

利用光反馈多模激光器结合滤波器产生平坦混沌

李鲲鹏 李璞 郭晓敏 郭龔强 张建国 刘义铭 徐兵杰 王云才

Flat chaos generated by optical feedback multi-mode laser with filter

Li Kun-Ying Li Pu Guo Xiao-Min Guo Yan-Qiang Zhang Jian-Guo Liu Yi-Ming Xu Bing-Jie Wang Yun-Cai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 110501 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190171

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190171>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超长腔碳纳米管锁模多波长掺镱光纤激光器

Ultra-long cavity multi-wavelength Yb-doped fiber laser mode-locked by carbon nanotubes
物理学报. 2015, 64(20): 204205 <https://doi.org/10.7498/aps.64.204205>

滤波对8字腔掺铒光纤激光器锁模运转的影响

Influence of spectral filtering on mode-locking operation of figure-eight Er-doped fiber laser
物理学报. 2019, 68(6): 064206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182144>

紫外域多纵模高光谱分辨率激光雷达探测气溶胶的技术实现和系统仿真

Technical realization and system simulation of ultraviolet multi-mode high-spectral-resolution lidar for measuring atmospheric aerosols
物理学报. 2018, 67(3): 030701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172036>

多横模垂直腔面发射激光器及其波长特性

Multi-transverse-mode and wavelength split characteristics of vertical cavity surface emitting laser
物理学报. 2015, 64(16): 164203 <https://doi.org/10.7498/aps.64.164203>

多模1064nm光纤激光器实现一维远失谐光晶格

One-dimensional far-detuned optical lattice realized with a multimode 1064 nm laser
物理学报. 2016, 65(4): 043701 <https://doi.org/10.7498/aps.65.043701>

利用啁啾脉冲光谱滤波和非线性偏振旋转技术实现高稳定性和开机自启动的全光纤掺Yb³⁺光纤锁模激光器

Highly stable and self-started all-fiber Yb³⁺ doped fiber laser mode-locked by chirped pulse spectral filtering and nonlinear polarization evolution
物理学报. 2016, 65(21): 214207 <https://doi.org/10.7498/aps.65.214207>

利用光反馈多模激光器结合滤波器产生平坦混沌*

李锬影¹⁾²⁾ 李璞^{1)2)3)4)5)†} 郭晓敏¹⁾²⁾ 郭龔强¹⁾²⁾ 张建国¹⁾²⁾
刘义铭⁴⁾⁵⁾ 徐兵杰⁴⁾⁵⁾ 王云才¹⁾²⁾

1) (太原理工大学, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

2) (太原理工大学物理与光电工程学院, 太原 030024)

3) (上海大学, 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200444)

4) (中国电子科技集团公司第三十研究所, 成都 610041)

5) (西南通信研究所, 保密通信重点实验室, 成都 610041)

(2019年1月29日收到; 2019年3月25日收到修改稿)

提出了一种利用多模激光器结合滤波器产生频谱平坦、无低频能量缺失的宽带混沌信号产生. 实验分析和对比了光反馈法布里-珀罗混沌半导体激光器滤波前后的多模及单模信号的频谱特性. 结果显示, 相较于多模混沌信号, 单模混沌信号的低频部分能量提升了 25 dB, 实现了 3 dB 带宽为 6 GHz 的平坦混沌产生. 进一步理论研究表明, 单模混沌信号低频成分能量获得显著提升的物理本质在于多模激光器模式竞争.

关键词: 混沌激光, 多模激光器, 模式竞争

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.68.20190171

1 引言

光学混沌在通信领域潜在价值巨大, 受到国内外学者的密切关注, 已被广泛用作保密通信的载波信号^[1], 测距雷达或光时域反射仪的探测信号^[2-4]以及密钥发生器的熵源信号^[5-10].

