

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.230148.

光电器件研究与应用

袁国振,任海兰. 光电探测器暗电流宽温拟合算法研究[J]. 光通信研究, 2025(1): 230148.

Yuan G Z, Ren H L. Study of Wide-temperature Fitting Algorithm for PD Dark Current [J]. Study on Optical Communications, 2025(1): 230148.

# 光电探测器暗电流宽温拟合算法研究

袁国振<sup>1,2</sup>, 任海兰<sup>1</sup>

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉莫仕通讯技术有限公司, 武汉 430070)

**摘要:**【目的】为了消除光电探测器(PD)内正负(PN)结固有暗电流物理特性的影响,在提升探测器功率探测范围和扩宽探测器工作环境温度范围的同时提高PD探测精度,文章设计了一套在标定PD时应用的暗电流补偿算法。【方法】首先,通过分析光电二极管物理特性及PD内的硬件电路设计,建立光生电流与光功率间的数学模型,基于数学模型修正光功率与光生电压模数转换(ADC)值的曲线关系,实现在具体温度点下去除暗电流功率影响并补偿功率;其次,研究暗电流的温度特性,计算出少数温度条件下所需补偿暗电流的功率大小,利用少数温度点拟合扩展至宽温范围实现暗电流温度补偿;最后,搭建温控测试平台,利用光开关(OS)控制光电二极管入光功率大小,通过光功率探测仪记录PD实时入光功率大小,测试在不同温度条件以及入光功率下的PD精度值。【结果】实验表明,利用算法标定PD后,工作温度范围可从 $-5\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 扩宽至 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低探测功率从 $-40$ 下降至 $-68\text{ dBm}$ 。在上述工作温度和探测范围内,软件算法计算上报的光功率与实际探测光功率的精度误差在 $\pm 1\text{ dB}$ 以内。【结论】采用文章所提算法对PD校准后能消除暗电流及噪声的影响,在宽温范围内能提高探测功率范围及探测精度。

**关键词:** 暗电流;光电探测器;宽温范围;低功耗探测;补偿算法

**中图分类号:** TN256

**文献标志码:** A

## Study of Wide-temperature Fitting Algorithm for PD Dark Current

YUAN Guozhen<sup>1,2</sup>, REN Hailan<sup>1</sup>

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunication, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Molex Communication Technology Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

**Abstract:** 【Objective】In order to eliminate the influence of the physical characteristics of the intrinsic dark current of the Positive-Negative (PN) junction in the Photoelectric Detector (PD), the detection accuracy of the PD can be improved at the same time of enhancing the detection range of the detector power and widening the detector working environment temperature. In this paper, a set of dark current compensation algorithms is designed to calibrate the PDs. 【Methods】Firstly, we analyze the physical characteristics of the photodiode and the hardware circuit design of the PD to establish a mathematical model between the photogenerated current and the optical power. Then we correct the curve relationship between the optical power and the Analog Digital Convert (ADC) value of the photogenerated voltage through the mathematical model, so as to achieve the power compensation by removing the influence of the dark current power at the specific temperature point. Next, by studying the temperature characteristics of dark current, we calculate the power required to compensate for dark current under a limited number of temperature conditions. By fitting these few temperature points, we extend the compensation to a broader temperature range, thereby achieving dark current temperature compensation. Lastly, a temperature-controlled testing platform is established, utilizing an Optical Switch (OS) to regulate the incident optical power on the photodiode. The real-time incident optical power on the PD is recorded through an optical power meter. This setup allows for testing the accuracy of the PD under various temperature conditions and incident optical power levels. 【Results】The experiments show that the working temperature can be widened from  $-5\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the minimum detection power can be reduced from  $-40$  to  $-68\text{ dBm}$  by using the algorithm to calibrate the photo-detector. Under the aforementioned operating temperature and detection range, the software algorithm calculates the accuracy error between the reported optical power and the actual detected optical power to be within  $\pm 1\text{ dB}$ . 【Conclusion】After calibrating the PD with this algorithm, the effects of dark current and noise can be eliminated, and the detection power range and detection accuracy can be improved in a wide temperature range.

