

## 激光与光电子学进展

## 基于差分进化和数字微扰的微环波长锁定系统

田华麟<sup>1</sup>, 张嘉杰<sup>1</sup>, 邱辞源<sup>2</sup>, 冯元华<sup>1\*</sup><sup>1</sup>暨南大学信息科学技术学院, 广东 广州 510632;<sup>2</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

**摘要** 硅基微环谐振器由于其优异的光谱选择性、紧凑的占地面积和低功耗特性,被大量应用于光子集成领域。但是,由制造误差和硅基器件高热敏性引起的微环谐振波长偏移会导致工作状态不稳定,在实际应用中需要实现相应的波长锁定方案。提出了一种基于差分进化和数字微扰的微环波长锁定系统,以输出光功率为监测变量,在全局搜索阶段基于差分进化算法搜索最佳加热功率来定位目标信号波长,在局部锁定阶段基于数字微扰算法解调出误差信号,据此来增减加热功率以消除环境温度波动干扰。经过理论推导和实验验证,发现提出的差分进化算法搜索最佳加热功率的速度比传统的逐步扫描方式快4倍左右,实验验证了在400 s内、环境温度变化5 °C条件下微环谐振波长的稳定锁定。

**关键词** 硅基微环; 波长锁定; 差分进化; 数字微扰

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223178

## Micro-Ring Wavelength Locking System Based on Differential Evolution and Digital Perturbation

Tian Hualin<sup>1</sup>, Zhang Jiajie<sup>1</sup>, Qiu Ciyuan<sup>2</sup>, Feng Yuanhua<sup>1\*</sup><sup>1</sup>College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China;<sup>2</sup>State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Silicon-based micro-ring resonators (MRRs) are widely used in photonic integration because of their excellent spectral selectivity, compact footprint, and low power consumption. However, MRR wavelength shifts caused by manufacturing errors and the high thermal sensitivity of silicon-based devices can lead to unstable operation. Therefore, a corresponding wavelength-locking scheme must be implemented in practice. In this paper, we propose an MRR wavelength-locking system based on differential evolution and digital perturbation. The output optical power is taken as the monitoring variable, and the optimal heating power is searched for the target signal wavelength based on a differential evolution algorithm in the global search stage. Moreover, the error signal is demodulated based on a digital perturbation algorithm in the local locking stage to increase or decrease the heating power to eliminate the interference of ambient temperature fluctuations. After theoretical derivation and experimental verification, it is found that the proposed differential evolution algorithm is approximately four times faster than the traditional step-by-step scanning method for searching for the optimal heating power. We verify the stable locking of the resonant wavelength of the MRR under a 5 °C ambient temperature change within 400 s.

**Key words** silicon-based micro-ring resonator; wavelength lock; differential evolution; digital perturbation

## 1 引言

硅基光子集成器件凭借小体积、大带宽、低功耗及高集成度等突出优势在电信网络、数据中心互连和信

号处理等通信领域具备重要的应用价值<sup>[1-2]</sup>。其中,硅基微环谐振器由于具备波长选择性,并在体积和功耗方面有进一步优势,成为构建光滤波器、光开关、光源、光调制器、光探测器等核心通信器件的理想方案<sup>[3-6]</sup>。

收稿日期: 2022-11-28; 修回日期: 2022-12-28; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2205200)、国家自然科学基金(62175092)、广州市基础与应用基础研究项目(202201010088)、广东省自然科学基金面上项目

通信作者: \*favinfeng@163.com

由于硅基微环谐振器的波长选择特性,一般需要在特定的波长下工作,然而在工艺误差的影响下,其谐振波长往往与目标信号波长存在较大偏差<sup>[7]</sup>。此外,硅材料的高热光系数也使得微环谐振波长对所处环境的温度变化非常敏感<sup>[8]</sup>。因此在基于硅基微环谐振器构建大规模集成光路时,解决波长漂移问题十分关键。

为解决硅基微环谐振器的波长漂移问题,在实际应用中需要实现相应的波长锁定方案。目前常见的微环波长锁定方案包括开环锁定<sup>[9-10]</sup>、闭环锁定<sup>[11-13]</sup>2种。开环锁定方案一般通过引入特殊的材料和器件结构,以降低硅基微环谐振器的热敏属性。这种方案引入了与 CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) 工艺不兼容的材料,导致其不适合大规模集成且对工艺误差的容忍度较低。开环锁定方案中存在的问题在实际应用中难以解决,因此更为常见的是闭环锁定方案。闭环锁定方案的基本思想是在硅基微环谐振器上集成微加热器,监测随波长偏移变化而变化的系统参量,设计一套反馈控制子系统以自动地将硅基微环谐振器的谐振波长实时锁定至目标信号波长。

