光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250905002

基于微弱信号检测的光隔离器性能测量技术研究

刘小磊*，安世宁

（河南理工大学 物理与电子信息学院，河南 焦作 454003）

摘　要： 针对当前光隔离器性能检测中插入损耗与隔离度测量精度不足、微弱信号难以探测的问题，提出一种基于STM32单片机的光隔离器性能检测系统。该系统将转换后的圆偏振光入射至光隔离器，利用InGaAs-PIN光电二极管结合ADL5304对数放大器实现宽动态范围、高精度的对数转换。采用四阶有源低通滤波器与24位ADC提升信噪比，由STM32完成数据处理与结果显示。通过探测圆偏振光功率并结合对数放大技术，能够准确计算出光隔离器的插入损耗与隔离度参数，最小可探测光功率达到－60 dBm。实验结果表明，该方法不仅简化了检测流程，还显著提升了测量精度，特别是在微弱信号检测方面表现出色，有效增强了光隔离器性能指标测量的可靠性与稳定性。

关键词： 光隔离器；插入损耗；隔离度；STM32；InGaAs-PIN光电二极管；ADL5304对数放大器

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－0981－08

Research on the Performance Measurement Technology of Optical Isolator Based on Weak Signal Detection

LIU Xiaolei, AN Shining

(**School of Physics and Electronic Information, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, CHN**)

Abstract: In response to the current issues of inadequate measurement accuracy for insertion loss and isolation in optical isolator performance testing, as well as the difficulty in detecting weak signals, this study proposes an optical isolator performance detection system based on an STM32 microcontroller. The system directs converted circularly polarized light into the optical isolator and utilizes an InGaAs-PIN photodiode combined with an ADL5304 logarithmic amplifier to achieve a wide dynamic range and high-precision logarithmic conversion. A fourth-order active low-pass filter and a 24-bit ADC were employed to enhance the signal-to-noise ratio, while the STM32 performed data processing and displayed the results. By detecting the power of circularly polarized light and incorporating logarithmic amplification technology, the system can accurately calculate the insertion loss and isolation parameters of the optical isolator, achieving a minimum detectable optical power of －60 dBm. Experimental results demonstrate that the proposed method simplifies the testing process and significantly improves measurement accuracy, particularly for weak signal detection, thereby enhancing the reliability and stability of optical isolator performance measurements.

Key words: optical isolator; insertion loss; isolation; STM32; InGaAs-PIN photodiode; ADL5304 logarithmic amplifier

收稿日期：2025－09－05.

*通信作者：刘小磊

0 引言

光隔离器是一种无源光器件，当光路正向通过时会产生极小的插入损耗，当光路反向通过时会产生极高的隔离度[1-2]。光隔离器的隔离度和插入损耗是两个关键性能指标，分别用于衡量光隔离器对反向光信号的隔离能力和对正向光信号的传输能力。光隔离器广泛应用于光电检测系统、光纤传感、光纤通信以及精密光学测量系统[3]，主要作用是通过抑制系统中的光反馈来提高系统的稳定性。在光纤通信系统中，高隔离度和低插入损耗的光隔离器可以确保信号的稳定传输，防止反射光造成的信号失真，减少系统中的光噪声和光干扰，提高系统的信噪比，使系统能更准确地识别和传输信息。

在传统方法中，测量插入损耗和隔离度时通常使用线偏振光。这要求手动调节光隔离器，使其起偏器方向与线偏振光偏振方向一致，但该过程极易产生小角度偏差，并且需要光功率计测量输入输出功率，然后进行计算，过程繁琐且易出错。当进行光隔离器隔离度测量时，从隔离器出射的光信号通常很微弱，且易受到噪声干扰。由于设备的精度限制、环境中噪声的干扰、测量方法的缺陷以及测量过程中各种误差的影响，在测量光隔离器隔离度过程中，当光源功率接近0 dBm时，出射光功率可以低至－60 dBm，出射的微弱信号难以被有效探测，出现隔离度测量结果不准确甚至难以测量的情况。

为此本文提出一种基于圆偏振光测量光隔离器隔离度与插入损耗的方法[4]。使用ADL5304对数放大器来对微弱信号进行宽范围、高精度的对数放大，使用NE5532四阶有源低通滤波器滤除环境中的高频噪声。通过STM32单片机对数据进行处理和计算，最终可精确检测到的微弱信号最小为－60 dBm。所提方法不仅简化了光隔离器性能指标的测量流程，同时还显著提升了检测的精确度。

