

文章编号: 1672-8785(2022)08-0013-04

一种大动态范围近红外光功率测量电路设计

孙 超 刘志明 徐桂城

(中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 基于铟镓砷(InGaAs)光电二极管设计了一种大动态范围近红外光功率测量电路。在不使用外置光衰减片的条件下, 它可以测量 $-95\sim 10$ dBm范围内的近红外光功率。该光功率测量电路采用了自动偏压控制、多档放大量程、差分采样电路等技术, 并通过电磁屏蔽设计抑制了杂散光噪声和电路暗噪声, 从而提高了测量动态范围。测试结果表明, 这种近红外光功率测量电路的动态范围达到 105 dB, 在 $-60\sim 10$ dBm范围内的线性度优于 ± 0.02 dB。

关键词: 近红外光; 动态范围; 光电二极管

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.08.003

Design of A Near-Infrared Optical Power Meter Circuit with Large Dynamic Range

SUN Chao, LIU Zhi-ming, XU Gui-cheng

(Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: A near-infrared optical power meter circuit with large dynamic range is designed based on indium gallium arsenide (InGaAs) photodiode. It can measure near-infrared optical power in the range of $-95\sim 10$ dBm without using an external optical attenuator. The optical power meter circuit adopts technologies such as automatic bias voltage control, multi-level amplification range, differential sampling circuit, etc., and suppresses stray light noise and dark noise through electromagnetic shielding design, thereby improving the measurement dynamic range. The test results show that the dynamic range of this near-infrared optical power meter circuit reaches 105 dB, and the linearity in the range of $-60\sim 10$ dBm is less than ± 0.02 dB.

Key words: near-infrared light; dynamic range; photodiode

0 引言

随着光纤通信和近红外光电传感技术的迅速发展, 1000~1700 nm 近红外波段在光纤通信中的应用日益广泛, 人们对光纤输出的近红

外光功率测量技术的要求也在不断提高。其中宽的动态范围是一个重要的电路指标^[1-2]。

InGaAs 光电二极管在 1000~1700 nm 波段的光谱响应度较高, 可将输入光功率转换成

收稿日期: 2022-06-21

作者简介: 孙超(1988-), 男, 山东青岛人, 高级工程师, 主要从事光电检测技术研究。

E-mail: sunchao048@ceyear.com

光电流, 是近红外光功率测量的关键器件。但是受限于探测器的光电响应度, 以波长为 1550 nm 的入射光为例, 当入射光功率大于 5 dBm 时, 探测器输出的光电流趋于饱和, 入射光功率与输出光电流的关系呈现非线性。这使得测量电路的线性动态范围减小, 难以满足大动态范围的高精度光功率测试要求。

为避免强输入光功率引起探测器饱和, 通常有两种解决方案: 一是增加外置光衰减片, 但是衰减片的存在会导致探测器对小于 -75 dBm 的光功率的响应太弱, 不利于微弱光信号测量; 二是在探测器上施加反偏电压, 但会导致探测器暗噪声过大, 弱光功率信号被湮没。

本文通过优化前置放大电路, 设计了一种大动态范围的近红外光功率测量电路, 并通过实验验证了其测量动态范围和线性度。结果表明, 该电路可以广泛用于光纤通信研发、近红外光功率测量等领域。

1 元器件选型

1.1 光电探测器

光电探测器是光子流转换成电子流的核心器件。采用 InGaAs 材料的光电二极管探测器能够实现 1000~1700 nm 通信光波段光功率测量。与雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)探测器相比, 光电二极管无需特殊设计高压偏置电路, 增益线性好且暗噪声低。光电二极管还应满足暗电流超低(小于 1 pA)、零偏模式线性度高、光电转换效率高的要求, 以降低系统噪声, 提高整个电路的测量线性度及灵敏度, 扩大光功率测量动态范围^[3]。

1.2 前置运放

前置放大电路采用跨阻式放大电路以实现光电流的“电流-电压”转换。为了满足 -95~-75 dBm 微弱光功率区间的高精度测量, 低偏置电流(小于 0.2 pA)和低输入失调电压是前置放大器的重要指标。放大器端存在大的偏置电流和失调电压会增加系统误差。光电二极管上若存在输入失调电压会产生更多的暗电流。偏置电流经跨阻放大后也会产生初始直流

失调, 影响放大动态范围和信噪比。此外, 运放还应满足低输入电容、低输入电压电流噪声、低电流温漂、高增益带宽积和压摆率等指标^[4]。

1.3 模/数转换器

模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)用于模拟信号到数字信号的转换。本文选用 24bits、1.5LSB INL、1Msps 采样速率、PulSAR 架构的差分 ADC 转换芯片, 能够保证较高的采样精度及速度, 同时减小共模噪声误差。配合精密基准电压源, ADC 可以提高采样准确度。

