

文章编号 1004-924X(2023)15-2161-10

光开关切换延时线自动标定与控制系统

陈逸飞, 史上清, 恽斌峰*

(东南大学 电子科学与工程学院 先进光子学中心, 江苏 南京 210096)

摘要: 光开关切换延时线芯片中各光开关的驱动电压标定和控制需使用多通道光功率计、可编程多通道电压源阵列等分立仪器, 存在成本高、扩展困难的问题。设计并制作了一套低成本、易扩展的光开关切换延时线自动标定与控制系统, 其中多通道光功率计模块可探测 $-53 \sim -7.7$ dBm 内的光功率, 误差小于 0.5 dB; 多通道电压输出模块可高精度稳定输出 0~10 V 的直流电压, 输出电压波动小于 ± 0.5 mV; 使用单片机控制各模块协同工作并连接上位机实现人机交互。使用本系统对 5-bit 光开关切换延时线进行了自动标定和控制, 结果显示, 在 32 级延时状态下, 延时线芯片输出端的透射光谱在 1 560 nm 波长附近的波动均小于 1 dB, 对应的延时步进为 3.110 9 ps/state。该结果与商用仪器标定电压下测得的 3.062 0 ps/state 的延时步进高度吻合。本文设计制作的标定与控制系统精度高、成本低、扩展性强, 具有很高的应用价值。

关键词: 微波光子学; 集成光学; 光开关切换延时线; 光开关; 标定; 自动化

中图分类号: TN256 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233115.2161

Automatic calibration and control system of optical switching delay line

CHEN Yifei, SHI Shangqing, YUN Binfeng*

(Advanced Photonics Center, School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

* Corresponding author, E-mail: ybf@seu.edu.cn

Abstract: Calibrating the driving voltage of each optical switch in optical switched delay line (OSDL) chips requires a multichannel optical power meter, a programmable multichannel voltage source, and other discrete instruments, which causes the problems of high cost and system complexity when the chip scale increases. In this paper, an automatic calibration and control system is proposed for OSDL chips, which includes the functions of a multichannel optical power meter and a multichannel adjustable voltage source. The power detection range is from -53 to -7.7 dBm, with an error of <0.5 dB. The voltage output range is 0-10 V, and the fluctuations are within ± 0.5 mV. A microcontroller unit is used to control all parts of the system and communicate with the computer. When the driving voltages of a 5-bit OSDL chip are calibrated with the proposed system, the measured fluctuations of the transmission spectra of all 32 delay states are approximately 1 dB near 1 560 nm, and the measured delay step is 3.110 9 ps/state, which is consistent with the result of 3.062 0 ps/state obtained via calibration using commercial instruments.

收稿日期: 2023-02-07; 修订日期: 2023-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62171118)

The proposed system achieved the same calibration and control effect as the commercial instruments and has the advantages of low cost and easy scalability. It has good application prospects.

Key words: microwave photonics; integrated optics; optical switching delay line; optical switch; calibration; automation

1 引言

基于微波光子技术的光控波束形成网络(Optical Beamforming Network, OBFN)^[1-4]在新一代相控阵雷达系统、无线通信等领域具有广阔的应用前景,相较于采用电移相器进行相位调控的电学波束形成网络,OBFN通常采用可调光延时线对各通道的相位进行调控^[5-9],具有瞬时带宽大、损耗低、抗电磁干扰能力强的优势^[10],并且可以有效解决“波束斜视”效应^[11],大大降低了器件与系统的尺寸和功耗,提升了稳定性。其中,一种广泛报道的基于光程切换的集成可调光延时线为光开关切换光波导延时线(Optical Switched Delay Line, OSDL),通过改变各光开关的状态(“直通”或“交叉”)^[12],控制光信号沿不同长度的路径传输,从而实现延时调节^[13]。OSDL中各光开关的状态由加载在光开关上的功率决定,为了实现延时调节,需要对OSDL中各光开关的控制电压进行标定^[14]。已报道的OSDL驱动电压自动标定与控制系统^[15-16]需要多通道光功率计和可编程电压源,对包含多通道OSDL的集成OBFN芯片而言,这会极大增加标定成本和时间^[17]。因此,小型化、多通道、低成本、易扩展的OSDL自动标定与控制系统是OBFN芯片迈向实用的关键。

小型光功率计通过光电探测器和跨阻放大器协同工作实现光功率到电压幅值的转换,光电探测器可使用基于硅锗或锗硅的PIN,APD,MSM等实现,跨阻放大器可基于电阻^[18]、伪电阻^[19]、电容反馈^[20]、共栅极^[20]和反相器^[21-22]等实现。其中,基于电阻的跨阻放大器线性度较高,因其调试方便而被广泛应用于板级电路^[23-24],后几种跨阻放大器在带宽、增益等方面进行了优化,但拓扑结构复杂且制作成本高,更适合用于集成方案。小型可编程电压源一般基于数模转换器^[25]或数字电位器^[26]并加以放大、