1 系统工作原理

该系统在测量光隔离器插入损耗与隔离度之前，需分别测量正向透过光隔离器前的功率与正向透过光隔离器后的功率，反向透过光隔离器前的功率与反向透过光隔离器后的功率，使用通过光隔离器前后的功率进行对数运算可分别得到插入损耗与隔离度的数值。

在光源发出的激光通过光隔离器之前，先经过偏振分光棱镜（PBS）与1/4波片，使其转变为圆偏振光。若圆偏振光的光功率为P_{in}，则光隔离器接收到的光功率是圆偏振光功率的1/2。使用圆偏振光测量光隔离器的插入损耗（Insertion Loss，IL）与隔离度（Isolation，ISO）的计算公式为：

$$IL = -10\lg(2P_{out+}/P_{in+}) \quad (1)$$

$$ISO = -10\lg(2P_{out-}/P_{in-}) \quad (2)$$

式中，P_{in+}，P_{out+}为正向放置光隔离器时，通过光隔离器前后的光功率；P_{in-}，P_{out-}为反向放置光隔离器时，通过光隔离器前后的光功率[5-6]。

系统工作原理如图1所示。首先，激光器发射的光进入PBS与1/4波片，将其转换为圆偏振光并穿过光隔离器。然后，使用InGaAs-PIN光电二极管将接收的光功率转换为光电流信号，再利用对数放大器进行高精度、宽范围的对数放大，使得电流信号转换为电压信号。将转换后的电压信号送至低通滤波器中处理微弱电压信号，由ADC对滤波后的电压信号进行采集，并完成模数转换。将电压信号的数字量送入STM32中进行数据的处理与校正并使其转换为功率值，在液晶显示屏上显示透过光隔离器后光功率值P_{out+}（或P_{out-}）。第二步移除光隔离器，在液晶显示屏上显示透过光隔离器前光功率值P_{in+}（或P_{in-}），同时计算并显示插入损耗（或隔离度）数值。系统实物图如图2所示。

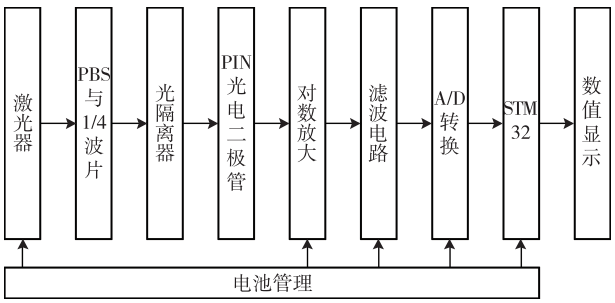


图1 系统原理框图

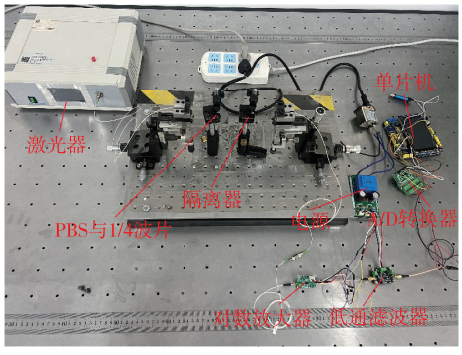


图2 系统实物图

2　系统硬件实现

2.1　光隔离器

本文设计的检测系统针对的是自由空间型偏振相关光隔离器，其内部结构由起偏器、法拉第旋转器、检偏器依次组成[7]，其中起偏器与检偏器成45°角。当光正向入射时，光经过法拉第旋转器后偏振方向旋转45°，此时线偏振光的偏振方向与检偏器平行，光可以通过检偏器。而当光反向入射时，由于法拉第旋转器的非互易性，光经过法拉第旋转器仍然向相同方向旋转45°，此时光的偏振方向与起偏器正交，光无法通过检偏器，从而实现了光的隔离效果[8]。光隔离器原理图如图3所示。