2 电路设计与分析

图 1 为大动态范围近红外光功率测量电路的原理框图。光信号入射到 InGaAs 光电二极管上产生光电流。然后通过前置放大器的跨阻变换, 将光电流信号转换成电压信号。电信号经过差分放大、滤波降噪后, 被差分 ADC 芯片转换为数字信号。中央处理器(CPU)对数字信号进行滑动平均滤波并计算光功率值大小, 然后反馈控制多路模拟开关, 选择合适的增益电阻。

为了满足 -95~10 dBm 大动态范围、高线性度测试要求, 本文设计了 InGaAs 光电二极管的偏压控制电路。当输入光功率大于 0 dBm 时, CPU 通过控制偏压控制电路, 在探测器阴极施加反偏电压, 使探测器工作在反偏模式下, 防止光功率过高时探测器进入饱和状态, 提高了 0~10 dBm 范围内的响应度和线性度。当输入光功率小于 0 dBm 时, CPU 通过模拟开关控制探测器阴极接地, 使探测器工作在零偏模式下。此时探测器暗电流小、热噪声低、线性度好, 极大提高了微弱光功率信号的测量信噪比。

前置跨阻放大电路采用 T 型网络设计^[5]。反馈电阻基于玻璃电阻并施加金属屏蔽体, 防止漏电流进入电路板上的任何高阻抗路径。当光功率信号较为微弱时, 使用单个反馈电阻则需要阻值达到 GΩ 级以上, 这会引入非常大的

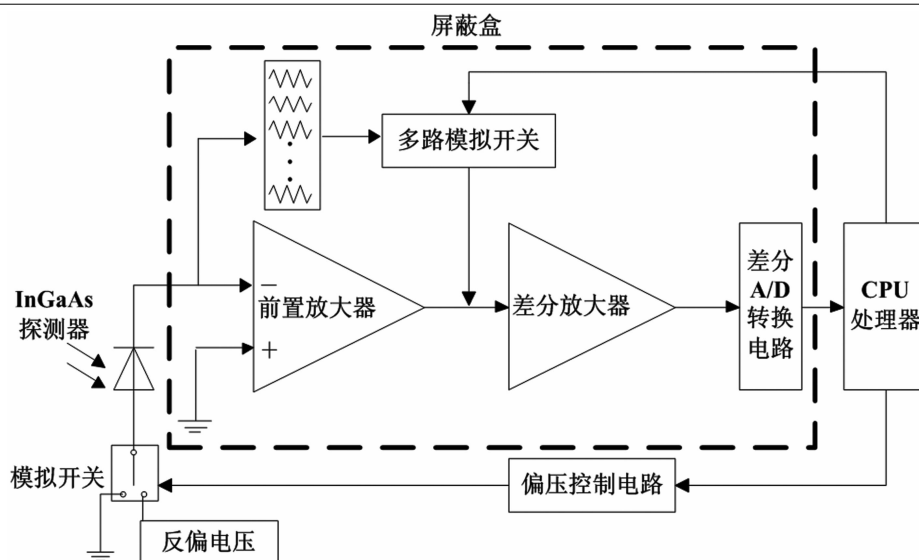


图 1 大动态范围近红外光功率测量电路的原理框图

电阻热噪声。T 型电阻反馈网络能够采用较小阻值的电路得到较大的反馈增益，降低电阻热噪声，提高了微弱信号的测量灵敏度。

同时需要注意的是，多路反馈电阻增加了前置运放的反馈电容，从而影响了电路带宽。通过特殊的印制电路板(PCB)布局可以减小反馈电容，增加电路有效带宽。在 PCB 布线时，应在电阻器焊盘之间放置接地走线。这样做可以屏蔽电容的电磁场输出，抑制其施加在电阻器求和节点端的影响，从而有效地将输出场分流到地端。此外，尽量缩短传输线长度有利于提高 -3 dB 带宽。多种不同阻值的电阻与模拟开关组成增益控制电路。通过判断光功率采样值大小，CPU 控制模拟开关切换前置跨阻放大电路中的增益电阻，使前置放大电路增益控制在合适范围内，从而减小非线性误差，提高 $-95\sim 10$ dBm 大动态范围内测量的准确度与线性度。

探测器暗电流、运放偏置电流和失调电压会引起运放输出的初始直流失调。运放偏置电流随环境温度的升高呈指数上升，进一步抑制了前置放大器的动态范围。本文利用运放虚短的原理，设计了硬件调零电路：使用数/模转换芯片和跟随放大电路产生动态调偏电压，然后将其输入到运放正相输入端，抑制直流失调；再配合软件计算无光时的放大电路零点，

进行软件算法调零校准，极大提高了前置放大电路的动态范围和工作温度范围。

此外，对光电探测器与前置放大器进行了阻抗匹配设计，改善了电路带宽；通过实现紧凑的电路布线、减少过孔数量、采用高介电常数的 PCB 板材等措施，有利于减小泄露电流，提高微弱光信号的测量灵敏度；在敏感电路上使用屏蔽盒进行屏蔽，抑制空间电磁噪声干扰；差分放大电路和差分 ADC 的使用有利于抑制共模噪声，提高模拟电路的抗干扰能力；采用滑动平均滤波算法对 CPU 处理器采集的数字光功率信号进行滤波降噪，进一步提高了测量准确度；PCB 上元器件焊接完成后，必须进行清洁，以清除污染物(如助焊剂、含盐水分、灰尘等)，维持其低泄漏性能。污染物可能会严重降低其微弱光电流测量性能。