**Key words:** dark current; PD; wide temperature range; low-power detection; compensation algorithm

## 0 引言

随着全光网的不断演进,对光电探测器(Photo-

electric Detector, PD)性能的要求越来越高,需同时具备低暗电流、宽光谱探测和高速响应等优良特性<sup>[1]</sup>。近年来,许多学者对暗电流特性做了较深的

收稿日期:2023-09-21; 修回日期:2023-10-18; 纸质出版日期:2025-02-10

作者简介:袁国振(2001—),男,湖北武汉人。硕士,主要研究方向为光模块掺铒光纤放大器。

通信作者:任海兰,教授。E-mail:464864919@qq.com

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

研究并提出了不同的改进方法,主要分为器件材料和硬件电路设计两方面。昆明物理研究所通过研究掺杂元素,研制出了 pBp 型 InAsSb  $640 \times 512$  阵列器件,实验证明,在工作温度 150 K 下,可将其暗电流密度降为  $3.9 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>,且峰值探测率为  $1.06 \times 10^{12}$  cmHz<sup>1/2</sup>/W<sup>[2]</sup>;2021 年,牛智川又将 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒结构引入 pBn 型波超晶格器件中,在 150 K 工作温度和 -0.1 V 偏置电压下,其暗电流密度为  $1.2 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>,4.1  $\mu$ m 处量子效率为 29%<sup>[3]</sup>;中电科公司则在硬件设计上对电路输入级设计进行研究,开发了电容反馈互导放大器 (Capacitance Interstage Transformer Amplifier, CITA),利用电路输入级结构对暗电流起抑制作用,在 77 K 低温环境下实验,在大于 300  $\mu$ s 的长积分时间工作时接收短波小信号,注入电流为 0~800 pA<sup>[4]</sup>。

上述研究降低了器件内暗电流密度,但暗电流为正负 (Positive-Negative, PN) 结固有的物理特性,不能完全消除。现阶段,PD 实际应用于光功率探测器时,在工作温度  $< 55$   $^{\circ}\text{C}$ 、探测功率  $> -40$  dBm 时,精度误差在  $\pm 1$  dB 以内,而在高温低功率探测场景时,精度误差严重劣化。因此本研究在 PD 校准中利用算法去除了暗电流影响,在所选光电二极管型号及外围硬件电路设计确定的情况下,利用软件设计解决了物理层面无法消除的影响因素。

## 1 暗电流的影响

暗电流是光电二极管内 PN 结工作在反向偏压下产生的漏电流。PD 内的 PN 结工作在反偏压状态时,会减小光电二极管结电容和缩短响应时间,适合高速应用,缺点则是存在暗电流且噪声水平较高<sup>[5]</sup>。光电二极管外围电路上的负载将光照电流转换为电信号:

$$V_{\text{out}} = P_{\text{in}} R(\lambda) R_{\text{load}}, \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{out}}$  为负载两端电压;  $P_{\text{in}}$  为输入光信号功率;  $R(\lambda)$  为响应度,  $R(\lambda) = \frac{I_{\text{Pd}}}{P_{\text{in}}}$ ,  $I_{\text{Pd}}$  为波长  $\lambda$  下产生的光电流;  $R_{\text{load}}$  为负载大小。而实际电信号表征光照强度时,除了光照电流还有 PN 结产生的暗电流,此误差为器件特性,无法消除<sup>[6]</sup>。光照强度较小时暗电流的影响占主导地位,此时光照强度与电压成非线性关系。导致单片机 (Micro Controller Unit, MCU) 计算上报功率值与实际光功率值误差较大。

暗电流大小与温度直接相关,理论计算下温度每增加 10  $^{\circ}\text{C}$  暗电流增加一倍。图 1 所示为 4 种不

同温度下光功率与光生电压模/数转换 (Analog Digital Convert, ADC) 值的关系。控制光开关衰减以 1 dB 步进遍历 -68~-5 dBm 光功率范围,读取每一功率点下的 ADC 值,分别测试 20、40、60 和 80  $^{\circ}\text{C}$  4 个温度下光功率与 ADC 值的对应关系。光功率  $< -45$  dBm,暗电流  $>$  光照电流,光功率和电压曲线呈非线性关系。同一光照强度下温度升高暗电流变大,ADC 值不断增加。温度升高至 80  $^{\circ}\text{C}$ ,光功率  $< -55$  dBm,暗电流对光照电流是一个极大值<sup>[7]</sup>,光照强度变化 1 dB,ADC 值变化很小。因此光照强度较弱时,暗电流会对探测电路产生影响,且随着温度的增加,对探测精度影响逐渐变大。