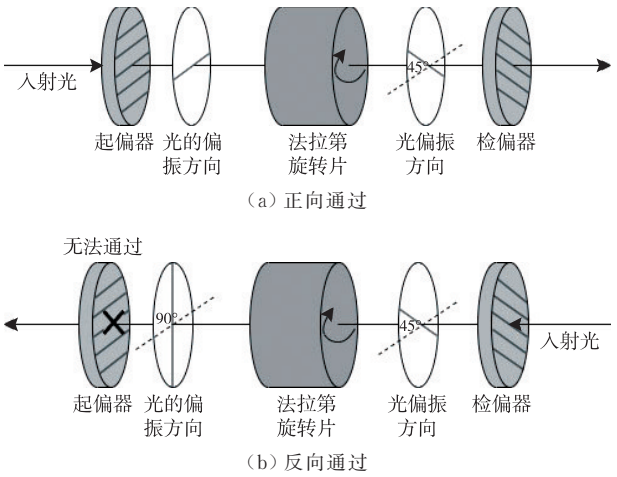


图3　光通过光隔离器的原理图

2.2　光电探测器

光电探测器是将探测到的光信号转换为电信号，转换后的光电流与探测到的光强度成正比。采用InGaAs-PIN光电二极管，其光敏面有效直径为75 μm，可探测到的波长范围为800～1 700 nm，具有高可靠性和低暗电流等特点[9]。当入射光波长为1 550 nm时，响应度为0.85 A/W。PIN光电二极管的响应度R是衡量器件性能优劣性重要指标之一，其计算公式为：

$$R=I/P \tag{3}$$

式中，I为光电二极管探测到的光生电流，P为输入光功率。

2.3　对数放大器

对数放大器又称I/V转换器，是通过对数运算将输入的电流信号非线性放大成电压信号。采用ADL5304对数放大器，其电路原理图如图4所示。

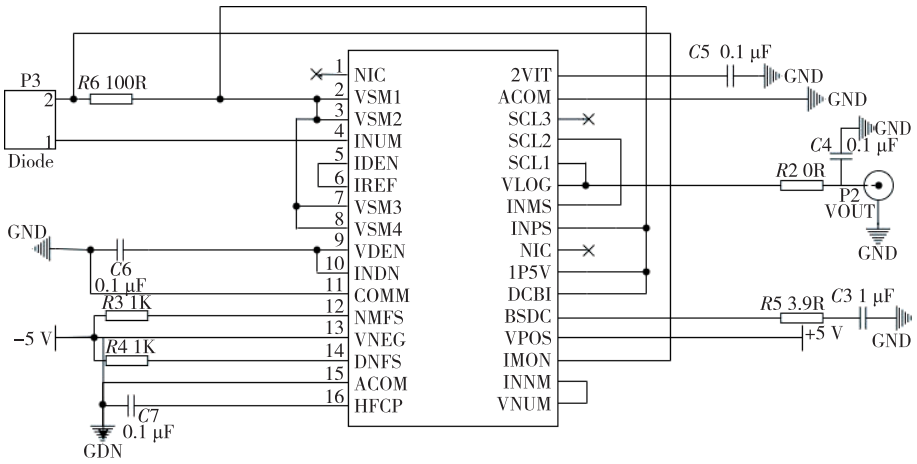


图4　ADL5304电路原理图

当双电源供电时，测量范围为1 pA～10 mA，测量范围内都具有高可靠性和低电源噪声的优质性能。当测量光隔离器隔离度时，通过光隔离器的微弱光功率信号可以低至－60 dBm量级，因此需要这种低噪声、大范围的对数放大器。在ADL5304内部使用三极管作为电流放大器，通过在基极和发射极之间施加电流，利用三极管的放大原理，集电极电流被放大β倍，其中倍数β是基于三极管的放大倍数，由此来实现电流到电压的转换。

热电压与绝对温度成正比，当温度为25℃时，热电压的值恒为25.69 mV，该值对于确定ADL5304对数斜率的值至关重要。在ADL5304内部采用双晶体管差异补偿技术，该技术利用两个晶体管在温度变化时产生的电压差异，来实现对饱和电流温度相依性的有效补偿[10]。光电二极管探测到的光生电流I和输出电压V_{LOG}间的对数关系为：

$$V_{LOG} = V_Y \lg(I/I_Z) \quad (4)$$

式中，V_{LOG}为输出电压，V_Y为对数斜率，I为光电二极管探测到的光生电流，I_Z为对数截距。

对数截距值表示输出电压为0 V时的输入电流值，当双电源供电时，对数截距取决于VSM1至VSM2，DCBI和INPS引脚的配置。当其连接至1P5V引脚时，对数截距为3.162 fA。对数斜率代表的是变化的光电二极管探测到的光生电流与输出电压之间的关系，通常借助半对数坐标图来表示，在默认的ADL5304配置下，V_Y=200(mV/10 times)，该数值表示光生电流变化每十倍时输出电压的变化量为200 mV。

对于微弱的光生电流(−60 dBm)，该器件表现出对数放大特性，能够将微小的电流变化转换为可观测的电压变化。而当光生电流较大时，则表现出对数压缩特性，使得相同倍数的电流变化仅引起固定的电压增量，有效避免了输出饱和现象。通过对数函数的非线性特性，将电流的乘性变化转换为电压的加性变化，从而同时实现微弱信号的检测和宽动态范围信号的捕获。

