

基于分布式反馈激光器的高速运动方向选择和识别

虞韞之, 马博文, 邹卫文*

上海交通大学智能微波光波融合创新中心(iMLic)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 类脑光子信息处理技术受高速低功耗的大脑信息处理原理的启发, 与传统光子信息处理技术相比, 可大幅提升处理的速率和能效, 且在感知和识别等方面具有重要的应用价值。提出了一种基于分布式反馈(DFB)激光器的类脑光子信息处理方案, 可对高速运动方向进行选择 and 识别。分析了电流偏置参数对 DFB 激光器光脉冲响应宽度的影响, 验证了所采用的 DFB 激光器光脉冲宽度与高速运动方向识别之间的依存关系, 并架构了基于 DFB 激光器的高速运动方向选择模块。对该模块进行实验测试, 在正确识别前提下, 分析了链路权值参数和电流偏置组合对模块适用速度范围的影响, 结果表明, 在马赫量级速度范围内, 该模块对一维方向实现了有效识别。

关键词 光电子学; 类脑光子; 高速运动方向识别; 分布式反馈激光器

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2325001

High-Speed Motion Direction Selection and Recognition Based on Distributed Feedback Laser

Yu Yunzhi, Ma Bowen, Zou Weiwen*

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Intelligent Microwave Lightwave Integration Innovation Center (iMLic), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract The neuromorphic photonic information processing technology is inspired by the high-speed and low power-consumption information processing mechanism in brain. Compared with the traditional photonic information processing technologies, it not only promotes greatly the processing speed and energy efficiency, but also possesses important applications in detection and perception. This paper proposes a neuromorphic photonic information processing scheme based on the distributed feedback(DFB) laser, which is used for high-speed motion direction selection and recognition. The influence of bias current on the DFB laser pulse response duration is analyzed. The dependence of high-speed motion direction recognition on the DFB laser pulse duration is confirmed and the module for high-speed motion direction selection based on DFB laser is constructed. The experimental test of this module is conducted. On the premise of correct recognition, the effects of link weighting parameters and current bias on the applicable speed range are analyzed. The results show that the proposed module can realize the effective recognition in one-dimensional direction within the Mach-level speed range.

Key words optoelectronics; neuromorphic photonics; high-speed motion direction recognition; distributed feedback laser

OCIS codes 250.5960; 200.4700; 140.5960

1 引 言

视网膜作为一种智能感知器, 具备识别物体运动方向的能力, 该项能力是神经生物学领域研究的热点^[1-3], 也是自主控制机器人^[4]等领域的核心挑战之一^[5-6]。研究者在甲虫视网膜中发现具有运动方向选择性(DS)响应能力的神经结构, 该结构的机理

可通过两种经典计算模型即 Hassenstein Reichardt (HR)模型和 Barlow-Levick(BL)模型进行描述^[2]。进一步研究 DS 结构中的生物细节, 可为经典计算模型的实现提供理论基础, 例如该结构中神经元响应时常数的差异性^[2]。Giulioni 等^[7]利用神经拟态芯片 FLANN, 模仿了基于 BL 模型的神经元互连结构, 实现了一维和二维运动方向的识别。该方案在

收稿日期: 2020-07-10; 修回日期: 2020-08-03; 录用日期: 2020-08-12

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2203700)、国家自然科学基金(61822508, 61571292)

* E-mail: wzou@sjtu.edu.cn

电域完整复现了 DS 神经结构,但在速率和应用范围上受制于噪声和串扰:一方面,为了保证方向判断的准确性,片上集成的单元节点在触发前需要保留约 3 ms 的等待时间,这一特性限制了该方案在高速运动物体方向判别中的应用;另一方面,FLANN 作为实验室研制阶段的概念型芯片,其研制成本较高。因此,低成本的高速运动方向识别仍有待实现。