滤波和反馈电路等实现^[27-28]。目前,将小型光功率计和可编程电压源结合构建OSDL标定与控制系统鲜有报道。为了实现OSDL自动标定与控制系统的微型化、多通道、低成本且易扩展,本文采用锗硅PIN型光电探测器阵列、基于电阻的跨阻放大器、多通道模数/数模转换芯片以及单片机设计制作了OSDL自动标定与控制系统,并基于该系统对5-bit硅基OSDL芯片进行了自动标定与控制实验。实验结果表明,该系统标定精度高、成本低、扩展性强,具有很好的应用价值。

2 系统架构

本文提出的OSDL自动标定与控制系统链路如图1(a)所示。其中,硅基OSDL结构如图1(b)所示,每级 2×2 马赫-曾德热光开关的两个输出端口分别连接固定长度的参考光波导和相应不同长度的延时光波导。通过对每个热光开关 $OS_n(n=0,1,2,\dots,N)$ 上的移相器 $PS_n(n=0,1,2,\dots,N)$ 施加不同的驱动电压,改变两臂相位差,切换光开关状态来选择不同的光路,从而产生不同的延时,级联 $N+1$ 个光开关可以产生 2^N 种延时。为了标定延时线中每个光开关的“直通”和“交叉”电压,在每个光开关输出端连接的参考波导处设计了基于定向耦合器的光功率探测端口 $TP_n(n=0,1,2,\dots,N-1)$ 。

OSDL芯片的自动标定与控制系统由多通道光功率计模块、多通道电压输出模块以及单片机模块3部分组成,如图1(c)所示。光开关切换延时线芯片中 N 个测试端口 TP_n 耦合出的光由多通道光功率计模块接收,经光电探测器将光信号转化为光电流,再经跨阻放大器(Transimpedance Amplifier, TIA)将光电流转换为电压信号,最后由模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)测量电压并将数据传输给单

片机,根据单片机中存储的电压-光功率标定关系可计算出输入光的功率值;多通道电压输出模块由数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)和同向放大电路组成,可由单片机控制实现 0~10 V 的高精度、高稳定直流电压输出,用于对光开关切换延时线芯片中各光开关的驱动;单片机调度多通道光功率计模块和多通道电压输出模块协同工作,并实现与上位机程序间的通信。

该系统可以实现以下功能:(1)通过单片机控制多通道电压输出模块扫描驱动电压,同时控

制多通道光功率计模块接收光功率,可以得到每个光开关驱动电压与输出端口光功率的关系曲线,从而通过上位机程序对每个光开关的“直通”和“交叉”驱动电压进行标定;(2)对标定得到的每个光开关的“直通”和“交叉”电压进行存储,自动给出芯片各延时状态(路径)对应的光开关驱动电压组合表,并存储;(3)根据用户选择的延时路径,查找光开关驱动电压组合表,并根据该驱动电压组合表控制多通道电压输出模块输出相应的电压组合,以控制延时线中所有光开关,实现 OSDL 芯片延时路径的选择。

