

混沌光注入展宽半导体激光器混沌载波发射机带宽

孙巍阳, 张胜海, 吴天安, 张晓旭

解放军信息工程大学理学院, 河南 郑州 450000

摘要 分析了一种展宽半导体激光器混沌载波发射机带宽的方案,即混沌光注入的外腔反馈半导体激光混沌发生器。利用数值模拟的方法分析了主从半导体激光器中失谐频率、注入强度、主从激光器偏置电流和从激光器的反馈强度对混沌载波发射机带宽的影响以及主激光器反馈强度对混沌载波信号反馈延时特性的影响。确定了能将混沌有效带宽展宽到 25.8 GHz 的参数组,该带宽约为半导体激光器原始混沌带宽 5.1 GHz 的 5 倍。

关键词 激光器; 半导体激光器; 混沌激光; 光注入; 带宽

中图分类号 O415; N93 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061410

Broadening the Bandwidth of Chaotic Carrier Transmitter in Semiconductor Lasers with Chaotic Optical Injection

Sun Weiyang, Zhang Shenghai, Wu Tianan, Zhang Xiaoxu

Institute of Science, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450000, China

Abstract A scheme of broadening the bandwidth of chaotic carrier transmitter in semiconductor lasers, namely, semiconductor lasers with chaotic optical injection is analyzed. The influence of the parameters, such as the detuning frequency, injection strength, bias current and slave laser feedback intensity, on the chaotic carrier transmitter bandwidth and master laser feedback intensity on the time delay signature are analyzed respectively by numerical simulation. The parameter set of which can broad the bandwidth to 25.8 GHz is confirmed, and it is five times than the original bandwidth of 5.1 GHz.

Key words lasers; semiconductor laser; chaotic laser; optical injection; bandwidth

OCIS codes 140.1540; 190.3100; 140.5960; 060.4510

1 引言

近年来,光通信技术快速发展,其具有传输频带宽、通信容量大和抗电磁干扰等优点^[1]。波分复用和时分复用技术更是大幅提高了光通信的容量和速率^[2-7]。然而,光通信的信息传输安全仍然是一个极具挑战性的课题。半导体激光器在外腔反馈和外光注入下很容易实现混沌光输出,由于混沌系统的不确定性,它在光通信的信息安全领域中的应用越来越广泛^[8-9]。在数据传输中,信息的保密性和传输速率是最重要的两部分^[10-15]。其中,信息保密的技术关键在于混沌系统反馈延时特性的抑制;而信息传输速率取决于混沌载波发射机的带宽。传统的混沌载波发射机的带宽只有数吉赫兹,无法满足高速光通信的需求。因此,为了突破数据传输速率的瓶颈,必须提高混沌载波发射机载波信号的带宽。

目前,提高带宽的方法主要有普通强光注入、混沌自相位调制^[16]以及交叉相位调制^[17],三种方法均能在一定程度上大幅展宽混沌载波发射机带宽,然而,在反馈延时特性的抑制上却没有明显优势。通过数值模拟可以发现,强光注入方案中主激光器偏置电流、主从激光器频率失谐以及注入强度均对混沌载波信号带宽

收稿日期: 2016-11-15; **收到修改稿日期:** 2016-12-06

基金项目: 河南省重点科技攻关计划 (152102210012)

作者简介: 孙巍阳(1992—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器随机数生成方面的研究。E-mail: 1533396627@qq.com

导师简介: 张胜海(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事半导体激光器随机数生成方面的研究。

E-mail: ccstshz@163.com

有影响。在此基础上,本文提出一种不仅能展宽混沌载波信号带宽,还能够同时改善其反馈延时特性的有效方案^[18-21],即具有外腔反馈的半导体激光器受到外部混沌光注入的方案,既能展宽混沌载波发射机带宽,同时又能改善输出信号的反馈延时特性,提高信息传输的安全性以及传输速率。

