doi:10.3788/gzxb20184704.0414001

同谱段异频点高稳定四路集成激光器模块

谭俊1,2,穆春元1,王跃辉1,2,于海洋1,2,赵泽平1,2,陈伟1,

刘建国1,3,祝宁华1,2

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室,北京,100083)
 (2 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院,北京,100049)
 (3 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院,北京,100049)

摘 要:面向高速空间相干光通信的应用需求,研制了一种同谱段异频点高稳定的四路集成激光器模块,并采用了梯度反馈控制方法,该反馈方法根据温度反馈值将控制事件分为五种层级,按照优先级顺序梯次调控每路温度和电流,降低了温度漂移和电流抖动,从而有效降低了伺服系统对激光器线宽的影响.将该方法应用到模块控制中,为了给它提供更加精确的温度反馈值,在硬件方面采用温度被动反馈放大电路,消除了电流分量引起的误差,实验测得温度漂移低于 0.001 ℃,电流抖动低于 0.6 μA.采用外腔半导体激光器,集成为模块后四路激光器洛伦兹线宽在 4.5~7.5 kHz 之间,阿伦方差均小于 4×10⁻⁹. 将该激光器模块应用到空间光通信中,测试了四种调制格式下的误码率,并演示验证了 4×50 Gb/s 16QAM 超高速空间相干光通信,结果表明该模块在空间光通信中具有良好的应用前景. 关键词:四路集成模块;反馈控制;自由空间光通信;半导体激光器;温度漂移;电流抖动;洛伦兹线宽;阿伦方差;16QAM

中图分类号:TN248.4 **文献标识码**:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0414001-9

High Stability Four-lane Integrated Laser Module with Different Frequency in the Same Spectrum

TAN Jun^{1,2}, MU Chun-yuan¹, WANG Yue-hui^{1,2}, YU Hai-yang^{1,2}, ZHAO Ze-ping^{1,2}, CHEN Wei¹, LIU Jian-guo^{1,3}, ZHU Ning-hua^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(2 College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to satisfy the application requirements of high-speed free-space coherent optical communication, the high stability four-lane integrated laser module with different frequency in the same spectrum was fabricated. The method of the gradient feedback control was proposed and it distinguish control cases with five levels which were set by the feedback values of temperature. The current and temperature of each lane are controlled step by step based on the priority order in this method and that

基金项目:国家自然科学基金(No. 61675196),国家高技术研究发展计划(No. 2015AA016903)和中国科学院战略性先导专项(No. XDA06010706)资助

第一作者:谭俊(1991-),男,博士研究生,主要研究方向为光通信系统、光电模块集成. Email: tanjun@semi.ac.cn

导 师:祝宁华(1959-),男,研究员,博士,主要研究方向为微波光子学、微波集成电路及高速光子集成器件与系统.Email: nhzhu@ semi.ac.cn

通讯作者:陈伟(1982一),男,副研究员,博士,主要研究方向为微波光子学、光网络安全. Email: wchen@semi.ac.cn

收稿日期:2017-11-28;录用日期:2018-01-10

will reduce the temperature drift, the current jitter and the influence of servo system on the linewidth of lasers. This method was applied to the module and it needed the more accurate feedback values of the temperature. Hence, the passive feedback amplifying circuit of the temperature was adopted and it can eliminate the deviation caused by the current component. The temperature drift and the current jitter which were less than 0.001 °C and 0.6 μ A, respectively, were tested. After being integrated into the module, the Lorentzian linewidth of four external cavity diode lasers were 4.5-7.5 kHz and the Allan variances were all less than 4×10^{-9} . In the Free-Space Optical (FSO) communication, the bit error rates of four modulation formats were tested with four lasers in the module and the ultra-high speed free-space coherent optical communication with 4×50 Gb/s 16QAM was demonstrated. The experimental results show that the four-lane integrated module; Feedback control; Free-space optical communication; Semiconductor laser; the temperature drift; the current jitter; Lorentzian linewidth; Allan variance; 16QAM