2.4 滤波电路

滤波器电路作为模拟信号处理领域的重要技术手段，基于带宽、截止频率和滤波器类型等关键参数的传递函数，通过合理的参数配置和优化设计，可广泛应用于各种工程场景。根据不同的频率响应特性，滤波器主要分为低通滤波器、高通滤波器和带通滤波器。根据调研，环境中产生的噪声大多为高频交流信号，因此在本设计中，为了有效提取微弱的直流电压信号并抑制环境中高频交流信号的干扰，滤波器的截止频率应设置在较低的范围内，以确保只有接近直流信号的低频成分才能通过。同时，考虑到微弱信号易受高频噪声影响的特点，需要设计较高阶数的滤波器来提高对较高范围内噪声高频成分的抑制能力。

NE5532运算放大器具有低噪声、高增益带宽积以及低失真等性能，是精密信号处理领域的理想器件。基于NE5532的优异特性，使用该运算放大器设计了一个四阶有源低通滤波器。该滤波器是通过级联两个二阶低通滤波器实现，每一级都采用Sallen-Key拓扑结构。这种拓扑结构既能保证滤波器在宽频率范围内的性能稳定性，又能简化电路设计的复杂性，提高了系统的可靠性和可维护性。该滤波器能有效提取微弱的直流信号，并显著抑制高频噪声的干扰，其电路原理图如图5所示。设计该低通滤波电路的截止频率为100 Hz，经Multisim14.3仿真可知，在100.556 HZ下，该滤波电路的增益下降至−3.08 dB，具有优异的滤波功能，波特测试仪测试结果如图6所示。