光子技术具有带宽宽和运算速度快的优势,已被广泛用于微波光子学和类脑光子信息处理技术等领域^[8-11]。类脑光子信息处理技术以高效的类脑信息处理机制和高速率的光子技术为基础,有望超越传统电子和光子处理技术,实现更加高速和低功耗的信息处理。目前,基于类脑光子信息处理的高速运动方向识别技术仍处于初级研究阶段,研究热点有两类:一是自顶而下,对生物神经算法进行研究,应用光子手段实现特定的仿生机理^[12];二是自底而上,从底层单元器件出发,用光子技术模拟生物神经元响应^[13-17]及神经元间的互连特性^[18-19]。本课题组对基于分布式反馈(DFB)激光器的光电架构作为光子神经元(PN)的可行性进行了研究,并对其脉冲激发、阈值特性和时域整合等生物特性进行了仿真和实验论证^[20],正在尝试结合类脑信息处理低功耗的优势,利用 DFB 激光器实现识别感知等应用中的信息处理。

本文提出了一种基于 DFB 激光器的类脑光子信息处理方案,通过模拟 DS 神经结构,实现了对一维高速运动方向的识别。首先,研究了 DFB 激光器作为光子神经元时其脉冲响应宽度的可调特性,通过分析腔内载流子的增益和耗散过程,讨论了电流偏置对 DFB 激光器光脉冲响应宽度的影响,并通过实验验证了该结论。进一步,从神经计算模型层面分析了 DS 结构在运动方向识别应用中的作用原理。最后,提出了基于 DFB 激光器的高速运动方向识别模块架构方案,通过模拟探测信号对该架构进行了相关实验,在一定速度范围内,论证了该模块对高速运动方向的识别能力,对于超出该速度范围的运动,分析了模块识别错误的原因。同时,通过改变链路参数,实验论证了该模块可对识别速度范围进行调控。

2 原理分析与实验

本课题组前期对比分析了神经元离子输运过程与 DFB 激光器腔内载流子受激过程的等效性,论证了 DFB 激光器具备整合多路输入脉冲的时域整合

特性^[21]。本节首先分析了电流偏置于 DFB 激光器输出光脉冲宽度的调谐作用。其次,分析了 DS 结构模型用于运动方向识别任务的原理,以及时域整合特性和脉冲响应宽度差异性在其中的作用,从而论证了 DFB 激光器应用于该任务的合理性。最后,提出了基于 DS 结构模型的以 DFB 激光器作为 PN 的高速运动方向识别模块架构方案,通过实验论证了该方案在高速运动方向识别应用中的可行性,分析了超出一定速度范围时运动方向错误识别的原因,以及参数配置在该速度范围内的调控作用。

2.1 DFB 激光器电流偏置对脉冲响应宽度的影响研究

神经元对刺激的差异性响应是实现神经系统丰富功能的重要条件。神经结构中不同神经元对脉冲刺激产生不同时常数的响应,该性质已经在生物运动感知领域得到了论证^[2]。探究了在相同脉冲输入条件下,不同电流偏置参数对 DFB 激光器光脉冲响应宽度的影响。实验结构如图 1(a)所示,在不同的电流偏置下,测试 DFB 激光器对高斯型脉冲的响应宽度。任意波形发生器(AWG)作为测试脉冲的输出源,经过激光器控制器(LDC)转换为 DFB 激光器的驱动电流。DFB 激光器输出的光脉冲经可变光衰减器(VOA)限制功率后,进入平衡光电探测器(BPD)转化为电信号,并显示在示波器(OSC)上。所测 DFB 激光器(EMCORE 1751A)的电流阈值为 19 mA。电流偏置影响光脉冲宽度的原理示意图如图 1(b)所示,随着驱动电流的增加,输出光脉冲宽度逐渐增加直至不变。当电流偏置小于阈值电流时,阈值以下的驱动电流[如图 1(b)中虚线所示]所激发的光子被腔内损耗耗散,只有超出阈值部分的驱动电流[如图 1(b)中实线所示]所激发的光子输出形成光脉冲,这使得输出脉冲宽度小于测试脉冲宽度;当电流偏置达到阈值时,驱动电流产生的光子可以全部输出,因此输出脉冲宽度达到峰值,继续提高电流偏置也不会改变输出脉冲宽度。图 1(c)是实际测得的电流偏置与输出脉冲宽度的对应关系图。分别测试了输入脉冲的半峰全宽(FWHM)为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 μs 时,电流偏置对输出光脉冲响应宽度的影响。实验中使用的 LDC 的内部集成有低通电路,这限制了 DFB 激光器调制带宽,因而输出脉冲宽度会略大于测试脉冲宽度,但不影响电流偏置对脉宽影响的定性描述。综上所述,通过对 DFB 激光器电流偏置进行调节,可以实现 DFB 激光器光脉冲响应宽度的可调特性。