闭环锁定方案中常用的监控系统参量包括输出光功率<sup>[12]</sup>、接收信号误码率<sup>[14]</sup>、微环圆周相移<sup>[15]</sup>、器件温度<sup>[16]</sup>等。其中,硅基微环谐振器输出光功率随波长漂移变化是直接由微环的波长选择性引起的,且监控输出光功率时只需使用一个光探测器,该器件的工艺已十分成熟,适合大规模集成,因此基于输出光功率监测的波长锁定方案一般是最简单和直接的波长锁定方法。另外,在闭环锁定方案中,基于反馈控制子系统的结构可分为基于模拟电路和基于数字信号处理2种实现方式。基于模拟电路的波长锁定方法包括抖动信号法<sup>[11]</sup>、平衡外差探测法<sup>[15]</sup>、误码率判决法<sup>[14]</sup>。相比数字信号处理方法,该方法不需要引入处理器,故更易于集成。基于数字信号处理的波长锁定方法包括步进极值搜索法<sup>[12]</sup>、自适应梯度变化法<sup>[13]</sup>、PID (Proportional-integral-differential) 控制法<sup>[17]</sup>,这些方案采用处理器来

实现控制算法,可以集中控制所有光器件的加热功率,其优点包括功能灵活、扩展方便、成本低,采用高性能的控制算法可以实现更好的器件性能。基于数字信号处理的控制子系统是实现硅基微环谐振器波长锁定的理想方式。

在实际应用中,对硅基微环谐振器波长锁定有2个关键要求:一是快速定位目标信号波长以消除制造过程带来的波长偏差,二是在锁定到目标信号波长后实时调节微环谐振波长以消除环境温度波动带来的波长偏差<sup>[18]</sup>。为了满足以上2个要求,本文设计了一套基于数字信号处理的硅基微环谐振器波长锁定系统,以微环输出光功率为监测系统变量,在全局搜索阶段基于差分进化算法来定位目标信号波长。相比传统的步进扫描定位目标信号波长的搜索方式,提出的方法的定位速度提升了4倍左右。在局部锁定阶段,基于数字微扰算法解调出误差信号,根据误差信号的符号增减加热功率来实时锁定目标信号波长。相对于模拟电路的抖动信号法波长锁定方式,提出的方法更为灵活且成本低、扩展性强。

## 2 基于差分进化和数字微扰算法的硅基微环谐振器波长锁定原理

### 2.1 基于数字信号处理的硅基微环谐振器波长锁定系统

基于差分进化和数字微扰算法的硅基微环谐振器波长锁定系统如图1所示,主要由输出光功率监测模块、微处理器和热调驱动模块组成。根据微环的光谱选择性可知,当微环的谐振波长与目标信号波长对齐时,其输出光功率会处于最小值水平。通过输出光功率监测模块得到实时的输出光功率数字信号,在微处理器内根据控制算法对输出光功率数字信号进行处理并对热调驱动模块进行输出控制,对集成在微环上微加热器的加热功率进行精准控制。基于该锁定系统的反馈控制算法分为2个阶段:在全局搜索阶段,基于差

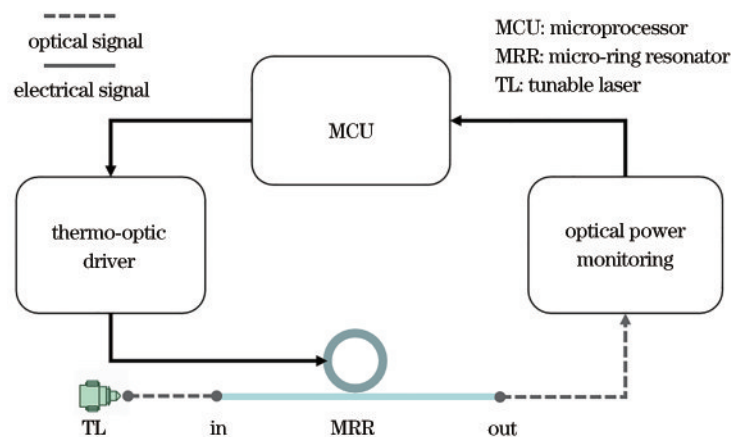


图1 基于数字信号处理的微环波长锁定系统框图

Fig. 1 Block diagram of micro-ring resonator wavelength locking system based on digital signal processing

分进化算法快速定位到目标信号波长;在局部锁定阶段,基于数字微扰算法解调出误差信号,根据误差信号的符号增减加热功率来实时锁定目标信号波长。

## 2.2 基于差分进化算法定位目标信号波长的原理

硅基微环谐振器输出光功率与加热功率的关系如图 2 所示。通过基于硅基光子器件的热光效应来改变集成在微环上微加热器的加热功率,可线性地改变谐振波长。当输出光功率处于最小值时,该加热功率下的微环谐振波长与目标信号波长对齐。全局搜索阶段的目标是找到输出光功率最小值对应的加热功率,即全局最佳加热功率,以定位到目标信号波长。