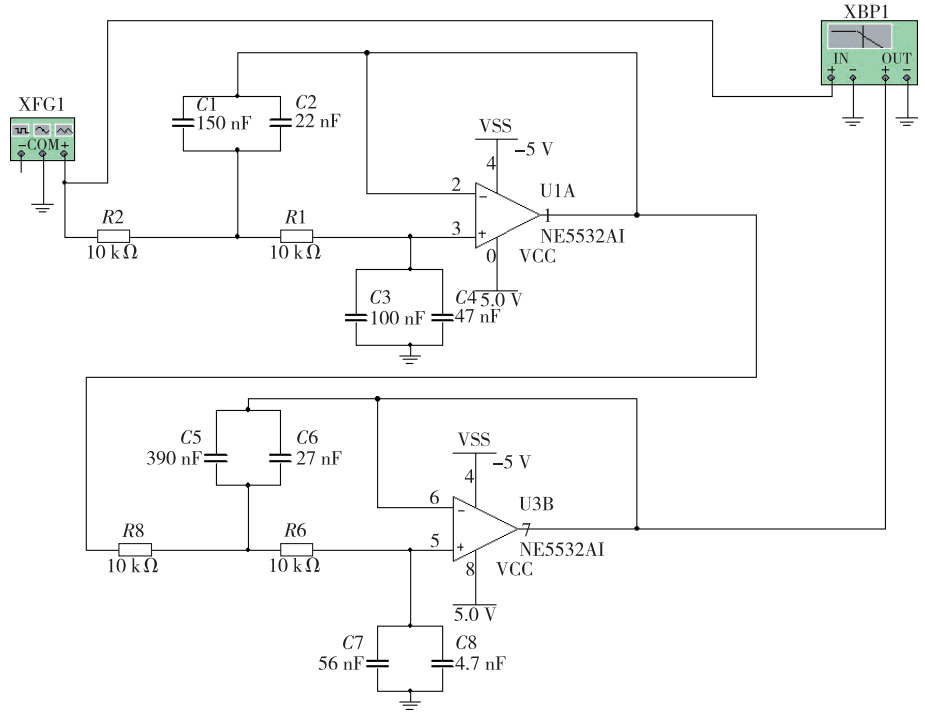


图5 低通滤波电路

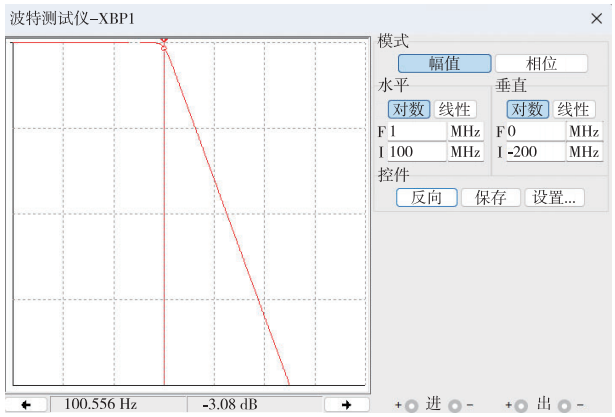


图 6　波特测试仪测试结果图

2.5　A/D 转换器

A/D 转换器又称模数转换器，主要功能是采集对数放大器中输出的电压信号以及该信号从模拟量到数字量的转换。本设计需要采集的最小信号为 −60 dBm，为满足这一需求，选用了高精度、低噪声的 A/D 转换器——ADS1256 模数转换器。该器件由 Texas Instruments 公司研发，具有 24 位高精度、超低噪声的特点，内部由一个数字滤波器和一个四阶三角积分调制器组成，能够处理四差分输入或八单端输入，同时提供四个可编程数字 I/O 端口[11]。

当进行单端信号测量时，使用 AIN0 至 AIN7 作为单端信号的输入端，AINCOM 作为输入信号的公共端。ADS1256 内部的低噪声 PGA（可编程增益放大器）可以提供 64，32，16，8，4，2 或 1 倍的增益放大[12-13]。经过 ADS1256 转换后，电压信号被转换成数字量，这些数字量随后被传输至 STM32 单片机以进行进一步的数据处理和分析。ADS1256 内部使用 $sinc^5$ 作为内置数字滤波器，由五阶 sinc 滤波器级联组成，具有极强的噪声抑制能力和陡峭的滚降特性，能够有效抑制高频噪声和工频干扰，显著提高信号的信噪比。A/D 转换电路如图 7 所示。

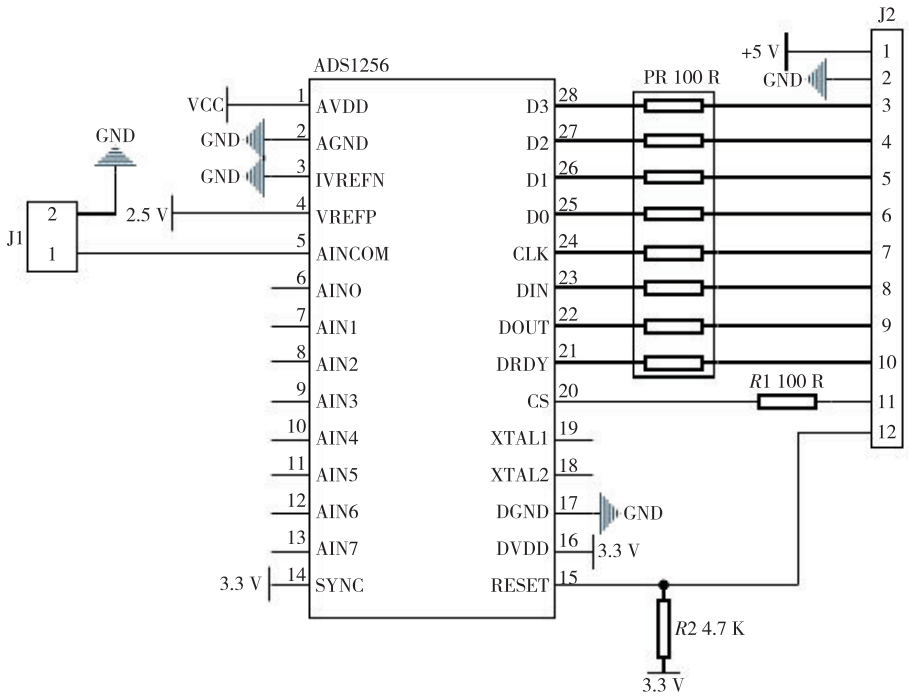


图 7　A/D 转换电路

2.6　STM32 控制设计

在 STM32 中对 ADC 传输的信号进行处理与校正，将电压信号模拟量转换为功率值，并利用光隔离器输入/输出的光功率值进行对数运算得到隔离度或插入损耗。本次系统设计选用的是由 ST 公司基于 Cortex-M3 内核开发的 STM32 系列微控制器，其芯片采用 STM32F103ZET6[14-15]。采用 STM32 微控制器作为主控单元来实现一系列综合控制功能。这些功能包括通过串口下载机制实现的数据传输，液晶显示模块的接口通信与画面展示，用户交互的按键控制逻辑，利用 SPI 总线实现与外设的通信控制以及数据的处理与误差校正的算法设计。

