

DOI:10.16136/j.joel.2023.02.0331

多波长相干光注入锁定的波长跟踪自动化控制

梁英, 于晋龙*, 李天宇, 王菊, 王子雄

(天津大学 电气自动化与信息工程学院 光纤通信实验室, 天津 300072)

摘要: 本文基于全网光同步的超密集波分复用无源光网络 (ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network, UDWDM-PON), 对多波长注入锁定的稳定性进行了研究, 提出了一种波长跟踪控制方法: 用光电探测器 (photo-diode, PD) 接收从激光器 (slave laser diode, SLD) 的光信号并进行滤波与检波处理, 所得信号用于建立 SLD 参数分布模型并进行线性扫描控制。该方法经基于 LabVIEW 程序控制与数据采集 (data acquisition, DAQ) 的仪器实验验证后, 对相关驱动电路进行了模块化改良, 采用基于微控制单元 (microcontroller unit, MCU) 的控制, 使得该控制模块具有更高控制精度、更易封装的特点, 从而能更好应用于多波长光的多路注入锁定当中。本文采用主动锁模激光器 (mode-locked laser, MLL) 作为多波长光源, 对双路 SLD 的注入锁定进行了验证与对照实验, 结果表明: 在相同注入条件下, 采用波长跟踪控制模块的注入锁定组具有更佳稳定性。

关键词: 光通信; 注入锁定; 半导体激光器; 光频率梳

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)02-0190-10

Automatic wavelength tracking control for multi-wavelength coherent optical injection locking

LIANG Ying, YU Jinlong*, LI Tianyu, WANG Ju, WANG Zixiong

(Laboratory of Optical Fiber Communications, School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the wavelength synchronous ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network (UDWDM-PON), a wavelength tracking control method based on signal detected by photoelectric detector (PD) for multi-wavelength optical injection locking is proposed. Specifically, the distribution model of the slave laser (SLD) parameter is established by filtering and detecting the output signal from PD, which is used for the linear scanning control. After the confirmatory experiment with LabVIEW control and data acquisition (DAQ), the control module is reformed by microcontroller unit (MCU) and driving circuit to improve the control precision and encapsulation, so that it can be well applied in multi-channel injection locking. Two-channel injection locking test with two distribute-feedback laser is compared, which using the actively mode-locked laser (MLL) as a multi-wavelength source. It turned out that the slave laser controlled by wavelength tracking module showed better stability under the same injection conditions.

Key words: optical communication; injection locking; semiconductor lasers; optical frequency comb

0 引言

多波长光源, 特别是光频率梳, 在宽光谱范围内提供均匀间隔的相干光分量, 被广泛应用于光

通信、距离测量、遥感技术等多方面。其中在超密集波分复用 (ultra-dense wavelength division multiplexing, UDWDM) 技术的应用当中, 光频率梳相较于采用激光器阵列的传统方式, 具备更高的频

* E-mail: liangying317@163.com

收稿日期: 2022-05-07 修订日期: 2022-06-08

基金项目: 国家自然科学基金 (61775162, 61427817) 资助项目

谱效率、更佳的带宽灵活性以及更高效的光纤非线性补偿,对组建未来大容量、灵活栅格光网络有更大潜力^[1-6]。与之相应的,采用解复用器与放大器的方式^[7]进行波长提取不仅不利于系统集成,也将不可避免地降低传输信噪比,而注入锁定的方法则能很好地克服这一问题。如 LIU 等^[1]通过对可调谐数字超模分布式布拉格反射激光器(digital supermode distributed Bragg reflector, DS-DBR)注入锁定实现了基于频率梳的可调谐发射机;LU 等^[6]则采用基于直调垂直腔面发射激光器(vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)的注入锁定实现多路并行通信,单路速率达到 14 Gb/s。结合注入锁定在生成毫米波与光载微波方面的应用,基于全网光同步的超密集波分复用无源光网络(ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network, UDWDM-PON)方案被提出^[8,9],其中采用锁模激光器(mode-locked laser, MLL)作为波长基准,对多路从激光器(slave laser diode, SLD)分别进行注入锁定以实现用户波长分配及信号上变频,具有窄间隔、低成本的优势;但与此同时,光频率梳作为波长基准具有频道间隔相对稳定、整体波长会因环境因素整体漂移的特点,这种漂移在弱注入条件下会导致失谐量超出锁定范围,为系统的传输质量带来恶劣影响。

另一方面,激光器的注入锁定技术自 20 世纪 80 年代起在光通信领域得到了广泛应用,有众多学者针对其动态特性与应用进行了研究^[10]。其中, DENG 等^[11]采用 VCSEL 的注入锁定技术构建了速率 1.25 Gb/s 的四路正交幅度调制(4-quadrature amplitude modulation, 4QAM)-正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)无源光网络;GAN 等^[12]对调制光高阶分量注入法布里-珀罗激光器(Fabry-Pérot laser diode, FP-LD)的锁定特性进行了分析和仿真,并以此产生毫米波;KRSTIĆ 等^[13]针对 FP-LD 注入锁定的双稳态特性进行了研究,并讨论了 SLD 双稳态之间的切换时间;HUANG 等^[14]利用远程注入锁定分布式反馈激光器(distributed feedback laser, DFB)作为双工收发器实现了无线光通信的设计。对于弱注入功率条件下的注入锁定, KAKARLA 等^[15]出于对自由空间光通信中相位敏感放大器(phase sensitive amplifier, PSA)泵浦光恢复的考虑,采用掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)与电锁相环(phase locked loop, PLL)实现了注入功率最低达到 -65 dBm 的注入锁定;同样采用 PLL, WU 等^[16]采

用注入锁定对间隔为 250 MHz、注入功率比为 -70 dB 的光频率梳进行了波长分离;KIM 等^[17]则通过光注入锁定(optical injection locking, OIL)-光锁相环(optical phase-lock loop, OPLL)结构对注入功率比为 -56 dB 的信号进行了再生放大。尽管 OPLL 极大提高了弱注入锁定的相位稳定,其反馈控制需要高速电子器件与短环路长度,因而更适用于极窄的锁定带宽,否则会大大增加控制成本和复杂性。

本文针对光频率梳弱注入条件下的注入锁定提出了一种波长跟踪控制方法:基于光电探测器(photoelectric detector, PD)、检波处理与数据采集(data acquisition, DAQ)构成的反馈,采用程序控制 SLD 的工作波长,以达到跟随注入波长锁定的目的。文中首先对该方法进行了原理分析并展示了可行性实验,而后分别实现了以 LabVIEW 控制为核心的控制环路,以及以微控制单元(micro-controller, MCU)为核心的控制电路。通过验证与对比实验可以认为,该方法相较 PLL 结构更适用于具有较大锁定带宽并追求更低实现成本的应用场合。此外,该方法对于因环境变化导致的注入光波长偏移现象也表现出较好的跟踪控制效果。