OCIS Codes: 140.5960; 250.3140; 060.2605; 300.3700

0 引言

空间光通信具有无带宽限制、高传输安全性、低损耗等优点,使其受到广泛的关注和研究^[1].但是空间光 通信在大气信道中传输会受大气湍流等因素的影响,引起相位抖动、光斑闪烁、功率损耗,从而使信号质量恶 化^[2].同时,由于目前没有成熟的多模高速接收器件和多转单模技术,单模接收端接收到的光信号很弱.针对 信号质量恶化和接收信号弱这两个问题,目前主流的方法是采用高阶调制格式的相干光通信系统来实现同 等速率下的低信道波特率传输和探测微弱信号.例如 2006年,LANGE R 团队实现了 142 km 5.625 Gb/s 传 输速率的零差二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying,BPSK)相干光通信^[3].近几年国内如上海光机 所、哈工大等多家单位也在积极研究相干光通信在空间光中的应用^[4-5].未来更高阶调制格式,例如正交相移 键控(Quadrature Phase Shift Keyin,QPSK)、16 位正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)、64QAM等^[6-7]都将会被引入空间光通信中.并且在相干光通信中,只有相位稳定的信号才可以被接 收端正确解调,而激光光源线宽的大小决定了信号相位的稳定性,线宽越窄,相位越稳定^[8],驱动电路中的电 源噪声又会展宽激光器线宽.因此,空间相干光通信需要高稳定性、窄线宽、低噪声的光源,而越高阶的调制 格式,对光源的性能要求越苛刻.另外,文献[9-10]证明了在空间光通信中,多点平行光通信的需求.因此,研制 多路集成小体积、低纹波、窄线宽的激光器模块对于空间相干光通信来说是十分必要的.

目前,外腔半导体激光器因为其线宽窄、结构灵活而受到广泛的应用^[11].但是其输出功率、频率和线宽 易受驱动电流噪声和温度漂移的影响.在空间光通信应用中,由于湍流等大气因素对激光线宽、频率和功率 的影响较大.当光源的线宽越宽,频率和功率抖动越大,大气对它们的恶化程度越严重^[12],因此必须采用反 馈控制回路,降低电路对激光器的影响.在文献[13]中,采用两套温度控制系统,并基于反馈温控技术,实现 了 0.1 ℃的控温精度.文献[14]中采用 MAX1968 作为温控芯片,采用 STM32 作为主控芯片,并对半导体激 光器进行控制,最终实现了 0.1 ℃的控制精度.文献[15]中采用 MAX1978 作为温控芯片,采用 FPGA 作为 主控芯片,最终实现温控精度为 0.005 ℃,电流波动在 0.074 mA.然而,上述文献中的指标对应的频率抖动都 达到几十甚至上百兆赫兹量级,相比于低于 0.01MHz 的激光器线宽,其电路的温度和电流控制精度都难以 达到应用需求.因此还需要更高精度的温度控制和更低的电流波动.同时,在空间光通信中,搭载在移动端的 光源需要具备小体积、低功耗等特性.到目前为止,国内外文献和产品中往往侧重激光器模块的可调谐范围, 而不重视高温控精度和小型化,对激光器在满足低纹波、低噪声、高温控精度的同时又能实现超小体积的多 路集成模块方面的报道很少.

本文研制了一种同频段异频点的高稳定四路集成激光器模块.通过引入梯度反馈控制方法和被动反馈 放大电路,实现了低噪声的电路驱动和精密的温度电流控制.采用实验室自研外腔半导体激光器,最终实现 四路高稳定窄线宽激光输出.基于此模块,搭建并演示了室内近距离单链路空间光通信系统,测量了四种调 制格式下的误码率、眼图和星座图.实验结果表明,该集成激光器模块能够实现 4×12.5 Gb/s 二进制启闭键 控(On-Off Keying, OOK)、 4×12.5 Gb/s BPSK、 4×25 Gb/s QPSK 以及 4×50 Gb/s 16QAM 空间光通信 传输,满足了高速空间光通信中多路集成、小体积、低噪声和高稳定输出的窄线宽光源模块的应用需求.