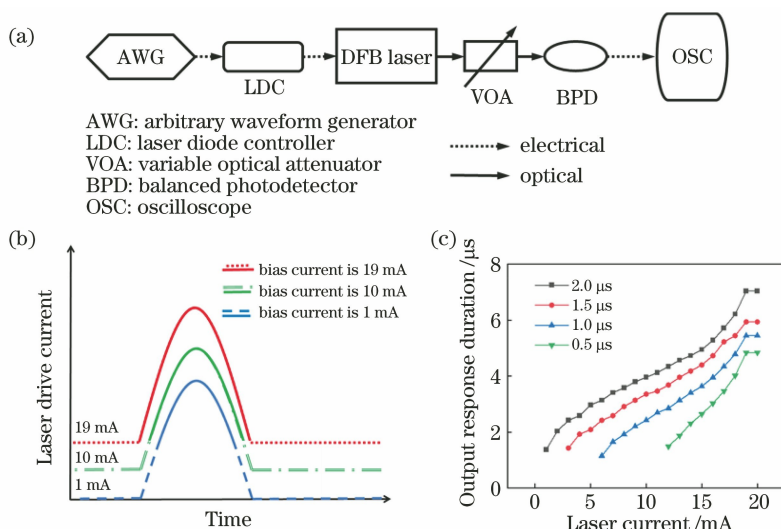


图 1 电流偏置对 DFB 激光器脉冲响应特性的影响。(a) 实验框架;(b) 原理分析;(c) 实验结果
 Fig. 1 Effect of bias current on DFB laser pulse response characteristics. (a) Experimental setup;
 (b) principle analysis; (c) experimental results

2.2 DS 结构模型原理分析

除了神经元的特性外,计算模型架构决定了 DS 结构的有效性和复杂度。BL 模型作为运动方向识别的经典计算模型之一,具有架构简单和效果明显的优势,但只能对特定速度下的运动方向进行识别。通过引入神经元脉冲响应时常数差异^[2],可以对某一速度范围内的运动方向进行识别。图 2(a)、(c) 是一种以 BL 模型为基础并结合神经元脉冲响应差异性的 DS 结构模型。在视网膜中,单个 DS 神经结构将一维方向划分为 preferred direction (pd) 和 null direction(nd),通过其中的神经元对 pd 和 nd

进行选择响应,从而实现对物体运动方向的感知。光感受器(PR)相当于前端传感器,当探测到有物体经过时发出电脉冲,并将其作为 DS 模块的输入信号。DS 模块由三个神经元 N1,N2,N3 和突触连结组成。N1 和 N2 都是“触发”神经元,用于接收输入信号,但二者对脉冲刺激具有不同的响应特性:N2 对脉冲刺激存在一定的低通响应,其输出相较于 N1 有更大的时间常数^[2],在本模型中,用更大的输出脉宽进行表征。N3 是“判决”神经元,其输出信号作为整个模块的判决输出,当物体运动在 pd 上时发出脉冲,运动在 nd 上时则无响应。连结 N1 和 N3 的箭