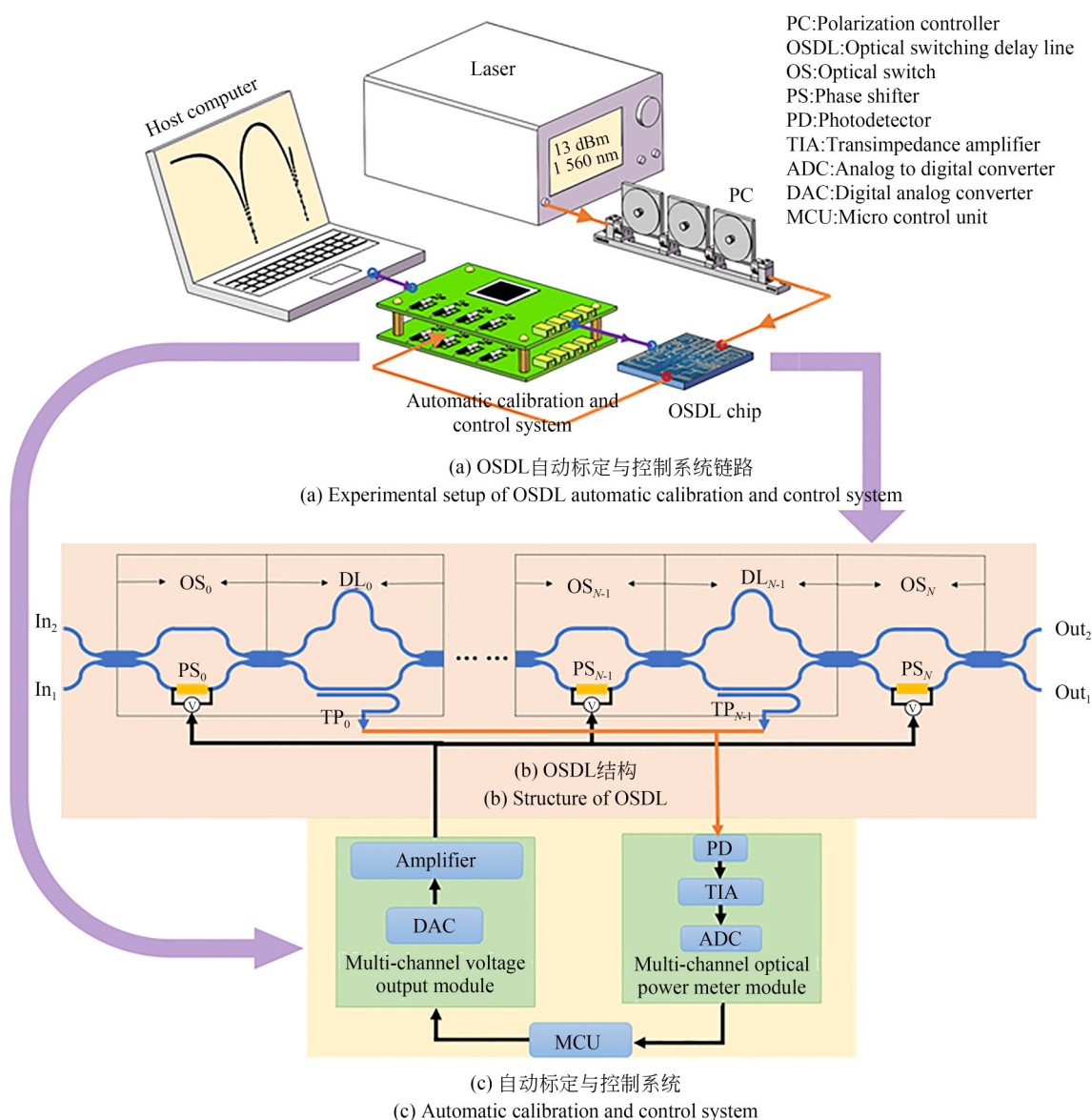


图 1 光开关切换延时芯片结构及其驱动电压自动标定与控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of OSDL chip architecture with automatic calibration and control system

3 系统硬件和软件设计

3.1 硬件设计

3.1.1 多通道光功率计模块

多通道光功率计模块由光电探测器(Photo-detector, PD), TIA 和 ADC 三个部分组成^[24]。

PD 将光功率转换为光电流。本系统中采用的 PD 型号是 Beijing Lightsensing 公司的 In-GaAs-PIN 型探测器(LSIPD-L1), 具有低噪声和高响应度的特点, 工作波段为 800~1 700 nm, 标称在波长 1 550 nm 的响应度 $R=0.9 \text{ A/W}$, 工作在光电导模式下的暗电流为 0.1 nA, 光伏模式下的暗电流为 1 nA。

TIA 负责将 PD 输出光电流信号转换为电压信号。对于实验室研发的硅基 OSDL 芯片, 当测试系统中激光器的输出功率为 13 dBm 时, 根据 OSDL 中各个器件单元的插损, 预估各探测端口的输出光功率约为 -50~-10 dBm, 使用 Thorlabs PM320E 光功率计测试得到的光功率范围与预期相符合, 则对应 PD 转换的光电流约为 9 nA~90 μA 。因此, 跨阻放大电路需满足大增益与低噪声的要求。由于光开关标定过程中使用直流光, 因此跨阻放大电路的带宽要求不高。综上, 基于高精电阻和低噪声运放设计跨阻放大电路^[19], 运放芯片选型为 ADI 公司的 ADA4530, 其偏置电流标称最大值为 20 fA, 均方根噪声标称值为 $14 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。根据统计规律和经验公式^[29], 电噪声峰峰值约为均方根噪声的 6.6 倍, 即 92.4 nV。

ADC 将 TIA 输出的电压信号进行采样量化, 并将结果传输给单片机处理与存储。因 PD 和 TIA 转换出的电压是直流信号, 所以 ADC 芯片的主要参数只需关注测量范围、分辨率、积分非线性误差(Integral Nonlinearity, INL)和微分非线性误差(Differential Nonlinearity, DNL)。因此, ADC 芯片选型为 ADI 公司的 LTC2408, 具有 8 通道 24 bit 分辨率, 标称 INL 为 33.5 LSB, 在 5 V 参考电压、伪差分信号输入的条件下, 其采样量化输出的结果波动为 10 μV 。

图 2 为光功率计模块的设计原理。ADC 芯

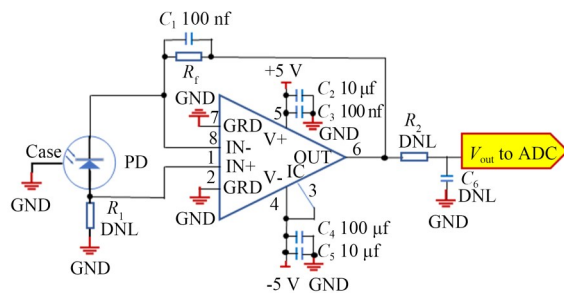


图 2 光功率计模块原理

Fig. 2 Schematic diagram of optical power meter module

片的采样量化值与输入光功率的关系为:

$$Q_{\text{sam}} = P_{\text{opt}} \times R \times R_f \times \frac{2^n}{V_{\text{ADC_ref}}}, \quad (1)$$

式中: Q_{sam} 是 ADC 的采样量化结果, P_{opt} 是输入的光功率, $R=0.9 \text{ A/W}$, 表示 PD 的响应度, R_f 为跨阻的阻值, $V_{\text{ADC_ref}}=5 \text{ V}$, 表示 ADC 的参考电压, $n=24$, 表示 ADC 的分辨率。