1 基本原理

1.1 注入锁定原理分析

图 1 展示了一套主从式激光器注入锁定的简化框图,其中主激光器(master laser diode, MLD)提供外部注入光并经由偏振控制器(polarization controller, PC)调整偏振方向,而后由 1 口通过光环行器 2 口注入 SLD,其结果由光环行器 3 口输出;当注入满足一定条件时,SLD 会与 MLD 同步并工作在相同波长,即进入注入锁定状态。事实上,通过向半导体激光器速率方程引入注入光强度与相移进行小信号分析,可将 SLD 的状态数值表示为^[10]:

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{1}{2}g[N(t) - N_{th}]A(t) + \kappa A_{inj} \cos \phi(t), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2}\{g[N(t) - N_{th}]\} - \kappa \frac{A_{inj}}{A(t)} \sin \phi(t) - \Delta\omega, \quad (2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = J - \gamma_N N(t) - \{\gamma_P + g[N(t) - N_{th}]\}A(t)^2, \quad (3)$$

式中, $A(t)$ 为光子数 $S(t)$ 的归一化振幅: $A^2(t) = S(t)$; $\phi(t)$ 为 SLD 内部光场与注入光的相位差,即: $\phi(t) = \phi_s(t) - \phi_{inj}(t)$, 其中 $\phi_s(t)$ 与 $\phi_{inj}(t)$ 分别为 SLD

与MLD的光场相位; $\Delta\omega=\omega_{\text{inj}}-\omega_s$ 为SLD自由振荡频率(ω_s)与注入光频率(ω_{inj})之差; $N(t)$ 为SLD的载流子数;其余参数: g 、 N_{th} 、 κ 、 A_{inj} 、 α 、 γ_N 、 γ_P 、 J 分别为增益系数、载流子数量阈值、耦合系数、注入光振幅、线宽增强因子、载流子复合速率、光子衰减速率和归一化泵浦电流。

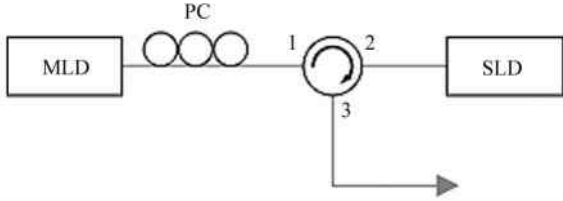


图1 注入锁定简化框图

Fig. 1 Simplified block diagram for injection locking

对式(1)–(3)求得稳态解,可将稳定注入锁定状态下的频率范围表示为:

$$-\kappa \sqrt{1+\alpha^2} \sqrt{\frac{P_{\text{inj}}}{P_o}} = \Delta\omega_{\text{min}} < \Delta\omega < \Delta\omega_{\text{max}} = \kappa \sqrt{\frac{P_{\text{inj}}}{P_o}}, \quad (4)$$

式中, P_o 与 P_{inj} 分别为SLD输出功率及注入光功率,为便于描述,用 $\Delta\omega_{\text{LR}}=\Delta\omega_{\text{max}}-\Delta\omega_{\text{min}}$ 表示该注入条件下SLD的锁定带宽。由式可知,SLD的锁定范围主要取决于耦合系数 κ 、线宽增强因子 α 及注入功率比 P_{inj}/P_o 。其中 κ 与 α 均由SLD自身特性决定,因而对于特定参数的SLD($\alpha=3$, $L=300\text{ }\mu\text{m}$, $r=0.33$, $n_g=3.3$),可根据注入功率比划分出锁定范围,如图2所示。图中阴影部分为稳定注入锁定范围,当注入功率比较大(如 -20 dB 附近)时,SLD的锁定带宽较大(约 11.7 GHz)且随注入比的增加而增大;当注入功率比较小(如 -40 dB 附近)时,SLD的锁定带宽较小(约 1.2 GHz)且随着注入比的减小而急遽减小,

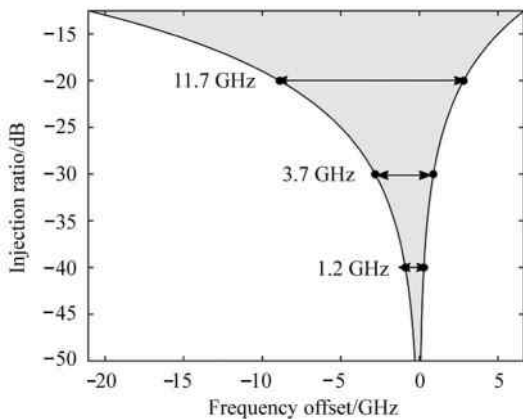


图2 特定从激光器的锁定范围

Fig. 2 Locking range of a specific slave laser

甚至当注入功率比为 -50 dB 时,该激光器的注入锁定频率带宽仅有 370 MHz 。

事实上,UDWDM-PON系统方案中的多波长光源在单一信道上提供弱注入的功率条件,且通过注入锁定实现目标波长的选择与分离也需求较窄的锁定带宽;然而与此同时,对系统提供频率梳的主光源虽具有稳定的信道间隔,整体却存在缓慢的波长漂移。当信道功率相对稳定时,已被锁定的SLD能自行跟随缓慢漂移的注入光改变输出波长,但当频率偏移继续增大并超出锁定带宽后,SLD便会失去锁定状态,继而造成通信质量的严重恶化。因此,针对该系统中的注入锁定过程进行自动化控制十分必要。

1.2 等间隔多波长光的注入锁定特性

对频率间隔一定的多波长光信号的注入锁定进行分析,首先将注入光简化为仅有 ω_{-1} 、 ω_0 、 ω_{+1} 3个相邻的频率分量,如图3所示,则此注入光可表示为:

$$E_{\text{inj}} = E_{-1} e^{j\omega_{-1}t} + E_0 e^{j\omega_0t} + E_1 e^{j\omega_1t}, \quad (5)$$

式中, E_{-1} 、 E_0 、 E_1 分别为 ω_{-1} 、 ω_0 、 ω_{+1} 频率分量的光场振幅,因各波长分量间相位差固定,式中忽略了对

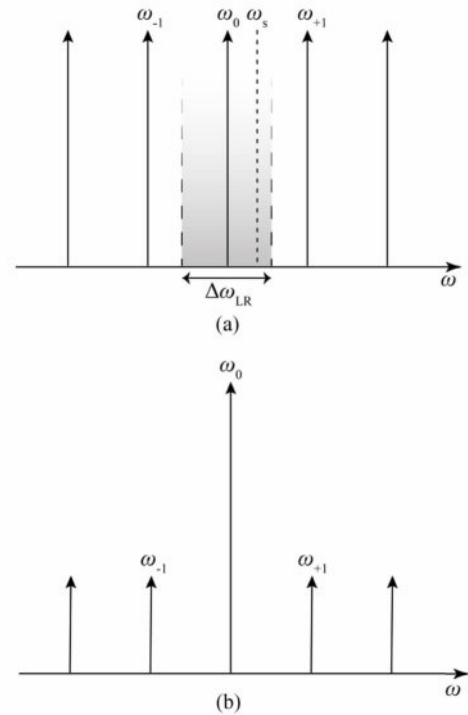


图3 多波长注入示意图:(a) 多波长注入频率梳;