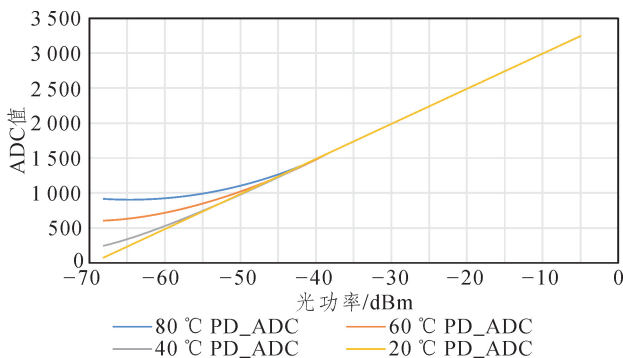


图 1 4 种不同温度下光功率与光生电压 ADC 值关系  
Figure 1 Relationship between optical power and photogenerated voltage ADC values at four different temperatures

## 2 暗电流补偿算法

上章分析了暗电流对 PD 的影响,得出当 PD 工作环境温度较高且探测功率较低时会产生较大暗电流,并导致低光功率段电信号与光功率曲线呈非线性关系的结论。为了在提高 PD 功率探测范围和工作环境温度的同时提升探测精度,需设计算法对 PD 进行校准,算法设计从功率和温度补偿两方面考虑。首先在确定温度点考虑如何去除暗电流影响,使光照强度较弱时光功率值与电压值呈线性关系;其次考虑在不同温度点下暗电流随着温度的变化而变化,如何按照温度特性对暗电流进行补偿。

### 2.1 功率补偿

首先,本文研究了固定温度下如何对暗电流功率进行补偿。图 2 所示为光功率与电压 ADC 值曲线,图中虚线为理想情况下光功率与 ADC 值的对应关系,实线为实际情况下二者的对应关系。探照光功率范围为 -60~-50 dBm 时,暗电流远大于光生电流,导致采样 ADC 值大于理论 ADC 值。当探照光功率为 -60 dBm 时,可以通过采样 ADC 值得

到理论光功率  $P_0$ ，此时计算补偿暗电流功率值为  $PdBm_{\text{dark}} = P_0 - (-60 \text{ dBm})$ 。

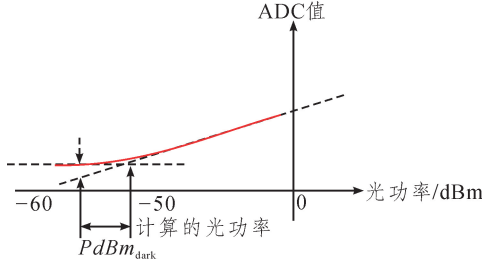


图2 光功率与光生电压数模转换值曲线

Figure 2 Optical power versus voltage ADC value curve

暗电流补偿算法流程如图3所示，首先对记录光功率点和其采样ADC值进行线性拟合(Linear Fit)得到未补偿关系曲线的斜率  $k_{\text{org}}$  与截距  $C_{\text{org}}$ 。将当前未经功率补偿拟合得到的  $k_{\text{org}}$ 、 $C_{\text{org}}$  带入ADC值计算光功率上报值，则上报功率值与实际功