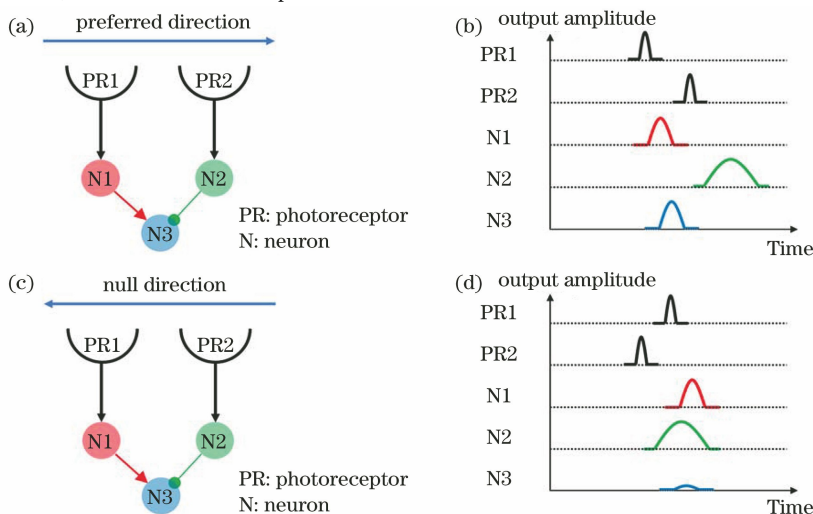


图 2 DS 模块示意图和神经元输出。(a) 物体运动在 pd 的情况;(b) 感光器及各神经元在图 2(a)情况下的输出;
 (c) 物体运动在 nd 的情况;(d) 感光器及各神经元在图 2(c)情况下的输出

Fig. 2 Schematic of DS module and output of neurons. (a) Matter motion in pd; (b) output of photoreceptors and neurons corresponding to Fig. 2(a); (c) matter motion in nd; (d) output of photoreceptors and neurons corresponding to Fig. 2 (c)

头连线表示兴奋性突触,用于传递神经元的兴奋状态,使得突触后的神经元发放脉冲,连结 N2 和 N3 的圆圈连线表示抑制性突触,与兴奋性突触的作用相反,其使突触后的神经元在一定时间内处于静息状态,在此时间窗内兴奋性突触传递的脉冲刺激不能触发脉冲。图 2(b)、(d)是信号在该模型中的传输过程示意图:物体在 pd 上运动时,感光器探测到物体运动后,先后产生脉冲信号并传输到 N1 和 N2,N1 先于 N2 激发,并通过突触将兴奋性刺激传递给 N3,使其先处于激发状态,在 N2 的抑制性突触传输的脉冲到达之后,N3 进入静息状态[图 2(b)];物体在 nd 上运动时,N2 优先通过抑制性突触作用于 N3,使其处于较长时间的静息状态,在此期间 N1 的兴奋性突触传输的脉冲会被抵消,N3 始终处于静息状态,从而实现了 pd 和 nd 的选择性响应。结合上述模型分析及课题组前期工作可知,DFB 激光器具备时域整合以及光脉冲响应宽度可调特性,且脉冲宽度在微秒量级及以下,适用于高速运动方向选择模块的架构单元。

2.3 实验与讨论

图 3 是依据 2.2 节 DS 结构模型所提出的一种基于 DFB 激光器的高速运动方向识别模块架构原理图。利用 AWG (Keysight M8195A)的两个独立通道 CH1 和 CH2 输出高斯型脉冲并模拟两个光感受器的探测信号。三个配备 LDC (Thorlabs ITC4001) 的 DFB 激光器 (EMCORE 1751A) 作为 PN 分别模拟触发神经元 N1,N2 和判决神经元 N3。利用 VOA 和 BPD (fsphotonics PDB1050) 模拟突触连结,VOA 通过调节光功率的衰减量来控制脉冲的权值,与突触权值调节类似;BPD 将光脉冲转换为电信号,实现与后光子神经元连接的功能,兴奋性突触接正输出端口,抑制性突触接负输出端口。功率合路器 (PC) 合并 PN1 和 PN2 的输出,并将其作为 PN3 的输入。为了模拟模型中 N1 和 N2 对输入脉冲的不同响应,需要对 PN1 和 PN2 设置不同的电流偏置,其中 LDC1 的电流偏置为 7 mA,LDC2 的电流偏置为 16 mA。模拟 PR 输出的高斯型脉冲的 FWHM 为 1 μ s,幅度为 500 mV,LDC3 的电流偏置为 22 mA。通过 OSC (Keysight DSOS804A) 观察该模块的输出结果。