(b) 从激光器注入锁定后的输出频谱

Fig. 3 Schematic diagram of multi-wavelength injection:

(a) Spectrum of multi-wavelengths;

(b) Output spectrum while SLD injection locked

相位差的表示。当 ω_0 作为目标频率与 SLD 发生注入锁定时,以 G 作为场强增益系数,则此时 SLD 输出的光场表现为注入光与放大后工作光场的叠加,即:

$$\begin{aligned} E_{\text{output}} &= E_{\text{inj}} + E_{\text{SL}} = \\ E_{-1} e^{j\omega_{-1}t} + (1 + G e^{j\Delta\Phi_L}) E_0 e^{j\omega_0t} + E_1 e^{j\omega_1t}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\Delta\Phi_L$ 为锁定状态下光信号在 SLD 中的相移,可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_L &= \arcsin\left(-\frac{\Delta\omega}{\kappa \sqrt{1+\alpha^2}} \sqrt{\frac{P_o}{P_{\text{inj}}}}\right) - \arctan\alpha = \\ \arcsin\left(\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\text{min}}}\right) - \arctan\alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

若使用 PD 对 SLD 输出光进行光电转换,设 $E_x = E_{-1} = E_1$ 且各分量的频率间隔为 $\Delta\Omega$,则 PD 处得到的归一化光电流可表示为:

$$\begin{aligned} I_{\text{PD}} &= E_{\text{output}} E_{\text{output}}^* = \\ 2E_x^2 &+ (1 + 2G\cos\Delta\Phi_L + G^2) E_0^2 + \\ 4(1 + G\cos\Delta\Phi_L) E_x E_0 &\cdot \cos\Delta\Omega t + \\ 2E_x^2 \cos(2\Delta\Omega t), \end{aligned} \quad (8)$$

其中包含直流、频率为 $\Delta\Omega$ 与 $2\Delta\Omega$ 的分量,经过滤波得到 $\Delta\Omega$ 分量:

$$I_{\Delta\Omega} = 4(1 + G\cos\Delta\Phi_L) E_x E_0 \cdot \cos\Delta\Omega t, \quad (9)$$

表现为包络为 $4(1 + G\cos\Delta\Phi_L) E_x E_0$ 的正弦波信号。

而当 SLD 与注入光频率失谐量过大并超出锁定范围时,目标频率 ω_0 处的光没有经过注入锁定放大,并且 SLD 处于自由振荡状态时,其输出不与注入光相干,无法通过上述方法得到相应电信号。由此可知,SLD 输出的信号中包含 $\Delta\Omega$ 分量,对该分量进行包络检测,在注入锁定状态时因 $I_{\Delta\Omega}$ 表现为较大值,失去锁定时表现为较小值,从而判断 SLD 是否工作于注入锁定状态,对 SLD 进行控制调整。如图 4 所示的实验对此进行了验证:多波长注入光的生成采用马赫-曾德尔调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 对可调激光器 (tunable laser diode, TLD) 进行正弦波强度调制,光载波及上下边带频率间隔为 $\Delta f_m = \Delta\Omega/2\pi$ 。该调制信号通过光环行器与 PC2 注入 SLD 后,由环形器 3 口输出并使用 PD 进行探测,得到的电信号首先通过窄带滤波器 (band pass filter, BPF) 滤得 $\Delta\Omega$ 频率分量信号,而后通过检波器 (detector) 与低通滤波器 (low pass filter, LPF) 获取该分量的幅值电压。该电压值经过 DAQ 录入计算机进行统计处理,而 SLD 的工作状态则由计算机输出的控制信号调节。

实验中采用了 Gooch & Housego 台式激光控

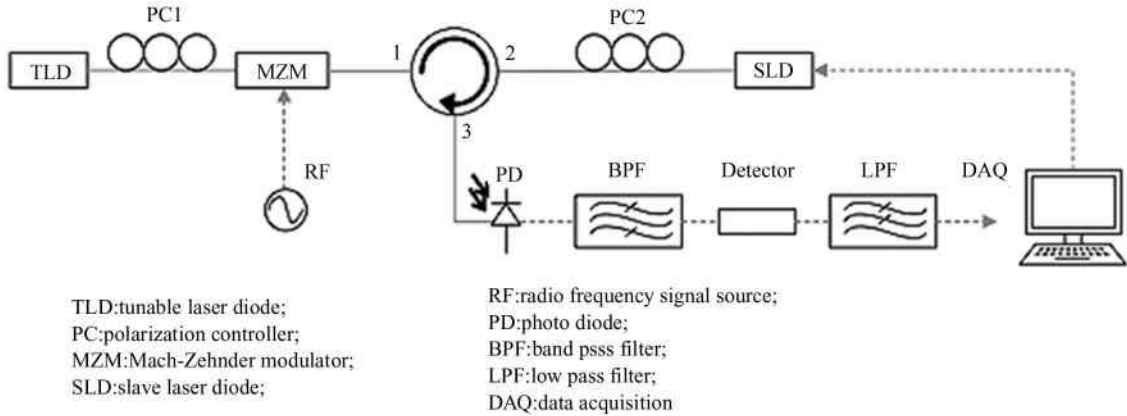


图 4 调制信号的注入锁定实验示意图

Fig. 4 Schematic of injection locking experiment of modulated signal

制器 EM595 提供对 SLD DFB 的驱动,该控制器支持配套 LabVIEW 与数据线对激光器工作参数进行编程控制。当 TLD 工作波长为 1 553.88 nm,正弦调制信号频率为 $\Delta f_m = \Delta\Omega/2\pi = 10$ GHz,SLD 工作温度为 24.8 °C 时,通过调节工作电流改变 SLD 工作波长。结合所用 DFB 激光器的参数进行换算,可

测得不同注入功率 (P_1) 下的锁定范围,如图 5 所示。

其中, V_{DAQ} 为频率 $\Delta\Omega$ 处经滤波与检波处理后得到的检测值, P_1 为包含光载波与边带分量的注入光总功率,调节过程中 SLD 输出功率 P_o 维持在 7.8 dBm 附近。可以看出,当 SLD 稳定工作于注入