率值存在较大差异。解决方案为假设所需补偿的暗电流对应的ADC值为  $i$ ，使用未经补偿的  $k_{\text{org}}$ 、 $C_{\text{org}}$  值代入  $i$  值计算得到当前温度下的理论暗电流补偿功率值  $PdBm_{\text{dark}}$ 。光功率值加上暗电流补偿功率值即可得到消除暗电流影响后的理论功率值  $P_0$ ，使用理论功率值与ADC值进行线性拟合计算出暗电流补偿后曲线的斜率  $k_{\text{new}}$  和截距  $C_{\text{new}}$ 。用拟合后的斜率  $k_{\text{new}}$  和截距  $C_{\text{new}}$  与ADC值计算得到理论功率值  $PdBm_{\text{fit}}$ ，为了得出当前温度下最理想的暗电流值，需对补偿后的  $k_{\text{new}}$ 、 $C_{\text{new}}$  值进行判断。用经过补偿计算出的功率值  $PmW_{\text{fit}}$  减去暗电流功率值  $PmW_{\text{dark}}$  即可得到实际光功率值  $P_{\text{new}}$ ，将计算出的理论功率值  $PdBm_{\text{new}}$  与实际功率值  $PdBm_{\text{cail}}$  做差作为精度判断标准。算法中将遍历计算不同  $i$  值进行补偿后得到的功率误差  $dBm_{\text{error}}$ ，并通过最优解算法对每次计算的误差进行迭代比较，最终得到误差精度最小对应的拟合功率曲线，曲线的斜率、截距以及暗电流对应的ADC值分别为  $k_{\text{Best}}$  和  $C_{\text{Best}}$ 、 $i_{\text{Best}}$ 。

经上述算法计算后便可消除暗电流影响得到实际光功率上报值。应注意，通过斜率和截距计算所得光功率值单位为dBm，式(2)将拟合功率值  $P_{\text{fit}}$  去除补偿功率值  $P_{\text{dark}}$  得到原始光功率  $P_{\text{org}}$  时需将单位mW转换为dBm，式(2)中的DB表达式即进行此转换。式(3)和式(4)分别为经暗电流补偿后理想光功率  $P_{\text{fit}}$  和暗电流  $P_{\text{dark}}$  的计算表达式。式(3)中ADC值为光生电压ADC值，式(4)中  $i_{\text{dark}}$  与图3中  $i$  值含义相同为暗电流对应光生电压值。

$$P_{\text{org}}(\text{dBm}) = \text{DB}(P_{\text{fit}}(\text{mW}) - P_{\text{dark}}(\text{mW})), \quad (2)$$

$$P_{\text{fit}}(\text{dBm}) = k_{\text{new}} \times \text{ADC} + C_{\text{new}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{dark}}(\text{dBm}) = k_{\text{new}} \times i_{\text{dark}} + C_{\text{new}}. \quad (4)$$

## 2.2 温度补偿

实际应用过程中PD工作温度可能随时变化，软件算法应能通过上报的不同温度计算出不同温度点下的暗电流功率补偿值。图4(a)所示为暗电流功率单位为dBm时对应的温度变化曲线，低温情况下暗电流功率较低且随温度变化较小，温度  $> 30^\circ\text{C}$  后暗电流呈曲线增长。分析曲线考虑用多项式对暗电流温度曲线进行拟合，但在实际校准PD过程中存在两个问题。首先，理论功率值与暗电流功率值采用mW值相减，因此将拟合后得到的dBm值转换为mW值进行计算时，转换后的暗电流mW值与实际计算mW值存在较大误差。如图4(b)所示，当dBm值转换为mW值后两温度点间暗电流差值变大。此时对比决定系数( $R^2$ )数值明显下降，说明使