近年来, 光反馈激光器因宽带、大幅度及结构简单等特性, 是最常用的混沌激光产生系统, 其混沌的动态特性研究受到国内外学者的青睐. 例如: 2001年, Quay等^[11]研究了垂直腔面发射激光器(VCSEL)在强光反馈下的混沌特性, 并理论分析了激光光谱红移的机制; 2007年, Rontani等^[12]研究了光反馈单模半导体激光器中反馈率对时延信

息和弛豫振荡周期的作用; 2010年, 夏光琼教授课题组^[13]研究了双腔反馈混沌半导体(DFB)激光器的时延特征, 且分析了弛豫振荡对时延抑制的影响; 2015年, 潘炜教授课题组^[14]实验和理论分析了两类光反馈DFB激光器的统计特性, 并证实后处理技术可以改善混沌信号的动态特性; 2018年, Ahmad等^[15]研究了交流耦合光反馈混沌半导体激光器的动力学特性, 通过控制反馈强度, 测试了混沌的不稳定性; 2018年, Grillot等^[16]实验研究和对比了两种多模光反馈量子点激光器的动力学特性, 并理论分析了外腔长度变化对混沌振荡的影响.

但受激光器弛豫振荡的影响, 光反馈半导体激光器直接产生的混沌信号能量主要集中在高频弛豫振荡频率处, 低频成分存在严重缺失. 实际应用

* 国家自然科学基金(批准号: 61775158, 61731014, 61671316, 61875147, 61771439)、国家密码局“十三五”国家密码发展基金(批准号: MMJJ20170127)、中国博士后科学基金(批准号: 2018M630283)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划和上海市科委重点实验室项目(批准号: SKLSFO2018-03)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lipu8603@126.com

中信号探测/采集器件的响应通常表现为 3 dB 低通滤波特性, 因此, 混沌信号被利用的有效带宽实际上应是 3 dB 带宽. 低频成分的缺失将局限混沌信号的能量利用率, 制约混沌应用的相关性能 (如混沌通信速率、密钥产生速率、测距雷达及光时域反射仪的测量精度和范围等).

针对低频成分的缺失问题, 本课题组前期提出了光反馈单模混沌激光器结合延迟自干涉结构^[17]、光外差结构^[18]或光纤振荡环^[19]结构的改善方案. 但是, 这些方案结构复杂, 偏振敏感, 易受环境影响.

本文提出一种结构简单、无低频成分缺失的宽带混沌激光产生方案. 具体而言, 我们实验上观察到法布里-珀罗 (FP) 半导体激光器在光反馈扰动下产生的多模混沌激光, 经光带通滤波器后, 将获得宽带平坦的单模混沌光. 实验结果显示: 相较于多模混沌光, 单模混沌光的低频振荡能量可提升 25 dB; 经测量, 该混沌激光的 3 dB 有效带宽可达 6 GHz. 进一步理论分析证明: 单模混沌信号中低频能量获得显著增加原因在于多模竞争, 多模混沌信号低频部分能量会因模式竞争而被抵消.

2 实验装置

图 1 是光反馈 FP 激光器混沌频谱特性分析实验装置示意图. FP 激光器 (FP-LD) 输出激光经偏振控制器 (PC), 被分光比为 60:40 的光纤耦合器分为两路: 40% 一路与光纤反射镜 (FM) 相连构成反馈腔, 驱动 FP 激光器产生多模混沌激光; 所产生的多模混沌激光则由 60% 端口输出.

进而, 多模混沌激光经掺铒光纤放大器

(EDFA), 在光带通滤波器 (BPF) 作用下, 调谐不同的滤波中心, 可以输出不同模式下的单模混沌信号. 实验中, 利用光谱分析仪 (OSA, YOKOGAWA, AQ6370C) 观测混沌信号光谱, 利用 12 GHz 光电探测器 (PD, NEWPORT, 1544B) 与 26.5 GHz 频谱分析仪 (ESA, Agilent Technologies, N9020A) 记录混沌信号频谱.