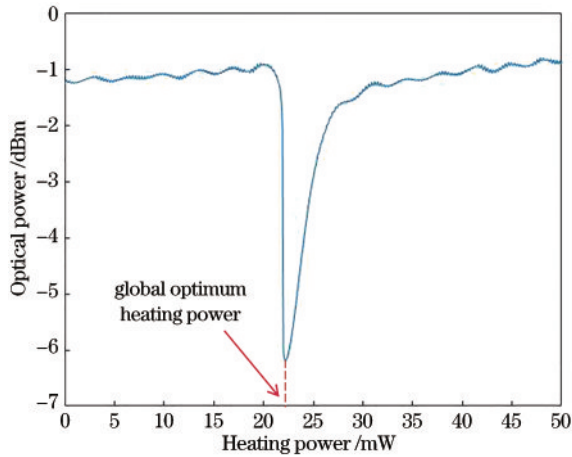


图 2 微环输出光功率随加热功率的变化

Fig. 2 Variation of output optical power of micro-ring resonator with heating power

传统的搜索全局最佳加热功率的方法是以固定步长逐次累加加热功率,将其作用于微加热器,得到输出光功率值,在扫描结束后通过比较得到输出光功率最小值对应的全局最佳加热功率。该方法的弊端在于,若设置的步长过大,则无法扫描出输出光功率最小值;若设置的步长过小,则需要多次扫描才能找到全局最佳加热功率。差分进化算法通过群体之间的相互合作与竞争来优化搜索方向,适用于各类目标值搜索场景。硅基微环谐振器的热响应速度处于微秒量级,快速切换加热功率可得到不同的输出光功率<sup>[19]</sup>。在全局搜索阶段,将加热功率作为种群、将输出光功率作为返回值,通过多次变异、交叉进化加热功率种群,可快速找到全局最佳加热功率,从而大大降低搜索次数。

在全局搜索阶段基于差分进化算法来搜索全局最佳加热功率的流程如图 3 所示。首先,确定最大加热功率  $P_{\max}$ ,在  $(0, P_{\max})$  范围内随机选取  $n$  个加热功率种群  $P_{(0,i)}$ ,其中 0 代表第 0 代加热功率,  $i$  代表第  $i$  个加热功率种群 ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。其次,设置输出光功率最大值  $y_{\max}$  与最小值  $y_{\min}$ ,将阈值定义为  $y_{\text{th}} = y_{\min} + (y_{\max} - y_{\min})/3$ 。当输出光功率小于该阈值时,则认为其对应的加热功率为最佳加热功率  $P_g$ 。最后,将第

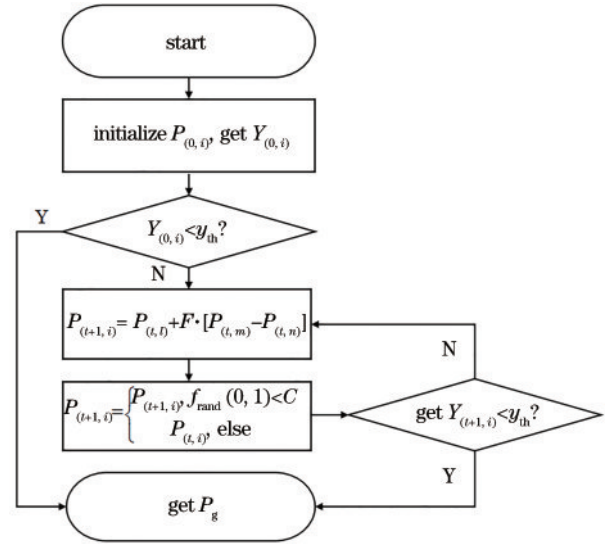


图 3 基于差分进化算法来搜索全局最佳加热功率的流程图  
Fig. 3 Flow chart of searching global optimal heating power based on differential evolution algorithm

0 代加热功率种群  $P_{(0,i)}$  施加到微加热器上,得到第 0 代输出光功率  $Y_{(0,i)}$ ,判断第 0 代输出光功率中是否有小于阈值  $y_{\text{th}}$  的值。如果有,则确定其对应的加热功率为最佳加热功率  $P_g$ ,并退出全局搜索阶段;如果没有,则进行下一次变异加热功率种群操作,其表达式为

$$P_{(t+1,i)} = P_{(t,i)} + F \cdot [P_{(t,m)} - P_{(t,n)}], \quad (1)$$

式中:  $P_{(t,i)}$ 、 $P_{(t,m)}$ 、 $P_{(t,n)}$  代表在第  $t$  代种群中随机选取的 3 个不同加热功率种群;  $F$  代表变异因子,为常数。此后,对种群进行交叉操作以增强变异的随机性,其表达式为

$$P_{(t+1,i)} = \begin{cases} P_{(t+1,i)}, f_{\text{rand}}(0,1) < C \\ P_{(t,i)}, f_{\text{rand}}(0,1) \geq C \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $C$  代表交叉因子,为常数;  $f_{\text{rand}}(0,1)$  代表取 0~1 范围内的任意小数,当其小于  $C$  时,则第  $t+1$  代中的第  $i$  个加热功率种群变异成功,反之则第  $t+1$  代中的第  $i$  个加热功率种群保持不变。将第  $t+1$  代加热功率种群  $P_{(t+1,i)}$  施加在微加热器上,得到第  $t+1$  代输出光功率  $Y_{(t+1,i)}$ ,比较第  $t+1$  代输出光功率与第  $t$  代输出光功率。若  $Y_{(t+1,i)} < Y_{(t,i)}$ ,则认为第  $t+1$  代中的第  $i$  个加热功率种群进化成功,反之则第  $t+1$  代中的第  $i$  个加热功率种群保持不变。判断第  $t+1$  代输出光功率  $Y_{(t+1,i)}$  中是否有小于  $y_{\text{th}}$  的值,如果有则确定其对应的加热功率为最佳加热功率  $P_g$  并退出全局搜索阶段,反之则进入下一次变异交叉操作,直至搜索到最佳加热功率  $P_g$ 。