实验室制备的 5-bit OSDL 有 6 个光开关需要标定和驱动控制。因此, 对制作的六通道光功率计模块进行了标定和测试, 结果如图 3 所示。在跨阻 $R_f=25 \text{ k}\Omega$ 时, 实验得到了光功率计模块中 6 个通道在不同输入光功率下的 ADC 量化值, 如图 3(a) 所示, 由式(1)可知, ADC 的采样量化值与输入光功率是线性关系, 所以图中的横纵坐标均使用线性单位。标定后选取标定范围内不同于标定点的光功率值进行准确性复测, 结果如图 3(b) 所示, 采用 Thorlabs 公司的 PM320E 光功率计作为标准, 图中横坐标为 PM320E 测得的激光器输出的光功率, 纵坐标为采用所制作光功率计模块测得的激光功率与 PM320E 测得的激光功率之差。结果表明, 所制作的六通道光功率计

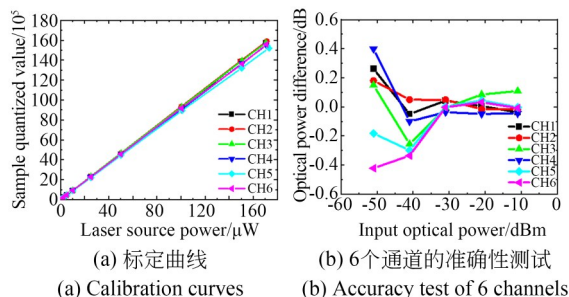


图 3 多通道光功率模块计标定和准确性测试结果

Fig. 3 Calibration and accuracy test results of multi-channel optical power meter module

模块可以实现 $-53\sim-7.7$ dBm的光功率测量,且全范围内功率测量结果与Thorlabs的PM320E光功率计测量结果相差小于0.5 dB。该光功率计模块的探测范围已实现了对功率探测需求范围的覆盖,足够实现对OSDL芯片的标定。

3.1.2 多通道电压输出模块

多通道电压输出模块由DAC和同向放大电路组成。DAC芯片选用ADI的AD5676,具有8通道和16 bit的精度,由ADR4550提供5 V参考电压,DAC的输出电压可表示为:

$$V_{\text{DAC}} = \frac{\text{code}}{2^n} \times V_{\text{DAC_ref}} \quad (2)$$

根据式(2), $V_{\text{DAC_ref}}=5$ V, $n=16$,DAC可直接输出0~5 V的电压,但是通常硅基热光开关需要0~10 V的驱动电压,因此需要将DAC输出电压放大2倍。同向放大电路的运放芯片选型为低噪声运放OPA2211。电路使用4层布线设计,即信号-接地-电源-信号的层级设计。该电压输出模块的稳定性测试结果如图4所示,在1小时的持续测试中,该电压输出模块在0~10 V输出电压内的波动小于 ± 0.5 mV。

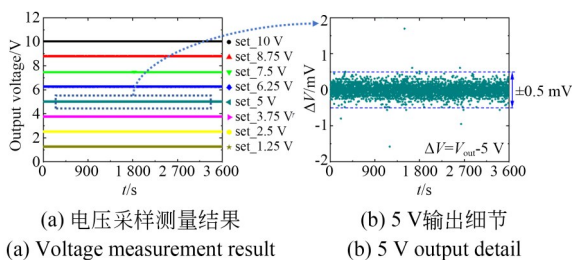


图4 多通道电压输出模块的输出稳定性测试结果
Fig. 4 Voltage output stability test of multi-channel optical power meter module

3.1.3 单片机模块

单片机选型为STM32F407ZGT6,该型号具有168 MHz的工作频率,1 MB片上存储,满足系统设计需求,且较多的引脚具备很好的扩展性。图5的通信接口示意图中展示了OSDL自动标定与控制系统中各模块之间的通信连接。其中单片机与ADC芯片、DAC芯片的通信连接均使用SPI通信;单片机和上位机的通信连接使用串口通信。

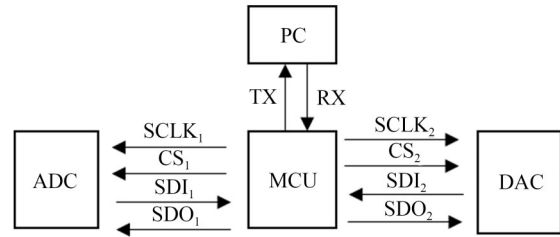


图5 通信接口示意图
Fig. 5 Schematic of communication interface

3.2 软件设计

3.2.1 单个光开关电压标定

单个光开关的开关电压标定流程如图6所示。单片机控制多通道电压输出模块对光开关的驱动电压进行扫描,20 mV的扫描电压步进精度已满足标定精度的需要,同时多通道光功率计模块对该光开关后的对应探测端口 TP_n 的光功率进行监测,从而得到探测端口光功率与光开关驱动电压的关系。其中,监测光功率最大值和最小值对应的驱动电压即为该光开关的“交叉”或“直通”状态电压。