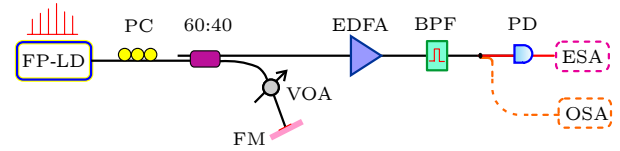


图 1 基于光反馈 FP 激光器混沌频谱特性分析实验装置 (FP-LD, 法布里-珀罗激光二极管; PC, 偏振控制器; VOA, 可调光衰减器; FM, 光纤反射镜; EDFA, 掺铒光纤放大器; BPF, 可调光滤波器; PD, 光电探测器; ESA, 频谱仪; OSA, 光谱仪)

Fig. 1. Experimental setup for the RF spectrum analysis of optical feedback FP laser (FP-LD, Fabry-Perot laser diode; PC, polarization controller; VOA, variable optical attenuator; FM, fiber mirror; EDFA, erbium-doped fiber amplifier; BPF, optical bandpass filter; PD, photodetector; ESA, electrical spectrum analyzer; OSA, optical spectrum analyzer).

3 实验结果

图 2 是实验记录的光反馈 FP 激光器直接输出多模混沌激光的光谱及频谱图. 实验中, FP 激光器偏置于 1.5 倍阈值电流 (12 mA), 反馈强度为 20%. 由图 2(a) 可观察到, FP 激光器直接输出的多模混沌激光由分布在 1535—1555 nm 波长范围内的 19 个纵模共同组成, 相邻纵模间隔约 1.1 nm. 为后续分析方便, 我们将图 2(a) 中能量最高的纵模 (中心波长 1549.291 nm) 定义为 0 模式, 其两侧

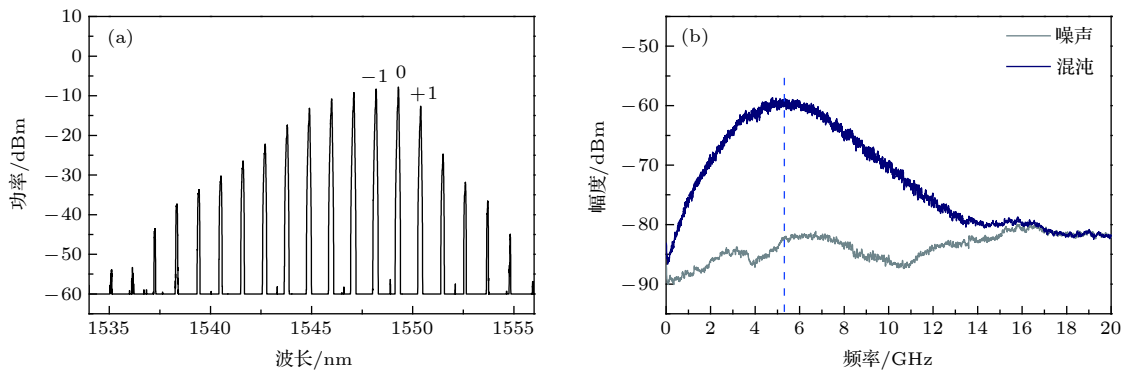


图 2 多模混沌激光特性实验结果 (a) 光谱; (b) 频谱

Fig. 2. Characteristics of the multi-mode chaos: (a) Optical spectrum; (b) RF spectrum.

的 1550.390 nm 和 1548.190 nm 纵模分别定义为 +1 模式和 -1 模式; 其他纵模依次类推, 分别定义为 +2, -2, +3, -3 等. 这里需要指出, 实验中所用光谱仪的分辨率设置为了 0.05 nm. 图 2(b) 是利用频谱分析仪记录的混沌信号频谱图. 实验中, 频谱仪的分辨率带宽和视频带宽分别为 1 MHz 和 1 kHz. 很明显, 多模混沌信号的能量主要集中在激光器弛豫振荡频率 5 GHz 附近, 低频范围 (0—5 GHz) 内的能量存在大幅缺失, 整个频谱呈现出单峰分布. 这与常规的光反馈单模激光器 (DFB 或 VCSEL) 输出混沌信号频谱特低通滤波特性, 这类混沌信号存在低频能量利用率低和 3 dB 有效带宽不足问题.