## 2.3 基于数字微扰算法的波长锁定原理

Zhu 等<sup>[11]</sup>在模拟电路的基础上提出了抖动信号法,通过将外部信号发生器产生的微扰信号施加在微加热器上,在电路上对输出端光信号转换的模拟信号进行滤波比较,并动态调整加热功率以保证微环的谐

振波长与目标信号波长对齐。该方案无需引入处理器,控制速度快,但需要引入额外的信号发生器,对不同参数的微环波长锁定的兼容性差,无法满足大规模集成的微环阵列的波长锁定需求。为此,提出基于数字微扰算法解调误差信号,根据误差信号的符号增加加热功率来实时锁定目标信号波长。

在局部锁定阶段,基于数字微扰算法的波长锁定原理是,在全局搜索阶段找到的最佳加热功率即最佳直流偏置电压上叠加完整周期正弦微扰信号  $V + A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ ,其中  $V$  是最佳直流偏置电压,  $A$  是正弦微扰信号的幅值,  $\omega$  是频率,  $t$  是时间,  $\varphi$  是相位。叠加的正弦微扰信号的幅值相对于直流偏置电压来说足够小,则不考虑叠加过程引入的非线性部分,正弦微扰信号引起的输出光功率变化的信号仍然是类正弦信号。正弦微扰信号导致的微环谐振波长改变量为  $\alpha \cdot B \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ ,其中:  $\alpha$  是加载到微加热器上的电压信号到中心波长的调制效率,为常数;  $B$  是改变量的幅值,为正数。由于周期正弦微扰信号相对于直流偏置电压足够小,  $\alpha$  近似于直流偏置电压关于波长的斜率  $\epsilon$ ,则在该最佳直流偏置电压下的输出光功率为一个类正弦信号  $\epsilon \cdot \alpha \cdot B \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ 。将输出光功率信号与正弦微扰信号相乘,得到混合信号  $A \cdot \epsilon \cdot \alpha \cdot B [1 - \cos(2\omega t + 2\varphi)]$ 。混合信号包含周期性的类正弦信号和直流信号,对混合信号在时间上求和即可滤除类正弦信号  $\cos(2\omega t + 2\varphi)$  部分,得到包含斜率  $\epsilon$  的直流部分  $A \cdot \epsilon \cdot \alpha \cdot B$  即误差信号,其中  $A$ 、 $\epsilon$ 、 $B$  皆为正数,故误差信号的符号由直流偏置电压关于波长的斜率  $\epsilon$  决定。根据微环的直流偏置电压关于波长的特性可知:误差信号小于 0,说明直流偏置电压过小,此时微环的谐振波长小于目标信号波长,应增加加热功率来锁定目标信号波长;误差信号大于 0,说明直流偏置电压过大,此时则应减小加热功率来锁定目标信号波长。

在局部锁定阶段,基于数字微扰算法锁定波长的流程图如图 4 所示。首先,基于最佳直流偏置电压数字值即全局最佳加热功率点对应的电压数字值构造微扰信号数字值数组  $V_{\text{Dither}}[i] = A \cdot \sin(\frac{360^\circ}{i_{\text{max}}} \frac{\pi}{180} i)$ ,其中:  $A$  应尽可能小,以避免影响直流偏置电压对微环的热光调制效果;  $i$  是点数,  $i$  从 0 逐渐增大至  $i_{\text{max}}$ ,以保证一个完整的正弦周期;  $\frac{\pi}{180}$  是角度转化为弧度的常数。微扰信号数字值数组加上全局最佳直流偏置电压数字值  $X_m$  即为该次局部锁定过程中的微扰信号数组  $V_{x,\text{dither}}[i] = X_m + V_{\text{Dither}}[i]$ 。其次,将构造的微扰信号数字值数组依次输出到数模转换器(DAC)上。经热调驱动电路放大,DAC 数字值作用于微环加热器。改变 DAC 数字值后,直通端光信号经过光电探测器转换为光电压信号,再由模数转换器(ADC)转换为数字信