3　系统软件实现

3.1　系统主控制流程

在 STM32 通电后首先进行的是系统初始化和

ADC、显示屏、按键等一系列外设的初始化配置，然后控制ADC进行数据的采集，最后将处理后的数据值传输在显示器上。具体流程图如图8所示。

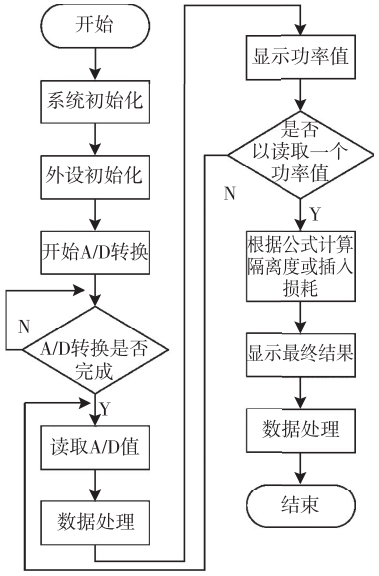


图8 STM32控制流程图

本次系统设计的按键分为：电源键，用于控制光隔离器性能检测系统的启动与关闭；测量键，用于测量并显示光功率值以及隔离度（或插入损耗）数值。系统采用中断扫描模式运行，即当测量键被按下时，信号会被发送到单片机进行按键识别，单片机根据接收到的指令执行相应的操作程序[16]。首次按键操作会测量并显示光信号通过光隔离器后的光功率值，而第二次按键测量并显示光信号通过光隔离器前的光功率值，同时自动计算显示*IL*/*ISO*。

3.2 数据处理与校准

3.2.1 数据处理

当进行数据处理时，由于ADS1256的采样误差和ADL5304对数放大器的暗电流以及PIN光电二极管的噪声等一系列因素均可能导致测量结果波动。

经过ADS1256转换前的电压与转换后显示的电压数字量之间的关系式为：

$$V_{\mathrm{LOG}}=(D_{\mathrm{OUT}}\times 2V_{\mathrm{REF}})/[G\times(2^{23}-1)] \quad (5)$$

式中，D_{OUT}为输出数据，V_{REF}为参考电压，G为可编程增益放大器放大倍数[17]。

STM32对ADC采集并转换后的数据进行校准计算，最终转换为光功率值，并使用该数值进一步进行隔离度与插入损耗的计算。

3.2.2 误差处理

使用算术平均值法来抵消误差，该算法是通过将采集的一组数据进行相加求和，然后除以该组数据的项数来得到的。算术平均数作为衡量数据集中心趋势的一种基本且直观的方法，其优势在于简明性、直观性以及计算上的便捷性，是抑制随机误差的常用方法。具体公式为：

$$M=\sum_{i=1}^{N}X_i/N \quad (6)$$

式中，M为算术平均值，N为数值的总和，X_i为第i个数值。

选取i=10作为算术平均值采集数组的个数，当首次按下测量键时，系统采集10组数据求均值，显示隔离器输出功率；在移除隔离器后，再次按键采集10组数据求均值，显示隔离器输入功率。最后代入公式(1)和(2)中求取隔离度与插入损耗。

4 测试结果与分析

所采用的激光器输出波长为1 550nm，使用本次设计的检测系统测量光隔离器的隔离度与插入损耗，使用测量的数据与标准光功率计测量的数据进行对比，分析相对误差来验证系统测量精度。测试结果分别如表1和2所示。

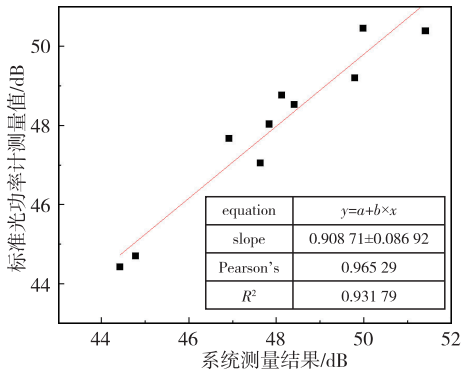
表1 本检测系统测试结果

Number	$P_{\mathrm{in}+}$/μW	$P_{\mathrm{out}+}$/nW	*ISO*/dB	$P_{\mathrm{in}-}$/μW	$P_{\mathrm{out}-}$/nW	*IL*/dB
1	224.76	1.73	48.122	245.75	103.54	0.743
2	238.95	4.31	44.422	213.67	88.53	0.815
3	260.50	1.30	49.986	129.79	52.08	0.955
4	292.02	1.05	51.410	141.87	60.20	0.712
5	233.64	3.88	44.776	259.28	97.73	1.226
6	236.38	1.70	48.410	250.50	102.25	0.880
7	219.84	2.23	46.912	50.69	20.58	0.904
8	227.46	1.87	47.831	48.80	19.69	0.931
9	224.74	1.17	49.795	25.39	10.23	0.935
10	258.30	2.22	47.633	334.92	137.51	0.855
Average		2.146	47.929			0.896