2 理论分析

图 1 所示为混沌光注入的半导体激光混沌发生器由两个具有同样结构的外腔反馈半导体激光器构成,激光器的反馈强度均可调节。主激光器输出混沌光经过光隔离器后再经分束器注入到从激光器中,从激光器的输出光即为带宽展宽后的混沌载波信号。

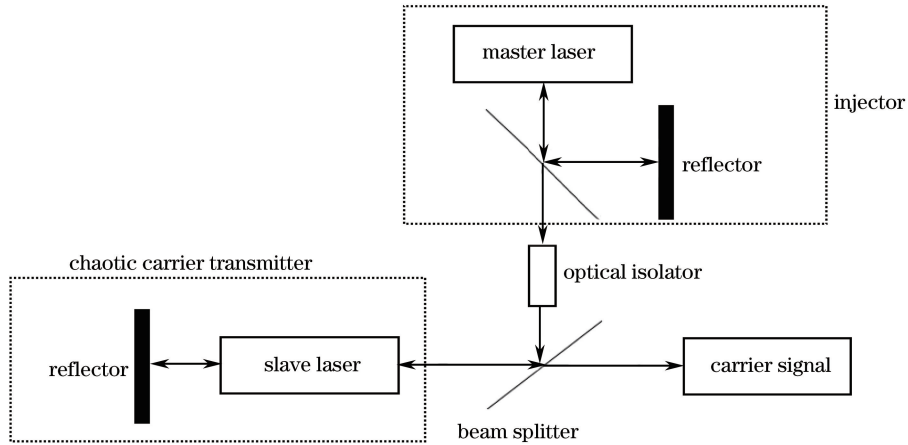


图 1 混沌光注入混沌载波发射机

Fig. 1 Chaotic carrier transmitter with chaotic optical injection

利用四阶 Lang-Kobayashi 方程描述混沌激光系统的工作状态为^[22]

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = 0.5 \left\{ G_n [N_m(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} E_m(t) + k_1 E_m(t - \Delta t_1) \cos [\omega_1 \Delta t_1 + \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta t_1)], \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_m(t)}{dt} = 0.5\alpha \left\{ G_n [N_m(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} - k_1 \frac{E_m(t - \Delta t_1)}{E_m(t)} \sin [\omega_1 \Delta t_1 + \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta t_1)], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_s(t)}{dt} = & 0.5 \left\{ G_n [N_s(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} E_s(t) + k_2 E_s(t - \Delta t_2) \cos [\omega_1 \Delta t_2 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_2)] + \\ & k_3 E_s(t - \Delta t_3) \cos [\omega_1 \Delta t_3 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_3) - t \Delta \omega], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_s(t)}{d(t)} = & 0.5\alpha \left\{ G_n [N_s(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} - k_2 \frac{E_s(t - \Delta t_2)}{E_s(t)} \sin [\omega_2 \Delta t_2 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_2)] - \\ & k_3 \frac{E_s(t - \Delta t_3)}{E_s(t)} \sin [\omega_2 \Delta t_3 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_3) - t \Delta \omega], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dN_{m,s}(t)}{dt} = j_{1,2} j_{th} - \frac{N_{m,s}(t)}{t_s} - \frac{G_n [N_{m,s}(t) - n_0]}{1 + \epsilon E_{m,s}^2(t)} E_{m,s}^2(t), \quad (5)$$

式中 $E_m(t)$ 和 $\phi_m(t)$ 分别为主激光器输出光振幅和相位, $E_s(t)$ 和 $\phi_s(t)$ 分别为从激光器输出光振幅和相位, $N(t)$ 为载流子浓度, k_1 、 k_2 为主从激光器反馈强度, k_3 为注入强度, Δt_1 、 Δt_2 为主从激光器反馈延时时时间, Δt_3 为注入延时时时间, j_1 、 j_2 分别为主从激光器偏置电流, ϵ 为增益饱和系数, 两个角频率分别为 $\omega_1 = 2\pi c/\lambda_1$ 和 $\omega_2 = 2\pi c/\lambda_2$, 角频率差 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, 主从激光器失谐频率 $\Delta f = \Delta\omega/(2\pi)$ 。