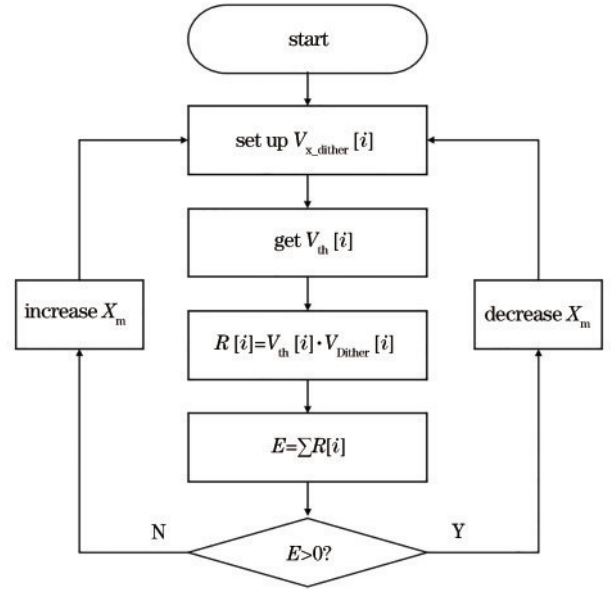


图 4 基于数字微扰算法锁定波长的流程图

Fig. 4 Flow chart of wavelength locking based on digital perturbation algorithm

号,从而得到直通端光电压数组  $V_{\text{th}}[i]$ 。最后,将直通端光电压数组  $V_{\text{th}}[i]$ 与微扰信号数字值数组  $V_{\text{Dither}}[i]$ 相乘得到混合信号  $R[i]$ ,对混合信号进行求和,得到混合信号的直流部分即误差信号  $E$ 。误差信号小于 0,说明直流偏置电压过低,导致微环的谐振波长位于目标信号波长的左边,此时需要增加直流偏置电压数字值;误差信号大于 0,说明直流偏置电压过高,导致微环的谐振波长位于目标信号波长的右边,此时需要减小直流偏置电压数字值。不断重复上述步骤,改变全局最佳直流偏置电压数字值  $X_m$  来实现对目标信号波长的实时稳定锁定。

### 3 实验验证与结果分析

#### 3.1 电路设计与实验平台

基于差分进化和数字微扰算法的硅基微环谐振器波长锁定系统分为输出光功率监测模块、微处理器和热调驱动模块。输出光功率监测模块实现对微环输出光功率的监测,微环输出端光信号经过一个光电二极管(PD)线性转换(0.8 A/W)为电流信号,电流信号通过运放 OPA277 搭建的电流转电压电路转换为电压信号。由于光电二极管输出是负电流信号,转换完的电压信号也为负电压信号,负电压信号经过运放 OPA277 搭建的反向比例运算放大电路转变为合适大小的正电压信号;正电压信号经过运放 OPA277 搭建的二阶有源低通滤波电路滤除高频噪声,滤波后的信号经过 16 位 ADC 芯片 ADS8860 转换为数字值,该芯片的最大探测电压为 3 V,探测精度为 46  $\mu\text{V}$ ,ADC 经过串行外设接口(SPI)与微处理器进行数据交换。实验中,选用 STM32F407ZGT6 微处理器,其主频达到

168 MHz, 适用于数字信号处理和工业控制领域。微处理器根据编写的控制算法对探测到的输出光功率数字值进行存储和处理, 并对热调驱动模块进行控制。热调驱动模块对微加热器的加热功率进行放大, 16 位 DAC 芯片 DAC8563 经过 SPI 与微处理器进行通信并输出电压信号, 电压信号经过运放 OPA277 搭建的同相比例运算放大电路增强带负载能力, 由此控制微加热器的加热功率。

实验平台如图 5 所示。单波长光信号经六维调节架调整, 经入射光栅耦合进入直波导, 光在直波导继续传播并与微环耦合, 最后经过出射光栅耦合出直波导。在传输过程中, 单个耦合光栅的耦合损耗约为  $-7$  dB, 整体耦合损耗约为  $-14$  dB。从输出端口出来的光经过 99:1 的分光器, 99% 的输出端口光信号为通信用光信号, 1% 为锁定用光信号并接入控制板。在 Keil 集成环境中以库函数的方式编写控制板的算法程序, 通过 DAP 仿真器与控制板下载、调试。图 5 右上角为显微镜下的微环结构, 微环的直径为  $20\ \mu\text{m}$ , 微加热器阻值为  $780\ \Omega$ 。微环上集成的微加热器焊盘引线到电路板, 控制板通过软排线连接引线板来控制微加热器的加热功率。另外, 在芯片底部安装了半导体制冷器 (TEC) 来模拟环境温度波动干扰。