3 测量结果

常温环境下，对大动态范围近红外光功率测量电路进行性能测试。具体测量参数如下：入射光波长为 1310 nm 和 1550 nm，入射光功率为 $-95\sim 10$ dBm，采样间隔为 1 dB，标准光功率计为 Keysight 公司生产的 81634B 型光功率计。首先将本文设计的光功率测量电路的测量值与标准光功率计进行比对校准，每 10 dB 设置一个校准点。然后将入射光输入到标准光

功率计, 调节光衰减器, 在 $-95 \sim 10$ dBm 范围内每衰减 1 dB 记录一次光功率标准值。接着复位光衰减器, 将入射光输入到本文设计的光功率测量电路。按照标准值的记录点调节光衰减器, 并记录被测电路输出的光功率计值, 最后计算光功率测量的准确度与线性度。准确度定义为光功率测试点的测量值与标准值之差; 线性度定义为测试光功率区间内, 准确度的最大值与最小值之差的二分之一(测试结果分别见图 2 和图 3)。

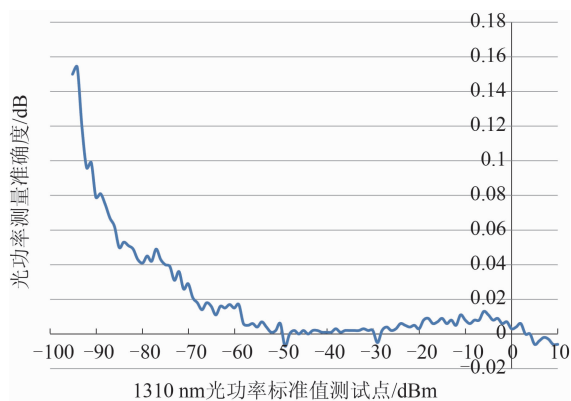


图 2 1310 nm 光功率测量的准确度(CW、常温)

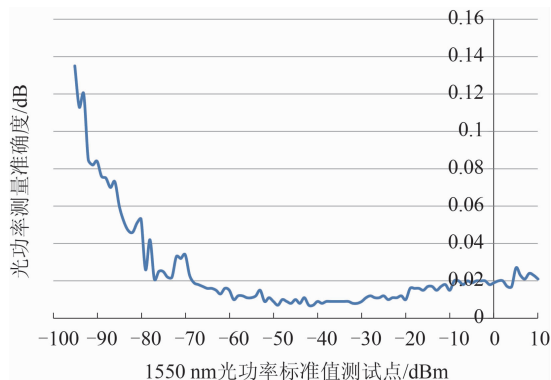


图 3 1550 nm 光功率测量的准确度(CW、常温)

测试结果表明, 此近红外光功率测量电路的动态范围达到 105 dB, 能够满足 $-95 \sim 10$ dBm 的光功率测量需求。在 $-60 \sim 10$ dBm 范

围内, 其准确度优于 ± 0.03 dB, 线性度优于 ± 0.02 dB; 在 $-95 \sim -60$ dBm 范围内, 准确度优于 ± 0.16 dB, 线性度优于 ± 0.14 dB。

4 结束语

本文通过优化探测器偏压控制电路, 采用超低偏置电流的前置放大器, 设计了 T 型网络多档放大量程控制电路。通过差分放大、屏蔽降噪、布局布线优化、滑动平均滤波等技术方法, 极大提高了光功率测量的灵敏度和动态范围, 并实现了良好的线性度、准确度和增益带宽。测试结果表明, 这种光功率测量电路在 1000~1700 nm 波段的测量动态范围为 105 dB, 最高灵敏度达到 -95 dBm; 在 $-60 \sim 10$ dBm 范围内, 准确度优于 ± 0.03 dB, 线性度优于 ± 0.02 dB。本文设计的电路能够广泛应用于近红外光功率测量, 可极大提高测量动态范围、准确度、线性度等指标。随着 5G 光通信技术的发展, 对光功率计采样速度的要求不断提高, 大通信带宽、高采样速率的近红外光功率计将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 李岩, 宋常青, 侯跃新, 等. 提高微弱电流放大器性能的方法 [J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(5): 978-980.
- [2] 吴雨欣. 多通道高精度激光功率计检测电路研究 [D]. 武汉: 中南大学, 2012.
- [3] 曲宏丰. 光电探测器特性一体化实验系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 陆茜, 齐东升, 卜树坡. 微弱电流信号测量系统的设计 [J]. 大众科技, 2011, 11(1): 73-74.
- [5] 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.