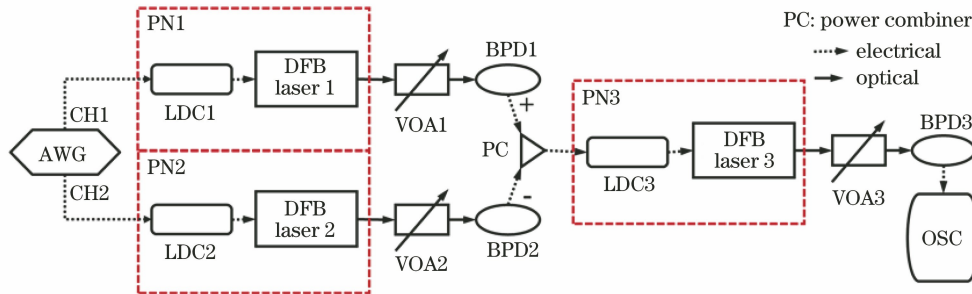


图 3 光子 DS 模块架构示意图

Fig. 3 Structural diagram of photonic DS module

图 4 给出了图 3 所示光子 DS 模块架构的原理性验证实验结果,其中 AWG_CH1 和 AWG_CH2 分别表示 AWG 的两个通道 CH1 和 CH2 的输出信号,BPD3 表示 PN3 的输出光脉冲经过光电转换后的信号。令探测信号的相对时间差 $\Delta t = t_{CH2} - t_{CH1}$, t_{CH1} 和 t_{CH2} 分别表示通道 1 和通道 2 中脉冲到达时刻。 Δt 的符号表征运动方向:当物体沿 pd 运动时, $\Delta t > 0$,当沿 nd 运动时, $\Delta t < 0$ 。由于 $|\Delta t|$ 能够反映运动速度的大小(假设光感受器的相对位置固定),下文均以 $|\Delta t|$ 的范围表征模块正确识别运动方向时的适用速度范围(下称速度范围)。如图 4(a)、(b)所示,当 $\Delta t = 2 \mu$ s 时,模块有脉冲输出,当 $\Delta t = -6 \mu$ s 时,模块无脉冲输出,与预计结果一致,能够正确识别运动方向。当 Δt 超出一定范

围时,该架构对方向的判别出现错误:如图 4(c)、(d)所示,当 $\Delta t = 1 \mu$ s 时,模块无响应,当 $\Delta t = -7 \mu$ s 时,模块有脉冲输出。根据 2.2 节原理分析可知,N3 受到的兴奋性刺激和抑制性刺激需要在一定的时间窗内完成整合,才能表现出选择性响应的特性,在生物神经元中,当两个刺激间隔超过一定时间时,则它们对神经元的影响呈现独立性,整合效应消失。在高速运动方向识别模块架构中,当 $\Delta t = 1 \mu$ s 时,PN1 的正脉冲与 PN2 的负脉冲在过短时间内先后到达,两路信号经过 PS 整合后,正负脉冲相互抵消,使得 PN3 无脉冲输入,从而一直保持了静息状态;当 $\Delta t = -7 \mu$ s 时,在 PN2 对 PN3 的抑制作用消失后,PN1 的兴奋性刺激才到来,两种刺激效果独立作用在 PN3 上,使得其发放脉冲。综上所