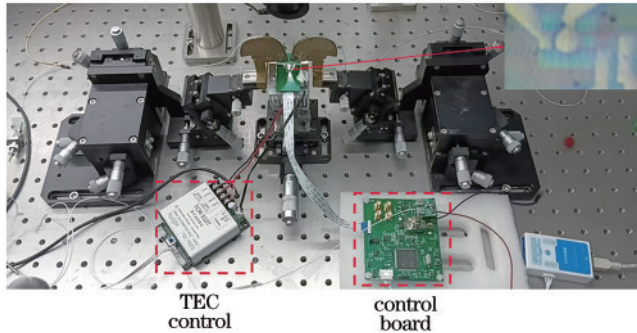


图 5 实验平台实物图

Fig. 5 Physical drawing of experimental platform

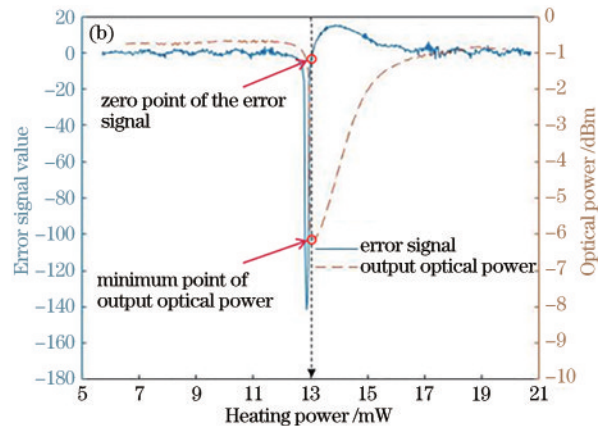
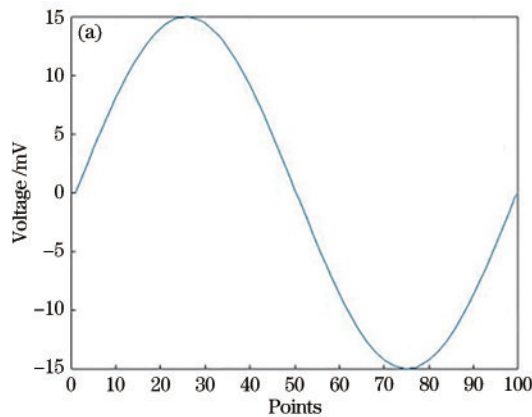


图 7 基于数字微扰算法的波长锁定实验结果。(a) 完整周期正弦微扰数字信号; (b) 误差信号和输出光功率随加热功率的变化  
Fig. 7 Wavelength lock experimental results based on digital perturbation algorithm. (a) Full-cycle sinusoidal perturbation digital signal; (b) variation of error signal and output optical power with heating power

### 3.2 控制算法的实验结果

在全局搜索阶段基于差分进化算法搜索最佳加热功率的实验中, 初始状态下微环的谐振波长为  $1548.2\ \text{nm}$ , 目标信号波长为  $1550\ \text{nm}$ , 最大加热功率为  $30\ \text{mW}$ 。在 MATLAB 软件中优化算法中的参数后, 将初始加热功率种群数量设置为 15, 将最大进化次数设置为 30, 将变异因子  $F$  设置为 0.3, 将交叉因子  $C$  设置为 0.5。图 6 所示为 500 次实验搜索到全局最佳加热功率所需要的进化次数分布直方图。大部分的实验只需要进化约 7 代即可搜索到全局最佳加热功率, 500 次实验的平均进化次数为 8.4 次, 平均搜索次数则为 128 次。

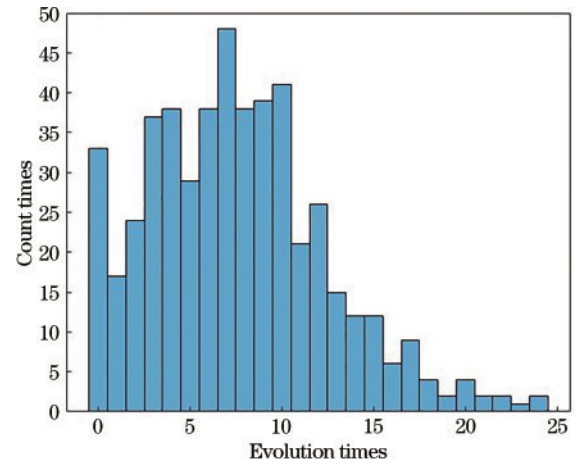


图 6 基于差分进化算法搜索最佳加热功率的 500 次实验的进化次数

Fig. 6 Evolution times of 500 experiments based on differential evolution algorithm to search the best heating power

在局部锁定阶段基于数字微扰算法进行波长锁定的实验中, 完整周期正弦微扰数字信号如图 7(a) 所示。将完整周期正弦微扰数字信号分为 100 个点, 将幅值设置为  $15\ \text{mV}$ , 一次误差解调算法的周期为  $5\ \text{ms}$ 。解调出来的误差信号及输出光功率与加热功率的关系

如图 7(b) 所示, 误差信号是一个反对称信号, 并且误差信号零点对应的加热功率与输出光功率最小值对应的加热功率对齐。

### 3.3 实验结果

基于上述硬件电路和反馈控制算法, 对比传统步进扫描和基于差分进化算法的搜索结果, 实验结果如图 8 所示。在 0~20 ms (阶段 1) 开展传统步进扫描搜索最佳加热功率实验, 将步长设置为 0.03 mW, 将步数设置为 1000, 将最大加热功率设置为 30 mW。在 20~22.4 ms (阶段 2) 开展基于差分进化算法搜索最佳加热功率实验, 在 22.4 ms 搜索到全局最佳加热功率。受到工艺误差和环境温度的影响, 微环谐振波长与目标信号波长的偏移可能处于任意位置, 即传统步进扫