1 四路集成激光器模块

1.1 四路梯度反馈控制法

基于实验室已有技术^[16],能够实现单支可调谐激光器驱动模块研制.然而针对四路激光器同时驱动控制,需要处理器并行控制4路驱动模块,并对突发事件进行分级处理.同时电源的纹波抖动会对每个驱动模块产生影响,而每个模块自身芯片的纹波抖动又会汇聚到电源总线,形成恶性循环,造成线宽的展宽和激光功率的抖动.针对并行控制和纹波抖动的问题,引入优先级事件处理机制,并借鉴 PID 算法思想实现梯度反馈控制.





如图 1(a)所示,四路伺服系统结构分别由半导体致冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)控制模块、半导体激光器(Laser Diode, LD)控制模块、温度反馈模块、外腔激光器、微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)处理器组成.其中 TEC 控制模块根据温度反馈值可对激光器温度实时控制和检测,LD 控制模块与处理器通过串口通信控制,实现对激光器驱动电流进行设置和调节.TEC 模块和 LD 模块都能够独立工作,极大地降低了处理器的工作量.考虑到激光器模块可能会搭载在卫星或无人机等移动端上,对激光器稳定的工作温度提出了更严格的要求,因此相比于原有技术,该集成模块在温度反馈端(FB-)加入了模数转换器采样,在处理器中运用 PID 思想对 LD 模块进行梯度反馈控制,从而实现了每路电流和温度控制的协同工作. 其中 PID 的算法表达式为^[17]

$$u(t) = k_{p}e(t) + k_{i}\int e(t) dt + k_{d} \frac{de(t)}{dt}$$

$$\tag{1}$$

式中,u(t)为温度的反馈控制量, $e(t) = e_{set} - e_{meas}(t)$ 为t时刻温度设定值与反馈温度(FB-)测量值所对应的 电压差.根据 PID 中等比项、积分项或微分项作为优先级分类参考,对驱动电流进行联调,其分级原则如图 1(b),随着等级的升高,优先级也变高.在第一级中,激光器模块开启时刻, $e_{meas}(t)$ 小于 e_{set} ,微分项 $\frac{de(t)}{dt} > 0$ 表示 $e_{meas}(t)$ 值正在升高,此时缓慢提升驱动电流,以降低电流对激光器温度的影响.在实际工作中,选择电 流升高的步进为 0.05 mA.在第二级中,为激光器模块的正常工作状态,由于电路的微弱抖动,引起 e(t)的上 下变化,当变化值小于 x_1 时,则开启日常监控状态,检测温度变化. x_1 的大小决定了伺服系统稳定时检测精 度.由于在伺服系统中,采用的是热敏电阻 R_{thm} 和高精度电阻(10 k Ω)串联在超稳定电压 2.5 V中,其 $e_{meas}(t)$ 的表达式为

$$e_{\text{meas}}(t) = k \cdot \frac{V_{\text{ref}} \cdot R_{\text{thm}}(t)}{R_{\text{thm}}(t) + 10} = 2.5 k R_{\text{thm}}(t) / [R_{\text{thm}}(t) + 10]$$
(2)

其中 k 为反馈值放大倍数,可得 e(t)的表达式为

$$e(t) = k \cdot \left[\frac{2.5 \cdot R_{\text{set}}}{R_{\text{set}} + 10} - \frac{2.5 \cdot R(t)}{R(t) + 10} \right]$$
(3)
0414001-3

式中, R_{set} 为温度设定值时所对应的热敏电阻阻值,一般设定激光器工作温度为 25 °C,其电阻值为 10 k Ω .而 热敏电阻 R_{thm} 与温度 T 的关系为

$$R_{\rm thm}/T = 0.256(\mathrm{k}\Omega/^{\circ}\mathrm{C}) \tag{4}$$

由式(4)可以看出,温度 T 变化 1℃,阻值变化为 0.256 k Ω <<10 k Ω ,在电路中取 k=2.因此将式(4)带 人式(3)可以得到 e(t)与温度变化 ΔT 的关系为

$$e(t) = k \cdot \frac{2.5 \cdot 10 \cdot \Delta R(t)}{(R_{\text{set}} + 10)^2} = 0.032 \cdot \Delta T$$
(5)

在第二级中, x_1 为允许电路温度漂移范围值,即温控精度.取温度漂移范围在 0.001 $^{\circ}$ 内,则 $x_1 = 0.032 \times 0.001 = 3.2 \times 10^{-5}$ V,并根据 $\int e(t) dt$ 的值对温度设定值对应的 DAC 进行微弱控制,消除温控芯片对激光器 的过度加热或制冷,以此缓慢达到热平衡状态.