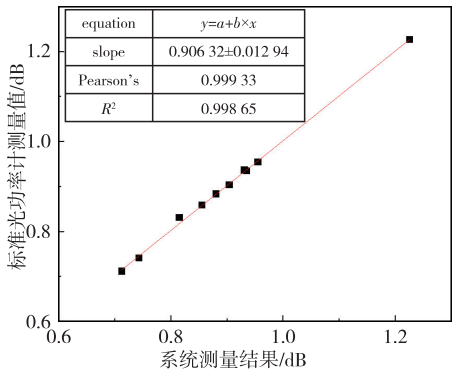
表2 标准光功率计测试结果

Number	$P_{\mathrm{in}+}$/μW	$P_{\mathrm{out}+}$/nW	*ISO*/dB	$P_{\mathrm{in}-}$/μW	$P_{\mathrm{out}-}$/nW	*IL*/dB
1	221.1	1.47	48.762	245.3	103.4	0.741
2	241.6	4.35	44.433	214.3	88.48	0.831
3	263.2	1.18	50.455	129.8	52.08	0.955
4	292.3	1.33	50.389	142.7	60.56	0.712
5	235.3	3.97	44.712	259.4	97.76	1.227
6	236.3	1.65	48.533	250.8	102.3	0.884
7	222.5	1.90	47.670	50.64	20.56	0.904
8	230.2	1.80	48.036	48.84	19.68	0.937
9	224.4	1.34	49.203	25.38	10.22	0.935
10	258.2	2.54	47.057	335.2	137.5	0.859
Average		2.153	47.925			0.898

以上测试结果中，编号相同组为对照组。为验证检测系统是否可以准确测量光隔离器的隔离度和插入损耗，使用表 1 和 2 对照组的测量数据进行分析比较，得出在该波长下的数据拟合图，如图 9(a)和(b)所示。测试结果显示，本次检测系统在 1 550 nm 的波长下隔离度的拟合优度(R^2=0.931 79)略低于插入损耗的拟合优度(R^2=0.998 65)，这主要是因为二者所测信号功率强度的巨大差异。当测量插入损耗时输出光功率较高(约为－11.6 dBm)，系统信噪比较高，测量结果稳定，线性拟合度极佳。而当测量隔离度时，待测信号为极其微弱的泄漏光，输出功率极低(约为－60 dBm)，在此低功率水平下，环境噪声、探测器暗电流及系统本身的微小波动对测量结果的影响相对显著，从而导致线性拟合结果出现轻微偏差。然而，数据拟合度 R^2 仍在可接受范围内且均十分接近于 1，说明本次检测系统的准确度已接近或达到光隔离器性能检测的标准。



(a) 隔离度拟合曲线



(b) 插入损耗拟合曲线

图 9　在 1 550 nm 的波长下的数据拟合图

本设计的检测系统所测光隔离器反向放置时通过的微弱光功率平均值为 2.146 nW(－56.683 dBm)，标准光功率计所测光隔离器反向传输微弱光功率平均值为 2.153 nW(－56.669 dBm)，二者误差为 0.001 4 dBm，误差控制在 0.1 dBm 之内。隔离器插入损耗平均值为 0.896 dB，标准光功率计所测光隔离器插入损耗平均值为 0.898 dB，二者误差为 0.002 dB，系统误差小于等于±0.05 dB。测得隔离器隔离度平均值为 47.929 dB，标准光功率计所测光隔离器隔离度平均值为 47.925 dB，二者误差为 0.004 dB，系统误差不超过 1 dB。由以上实验可知，该检测系统误差在可控范围之内，符合测量光隔离器隔离度与插入损耗的标准。

5　结论

本文设计了一种基于 STM32 的光隔离器性能指标自动检测系统，采用圆偏振光测量方法，结合 ADL5304 对数放大器对微弱信号进行宽范围、高精度的对数放大。系统还使用 NE5532 四阶有源低通滤波器有效滤除环境中的高频噪声，通过 STM32 单片机对光功率进行处理和数据校准。测试结果表明，该检测系统具有成本低、误差小、精度高、方法简单等优点，能够解决传统测量方法存在的缺陷和难以探测到微弱信号的问题，显著提高了光隔离器性能检测的效率与精度。

参考文献：

[1] 李叶芳，王晓娜，王晓旭．光隔离器在光信息技术实验中的应用[J]．实验科学与技术，2009，7(6)：23-24.
Li Yefang，Wang Xiaona，Wang Xiaoxu. Application of optic isolator in optical information and technology experiment[J]. Experiment Science & Technology，2009，7(6)：23-24.