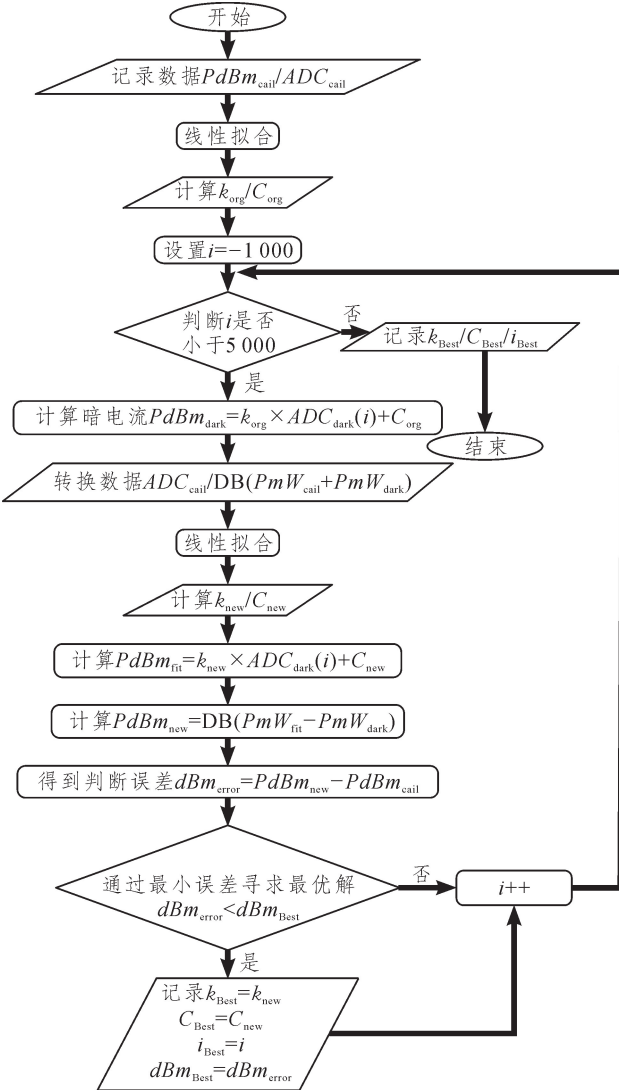
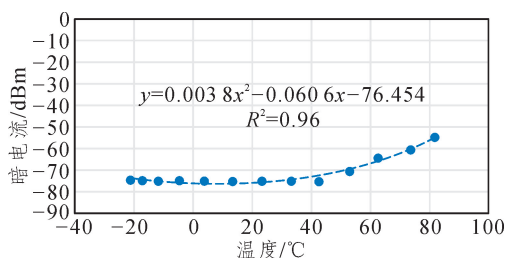


图3 暗电流补偿算法流程图

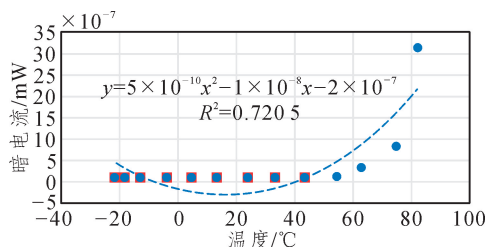
Figure 3 Flowchart of dark current compensation algorithm

用同种拟合方式,图 4(a)中数据点拟合效果更好。而图 4(b)对数据拟合效果较差导致计算上报功率值与实际功率值精度变差<sup>[8]</sup>。因此通过误差考虑使用何种数学模型对暗电流温度曲线进行拟合。其次,生产过程中使用温箱模拟 PD 工作温度,测量多个温度点的暗电流功率值进行曲线拟合耗时较长且成本高,还需考虑选取合适温度点进行曲线拟合使得温度补偿效果更好。



(a) 暗电流 (dBm) 与温度的关系曲线

(a) Dark current (dBm) value versus temperature curve



(b) 暗电流 (mW) 与温度的关系曲线

(b) Dark current (mW) versus temperature curve

图 4 暗电流实验值随温度变化的趋势

Figure 4 The experimental dark current values versus temperature

针对温度特性考虑选取 0、30 和 60 °C 3 个温度点及 0、30、60 和 80 °C 4 个温度点两种方案,并考虑采用分段拟合和全温度段拟合两种方案对宽温范围暗电流曲线进行延长拟合。如图 5 所示为 4 种不同方案的拟合曲线,使用两段线性与多项式拟合效果较好,但两段线性对高温点拟合效果较差。

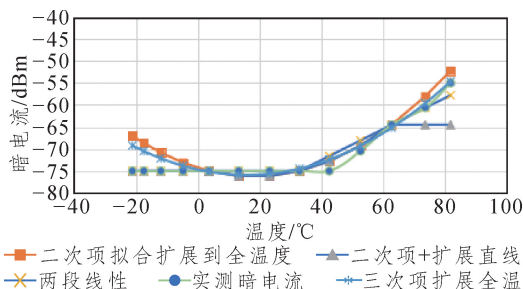


图 5 4 种不同拟合方式下的暗电流实验值对应温度曲线

Figure 5 Temperature profiles corresponding to the experimental values of dark current under 4 different fitting methods