混沌带宽增强系统中混沌载波发射机基本参数如表 1 所示。

3 数值模拟和参数分析

3.1 无外光注入的混沌半导体激光器参数对混沌载波信号带宽的影响

通过数值模拟可以发现,混沌载波发射机的外腔反馈强度和激光器偏置电流对系统带宽具有很大影响。

图 2 对比了采用不同反馈强度和偏置电流时输出光强频谱图差异。

表 1 混沌载波发射机基本参数

Table 1 Parameters of chaotic carrier transmitter

Internal parameter	Value
Gain factor (G_n)	$8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Carrier density (n_0)	$1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Photon lifetime (t_p)	$1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$
Slavelaser wavelength (λ_2)	$1.5369 \times 10^{-6} \text{ m}$
Speed of light (c)	$3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Linewidth amplification factor (α)	3.0
Threshold current (j_{th})	$9.89 \times 10^{32} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
Carrier lifetime (t_s)	$2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$
Slavelaser bias current (j_2)	$1.2 j_{th}$
Feedback intensity (k_2)	$6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$
Delay time (Δt_2)	$6 \times 10^{-9} \text{ s}$

图 2(a) 中所用参数与表 1 一致, 即反馈强度 $k_2 = 6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, 偏置电流 $j_2 = 1.2 j_{th}$, 输出光带宽为 5.1 GHz (此处带宽为 80% 能量带宽, 文中如无特殊说明带宽均为 80% 能量带宽); 图 2(b) 中反馈强度 $k_2 = 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 偏置电流 $j_2 = 1.2 j_{th}$, 输出光带宽为 6.1 GHz; 图 2(c) 中反馈强度 $k_2 = 6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, 偏置电流 $j_2 = 1.5 j_{th}$, 输出光带宽为 8.9 GHz。对比图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, 保持偏置电流不变增加外腔反馈强度能在一定程度上使输出频谱图更平坦, 并展宽带宽; 对比图 2(a) 和图 2(c) 可以看出, 保持外腔反馈强度不变, 适当增加激光器偏置电流能大幅展宽混沌载波信号带宽。

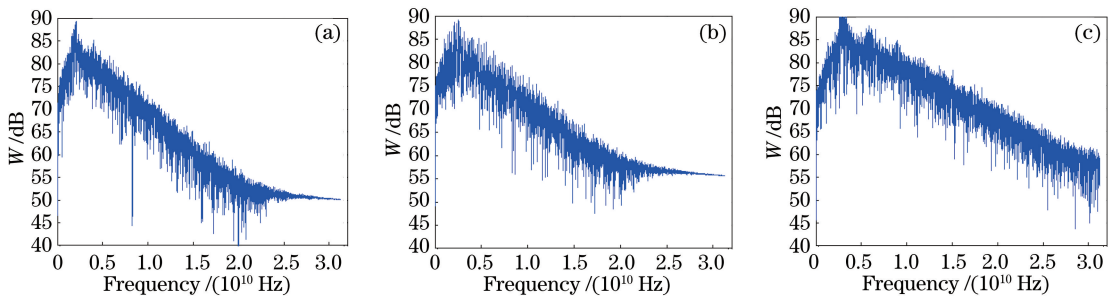


图 2 不同反馈强度和偏置电流输出光强度频谱图

Fig. 2 Spectrum of output light intensity under different feedback intensities and bias currents