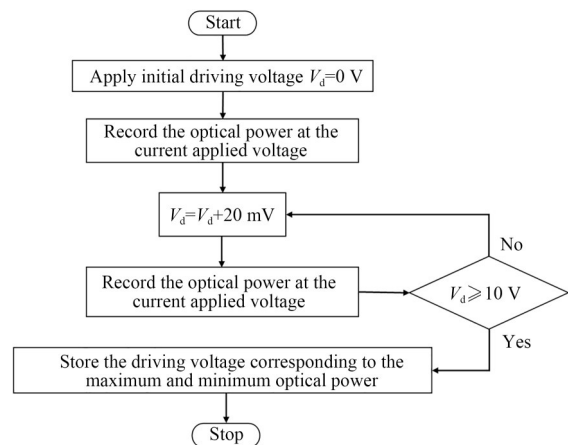


图6 单个光开关的驱动电压标定流程
Fig. 6 Flow chart of driving voltage calibration for single optical switch

3.2.2 多通道OSDL芯片标定与控制

多通道OSDL标定和控制流程如图7所示。首先对各通道延时线的光开关驱动电压进行标定,存储各通道延时线上每个光开关的“交叉”和“直通”状态电压;根据延时线结构,定制每个延时通道的每个延时状态对应的光开关驱动电压

组合表。根据该表,可以得到指定延时线通道在指定延时状态下各光开关的驱动电压,通过单片机控制多通道电压输出模块向指定延时线通道输出对应的驱动电压,即可实现对指定延时通道延时状态的控制。重复上述流程即可实现多个延时线通道的控制。

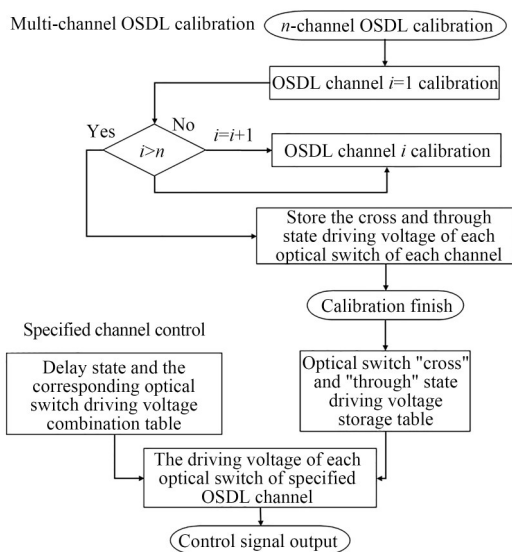


图7 多通道光开关切换延时线芯片标定和指定延时线通道控制流程

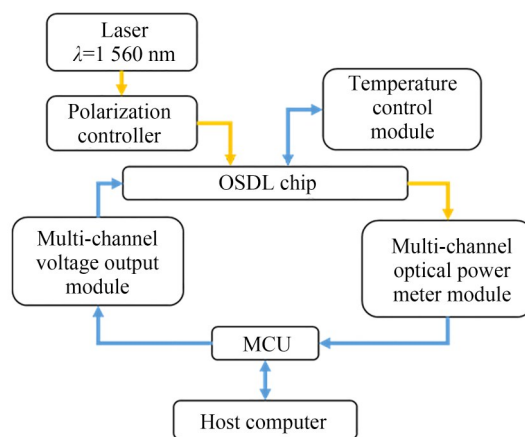
Fig. 7 Flow chart of multi-channel OSDL chip calibration and specified channel control

4 系统测试

OSDL 自动标定与控制实验系统如图 8 所示。多通道光功率计模块、多通道电压输出模块、单片机模块和电源模块都通过铜柱固定在亚克力底板上,OSDL 模块中的光功率探测端口与多通道光功率计模块的光纤端口相接,光开关驱动电极通过转接电路与多通道电压输出模块的输出端口相接,温控模块^[30]通过转接电路与光开关切换延时线模块相接。

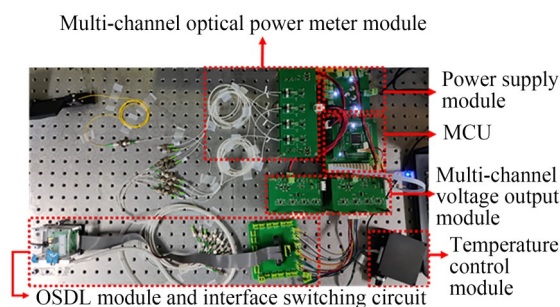
4.1 OSDL 芯片自动标定

所设计的自动标定与控制系统 5-bit OSDL 如图 9 所示。设置激光波长 $\lambda=1\ 560\ \text{nm}$,功率设置为 13 dBm。将 5-bit OSDL 芯片中的探测端口 TP_n 接入多通道光功率计模块,将控制光开关状



(a) 实验系统框图

(a) Schematic diagram of experimental system



(b) 实验系统照片

(b) Photo of experimental system

图8 光开关切换延时线自动标定与控制实验系统

Fig. 8 Experimental setup of automatic calibration and control of OSDL chip

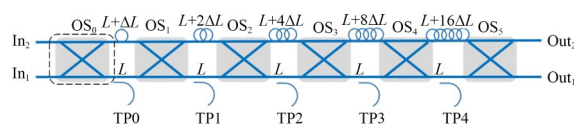


图9 5-bit 光开关切换延时线结构

Fig. 9 Structure of 5-bit optical switching delay line

态的电极接入多通道电压输出模块,按照图 6 中的标定流程,根据探测端口的光功率监测结果,判断前一级光开关的状态,得到图 10 所示的光开关驱动电压和对应探测端口的光功率关系。光开关 $\text{OS}_0 \sim \text{OS}_5$ 的消光比分别为 35.7, 27.7, 28.1, 24.4, 26.8, 32.5 dB,根据图 10(a)~10(f) 中光功率的最大值和最小值所对应的电压, $\text{OS}_0 \sim \text{OS}_5$ 光开关的“交叉”和“直通”电压标定结果如表 1 所示。