针对 4 种不同拟合方法,计算每种拟合方法在 -40~80 °C 内各温度点的拟合暗电流大小并带入到上报功率值式中计算上报功率值大小,将上报功率值与实际功率值做差取最大值。表 1 所示为 4 种不同拟合方式下功率点的精度误差,二项式拟合方法在 0、30 和 60 °C 拟合扩展至全温范围段时会导致在 80 °C 计算的暗电流值较大,使得拟合功率 mW 值减暗电流 mW 值为负数,不能转换为 dBm 值,为无效物理意义量,即对应表中的 NUM 值。二次项拟合加扩展直线是使用中间 3 温度点拟合,并在小于 0 °C 和大于 60 °C 温度点沿用边界点温度值为二次项方法改进。此方法的优点在于在高温段不会拟合出暗电流值高于实际物理值的情况,弥补了二项式扩展到全温度方法的不足,但 80 °C 温度点拟合暗电流与实际差值较大导致精度变差。两段线性拟合是使用 0 和 30 °C 进行线性拟合计算常温及低温暗电流,30 和 60 °C 间使用线性拟合计算出高温暗电流,在 80 °C 高温点拟合效果仍然较差,误差精度为 2.7 dBm。经分析是由于暗电流在 50~80 °C 范围内增长较快,使用 30~60 °C 间斜率难以对 80 °C 进行有效拟合。考虑在 30 和 60 °C 之间增加温度测试点并使用三次项拟合式对温度暗电流曲线进行拟合。验证发现在 80 °C 处暗电流拟合效果较好。在低温段与常温段误差精度在 0.4 dBm 以内,经分析三次项拟合为温度暗电流曲线最佳拟合方案。

表 1 4 种不同拟合方式下功率点精度误差

Table 1 Power point accuracy error for 4 different fitting methods

| 温度/°C | 二次项/<br>dBm | 二次项+扩展<br>直线/dBm | 两段线<br>性/dBm | 三次项/<br>dBm |
|-------|-------------|------------------|--------------|-------------|
| -40   | 0.354 0     | 0.580 4          | 0.372 3      | 0.396 7     |
| -30   | 0.442 2     | 0.421 5          | 0.256 0      | 0.291 2     |
| -20   | 0.225 4     | 0.316 3          | 0.190 3      | 0.217 0     |
| -10   | 0.176 4     | 0.218 8          | 0.152 5      | 0.172 5     |
| 0     | 0.173 5     | 0.173 5          | 0.173 5      | 0.158 3     |
| 10    | 0.101 6     | 0.101 6          | 0.128 5      | 0.122 5     |
| 20    | 0.116 4     | 0.116 4          | 0.151 7      | 0.160 6     |
| 30    | 0.133 3     | 0.133 3          | 0.133 3      | 0.173 2     |
| 40    | 0.080 8     | 0.080 8          | 0.108 9      | 0.107 9     |
| 50    | 0.066 4     | 0.066 4          | 0.187 1      | 0.067 7     |
| 60    | 0.152 4     | 0.152 4          | 0.152 4      | 0.233 2     |
| 70    | 2.917 6     | 1.077 4          | 0.146 6      | 0.672 5     |
| 80    | # NUM!      | 4.259 7          | 2.783 8      | 0.680 1     |

拟合式斜率与截距值计算和暗电流值直接相关,不同温度下暗电流产生变化后所得斜率与截距值同样产生变化,斜率与截距值温度补偿采用与暗

电流补偿相一致的方法。式(5)~(7)为温度拟合式,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为三次项拟合系数, 3 组不同下标分别对应不同值的计算系数,  $T$  为实时温度。计算各温度点下的  $k$ 、 $C$  和  $P_{\text{dark}}$  为

$$k = a_1 \times T^3 + b_1 \times T^2 + c_1 \times T + d_1, \quad (5)$$

$$C = a_2 \times T^3 + b_2 \times T^2 + c_2 \times T + d_2, \quad (6)$$

$$P_{\text{dark}} = a_3 \times T^3 + b_3 \times T^2 + c_3 \times T + d_3. \quad (7)$$