描可能在任何时候搜索到最佳加热功率, 可认为传统步进扫描搜索全局最佳加热功率所需的平均搜索次数为 500 次, 而实验分析得到, 基于差分进化算法搜索全局最佳加热功率所需的平均搜索次数约为 128 次, 即在相同的硬件环境下, 提出的方案的搜索速度提升了约 4 倍。在 22.4~120 ms (阶段 3) 基于数字微扰算法进行波长锁定, 输出光功率在 22.4~70 ms 逐渐趋于最小值状态, 随后光功率值在最小值附近波动, 这说明在这段时间内微环的谐振波长始终与目标信号波长处于锁定状态。在锁定过程中, 数字微扰信号引起的加热功率波动约为 0.2 mW, 经测试, 微环的谐振波长偏移与加热功率变化的关系为 0.1 nm/mW, 则基于数字微扰算法的波长锁定的精度约为 20 pm。

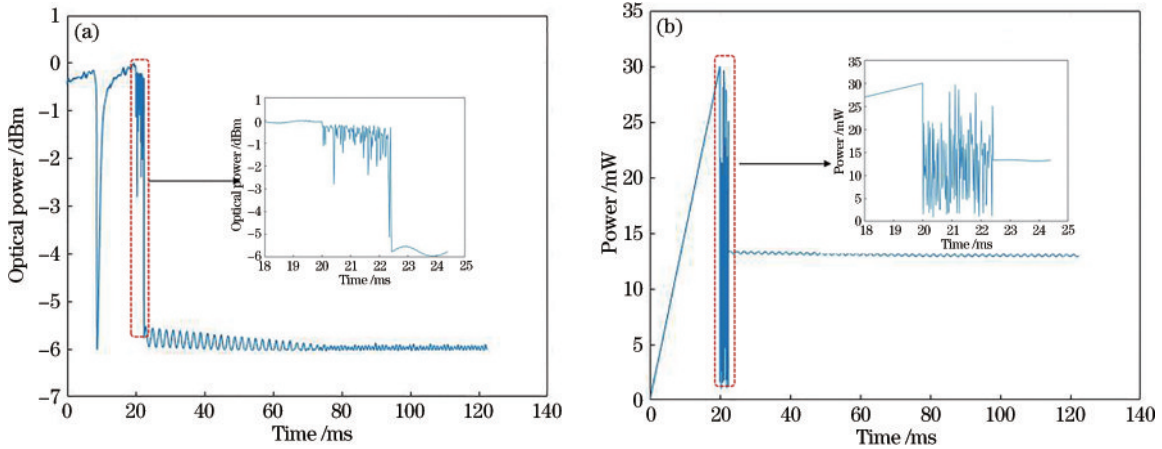


图 8 3 个阶段下输出光功率和加热功率的变化。(a) 输出光功率; (b) 加热功率

Fig. 8 Changes in output optical power and heating power in 3 stages. (a) Output optical power; (b) heating power

为了进一步验证算法的锁定稳定性, 在微环待测系统下使用 TEC 温控模块来模拟 400 s 内的从 25 °C 到 30 °C 的环境温度变化, 微环的谐振波长随温度变化的关系如图 9(a) 所示。环境温度变化 5 °C, 谐振波长右移 0.5 nm。整个过程中加热功率的变化情况如图 9(b) 所示, 0~50 s, 环境温度上升导致微环谐振波

长向右移动, 加热功率下降使微环的谐振波长左移, 由此抑制环境温度上升带来的波长偏移; 50~150 s, 环境温度下降导致微环谐振波长向左移动, 加热功率增大使微环的谐振波长右移, 由此抑制环境温度下降带来的波长偏移。在 200~400 s, 环境温度相对稳定, 加热功率略微变化以抑制环境温度变化导致的波长漂

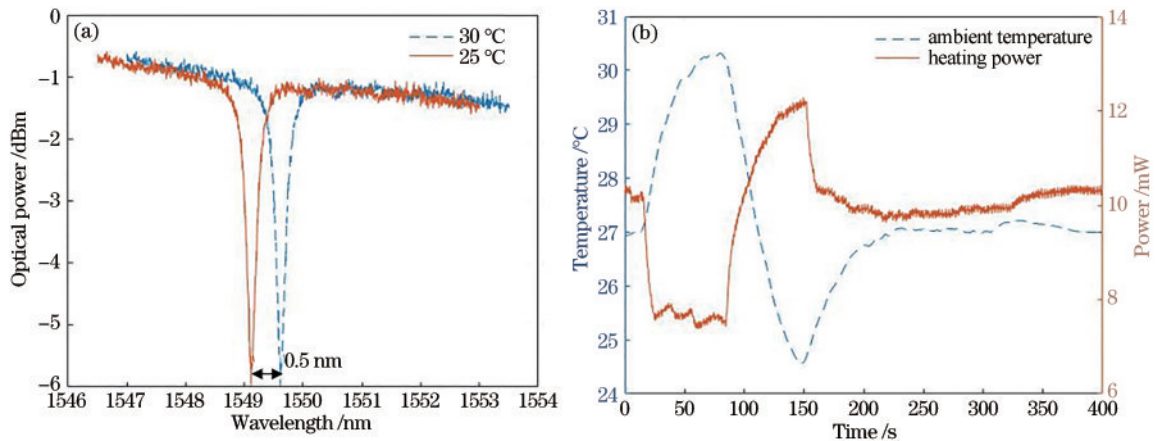


图 9 环境温度变化 5 °C 的实验结果。(a) 微环谐振波长随温度的变化; (b) 0~400 s 环境温度变化 5 °C 时加热功率的变化

Fig. 9 Experimental results with ambient temperature change of 5 °C. (a) Variation of micro-ring resonator wavelength with temperature; (b) change of heating power when ambient temperature changes 5 °C in 0-400 s