锁定状态时, DAQ 采集到了明显高于非锁定状态下的电压值 V_{DAQ} , 且 V_{DAQ} 随注入功率变化的分布也符合 SLD 锁定范围的变化特性(即注入功率比越高, 锁定范围越大, 且当 $\alpha \neq 0$ 时, 锁定范围呈非对称性); 与此同时, 虽然 V_{DAQ} 在锁定范围内因相移变化产生波动, 但该波动随注入比的减小而减小, 仍表现出明显高于非锁定状态下的取值。

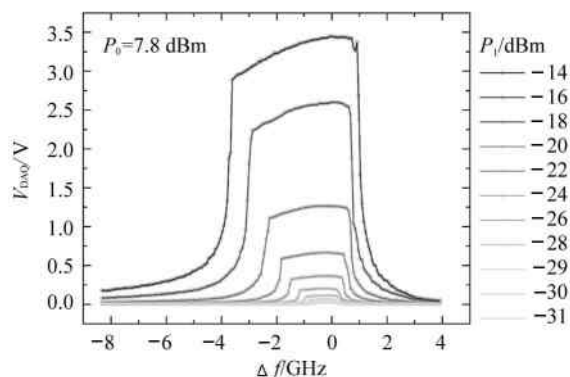


图5 工作温度 24.8 °C, 不同注入功率 P_1 时测得的 $I_{\Delta\Omega}$ 包络值 V_{DAQ} 的分布

Fig. 5 Distribution of V_{DAQ} measured at 24.8 °C while the injection power is P_1

因此, 对工作在特定注入功率和工作温度的 SLD, 都可通过检测其 V_{DAQ} 来判断工作状态, 若测定值符合锁定状态下的记录范围, 则认为 SLD 仍工作在锁定状态; 若测定值明显低于应有的 V_{DAQ} 值, 则认为 SLD 失锁, 需要控制其工作参数, 使 SLD 再次进入锁定状态。

1.3 波长跟踪控制算法设计

基于 1.2 中的实验与分析, 采用 LabVIEW 程序设计与 DAQ 采集、EM595 驱动控制相结合, 可构建出基于 SLD 数值反馈的控制系统。其中, 激光器当前的工作参数以及 DAQ 采集得到的电压值 V_{DAQ} 作为控制程序的输入参数, 而激光器工作设置参数则相应作为控制程序的输出参数, 以达到控制激光器调整锁定状态的目的; 另一方面, V_{DAQ} 的取值也同时受到注入条件影响, 假定工作环境对注入条件的影响极少出现突变的情况, 控制程序需要根据 SLD 之前锁定状态下的工作参数来推定当前 V_{DAQ} 的取值范围, 也需要在注入条件变化后对 V_{DAQ} 的估值进行更新。

采用比例积分微分 (proportional-integral-derivative, PID) 构建负反馈控制系统, 从而调节被控对象使其特征参数达到设定值一般是首要选择。然

而正如前文所说, V_{DAQ} 作为设定值本身与注入条件相关, 且 $V_{\text{DAQ}}-I_{\text{SLD}}$ 分布与图 5 相近, 并不适用于 PID 算法。综合考虑对目标 V_{DAQ} 峰值的控制需求与运算效率, 本文最终采用了电流扫描方法, 即基于 $V_{\text{DAQ}}-I_{\text{SLD}}$ 分布进行模型构建、参数跟踪、模型更新, 其调节过程如图 6 所示。

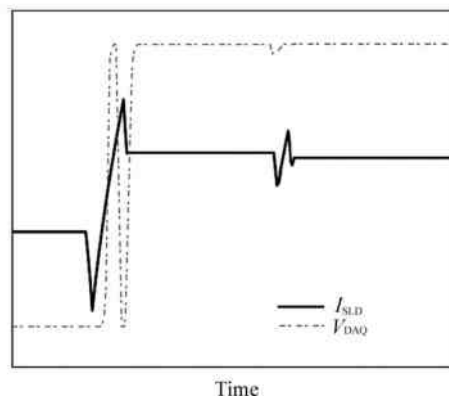


图6 电流扫描法控制示意图

Fig. 6 Schematic diagram of current scanning control

图中, 实线表示 SLD 工作电流 I_{SLD} , 虚线表示 DAQ 采集值 V_{DAQ} 。通过调节 SLD 的波长来调节失谐量, 有改变工作温度与工作电流两种方式, 前者对波长的可调范围较大但具有迟滞效应, 后者对波长可调范围较小但对注入功率比的影响较大; 然而另一方面系统光源波长会随时间在小范围内漂变, 因而对 SLD 波长的控制更追求效率而非范围, 并且在该范围下调节工作电流具备更高的调谐精度, 所以控制系统采用了一定温度范围内, 保持 SLD 工作温度不变而调节 SLD 工作电流的方式进行工作波长的控制。以图 6 为例, 一开始 SLD 处于失锁状态, DAQ 采集到 V_{DAQ} 极小值传达给控制程序; 因记录中并不存在已有 $V_{\text{DAQ}}-I_{\text{SLD}}$ 分布模型, 程序依据 SLD 性能参数通过设定工作温度与工作电流的方式对 SLD 进行初始设定范围内的波长扫描, 直到 SLD 工作在稳定的锁定状态, 则记录此时 SLD 的最佳锁定点, 并根据已有的工作电流扫描建立该注入条件下的分布模型; 当注入光发生小幅波动使 V_{DAQ} 值有所下降但 SLD 仍未彻底失锁时, 程序则依据已建立的分布模型重新设定较小的电流扫描范围, 继而再次找到最佳锁定点并更新分布模型。在这一算法实现过程中, 控制硬件设备对电流的扫描精度、以及 SLD 反馈值对波长调节的响应速率会直接影响控制效果。

2 实验与分析

2.1 基于 LabVIEW-DAQ 实现的控制系统

为验证 2.3 中基于电流线性扫描的控制算法的可行性,在图 4 所示的实验装置基础上进行了进一步实验。当工作温度为 24.38°C ,注入光总功率 P_1 为 -30 dBm 时,测得该 SLD DFB 的初始 $V_{\text{DAQ}}-I_{\text{SLD}}$ 分布如图 7 所示;TLD 初始工作波长为 1553.88 nm ,通过手动调节 TLD 波长(步进 $\pm 0.001\text{ nm}$)的方式测试波长跟踪控制效果,图 8 所示为 LabVIEW 所记录并显示的 SLD 状态变化过程。