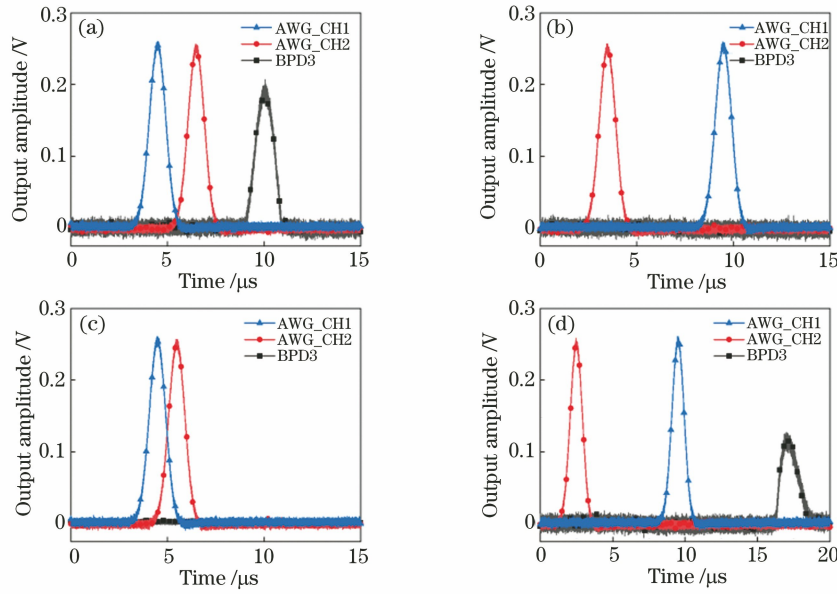


图 4 不同探测信号时间间隔下的实验结果。(a) $\Delta t = 2 \mu\text{s}$; (b) $\Delta t = -6 \mu\text{s}$; (c) $\Delta t = 1 \mu\text{s}$; (d) $\Delta t = -7 \mu\text{s}$
 Fig. 4 Experimental results under different probe signal time delays. (a) $\Delta t = 2 \mu\text{s}$; (b) $\Delta t = -6 \mu\text{s}$;
 (c) $\Delta t = 1 \mu\text{s}$; (d) $\Delta t = -7 \mu\text{s}$

述,该模块对 $2 \mu\text{s} < |\Delta t| < 6 \mu\text{s}$ 范围内的运动方向具备选择和识别能力,超出速度范围的运动会导致模块响应出现误判。假设感光器间距为 1 mm,该模块在上述参数条件下对速度在 0.49 马赫到 1.47 马赫间的运动可以实现有效识别。

为了定量描述模块识别的准确结果,在相同时间间隔下,引入模块识别 pd 和 nd 运动的输出信号幅度差,结合预设的幅度差判别标准,定义了模块正确识别时相应的 $|\Delta t|$ 范围。如图 5 所示,横坐标表示不同的时间间隔,纵坐标表示特定 $|\Delta t|$ 下,模块识别 pd 和 nd 运动的输出幅度差。由上述原理可知,当发生误判时,模块对相同 $|\Delta t|$ 下 pd 和 nd 运动的识别输出幅度一致。所以通过设定幅度差的标准,可以定量描述模块识别正确时的速度范围;当幅值差小于标准值,则模块错误识别,否则模块正确识别。在本次实验中,AWG 输入脉冲幅度为 500 mV,LDC1 的电流偏置为 9 mA,LDC2 的电流偏置为 18 mA,LDC3 的电流偏置为 16 mA,设定幅值差标准为 200 mV(如图 5 虚线所示)。从图 5 中的结果可以看出,上述参数配置下模块的 $|\Delta t|$ 范围是 $2.2 \mu\text{s} < |\Delta t| < 6 \mu\text{s}$ 。

进一步,通过实验探究了 VOA 权值调节和 LDC 电流偏置对 $|\Delta t|$ 范围的影响,结果如图 6 所示。通过调整 VOA1 和 VOA2 的衰减量,使得 BPD1 和 BPD2 的输出电脉冲幅值比分别为 1:1, 1.0:1.2, 1.0:1.5, 1.0:1.7, 1:2,相应地测量不同幅