移。在整个实验过程中,加热功率始终随环境温度波动,进而保证长时间、稳定的波长锁定。

## 4 结 论

设计了一套基于数字信号处理的硅基微环谐振器波长锁定控制系统,以微环输出光功率为监测系统变量,在全局搜索阶段基于差分进化算法来定位目标信号波长。与传统的步进扫描搜索定位目标信号波长的方案相比,本方案的搜索速度提升了约 4 倍。在局部锁定阶段基于数字微扰算法解调出误差信号,根据误差信号的符号增减加热功率来实时锁定目标信号波长。该方案可在微处理器内对微扰信号的幅值、周期进行定义并对输出光功率数字信号进行处理,相比在模拟电路上使用抖动信号锁定的方式更为灵活。在 0~400 s,环境温度变化 5 °C 的条件下,该方案依然可以保持对目标波长的实时锁定,这说明该方案在实际应用中可抑制环境温度波动带来的波长偏移。另外,提出的方案在多硅基微环光子集成系统中依然适用。

## 参 考 文 献

- [1] Won R. Integrating silicon photonics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 498-499.
- [2] Ye W N, Xiong Y L. Review of silicon photonics: history and recent advances[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(16): 1299-1320.
- [3] Bogaerts W, De Heyn P, Van Vaerenbergh T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47-73.
- [4] Rabbani-Haghighi H. New materials and device architectures for organic solid-state lasers[D]. Paris: Université Paris-Nord-Paris XIII, 2011.
- [5] Roshan-Zamir A, Wang B H, Telaprolu S, et al. A 40 Gb/s PAM4 silicon microring resonator modulator transmitter in 65nm CMOS[C]//2016 IEEE Optical Interconnects Conference (OI), May 9-11, 2016, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 8-9.
- [6] Logan D F, Velha P, Sorel M, et al. Defect-enhanced silicon-on-insulator waveguide resonant photodetector with high sensitivity at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(20): 1530-1532.
- [7] Zhu Q M, Jiang X H, Cao R Y, et al. Multi-stage wavelength locking in a  $4 \times 4$  silicon electro-optic switch based on dual-ring resonators[C]//2019 24th Opto Electronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 7-11, 2019, Fukuoka, Japan. New York: IEEE Press, 2019.
- [8] Timurdogan E, Biberman A, Trotter D C, et al. Automated wavelength recovery for microring resonators [C]//CLEO: Science and Innovations 2012, May 6-11, 2012, San Jose, California, USA. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2012: CM2M.1.
- [9] Alipour P, Hosseini E S, Eftekhar A A, et al. Athermal performance in high-Q polymer-clad silicon microdisk resonators[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3462-3464.
- [10] Guha B, Preston K, Lipson M. Athermal silicon microring electro-optic modulator[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2253-2255.
- [11] Zhu X L, Padmaraju K, Luo L W, et al. Fast wavelength locking of a microring resonator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(23): 2365-2368.
- [12] Mak J C C, Sacher W D, Mikkelsen J C, et al. Automated calibration of high-order microring filters[C]//CLEO: Science and Innovations 2015, May 10-15, 2015, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2015: SW1N.2.
- [13] Gatdula R, Kim K, Melikyan A, et al. Simultaneous four-channel thermal adaptation of polarization insensitive silicon photonics WDM receiver[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27119-27126.
- [14] Zortman W A, Lentine A L, Trotter D C, et al. Bit-error-rate monitoring for active wavelength control of resonant modulators[J]. *IEEE Micro*, 2013, 33(1): 42-52.
- [15] Cox J A, Lentine A L, Trotter D C, et al. Control of integrated micro-resonator wavelength via balanced homodyne locking[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 11279-11289.
- [16] DeRose C T, Watts M R, Trotter D C, et al. Silicon microring modulator with integrated heater and temperature sensor for thermal control[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2010: CThJ3.
- [17] Padmaraju K, Logan D F, Zhu X L, et al. Integrated thermal stabilization of a microring modulator[J]. *Optics express*, 2013, 21(12): 14342-14350.
- [18] Zhu Q M, Qiu C Y, He Y, et al. Self-homodyne wavelength locking of a silicon microring resonator[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36625-36636.
- [19] 朱庆明. 基于波长控制的谐振型硅基光开关及光滤波器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.  
Zhu Q M. Research on resonant silicon-based optical switch and optical filter based on wavelength control[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.