在第三级中, x_2 选择在 0.01 ℃时对应的电压变化值,根据式(5)计算出 $x_2 = 3.2 \times 10^{-4}$ V,在此等级下, 维持其他模块工作状态,同时增加该驱动模块的访问次数,即增加对温度的控制次数,从而降低温度变化,使 其恢复到第二级状态中.在第四级中, x_3 选择 0.1 ℃时对应的电压变化值,根据式(5)计算出 $x_3 = 3.2 \times 10^{-3}$ V,在此情况下,降低激光器驱动电流,从而降低激光器自身热能.在实际工作中,温度变化低于 0.05 ℃时,电 流降低的步进为 0.01 mA,当温度变化高于 0.05 ℃时,电流降低的步进为 0.05 mA.在第五级中,温度上升超 过 0.1 ℃, $x_3 < e(t)$,此时激光器无法及时散热,如果不及时控制,热累加会使得激光器温度快速上升,对激 光器造成损伤.因此,快速降低激光器驱动电流至零,直至温度低于设定温度后,再开启激光器驱动电流.

1.2 温度被动反馈放大电路

为实现上述梯度反馈控制法,其关键技术在于对激光器热敏电阻精确采样,因此在电路方面引入运算放 大器,其结构如图 2(a)所示.



(a) The temperature feedback amplifying circuit

(b) The feedback collecting module

图 2 温度反馈电路图 Fig.2 The temperature feedback circuitry

热敏电阻 R_{thm}与高精度电阻 R₁ 串联在电路中,由高精度电压芯片提供 2.5 V 电压,则 V_i=2.5R_{thm}/(R_{thm}+R₁).由于如果将 V_i节点直接接入温控芯片和双路 ADC 芯片,会使得一部分电流分量从 V_i节点处 流入温控和 ADC 芯片中,造成 V_i测量值低于实际值,从而使 FB-反馈值不精确.采用运放结构,根据"虚短 虚断"原理,V_n=V_i,当温度升高,V_i升高,V_n升高,最终 FB-值升高,实现被动反馈.由图中可知

$$V_{\rm FB} = V_{\rm n} \cdot (R_2 + R_3)/R_2$$
 (6)

将 V_i值带入式(6)可得

$$V_{\rm FB} = 2.5R_{\rm thm} \cdot (R_2 + R_3) / [R_2 \cdot (R_{\rm thm} + R_1)]$$
(7)

式中 R_1 为高精度电阻,取值为10 k Ω ,则由 $e_{meas}(t) = V_{FB}$ 可得, $k = (R_2 + R_3)/R_2$ 为该反馈放大电路的放大 倍数,k 值越高,温度漂移被放大得越大,反馈控制越精确.在该模块中,取 $R_2 = R_3 = 10$ k Ω ,则k = 2.

图 2(b)为温度反馈值采集模块图,采用 MAX1978 对半导体制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC)进行控制.采用并行两路模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)进行采样,每路模数转换器有 16 位寄存器,采样精度达到 1.407×10⁻⁵ V,完全满足应用要求.采用 ARM 系列 STM32F103 作为控制芯片,其具

有 16 种响应优先级中断向量,5 种串口通信端口,最大时钟频率为 72 MHz,能够很好地完成多模块驱动控制和多事件优先级处理工作.在电流控制方面,采用 ADN8810 作为主控芯片,最终制得四路集成激光器模块驱动电路.使用六位半高精度万用表测量电路中V_i电压值,结果表明,电压抖动小于 30 μV,其对应的温度漂移低于 0.001 ℃.将激光器电流控制引脚(LD-)串联 5 Ω 电阻,测得电阻两端电压抖动在 3 μV 左右,对应电流抖动在 0.6 μA.

1.2 激光器模块测试实验结果

采用实验室自研的外腔半导体激光器,其功率随温度和电流的变化曲线如图 3.