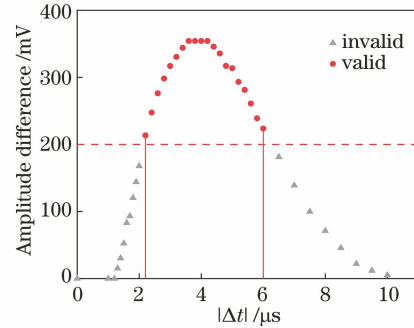


图 5 模块适用速度范围的定量描述示意图
 Fig. 5 Quantitative description diagram of applicable speed range of module

值比下模块的 $|\Delta t|$ 范围,结果如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知,随着抑制性突触权值的增加,模块的 $|\Delta t|$ 范围得到扩展,但是对于较小的 $|\Delta t|$ ($|\Delta t| < 2.2 \mu\text{s}$),即在较大的运动速度下,模块无法正确识别(幅值比为 1:1 时, $|\Delta t|$ 的范围是 $1.4 \mu\text{s} < |\Delta t| < 3.1 \mu\text{s}$; 幅值比为 1:2 时, $|\Delta t|$ 的范围是 $2.2 \mu\text{s} < |\Delta t| < 6 \mu\text{s}$)。图 6(b) 给出的是不同电流偏置组合下的 $|\Delta t|$ 范围。保持 LDC1 的电流偏置为 9 mA 时,BPD1 和 BPD2 的输出电脉冲幅度比为 1:2。由图 6(b) 可知,电流偏置的组合对 $|\Delta t|$ 范围的宽度和模块可识别的最大速度有影响;当 DFB 激光器 2 偏置电流增加时,抑制性突触的响应时长增加, $|\Delta t|$ 范围扩展,但同时 $|\Delta t|$ 最小值增大(速度范围的上限降低),速度范围和速度上限仍呈现互补关系。

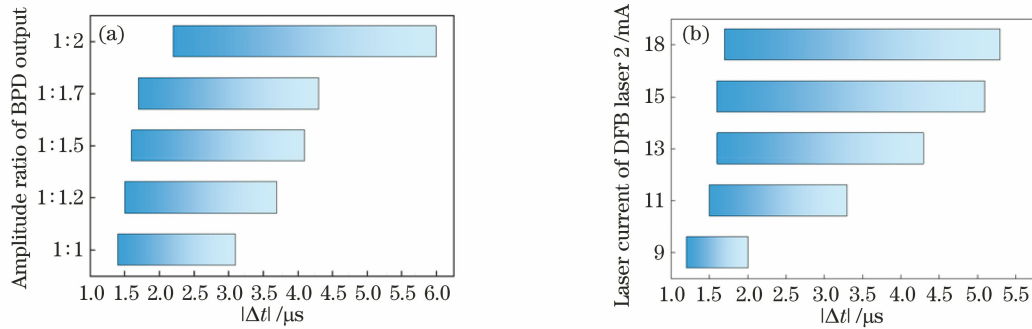


图 6 不同参数对 Δt 范围的影响。(a) 权值; (b) 偏置电流

Fig. 6 Effect of different parameters on range of Δt . (a) Weight value; (b) bias current

3 结 论

提出了基于 DFB 激光器的高速运动方向识别方案, 实现了一维方向上马赫量级运动速度的方向识别。探究了电流偏置对 DFB 激光器光脉冲响应宽度的影响, 分析了 DS 结构模型和脉冲响应宽度在运动方向识别任务中的作用原理, 论证了 DFB 激光器光脉冲响应宽度可调特性用于高速运动方向选择任务的合理性; 构建了基于 DFB 激光器的高速运动方向识别模块, 论证了一维方向上马赫量级速度运动方向的识别能力、权值调节和电流偏置组合对模块适用速度范围的调控性。该模块具有适用速度高和操作简单等优势, 为高速运动方向识别提供了可行性方案。未来将进一步针对实际探测信号进行测试, 并且开展二维和三维空间上的组合方向识别研究。