图 8(a) 中,SLD 一开始处于初始注入条件下,依据控制程序首先以默认范围进行电流扫描(对应

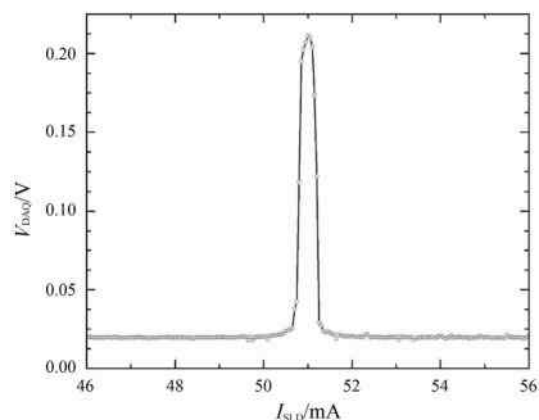


图 7 SLD 初始 $V_{\text{DAQ}}-I_{\text{SLD}}$ 分布

Fig. 7 Initial $V_{\text{DAQ}}-I_{\text{SLD}}$ distribution of SLD

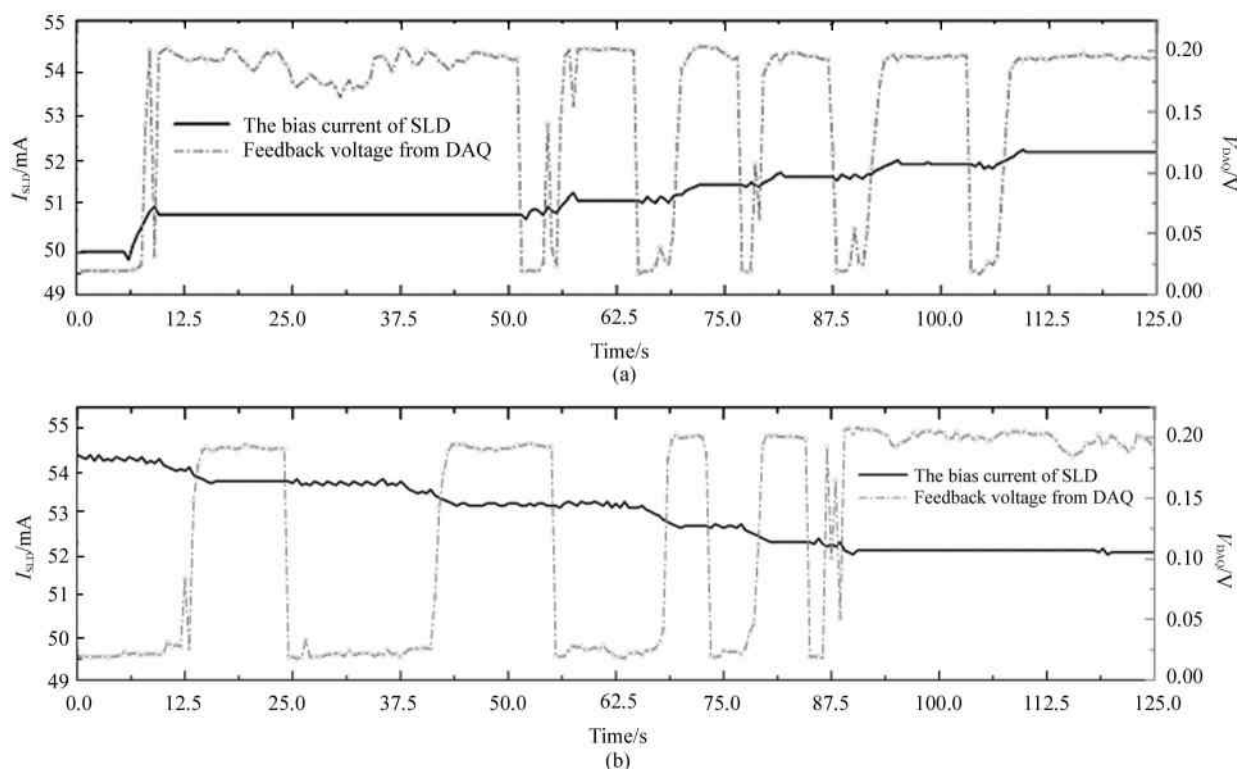


图 8 I_{SLD} 与 V_{DAQ} 随波长跟踪控制的变化:(a) TLD 波长增大;(b) TLD 波长减小

Fig. 8 The changes of I_{SLD} and V_{DAQ} with wavelength tracking control:(a) TLD redshifts;(b) TLD blueshifts

图 8(a) 中约 6—10 s 期间 I_{SLD} 的调节过程),如图 8(a) 所示初次扫描得到的最佳锁定点在 I_{SLD} 取值约 51 mA 处,因此根据当前获得的分布模型,SLD 的工作电流被控制在 51 mA ;而后随着 TLD 波长逐步增大, V_{DAQ} 在 $0.17-0.2\text{ V}$ 范围内发生波动但并没有骤然减小(约 12—51 s 期间),表明此时 SLD 仍工作在锁定状态,因此并没有通过 I_{SLD} 对 SLD 进行调节;随着 TLD 继续增大直到检测值 V_{DAQ} 明显降低(约 52 s 处),SLD 失去锁定状态,因之前分布模型已建

立并根据工作状态做出了调整,此处 I_{SLD} 的扫描范围相较于初始范围大大缩小(约 52—55 s 期间)并迅速将 SLD 工作电流控制在了 51.25 mA ;之后 TLD 继续逐步增大,每当注入光波长的变化导致 V_{DAQ} 值骤降即 SLD 失锁时,便会出现短暂的 I_{SLD} 调节波动,并随后将 I_{SLD} 控制在新的最佳锁定点使 V_{DAQ} 重回较大值。图 8(b) 中则是逐步减小 TLD 波长, V_{DAQ} 值因此产生波动, I_{SLD} 随之进行相应调节的过程。

由此可见该控制系统基本实现了波长跟踪控

制,且采用计算机运算与 DAQ 对控制的实现也具备很好的直观性,便于对控制算法及时做出调试,但与此同时这耗费了较高的实现成本、占用了极大的空间体积,无法直接应用到多路通信的注入锁定中去;另一方面,该系统对 SLD 电流调节的精度取决于 EM595 (± 0.05 mA),在弱注入条件下对 SLD 的波长调节并不够精确。因此该控制系统的实现需要进一步改进。

2.2 基于 MCU 与驱动电路实现的控制系统

根据 1.3 与 2.1 的内容,可将波长跟踪控制系统的功能归纳并模块化表述,优化改进后的系统功能如图 9 所示。在 2.1 的实验中,DAQ 和 EM595 部分模块承担了其中的模数转换(analog to digital converter, ADC)功能,将反馈信号采集并转换为数字信号后交由计算机程序处理;而计算机则充当了与 MCU 相同的角色,将经过控制算法运算后得到的结果传递给 EM595;EM595 本身则提供了数模转换(digital to analog converter, DAC)、电流驱动(current driver module)和温度驱动(temperature control module)功能,从而将控制信号传递给 DFB 激光器完成这一控制流程。