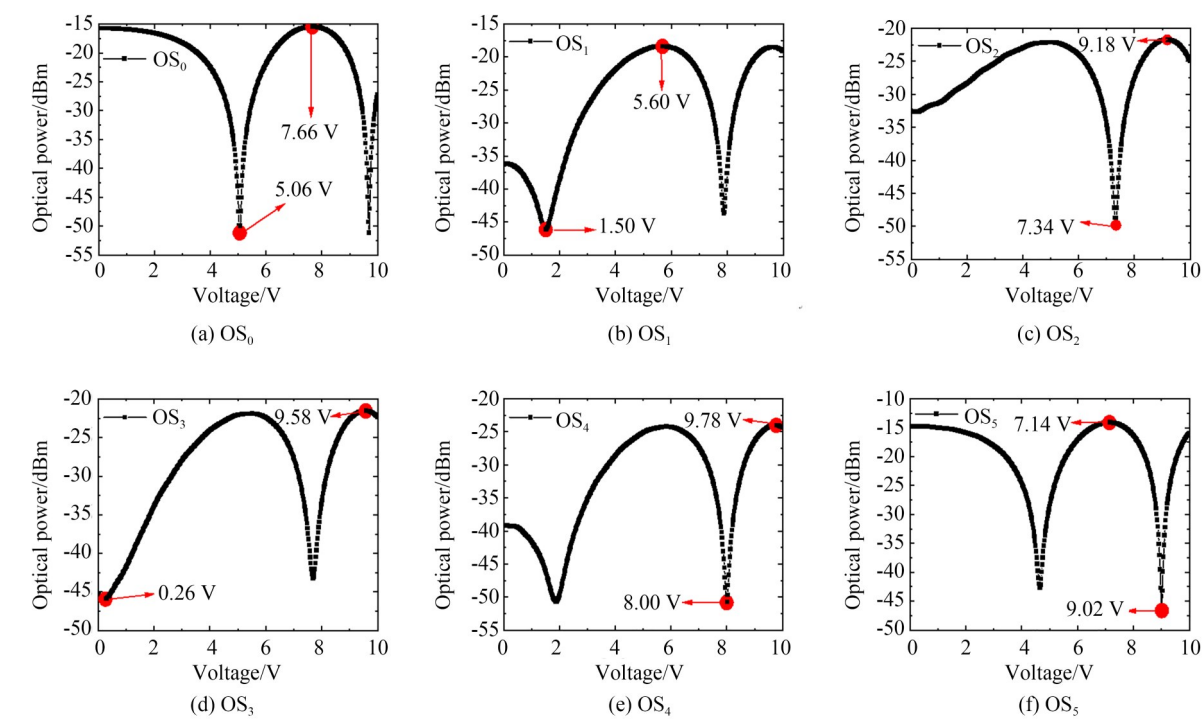


图 10 5-bit 光开关切换延时线标定中 6 个光开关驱动电压与测试端口光功率的实验测量结果

Fig. 10 Measured results of optical power and driving voltage of 6 optical switches in 5-bit OSDL chip calibration

表 1 光开关的“交叉”和“直通”状态驱动电压标定结果

Tab. 1 Calibration results of driving voltages of optical switches in cross and through states (V)

光开关	Cross voltage	Through voltage
OS ₀	7.66	5.06
OS ₁	1.50	5.68
OS ₂	7.34	9.18
OS ₃	0.26	9.58
OS ₄	8.00	9.78
OS ₅	7.14	9.02

4.2 系统标定准确性检验

为检验硬件系统的标定精度,本文对比了所设计的系统和商用分立仪器分别控制单个光开关所得到的消光比,结果为 35.7 dB 和 37.7 dB,说明本文提出的系统标定精度与商用仪器接近。

为检验光开关电压标定的准确性,在使用所设计系统的标定和控制下,对 OSDL 芯片 32 种延时状态下输出端口 Out₂的输出光谱进行测量。图 11(a)~11(d)中分别展示了 0ΔL, 10ΔL, 20ΔL 和 31ΔL 这 4 种典型延时状态下 Out₂端口的输出光谱。可以看出,在波长 1 558~1 561 nm,延时线输出光谱的波动小于 1 dB,表明 5-bit OSDL 芯