### 3 实验验证与结果分析

为测试通过算法校准后 PD 的探测精度提升, 搭建如图 6 所示的实验平台进行验证。光源连接光开关(Optical Switch, OS), OS 将光分成多股入射光以实现同时校准测试模块的多个 PD 提升测试效率, 将测试模块的待测产品入端口(Device Under Test, DUT)与 OS 相连接。上位机(Supervisory Computer, SC)通过通用接口总线(General-Purpose Interface Bus, GPIB)与设备相连, 控制 OS 内部可变光衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)衰减大小来实现不同 PD 入射光。OS 分别用 Lucent Connector(LC)光纤跳线连接光功率计(Power Meter, PM)和测试模块, 实现探测测试模块的实时入射光。上位机与测试模块之间使用的是串行外设接口(Serial Peripheral Interface, SPI)通信, 能够实时读取模块的 ADC 值和计算后的实时入射光<sup>[9]</sup>。

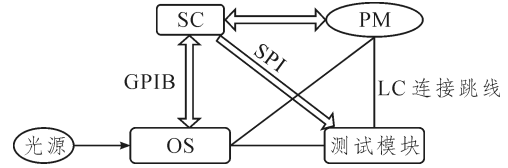


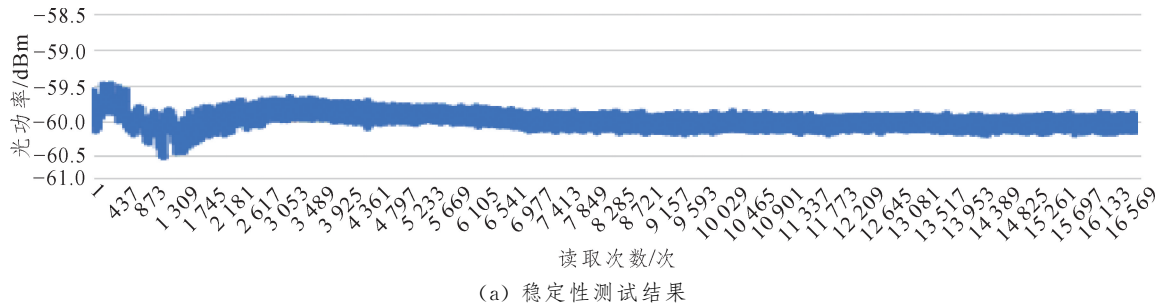
图 6 算法验证环境搭建示意图

Figure 6 Schematic diagram of algorithm verification environment

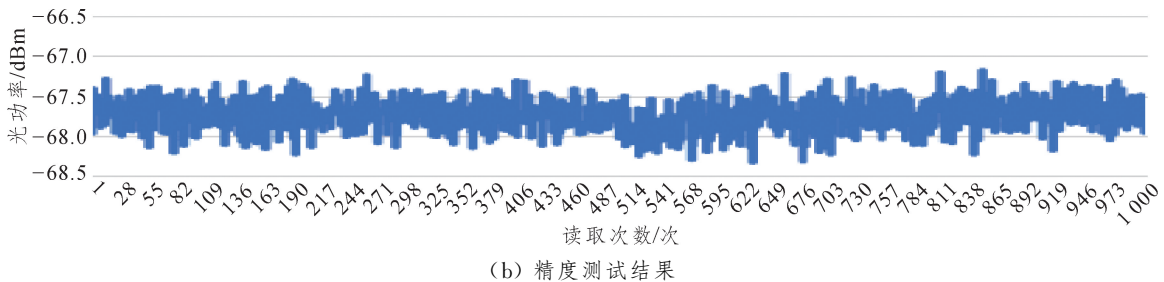
验证实验共有两组, 分别为精度和稳定性测试。

精度测试为利用 OS 设定一入射光功率且温箱固定温度, 维持设定的温度和功率不变, 获取 10 min 内 1 000 次的 PD 上报功率, 取 1 000 次上报功率中的最大值和最小值做差, 记为稳定度<sup>[10]</sup>。稳定性测试为设置 PD 入光功率不变, 将温箱温度设置为 80 ℃, 下降斜率设置为 0.5 ℃/min, 温度下降过程中不停地读取 PD 上报的功率值, 记录这段时间内的上报功率值同时绘制曲线, 用于测试在不同温度下暗电流发生改变时光功率能否准确上报。