图 3 激光器电流温度曲线和实物图 Fig.3 The curves of the current and the temperature of the laser together with the photograph

从图 3(a)中可以看出,在温度控制为 25 ℃时,激光器输出功率随电流增加.在 40~120 mA内,功率与 电流呈线性关系.图 3(b)表示在电流为 120 mA时,温度从 10 ℃上升到 39 ℃时的功率变化曲线,其功率突 变的节点分别是 20、25、30 和 35 ℃.考虑到对激光器的保护,一般控制温度选择在 20~25 ℃之间,因此为获 得稳定且高功率输出,选择驱动电流为 120 mA,控制温度为 25 ℃.图 3(b)插图为自研外腔半导体激光器实 物图.

根据上述所设计制备的电路驱动模块伺服系统,最终封装成四路集成激光器模块,其光谱测试和实物图 如图 4(a)、图 4(b)所示.四支激光器的波长分别为:1549.476、1549.872、1550.264 和 1550.652 nm,波长间隔 约 0.4 nm.其输出功率分别为 5.96、5.14、6.17 和 5.81 mW.





(b) The photograph of four-laser integrated module

图 4 四路集成激光器模块 Fig.4 The four-laser integrated module

采用上海光机所研制的单频激光器噪声测试仪^[18-19]测量模块中四支激光器的线宽,其测试结果如图 5 所示.结果表明,四支激光器在高频段频率抖动趋向于稳定值(S_w). S_w 分别是 2 307、2 157、1 491 和 1 634 Hz²/Hz.洛伦兹线宽与 S_w 的关系表示为^[20]

$$\Delta \nu = \pi \cdot S_{w} \tag{8}$$

由式(8)可计算出模块中四支激光器洛伦兹线宽约为:7.25、6.78、4.68和5.13 kHz.由于测量时间不同, 线宽不同^[19],在1ms测量时间(对应积分带宽为1kHz)下,模块中四支激光器线宽约为:28.38、10.18、16.05 和16.24 kHz.两种测试结果均表明此集成激光器模块具有低噪声、超窄线宽的特点.采用频率计数器测量 100 s内频率波动情况,并测量得到模块中四支激光器阿伦方差都在4×10⁻⁹以内,表明该激光器模块频率 稳定性好.





2 激光器模块的空间光通信实验结果

Fig.5

为了演示验证 4 路集成窄线宽激光器模块在空间光通信中的应用,搭建了两种室内光信号测试系统,如 图 6 所示,光传输距离均为 10 m.



(b) The experimental structure of 12.5 Bbaud BPSK/QPSK/16QAM modulation format

 (c) The photograph of experimental link
 IM: Intensity modulator; ATP: Acquisition, tracking and pointing; PD: Photo-detector;
 BERT: Bit error rate tester; DPO: Digital phosphor oscilloscope

图 6 实验结构图和实物图

Fig.6 The diagrams of the experimental structure and the photograph

2.1 激光器模块功率稳定性和一致性

如图 6(a)所示,选择直接调制直接探测(Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD)系统测试 4 路 激光器在12.5Gb/sOOK调制格式下的空间光通信稳定性以及4路激光器的一致性.采用SHF公司研制

的 11125A 误码分析仪测试每路空间光信号误码. 每路均测试 30 分钟的误码率,并选择每一分钟的累 计误码率(300 帧误码采样点)为一个参考点,以此 得到 30 个随时间变化的误码率参考点,其测试结果 如图 7 所示.由于商用光学捕获、跟踪和瞄准系统 (Acquisition, Tracking, Pointing, ATP)中伺服系 统自身的机械抖动以及室内较弱湍流的存在,图 7 中四条误码率曲线上下浮动,并非一个稳定的误码 率值.但从 30 分钟的测试结果来看,误码率曲线稳 定在 10⁻⁶到 10⁻⁷之间,表明 4 路激光器具备较好的 一致性以及稳定性.由于 ATP 系统、空间光链路以 及多转单模对信号质量的影响,直接探测出的数据 存在较多误码,这也表明在高速空间光通信中,需要 引入高阶调制格式以及算法补偿,以获得较低的误 码率以及更远距离的传输通信.