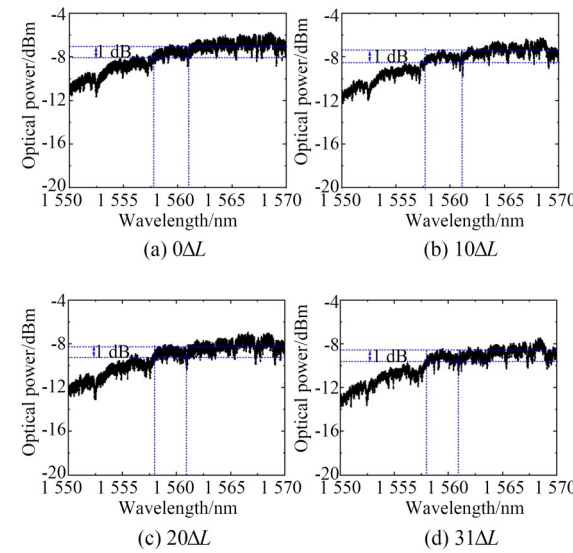


图 11 四种延时状态下 5-bit 光开关切换延时线芯片的透射光谱测试结果

Fig. 11 Measured transmission spectra of 5-bit OSDL in four different delay states

片上各光开关都工作在目标状态下,残余的光谱抖动主要是芯片上的光栅耦合器以及由于制作误差引起的光开关消光比不足导致的。

基于光矢量网络分析方案^[31],分别采用所设计的系统和商用分立仪器标定的光开关电压值

对 5-bit OSDL 芯片的 32 种延时状态进行了测试,结果分别如图 12(a)和图 12(b)所示,测试得到的 5-bit OSDL 的延时步进分别为 3.110 9 ps/state 和 3.062 0 ps/state,两者非常吻合。

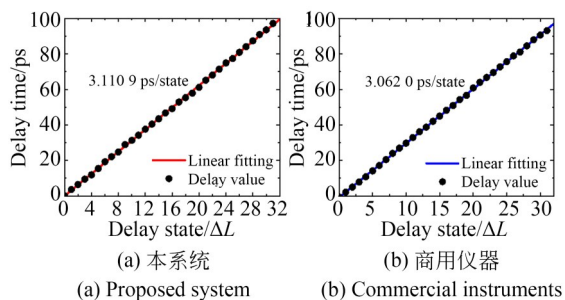


图 12 两种系统标定后 5-bit 光开关切换延时线芯片的延时量测量结果

Fig. 12 Measured delay time of 5-bit OSDL chip calibrated by two systems

根据光开关消光比、透射光谱和延时量的测试结果,可知本文提出的自动标定与控制系统对 OSDL 芯片进行标定和控制的效果与商用仪器基本相同。

参考文献:

- [1] MARAM R, KAUSHAL S, AZAÑA J, *et al.* Recent trends and advances of silicon-based integrated microwave photonics [J]. *Photonics*, 2019, 6 (1): 13.
- [2] YAO J P. Microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [3] TSOKOS C, ANDRIANOPOULOS E, RAPTAKIS A, *et al.* True time delay optical beamforming network based on hybrid inp-silicon nitride integration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(18): 5845-5854.
- [4] ZHU C, LU L J, SHAN W S, *et al.* Silicon integrated microwave photonic beamformer [J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1162-1170.
- [5] ROTMAN R, TUR M, YARON L. True time delay in phased arrays[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(3): 504-518.
- [6] MOREIRA R L, GARCIA J, LI W Z, *et al.* Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications [J]. *IEEE*

5 结 论

本文设计的光开关切换延时线自动标定与控制系统包含三部分:多通道光功率计模块、多通道电压输出模块和单片机模块。多通道光功率计模块实现了多通道高精度光功率测量,测量范围为 $-53\sim-7.7$ dBm,测量误差小于 0.5 dB;多通道电压输出模块实现了多通道 0~10 V 高精度高稳定性的直流电压输出,输出电压波动小于 ± 0.5 mV;单片机模块协调多通道光功率计模块和多通道电压输出模块实现光开关切换延时线的自动标定与控制功能,并负责与上位机的通信。采用该自动标定与控制系统对 5-bit OSDL 芯片进行了标定与控制,芯片透射光谱在波长 1 558~1 561 nm 的波动小于 1 dB,延时量测量结果为 3.110 9 ps/state,与商用仪器标定所测得的 3.062 0 ps/state 基本相同。实验结果表明,该系统标定精度高、成本低、扩展性强,具有广阔的应用前景。

- [7] ZHOU L J, WANG X Y, LU L J, *et al.* Integrated optical delay lines: a review and perspective [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(10): 101301.
- [8] ZHENG P F, WANG C Q, XU X M, *et al.* A seven bit silicon optical true time delay line for ka-band phased array antenna [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-9.
- [9] ZHENG P F, XU X M, LIN D D, *et al.* A wide-band 1×4 optical beam-forming chip based on switchable optical delay lines for Ka-band phased array [J]. *Optics Communications*, 2021, 488: 126842.
- [10] 郑鹏飞, 恽斌峰. 可重构自耦合微环辅助的 MZI 集成光子滤波器 [J]. *光学 精密工程*, 2020, 28 (1): 1-9.
- [11] LIN D D, XU X M, ZHENG P F, *et al.* A tun-