图 3 给出了从激光器归一化外腔反馈强度和偏置电流对混沌载波信号带宽的综合影响。

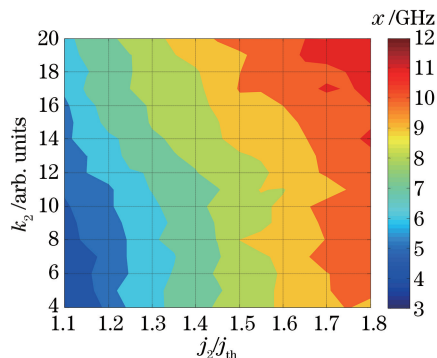


图 3 反馈强度和偏置电流对带宽的影响

Fig. 3 Effect of feedback intensity and bias current on bandwidth

由图 3 可以看出, 在整个参数区间内, 随着反馈强度和偏置电流的增加, 输出光带宽呈现递增趋势。反馈强度的增加改善了系统的混沌状态, 展宽了输出信号带宽。但是, 若其过大会劣化输出光反馈延时特性, 严重影响信息传输的安全性。因此, 在实际应用中反馈强度的选择主要考虑该应用对载波信号保密性能的

要求,针对不同的要求选择合适的反馈强度。另外,偏置电流增大到一定程度之后李雅普诺夫指数随着偏置电流的增大而减小。

3.2 注入部分主激光器参数对混沌载波信号带宽的影响

在研究注入部分主激光器参数对混沌载波信号带宽的影响之前需要确定从激光器的参数。从激光器外腔反馈强度 $k_2 = 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、偏置电流 $j_2 = 1.5 j_{\text{th}}$ 时得到的结果较为理想,而不加注入时,混沌载波信号带宽为 8.6 GHz。注入部分参数如表 2 所示。

表 2 注入部分参数
Table 2 Parameters of injector

Internal parameter	Value
Gain factor (G_n)	$8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Carrier density (n_0)	$1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Photon lifetime (t_p)	$1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$
Speed of light (c)	$3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Linewidth amplification factor (α)	3.0
Threshold current (j_{th})	$9.89 \times 10^{32} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
Carrier lifetime (t_s)	$2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$
Feedback intensity (k_1)	10^{10} s^{-1}
Delay time (Δt_1)	$6 \times 10^{-9} \text{ s}$

通过数值模拟可以发现主激光器的偏置电流 j_1 、注入强度 k_3 以及主从激光器失谐频率 Δf 对输出光带宽均有影响。

3.2.1 主激光器偏置电流对混沌载波信号带宽的影响

图 4 所示为主激光器偏置电流对带宽的影响。其中,主从激光器失谐频率 $\Delta f = 10 \text{ GHz}$,激光器注入强度 $k_3 = 1.3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。

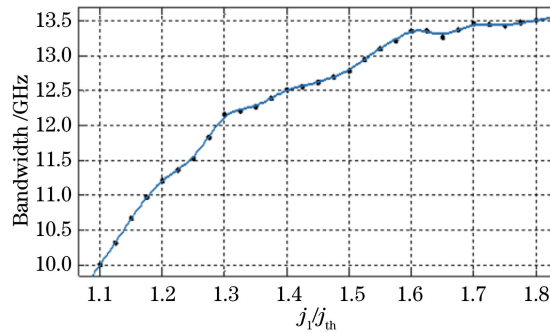


图 4 主激光器偏置电流对带宽的影响

Fig. 4 Effect of master laser bias current on bandwidth

由于偏置电流影响激光器反转粒子数,当偏置电流增大时反转粒子数目增加,从而激光器输出光强增大,持续增大偏置电流使得反转粒子数达到饱和,此时,继续增大偏置电流则对激光器输出光影响不明显。由图 4 可以看出,当主激光器偏置电流小于 $1.6 j_{\text{th}}$ 时,随着偏置电流的增加带宽大小接近线性增长;但当偏置电流大于 $1.6 j_{\text{th}}$ 时,再增加偏置电流则带宽变化不明显,并且偏置电流过大反而使得系统李雅普诺夫指数降低;当偏置电流取 $1.6 j_{\text{th}}$ 时,带宽为 13.4 GHz,对比 $1.1 j_{\text{th}}$ 时的 10 GHz,展宽了三分之一。综上,主激光器偏置电流为 $1.6 j_{\text{th}}$ 输出结果较为理想。