图 7 四路激光器模块通信链路在 12.5Gb/s OOK 调制 格式下的误码率随时间变化图,以及相应的眼图 和消光比(Ex:消光比)

2.2 激光器模块空间相干光通信实验

基于泰克公司的相干光通信系统,图 6(b)所示的光通信测试链路被搭建起来,用以验证 4 路集成激光 器模块在高阶调制格式下的空间光通信应用能力.图 6(c)为该测试链路的实物图.光发射机和接收机分别采 用泰克公司的 OM5110 和 OM4106D.使用 50/50 耦合器将单路激光分成两路,一路替代发射机中的激光光 源,另一路连接接收机作为解调制的本振光源.图 8(a)、(b)分别表示 12.5 Gb/s 的 BPSK 眼图以及 25 Gb/s 的 QPSK 星座图.测试结果表明,在一段时间内,这两种调制格式能够实现无误码传输.图 9 表示为集成激光 器模块中每路激光作为调制解调光源在 50Gb/s 16QAM 调制格式下的误码率以及星座图,其误码率为 5× 10⁻²左右.而出现 16QAM 误码率偏高的原因在于,相比于 OOK、BPSK、QPSK 这三种调制格式,16QAM 采 用两路正交四电平调制的方式对信号进行调制,其要求电平信号更稳定的分离度和更短的信号上升下降时 间,同时室内弱湍流等因素对信号的影响也更加严重.未来通过采用适用于空间光通信的补偿算法、更高精 度的码型发生器以及低远场发散角的光学天线等方法能够有效地降低 16QAM 调制格式下的信号误码率, 提高空间光通信的通信质量.

综上所述,实验证明了该模块作为集成光源,能够实现高速 BPSK、QPSK 相干光通信,并验证了 4× 50 Gb/s16QAM 短距离超高速空间相干光通信.结果表明该模块能够满足高速相干光通信的应用需求.



(a) The eye diagrams with 12.5 Gb/s BPSK

(b) The constellation diagrams with 25 Gb/s QPSK

图 8 眼图和星座图 Fig.8 The eye diagrams and the constellation diagrams

Fig.7 The diagram of BER vs. time of four-laser module with 12.5Gb/s OOK modulation format, eye diagrams and extinction ratios (Ex: extinction ratios)



图 9 四路激光器模块链路在 50 Gb/s 16QAM 调制格式下的误码率、星座图(Ln:激光器,n=1,2,3,4) Fig.9 The BERs and the constellation diagrams of four-laser module with 50 Gb/s 16QAM (Ln: laser, n=1, 2, 3, 4)