参 考 文 献

- [1] Strother J A, Wu S T, Wong A M, et al. The emergence of directional selectivity in the visual motion pathway of drosophila[J]. *Neuron*, 2017, 94(1): 168-182.
- [2] Biswas T, Lee C H. Visual motion: cellular implementation of a hybrid motion detector [J]. *Current Biology*, 2017, 27(7): R274-R276.
- [3] Kim J S, Greene M J, Zlateski A, et al. Space-time wiring specificity supports direction selectivity in the retina[J]. *Nature*, 2014, 509(7500): 331-336.
- [4] Coombs D, Herman M, Hong T H, et al. Real-time obstacle avoidance using central flow divergence, and peripheral flow [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(1): 49-59.
- [5] Li Q W, Zhou Y Q, Ma Y P, et al. Salient object detection method based on binocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315002.
- [6] Ma Q, Zhu B, Cheng Z D, et al. Detection and recognition method of fast low-altitude unmanned aerial vehicle based on dual channel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1210002.
- [7] Ma 旗, 朱 斌, 程 正 东, 等. 基 于 双 通 道 的 快 速 低 空 无 人 机 检 测 识 别 方 法 [J]. *光 学 学 报*, 2019, 39(12): 1210002.
- [8] Giulioni M, Lagorce X, Galluppi F, et al. Event-based computation of motion flow on a neuromorphic analog neural platform [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2016, 10: 35.
- [9] Pan S L, Zhang Y M. Microwave photonic radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020: 1.
- [10] Xin G Y, Zou W W, Long X, et al. Polarization optimization for instantaneous frequency measurements based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0507001.
- [11] 忻 光 耀, 邹 卫 文, 龙 鑫, 等. 受 激 布 里 渊 散 射 瞬 时 频 率 测 量 的 偏 振 优 化 [J]. *光 学 学 报*, 2019, 39(5): 0507001.
- [12] Li C G, Qian N, Deng A Y, et al. Channel-mismatch compensation of photonic analog-to-digital converter for wideband radar direct receiving [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1606002.
- [13] 李 成 功, 钱 娜, 邓 安 逸, 等. 面 向 宽 带 雷 达 直 接 接 收 的 光 子 模 数 转 换 系 统 中 的 通 道 失 配 补 偿 [J]. *光 学 学 报*, 2020, 40(16): 1606002.
- [14] Zou W W, Ma B W, Xu S F, et al. Towards an intelligent photonic system [J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(6): 160401.
- [15] Lin R Z, Ge J, Tran P, et al. Biomimetic photonics: jamming avoidance system in *Eigenmannia* [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13349-13360.
- [16] Izhikevich E M. Neural excitability, spiking and

- bursting[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2000, 10(6): 1171-1266.
- [14] Izhikevich E M. Which model to use for cortical spiking neurons? [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2004, 15(5): 1063-1070.
- [15] Prucnal P R, Shastri B J, de Lima T F, et al. Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2): 228-299.
- [16] Cheng Z G, Ríos C, Pernice W H P, et al. On-chip photonic synapse[J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1700160.
- [17] Feldmann J, Youngblood N, Wright C D, et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 208-214.
- [18] Zhang Z X, Wu Z M, Lu D, et al. Controllable spiking dynamics in cascaded VCSEL-SA photonic neurons[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 99(2): 1103-1114.
- [19] Wang R, Ren Q S, Zhao J Y. Research progress on photonic neuromorphic computing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120004. 王睿, 任全胜, 赵建业. 光学神经拟态计算研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120004.
- [20] Ma B W, Chen J P, Zou W W. A DFB-LD-based photonic neuromorphic network for spatiotemporal pattern recognition [C]//*Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California*. Washington, D.C.: OSA, 2020: M2K.2.
- [21] Ma B W, Zou W W. Demonstration of a distributed feedback laser diode working as a graded-potential-signaling photonic neuron and its application to neuromorphic information processing [J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(6): 160408.