3.2.2 主激光器注入强度对混沌载波信号带宽的影响

图 5 所示为注入强度对带宽的影响。其中,主从激光器失谐频率 $\Delta f = 10 \text{ GHz}$,主激光器偏置电流 $j_1 = 1.6 j_{\text{th}}$ 。

与偏置电流影响不同的是注入强度直接决定主激光器对从激光器扰动的幅度,增大注入强度即是增强主激光器对从激光器的扰动幅度。而主激光器对从激光器的扰动幅度直接影响输出载波信号带宽。由图 5 可以看出,在整个参数区间内,随着注入强度的增加,混沌载波信号带宽呈递增趋势。注入强度为 0 时,载波

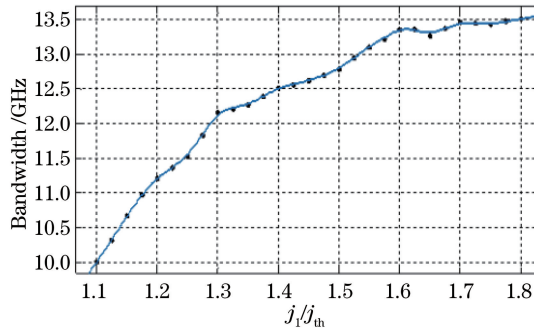


图 5 注入强度对带宽的影响

Fig. 5 Effect of injection strength on bandwidth

信号带宽为 8 GHz, 当注入强度增大到 $2.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 时, 带宽增大到了 21 GHz, 为原来的 2.5 倍。当注入强度超过 $4 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 时, 系统处于强光注入锁定状态, 此时输出光不再处于混沌状态。综合分析, 认为主激光器注入强度 $3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 时输出结果较为理想。

3.2.3 主从激光器失谐频率对混沌载波信号带宽的影响

图 6 所示为主从激光器失谐频率对带宽的影响。其中, 主激光器注入强度 $k_3 = 3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 主激光器偏置电流 $j_1 = 1.6 j_{th}$ 。

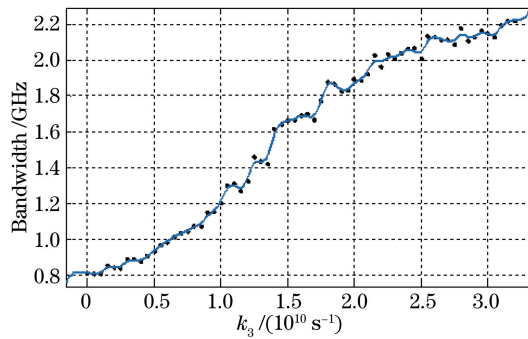


图 6 主从激光器失谐频率对带宽的影响

Fig. 6 Effect of master-slave laser detuning frequency on bandwidth

数值研究表明, 主从激光器一定程度的正失谐能够展宽输出信号带宽, 这正是由于频率失谐使得主从激光器的中心频率有所偏差, 从而间接展宽了输出载波信号带宽。由图 6 可以看出, 当主从激光器失谐频率小于 26 GHz 时, 随着失谐频率的增加, 混沌载波信号带宽由 18.4 GHz 展宽到了 25.8 GHz。可见, 适当增加失谐频率可以大幅展宽带宽。当主从激光器失谐频率大于 26 GHz 时, 随着失谐频率的增加, 载波信号带宽逐渐减小。因此, 可以认为主从激光器失谐频率为 26 GHz 为最佳。