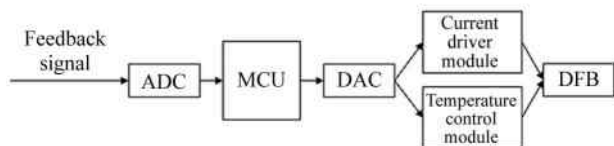


图 9 控制模块功能框图

Fig. 9 Function block diagram of the control module

综合以上所述的模块功能分别进行电路设计,得到如图 10 所示的控制模块硬件实现。其中反馈信号由 SMA (sub-miniature-A) 接口引入,微控制器模块围绕芯片 STM32 搭建并实现 ADC 与 DAC 功能,输出的模拟信号分别接入订制的电流驱动与温度控制电路,板上集成去耦合的 DFB 激光器减少链路损耗。与此同时 STM32 搭载的配套程序也进行了更新,其功能框图如图 11 所示,由 C 语言编写。

该模块不仅对占用体积与成本进行了优化,还从设计上提高了控制的精确度和稳定性。所用 DFB 具有 14—25 mA 的阈值电流,针对该型号激光器,模块可控驱动电流被设计为 30—60 mA,调节精度约为 $30/4096 \approx 0.007$ mA。

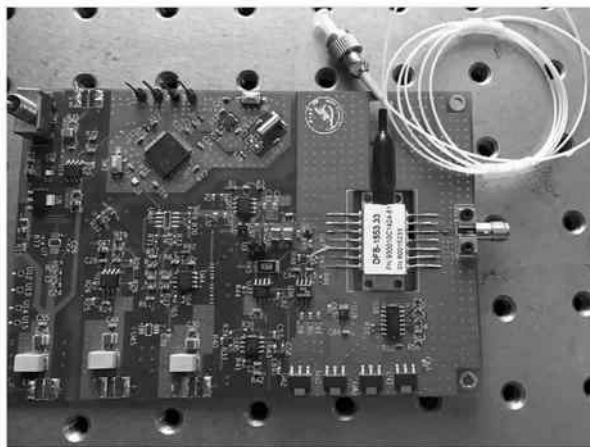


图 10 控制模块电路实现

Fig. 10 Circuit of the control module

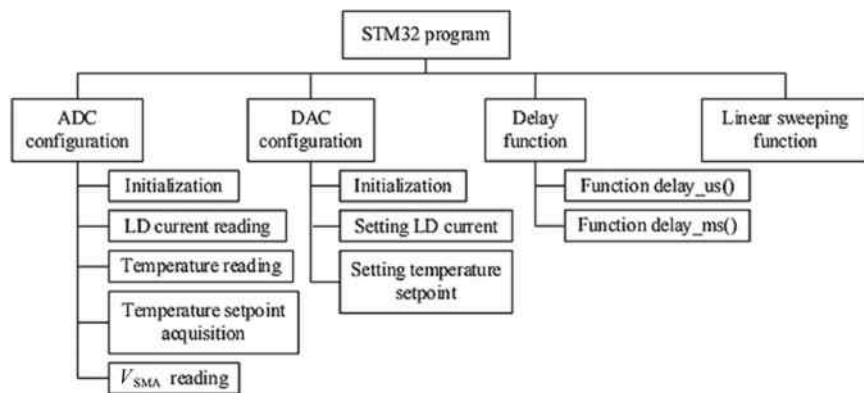


图 11 STM32 程序功能框图

Fig. 11 Function block diagram of the STM32 program

为验证该模块的波长跟踪控制能力,进行了如图 12 所示的双路 DFB 注入锁定实验。其中主动 MLL PSL-10-TT 用以实现全网波长同步 UDWDM-PON 方案中的系统光源,在该实验中提供中心波长为 1553.052 nm,波长间隔为 0.04 nm (5 GHz) 的

梳状谱,如图 13 所示。因该梳状谱平坦性有限,所以 MLL 的输入光经可调衰减器(attenuator, ATT)与光耦合器分路后,选择中心波长作为两组注入锁定的目标分量。

而后两组分别进行注入锁定,其中 DFB1 组没有

进行波长跟踪控制,而 DFB2 组则采用了基于 MCU 与驱动电路实现的控制模块。其中 DFB2 组中经 PD2 得到的电信号经带宽为 5 GHz、增益为 20 dB 的低噪声窄带放大器(amplifier, 图中 AMP2)放大后由功分器分离,一路级联带宽为 12 GHz 的 Detector 进行检波,获得反馈电压信号 V_{SMA} 接入控制模块,另

一路则采用频谱仪 (electrical spectrum analyzer, ESA) Agilent 8564EC 监测并记录当前频谱。当 DFB 处于注入锁定时,两组在 ESA 处都可观察到如图 14 所示的频谱,DFB2 组初步得到的 V_{SMA} 随波长的分布如图 15 所示。