- able optical delay line based on cascaded silicon nitride microrings for ka-band beamforming [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-10.
- [12] 王旗,王希斌,孙小强,等. 基于Norland紫外固化胶的热光开关器件[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 194-198.
- WANG Q, WANG X B, SUN X Q, *et al.* Thermo-optic switch device based on Norland optical adhesive[J]. *Chinese Optics and Applied Optics Abstracts*, 2012, 5(2):194-198. (in Chinese)
- [13] XIE J Y, ZHOU L J, LI Z X, *et al.* Seven-bit reconfigurable optical true time delay line based on silicon integration [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22707-22715.
- [14] SHI S Q, HU G H, LIN D D, *et al.* Performance comparison of integrated optical switching delay lines on three typical photonic integration pilot lines [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 109016.
- [15] LIN D D, SHI S Q, LIU P C, *et al.* Low loss silicon nitride 1×4 microwave photonic beamforming chip [J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30672.
- [16] SHI S Q, LIN D D, LIU P C, *et al.* Non-invasive delay state calibration of silicon optical switching delay line[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(19): 6444-6453.
- [17] TAJIMA K, NAKAMURA S, UENO Y, *et al.* Hybrid integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switch with ultrafast, high extinction switching [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(23): 2030-2031.
- [18] AULL B. Geiger-mode avalanche photodiode arrays integrated to all-digital CMOS circuits [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(4): 495.
- [19] DJEKIC D, FANTNER G, BEHREND S J, *et al.* A transimpedance amplifier using a widely tunable PVT-independent pseudo-resistor for high-performance current sensing applications [C]. *ESSCIRC 2017 - 43rd IEEE European Solid State Circuits Conference. September 11-14, 2017, Leuven, Belgium*. IEEE, 2017: 79-82.
- [20] ROMANOVA A, BARZDENAS V. A review of modern CMOS transimpedance amplifiers for OTDR applications [J]. *Electronics*, 2019, 8(10): 1073.
- [21] HOSSEINISHARIF SALI, POURAHMADI M, SHAYESTEH M R. Utilization of a cascoded-inverter in an RGC structure as a low-power, broadband TIA [J]. *Microelectronics Journal*, 2020, 99: 104749.
- [22] BAE W. CMOS inverter as analog circuit: an overview [J]. *Journal of Low Power Electronics and Applications*, 2019, 9(3): 26.
- [23] 方文长,陈焰,张矿伟,等. 嵌入式光功率计的研制[J]. *自动化仪表*, 2020, 41(11): 21-27.
- FANG W CH, CHEN Y, ZHANG K W, *et al.* Development of embedded optical power meter [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2020, 41(11): 21-27. (in Chinese)
- [24] 张翔,陈涛,金操帆,等. 便携式光源、光功率计系统开发与设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(21): 212301.
- ZHANG X, CHEN T, JIN C F, *et al.* Development and design of portable light source and optical power meter system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(21): 212301. (in Chinese)
- [25] 周松斌,林剑鲁,刘洋,等. 一种高精度可调标准电压源的设计[J]. *自动化与信息工程*, 2012, 33(2): 26-29.
- ZHOU S B, LIN C L, LIU Y, *et al.* Design of a high-precision adjustable standard voltage source [J]. *Automation & Information Engineering*, 2012, 33(2): 26-29. (in Chinese)
- [26] 黄剑平,穆瑞珍. 基于数字电位器的可编程电压基准源设计[J]. *电子器件*, 2015, 38(6): 1296-1300.
- HUANG J P, MU R ZH. The design of programmable voltage reference based on digital potentiometer [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2015, 38(6): 1296-1300. (in Chinese)
- [27] ACHTENBERG K, MIKOŁAJCZYK J, CIOFI C, *et al.* Low-noise programmable voltage source [J]. *Electronics*, 2020, 9(8): 1245.
- [28] 肖岚,袁银麟,翁建文,等. 基于振镜的准直光源功率稳定控制器[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(24):3189-3197.
- XIAO L, YUAN Y L, WENG J W, *et al.* Power stability controller for collimating-light source based on scanlab[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(24):3189-3197. (in Chinese)
- [29] JUNG W G. *Op Amp Applications Handbook* [M]. Amsterdam: Newnes, 2005

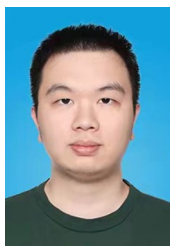
- [30] 冯勇, 张文喜, 伍洲, 等. 半导体激光器电流调制实现短相干光源[J]. 光学精密工程, 2021, 29(6):1321-1328.

FENG Y, ZHANG W X, WU ZH, *et al.* Short coherent light source based on current modulation in semiconductor lasers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6):1321-1328. (in Chinese)

- [31] 史上清, 刘鹏程, 恽斌峰. 硅基光开关切换延时线芯片延时测量稳定性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(20): 2013001.

SHI SH Q, LIU P CH, YUN B F. Delay measurement stability of silicon-based optical switching delay line chip[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(20): 2013001. (in Chinese)

作者简介:



陈逸飞(1998—),男,江苏南京人,博士研究生,2020年于西南交通大学获得学士学位,主要从事硅基集成光子器件设计的研究。E-mail: 230228362@seu.edu.cn

通讯作者:



恽斌峰(1979—),男,江苏常州人,教授,博士生导师,江苏省光学学会理事,国家重点研发项目负责人,2001年于电子科技大学获得学士学位,2006年于东南大学获得博士学位,主要从事光通信与光电集成技术的研究。E-mail: ybf@seu.edu.cn