3.3 主激光器反馈强度对混沌载波信号光强反馈延时特性的影响

图 7 为不同主激光器反馈强度下混沌载波信号光强自相关函数图^[23-24]。其中, 主激光器注入强度 $k_3 = 3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 主激光器偏置电流 $j_1 = 1.6 j_{th}$, 主从激光器失谐频率 $\Delta f = 26 \text{ GHz}$ 。

图 7(a)~(d) 中反馈强度依次为 $0, 10^{10}, 2 \times 10^{10}, 3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。其中, 图 7(a) 对应自相关函数特征峰值为 0.3084; 图 7(b)~(c) 对应特征峰值分别为 0.2165 和 0.1738; 图 7(d) 中特征峰值达到 0.3206。由此可见, 对比没有外腔反馈的固定强光注入, 混沌光注入在输出信号的反馈延时特性抑制上具有明显优势, 适当增加主激光器的反馈强度能够有效改善输出信号的反馈延时特性, 但反馈强度过大会使得延时特征峰值增加, 劣化输出信号的反馈延时特性。计算发现主激光器反馈强度取 $2 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 时输出结果较为理想。

4 结 论

通过分析从激光器外腔反馈强度和激光器偏置电流对带宽的影响, 再综合考虑由于外腔反馈强度和激

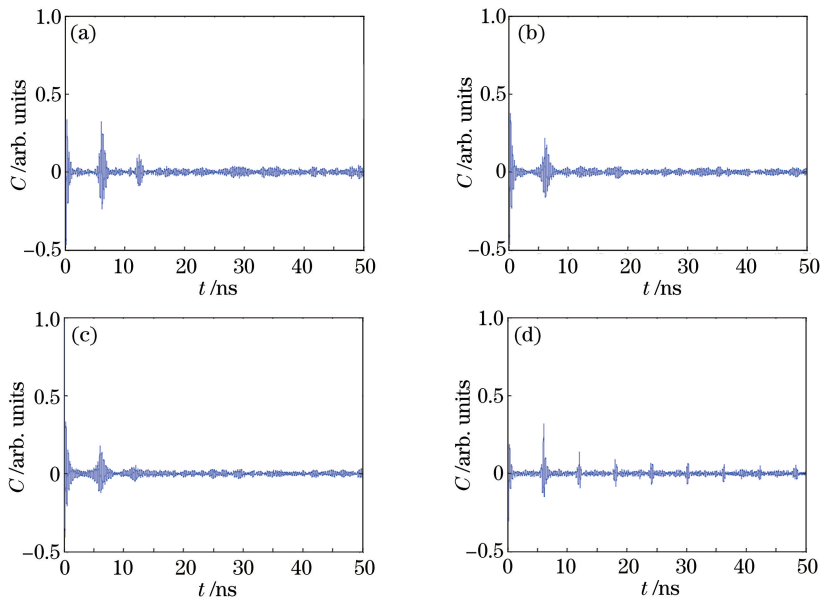


图 7 主激光器反馈强度对反馈延时特性的影响

Fig. 7 Effect of master laser feedback intensity on time delay signature

激光器偏置电流增大所带来的负面影响,发现从激光器外腔反馈强度和偏置电流分别取 10^{10} s^{-1} 和 $1.5 j_{th}$ 时,输出结果较为理想。不加混沌注入光时混沌载波信号带宽为 8.6 GHz,比原始混沌带宽 5.1 GHz 展宽了 1.7 倍。再通过分析注入部分各参数(主激光器偏置电流、注入强度、主从激光器失谐频率)对混沌载波信号带宽的影响,可以发现当主激光器偏置电流 $j_1 = 1.6 j_{th}$,注入强度 $k_3 = 3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$,主从激光器频率失谐 $\Delta f = 26 \text{ GHz}$ 时混沌载波信号带宽为 25.8 GHz,即展宽到原始混沌带宽的 5 倍。