图 16 则展示了记录时间 (20 min) 以内激光器

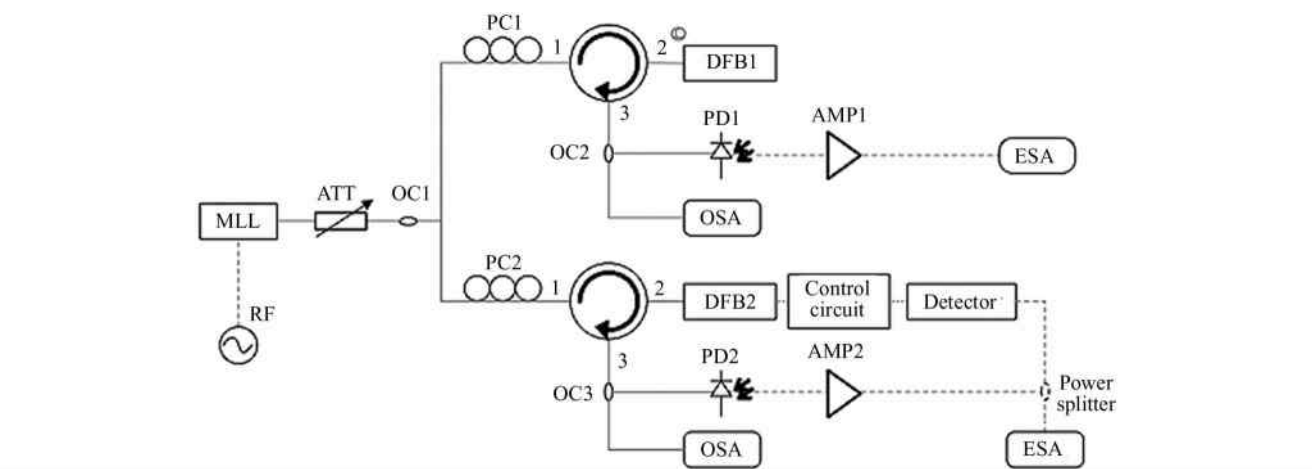


图 12 双路 DFB 注入锁定对比实验

Fig. 12 Comparative experiment between two DFB-locking groups

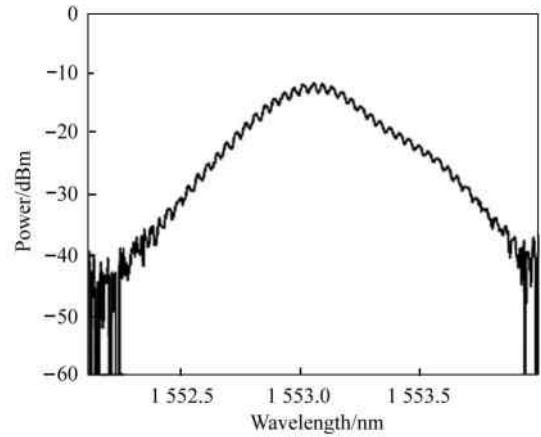


图 13 锁模激光器输出光谱, $Res=0.05$ nm

Fig. 13 Spectrum of the mode-locked laser, $Res=0.05$ nm

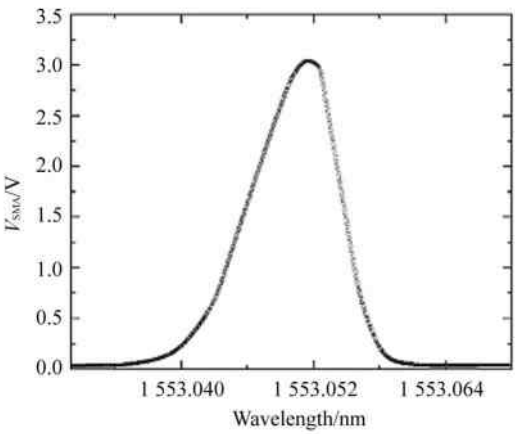


图 15 初始注入条件下 DFB2 扫描得到的 V_{SMA} 分布

Fig. 15 V_{SMA} distribution while DFB2 scanning under the initial injection condition

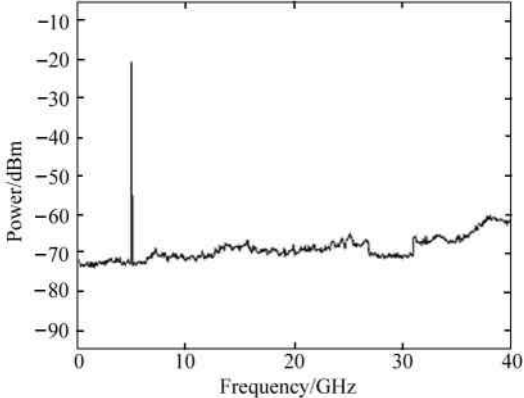


图 14 DFB 注入锁定时 PD 接收信号频谱

Fig. 14 Spectrum of PD signal during DFB injection locking

工作波长及 PD 接收信号 5 GHz 分量的功率变化,对 DFB1 组 (浅灰) 与 DFB2 组 (黑色) 进行了比较。其中可以看出在 MLL 作为光源进行波长分量注入的条件下,DFB 可锁定的带宽很窄,不加以控制的 DFB1 组难以通过手动调节达到所需失谐量调节的精度,因此随时间变化 DFB1 很快偏移出锁定带宽,继而失锁;而 DFB2 则通过波长跟踪锁定控制模块以更高精度进行调节,从而进入了稳定的注入锁定状态。

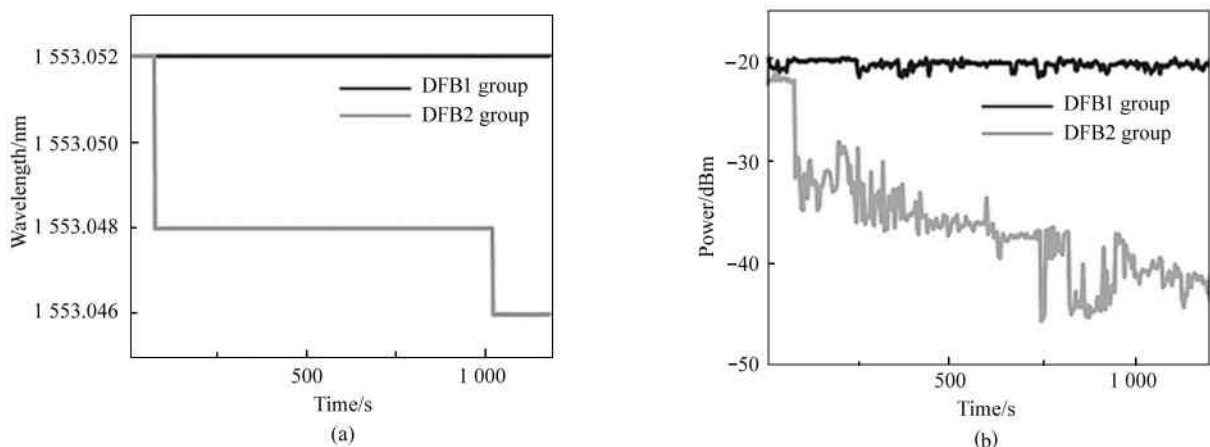


图 16 双路 DFB 注入锁定稳定性对比: (a) DFB1、DFB2 输出中心波长波动状况; (b) PD1、PD2 接收信号 5 GHz 分量功率
Fig. 16 Comparison of locking stability during double DFB injection: (a) Fluctuation of the output wavelength of DFB1 and DFB2;
(b) The power of the component of PD1, PD2 receiving signal at 5 GHz

下面对 MLL 输出进行微调,使其中心波长由 1553.052 nm 调整为 1553.066 nm。图 17 所示为 DFB2 组在这一过程中的波长跟踪情况,图(a)为 DFB2 的输出波长变化,图(b)为 PD2 接收信号 5 GHz 处峰值功率变化情况。当 MLL 波长因手动调整出现突变时,DFB2 进入短暂的失锁状态,PD2 接收信号峰值功率大幅降低,与之相应的控制模块

采集到的 V_{SMA} 值也大幅降低,继而触发 DFB2 控制模块进行大范围的波长跟踪扫描,并最终重新锁定在目标波长 1553.066 nm 处;而图(a)中其余几处的微小波动则是因为外界环境的变化,虽并没有致使 DFB2 直接失锁,但仍让 DFB2 偏移了最佳锁定状态,所以控制模块进行了小范围内的波长跟踪控制,从而进一步提高了 DFB2 注入锁定组的稳定性。