图 7(a)所示为稳定性测试结果, 高温段上报功率受温度变化影响较大, 温度降低暗电流变小时功率变化趋于平稳。入射光功率为 -60 dBm, 上报最低光功率值 -60.51 dBm, 最高光功率值 -59.48 dBm, 宽温范围下功率变化为 ±1 dB。图 7(b)所示为精度测试结果, 入射光功率为 -68 dBm, 温箱设置在 70 ℃ 获取上报功率, 读取 1 000 次上报功率结果, 最低光功率值为 -68.33 dBm, 最高光功率值为 -67.18 dBm。在高温低功率的情况下满足实验效果。



(a) Stability test results



(b) Accuracy test results

图 7 验证算法实验结果图

Figure 7 Experimental results figure of the validation algorithm

## 4 结束语

本文设计了一种修正光功率与光生电压 ADC 值曲线的补偿算法。实验通过算法对 PD 功率曲线进行校准并对校准后的器件进行精度测试和稳定性测试以验证精度性能指标,算法利用少数温度点暗电流实验值拟合宽温度范围内的暗电流,消除了暗电流对 PD 的影响,突破了改变器件设计和电路设计传统方法只能降低暗电流大小而不能完全消除其物理特性影响的技术壁垒,为后续 PD 在光通信应用场景中提供了更多解决方案。

### 参考文献:

- [1] 甘文祥. 红外焦平面器件读出电路技术[J]. 红外, 2003(9): 1—8.  
Gan W X. Infrared Focal Plane Device Readout Circuit Technology[J]. Infrared, 2003(9): 1—8.
- [2] 陈冬琼, 王海澎, 秦强, 等. InAsSb 势垒阻挡型红外探测器暗电流特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(5): 810—817.  
Chen D Q, Wang H P, Qin Q, et al. Research on Dark Current Characteristics of InAsSb Barrier-blocking Infrared Detector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(5): 810—817.
- [3] She L F, Jiang J K, Chen W Q, et al. Mid-wave Infrared p+-B-n InAs/InAsSb Type-II Superlattice Photodetector with an AlAsSb/InAsSb Superlattice Barrier[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 121: 104015.
- [4] 张露漩, 袁媛, 李敬国. 背景暗电流抑制的红外探测器读出电路输入级设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(1): 69—73.  
Zhang L X, Yuan Y, Li J G. Input Stage Design of IR Detector Readout Circuit with Background Dark Current Suppression[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(1): 69—73.
- [5] 葛张峰, 余晨辉, 陈鸣, 等. AlGaIn 日盲紫外雪崩光电探测器暗电流研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0920003.  
Ge Z F, Yu C H, Chen M, et al. Research on Dark Current of AlGaIn Solar-blind Ultraviolet Avalanche Photodetectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0920003.
- [6] 马晓凯. 光通信波段光探测器的暗电流抑制与宽谱高速及大功率响应特性的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.  
Ma X K. Research On Dark Current Suppression and Wide-Spectrum, High-Speed and High-Power Response Characteristics of Photodetectors within Wavelength Region of Optical Communications [D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [7] 徐雨欣, 罗向东, 徐佳斌, 等. 一种光敏二极管的暗电流补偿电路: 中国, CN202210301344.0[P]. 2022-07-01.  
Xu Y X, Luo X D, Xu J B, et al. A Dark Current Compensation Circuit for a Photodiode: China, CN202210301344.0[P]. 2022-07-01.
- [8] 徐孟军. 光电感烟火灾探测器原理及标定方法[J]. 科技创新与应用, 2015(20): 26.  
Xu M J. Principle and Calibration Method of Photoelectric Smoke Detector[J]. Technology Innovation and Application, 2015(20): 26.
- [9] 李颖, 林洪生. 基于相对误差的曲线最小二乘拟合[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(3): 338—342.  
Li Y, Lin H S. Relative Error based Curve Fitting for Least Square Method[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2012, 30(3): 338—342.
- [10] 殷亚详, 邵云峰, 张光宇, 等. 半导体光电传感器暗电流的校正方法和系统: 中国, CN202211672220.X [P]. 2023-03-03.  
Yin Y X, Shao Y F, Zhang G Y, et al. Semiconductor Photoelectric Sensor Dark Current Correction Method and System: China, CN202211672220.X [P]. 2023-03-03.