[2] Kim J，Kim S，Bahl G. Complete linear optical isolation at the microscale with ultralow loss[J]. Scientific Reports，2017，7：1647.

[3] 粟新汉．光隔离器在光信息与光通信中的应用[J]．中国科技信息，2014(18)：25-26.
Su Xinhan. Application of optical isolator in optical information and optical communication[J]. China Science and Technology Information，2014(18)：25-26.

[4] 肖　旺．基于嵌入式手性超材料的圆偏振光探测器[D]．长沙：湖南大学，2019.
Xiao Wang. Circularly polarized light detector based on 2D embedded chiral nanostructures [D]. Changsha：Hunan University，2019.

[5] 陆　蓉．可消偏型光隔离器的研究[D]．西安：西安电子科技大学，2009.
Lu Rong. Research on depolarizing optical isolator[D]. Xi'an：Xidian University，2009.

[6] 罗　敬，刘　东，徐沛拓，等．基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统[J]．中国激光，2016，43(12)：1210001.

Luo Jing, Liu Dong, Xu Peituo, et al. High-precision polarizing beam splitting system based on polarizing beam splitter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1210001.

[7] 李明轩, 于丽娟, 刘建国. 新型硅基集成光隔离器的研究进展[J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(5): 68-74.
Li Mingxuan, Yu Lijuan, Liu Jianguo. Research progress of new silicon-based integrated optical isolators [J]. ZTE Technology Journal, 2019, 25(5): 68-74.

[8] Tang L, Drezdzon S M, Yoshie T. Single-mode waveguide optical isolator based on direction-dependent cutoff frequency [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 16202-16208.

[9] 何勇涛, 马 晓, 胡宇浩, 等. 光隔离器用近红外偏振玻璃研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(3): 1087-1102, 1142.
He Yongtao, Ma Xiao, Hu Yuhao, et al. Research progress of near-infrared polarized glass for optical isolators[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2024, 43(3): 1087-1102, 1142.

[10] 王 迪, 牛萍娟, 刘宏伟, 等. InGaAs光电探测器的高频特性研究[J]. 新型工业化, 2020, 10(2): 12-18.
Wang Di, Niu Pingjuan, Liu Hongwei, et al. Research on the high frequency characteristics of InGaAs photodetectors [J]. The Journal of New Industrialization, 2020, 10(2): 12-18.

[11] 倪演海, 莫 斌, 赵 奎, 等. ADL5304在光线路保护系统中的应用[J]. 光通信技术, 2018, 42(5): 14-16.
Ni Yanhai, Mo Bin, Zhao Kui, et al. Application of ADL5304 in OLP system [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(5): 14-16.

[12] 郭玉霞, 李志杰. 基于ADS1256和STM32的数据采集装置设计[J]. 无线电工程, 2019, 49(1): 81-85.
Guo Yuxia, Li Zhijie. Design of a data acquisition device based on ADS1256 and STM32 [J]. Radio Engineering, 2019, 49(1): 81-85.

[13] 苏 阳, 曹 进, 程 磊, 等. ADS1256在高精度数据采集系统的应用分析[J]. 电子科学技术, 2016, 3(5): 546-548.
Su Yang, Cao Jin, Cheng Lei, et al. Application of ADS1256 in high precision data acquisition system [J]. Electronic Science & Technology, 2016, 3(5): 546-548.

[14] Zheng J, Wang F, Wang L. Research and Design of Wireless Sensor Middleware Based on STM32 [C]//Proceedings of 9th IFIP WG 5.14 International Conference, 2015: 1-6.

[15] 王晓东, 胡松钰. 激光结构光测量连续调节智能光源控制器设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 20200180.
Wang Xiaodong, Hu Songyu. Continuous smart light source controller design for laser structure light measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 20200180.

[16] 杨 浩, 刘译文, 赵笠铮, 等. 基于AD8304对数放大器的高精度光功率计的设计[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(4): 215-218.
Yang Hao, Liu Yiwen, Zhao Lizheng, et al. Design of high precision optical power meter based on the AD8304 logarithmic amplifier [J]. Experiment Science and Technology, 2015, 13(4): 215-218.

[17] 孙沁梅, 卢益民. 高精度模数转换器ADS1256的原理和应用[J]. 计算机与数字工程, 2005, 33(3): 94-97.
Sun Qinmei, Lu Yimin. Principle and application of high-accuracy A/D convertor ADS1256[J]. Computer & Digital Engineering, 2005, 33(3): 94-97.

作者简介:

刘小磊(1980—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为光电检测、光纤通信。