3 结论

研制了一款同频段异频点高稳定的四路集成激光器模块.该模块中采用梯度反馈控制方法和温度被动 反馈放大电路.其优点主要有:1)梯度反馈控制法具有五种等级优先级事件处理机制,根据各路激光器的温 度反馈值,对每路实现梯次控制,并同时调控每路激光器的温度和驱动电流,降低了温度漂移和电流抖动,从 而有效地减少了伺服系统对激光器线宽和稳定度的影响,实现了对四路激光器的稳定有序控制.2)引入温度 反馈放大电路,消除了由温控芯片和 ADC 采集热敏电阻两端反馈电压值时电流分量引起的测量误差,放大 反馈电压值,提高了温控精度.3)最终采用外腔半导体激光器制作四路集成激光器模块,该模块四路激光输 出具有高稳定性、一致性,模块电路噪声对线宽影响微弱,能够满足高速空间相干光通信的要求.模块驱动电 路的温控精度达到 0.001 ℃,驱动电流抖动小于 0.6 μA.在驱动电路控制下测得模块四路激光器洛伦兹线宽 分别为:7.25、6.78、4.68 和 5.13 kHz,阿伦方差均小于 4×10⁻⁹.激光器模块应用到空间光通信中,分别测量 12.5 Gbaud OOK、BPSK、QPSK 和 16QAM 四种调制格式下室内空间光通信的误码率、眼图和星座图.在 OOK 调制格式下持续 30 分钟测试,其累积误码率稳定在 10⁻⁶ 到 10⁻⁷之间.在 BPSK 和 QPSK 的两种调制 格式下,接收信号质量高,没有误码.最后演示验证了在 16QAM 调制下,4 路 50 Gb/s 空间光通信能力,其误 码率在 5×10⁻²左右.测试结果表明,该模块可以作为各种调制格式下的空间光通信光源,在高速相干光通信 中具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] MAO Tian-yi, CHEN Qian, HE Wei-ji, et al. Free-space optical communication using patterned modulation and bucket detection[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(11): 38-42.
- [2] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective[J]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [3] LANGE R, GIGGENBACH D, WANDERNOTH B, et al. 142 km, 5.625 Gbps free-space optical link based on homodyne BPSK modulation[C]. SPIE, 2006, 6105: 61050A.
- [4] LIU Fu-chuan, SUN Jian-feng, MA Xiao-ping, et al. New coherent laser communication detection scheme based on channel-switching method[J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2738-46.
- [5] MA Jing, LI Kang-ning, TAN Li-ying, et al. Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [6] JIA Shi, YU Xian-bin, HU Hao, et al. THz photonic wireless links with 16-QAM modulation in the 375-450 GHz band.
 [J]. Optics Express, 2016, 24(21): 23777-23783.
- QU Zhen, DJORDJEVIC I B. 500Gb/s free-space optical transmission over strong atmospheric turbulence channels[J].
 Optics Letters, 2016, 41(14): 3285-3288.
- [8] ISHII H, KASAYA K, OOHASHI H. Wavelength-tunable lasers for next-generation optical networks [J]. NTT Technical Review, 2011, 9(3): 1-6.
- [9] WANG Ping, CAO Tian, GUO Li-xin, *et al.* Performance analysis of multihop parallel free-space optical systems over exponentiated Weibull fading channels[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 1-17.
- [10] GAO Zheng-guang, LIU Hong-zhan, MA Xiao-ping, et al. Performance of multi-hop parallel free-space optical communication over gamma-gamma fading channel with pointing errors[J]. Applied Optics, 2016, 55(32): 9178-9184.

- [11] WANG Jun-zhen, WANG Yue-feng, BAI Hui-jun. A kind of narrow line width external cavity laser diode with wavelength stability and continuous tuning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(12): 1202002.
 - 王军阵,汪岳峰,白慧君.一种波长稳定可调的窄线宽外腔二极管激光器[J].中国激光,2014,41(12):1202002.
- [12] ANDREWS L C. Laser beam scintillation with applications[M]. PHILLIPS R L, AND HOPEN C Y. Washington: SPIE Press, 2001: 201-239.
- [13] LI Zhin-yong, WANG Li-xin, TAN Rong-qing, et al. Single emitter laser diode with external cavity of volume Bragg grating based on TEC temperature control[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(5): 501-503.
 李志永, 王立新, 谭荣清, 等. 温控体布拉格光栅外腔单管半导体激光器[J]. 激光与红外, 2013, 43(5): 501-503.
- [14] 孔庆楠. 基于 STM32 的半导体激光器驱动电路的设计[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [15] 吴栋. 可调谐窄线宽半导体激光器驱动设计[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- [16] WANG Qi, GUO Jin-jin, CHEN Wei, et al. Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0101004.
 王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101004.
- [17] ZHAN Jun-tong, FU Qiang, DUAN Jin, et al. Stability improvement of DFB laser driving power using digital position PID algorithm[J]. Infrared & Laser Engineering, 2015, 44(6): 1757-1761.
 战俊形,付强,段锦,等.利用位置式数字 PID 算法提高 DFB 激光器驱动电源稳定性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44 (6): 1757-1761.
- [18] XU Dan, YANG Fei, CHEN Di-jun, et al. Laser phase and frequency noise measurement by Michelson interferometer composed of a 3×3 optical fiber coupler[J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22386-93.
- [19] XU Dan, LU Bin, YANG Fei, et al. Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a 3×3 fiber coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102004.
- 徐丹, 卢斌, 杨飞, 等. 基于 3×3 耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0102004.
- [20] LEWOCZKOADAMCZYK W, PYRLIK C, HÄGER J, et al. Ultra-narrow linewidth DFB-laser with optical feedback from a monolithic confocal Fabry-Perot cavity.[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 9705-9.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61675196), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2015AA016903) and Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA06010706)