另一方面,从信息传输的安全性角度而言,具有合适反馈强度的混沌光注入时相较于普通强光注入反馈延时的特征峰值明显降低,大幅提高了信息传输的安全性。

参 考 文 献

- [1] Wang Yuncai, Zhang Gengwei, Wang Anbang, *et al.* Broadening the bandwidth of chaotic carrier wavelet in semiconductor lasers with optical injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4372-4377.
王云才, 张耕玮, 王安邦. 光注入提高半导体激光器混沌载波发射机的带宽[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4372-4377.
- [2] Bourmpos M, Argyris A, Syvridis D. Sensitivity analysis of astar optical network based on mutually coupled semiconductor lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(16): 2618-2624.
- [3] Wu J G, Wu Z M, Liu Y R, *et al.* Simulation of bidirectional long-distance chaos communication performance in a novel fiber-optic chaos synchronization system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(3): 461-467.
- [4] Wu J G, Wu Z M, Tang X, *et al.* Experimental demonstration of LD-based bidirectional fiber-optic chaos communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 587-590.
- [5] Argyris A, Syvridis D, Annovazzi-Lodi V, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber optic links[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 343-346.
- [6] Hong Y H, Lee M W, Jon P, *et al.* GHz bandwidth message transmission using chaotic vertical-cavitysurf-ace-emitting lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(22): 5099-5105.
- [7] Annovazzi-Lodi V, Aromataris G, Benedetti M, *et al.* Private transmission with chaotic lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(8): 1095-1101.
- [8] Zhao Qingchun, Wang Yuncai. Research progress in security analysis of chaotic optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(3): 030602.
赵清春, 王云才. 混沌激光通信的保密性能研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(3): 030602.
- [9] Li Pu, Wang Yuncai. Research progress in physical random number generator based on laser chaos for high-speed secure communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060002.

- 李 璞, 王云才. 面向高速保密通信的激光混沌物理随机数发生器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 060002.
- [10] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, *et al.* Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser[J]. *Physics Review Letters*, 2009, 103(2): 024102.
- [11] Li P, Wang Y C, Wang A B, *et al.* Direct generation of all-optical random numbers from optical pulse amplitude chaos [J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 4297-4308.
- [12] Li X Z, Chan S C. Random bit generation using an optically injected semiconductor laser in chaos with oversampling [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2163-2165.
- [13] Uchida A, Amano K, Lnoe M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 728-732.
- [14] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, *et al.* Loss of time delay signature in broadband cascade-coupled semiconductor lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(23): 2187-2190.
- [15] Xiang S Y, Pan W, Zhang L Y, *et al.* Phase-modulated dual-path feedback for time delay signature suppression from intensity and phase chaos in semiconductor laser [J]. *Optics Communications*, 2014, 324: 38-46.
- [16] Yan S L. Enhancement of chaotic carrier bandwidth in a semiconductor laser transmitter using self-phase modulation in an optical fiber external round cavity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(11): 1007-1012.
- [17] Yan Senlin. Enhancement of chaotic carrier bandwidth in a semiconductor laser transmitter using cross phase modulation in an optical fiber external round cavity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 3810-3816.
颜森林. 交叉相位调制提高半导体激光器混沌载波发射机带宽方法 [J]. *物理学报*, 2010, 59(6): 3810-3816.
- [18] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, *et al.* Loss of time-delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser with optical feedback [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 2960-2962.
- [19] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, *et al.* Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point view [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(7): 879-891.
- [20] Wu Y, Wang Y C, Li P, *et al.* Can fixed time delay signature be concealed in chaotic semiconductor laser with optical feedback [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1371-1379.
- [21] Guo Y Y, Wu Y, Wang Y C. Method to identify time delay of chaotic semiconductor laser with optical feedback [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(6): 061901.
- [22] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [23] Sukow D W, Heil T, Fischer I, *et al.* Statistical studies of semiconductor lasers with delayed optical feedback [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1999: 668-678.
- [24] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, *et al.* Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point view [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(7): 879-891.