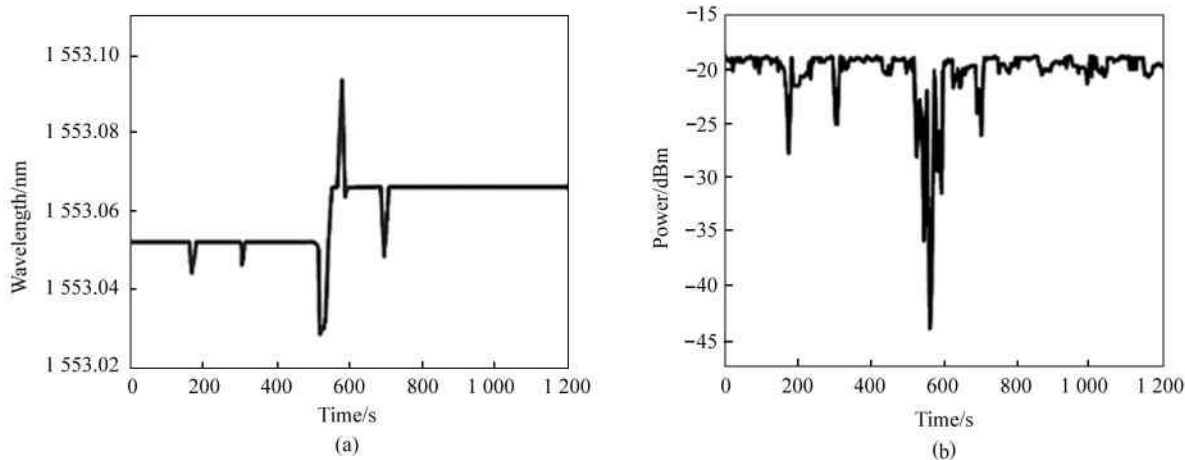


图 17 调节注入波长时 DFB2 组的波长跟踪过程: (a) DFB2 输出波长变化; (b) PD2 接收信号 5 GHz 分量功率
Fig. 17 The wavelength tracking process of DFB2 during adjusting injection: (a) Changes of the DFB2 output wavelength;
(b) The power of the component of PD2 receiving signal at 5 GHz

3 结 论

本文针对多波长光源注入锁定提出了一种提高 SLD 注入锁定稳定性的控制方法,实现了两套控制系统,并进行了实验验证与对比分析。该方法以多

波长光源注入下的激光器注入锁定特性为基础。本文首先在现有注入锁定模型下解释并分析了 SLD 的锁定范围与失锁原因,通过理论推导并阐述了以 PD 接收判断 SLD 锁定状态的方法,经过实验对该方法的验证后,提出了一种基于该 PD 接收信号的控制算

法,最终对两套控制系统进行了实现:第一套基于计算机 LabVIEW 控制与 DAQ,该系统便于实时观察 SLD 各项工作参数并结合光谱与电谱分析注入锁定状态,但占用面积大且控制精度较低;第二套则通过 MCU 及相关驱动电路对第一套系统进行了模块化升级,具有更高调节精度且实现成本更低。本文对第二套系统的控制效果进行了实验与对比验证,结果表明第二套系统可明显改善多波长 OIL 的稳定性,具有应用于无本振上变频、全网光同步的 UD-WDM-PON 等技术的价值^[9]。

参考文献:

- [1] LIU Z, FARWELL S, WALE W, et al. InP-based optical comb-locked tunable transmitter[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE, 2016:1-3.
- [2] MARIN-PALOMO P, KEMAL J N, KARPOV M, et al. Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. Nature, 2017, 546 (7657): 274-279.
- [3] HU H, DA ROS F, PU M H, et al. Single-source chip-based frequency comb enabling extreme parallel data transmission[J]. Nature Photonics, 2018, 12 (8): 469-473.
- [4] TORRES-COMPANY V, SCHRÖDER J, FULOP A, et al. Laser frequency combs for coherent optical communications[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, Rome, Italy. New York: IEEE, 2018:1-3.
- [5] LUNDBERG L, KARLSSON M, LORENCES-RIESGO A, et al. Frequency comb-cased WDM transmission systems enabling joint signal processing[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5):718.
- [6] LU Y, ZHANG W J, XU B X, et al. Directly modulated VCSELs with frequency comb injection for parallel communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39 (5): 1348-1354.
- [7] DONG Z, LI X Y, YU J J, et al. 8×9 . 95-Gb/s ultra-dense WDM-PON on a 12.5-GHz grid with digital pre-equalization [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2): 194-197.
- [8] LI T Y. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network research based on network wavelength synchronous[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- 李天宇. 基于全网波长同步的超密集波分复用无源光网络研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [9] WANG J, JIA T, WANG S S, et al. Wavelength synchronization technology for UDWDM-PON transmitter based on injection locking[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19 (1): 010602.
- [10] MURAKAMI A, KAWASHIMA K, ATSUKI K. Cavity resonance shift and bandwidth enhancement in semiconductor lasers with strong light injection[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(10): 1196-1204.
- [11] DENG L, ZHAO Y, PANG X, et al. All-VCSEL transmitters with remote optical injection for WDM-OFDM-PON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(5): 461-464.
- [12] GAN L, LIU J, LI F, et al. An optical millimeter-wave generator using optical higher order sideband injection locking in a Fabry-Pérot laser diode[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(23): 4985-4996.
- [13] KRSTIĆ M M, CRNJANSKI J V, TOTOVIC A R, et al. Switching of bistable injection-locked Fabry-Pérot laser by frequency detuning variation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21 (6): 583-591.
- [14] HUANG X H, LI C Y, LU H H, et al. A bidirectional FSO communication employing phase modulation scheme and remotely injection-locked DFB LD[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(21): 5883-5892.
- [15] KAKARLA R, SCHRÖDER J, ANDREKSON P A. Optical injection locking at sub nano-watt powers [J]. Optics Letters, 2018, 43(23): 5769-5772.
- [16] WU D S, SLAVIK R, MARRA G, et al. Direct selection and amplification of individual narrowly spaced optical comb modes via injection locking: design and characterization [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(14): 2287-2295.
- [17] KIM J, SCHNATZ H, WU D S, et al. Optical injection locking-based amplification in phase-coherent transfer of optical frequencies [J]. Optics Letters, 2015, 40 (18): 4198-201.

作者简介:

于晋龙 (1969—),男,博士,教授/博士生导师,主要从事光电技术、高速光通信、激光测距技术、光子微波技术、接入网技术、高速光信号处理技术方面的研究。