为了解决低频能量缺失的问题, 我们利用光带通滤波器 BPF(滤波线宽设置为 0.27 nm) 对混沌激光的 0, +1, -1 模式分别进行了滤波, 并实验测量了所获得不同模式下单模混沌信号的光谱及频谱. 图 3(a1)—(a3) 分别对应 3 个不同模式 ($m = -1, 0, +1$) 的单模混沌信号光谱, 而图 3(b1)—(b3) 则分别对应 3 个不同模式下 ($m = -1, 0, +1$) 的单模混沌信号频谱. 与预期一致, $m = 0$ 模式处于整个光谱的中心位置 [图 3(a2)], 因此, 其在频谱上能量最高 (图 3(b2)), 其他两侧模式 ($m = -1, +1$) 能量相对较低 (图 3(b1), (b3)). 但是, 需要注意的是, 不论是哪一个模式, 相对于多模混沌信号, 所有单模混沌信号在低频部分的能量均得到了大幅

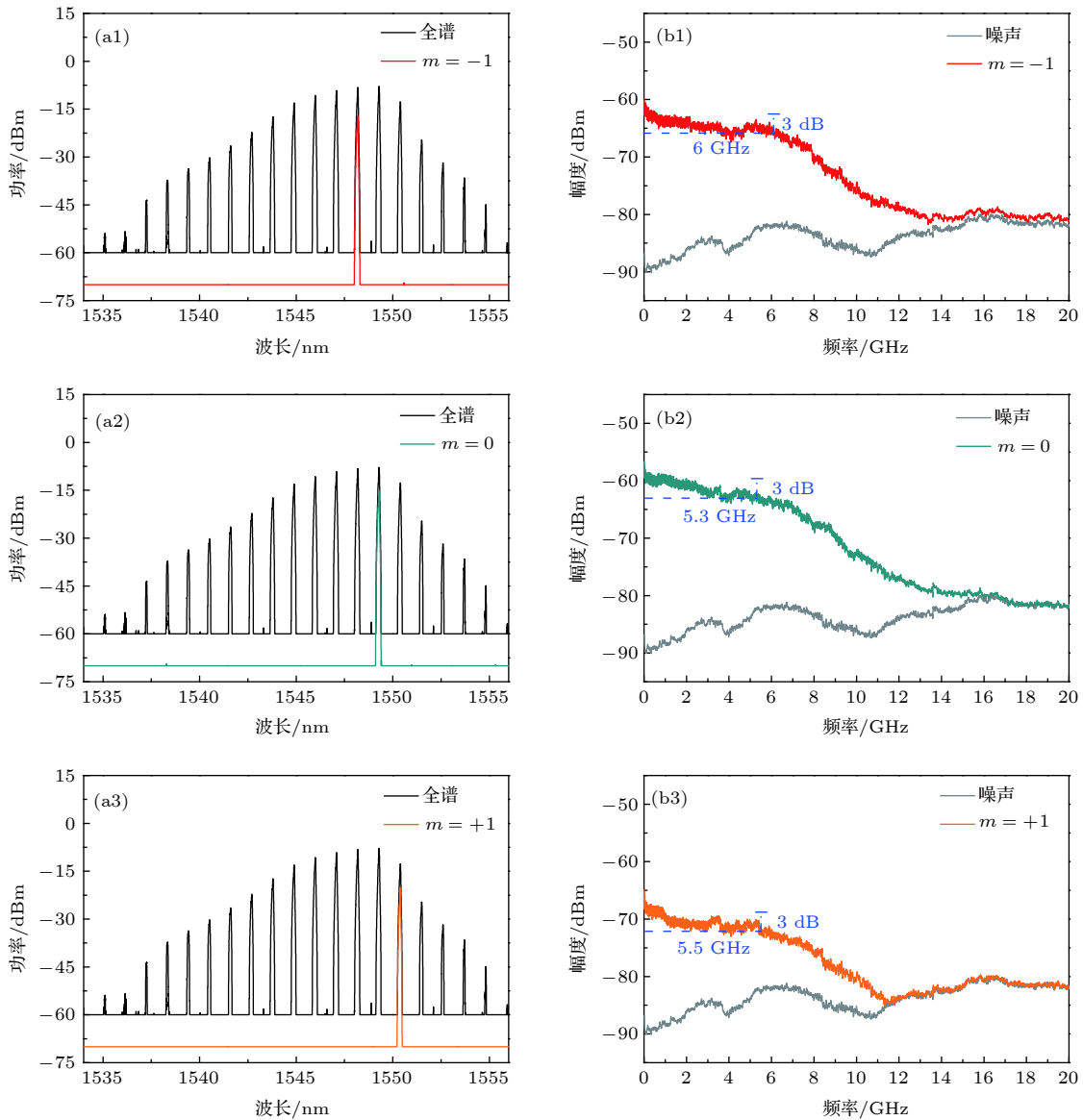


图 3 $m = -1, 0, +1$ 模式下的单模混沌信号特性实验结果 (a1)—(a3) 光谱; (b1)—(b3) 频谱

Fig. 3. Characteristics of single-mode chaotic signals ($m = -1, 0, +1$): (a1)—(a3) Optical spectra; (b1)—(b3) RF spectra.

度提升, 整个频谱更为平坦 (图 3(b)). 这里, 能量提升是通过测量滤波前后混沌频谱在 0 GHz 处对应的功率值来确定的, 以 $m = -1$ 模式下输出的单模混沌信号频谱为例 (图 3(b1)): 经测量, 其低频能量与原始多模混沌激光信号 (图 2(b)) 相比提升了 25 dB, 3 dB 有效带宽可达 6 GHz. 实验中, 反馈强度是指反馈光强度与激光器输出光强度的比值. 我们观察到在偏置电流一定时, 当反馈强度大于 2%, 激光器开始进入混沌态; 当反馈强度到达 20% 时, 混沌信号频谱带宽达到最大, 且反馈强度改变时, 滤波前后混沌带宽变化规律一致. 这意味着只要将多模混沌激光器与相应滤波器简单结合, 即可获得无低频成分缺失的宽带平坦混沌信号产生; 与在先技术 [17–19] 相比, 本实验方案在系统复杂度上获得了显著改善.

4 理论分析结果

进一步, 我们在理论上探究了光反馈多模激光器经过滤波之后获得的不同模式下的单模混沌信号低频成分能量得到显著提升的物理机制. 具体而言, 我们基于 Lang-Kabayashi 提出的理论模型, 对光反馈多模激光器混沌动力学特性进行了数值模拟. 如下 [20, 21]:

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = \frac{1}{2} [G_m(N) - \gamma] E_m(t) + k_t E_m(t - \tau_t) \times \cos(\Delta_m(t)) + F_\gamma(t), \quad (1a)$$

$$\frac{d\Phi_m(t)}{dt} = \alpha/2 [G_m(N) - \gamma] - k_t \sin(\Delta_m(t)) E_m(t - \tau_t)/E_m(t), \quad (1b)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \gamma_e [CN_{th} - N] - \sum_{m=1}^M G_m(N) |E_m(t)|^2, \quad (1c)$$

$$G_m(N) = \frac{g_c(N - N_0)}{1 + s \sum_{m=1}^M |E_m(t)|^2} \left[1 - \left(m \frac{\Delta\omega_L}{\Delta\omega_g} \right)^2 \right], \quad (1d)$$

$$\Delta_m(t) = (\omega_c + m\Delta\omega_L) + \Phi_m(t) - \Phi_m(t - \tau_t), \quad (1e)$$

其中 M 表示多模激光器的模式总数, m 对应多模激光器的第 m 个模式; E , Φ , N 分别表示激光器的

归一化振幅、相位和载流子数; Δ 为激光器自身和外部反馈光的相位差, G 为激光器增益, α 表示线宽增强因子, γ 表示激光器内腔损耗系数, γ_e 为载流子衰减系数, C 为激光器工作时偏置电流系数 ($C = I/I_{th}$, I 为工作电流, I_{th} 为阈值电流), τ 为光在腔内环行一周的时间, $\Delta\omega_L = 2\pi/\tau$ 表示为激光器纵模间隔, τ_t 为反馈光延迟时间, k_t 为反馈光强度, N_{th} 为阈值载流子数 ($N_{th} = N_0 + \gamma/g_c$, N_0 为透明载流子数, g_c 为微分增益系数), ω_c 为增益峰值频率, $\Delta\omega_g$ 为增益宽度, s 为增益饱和系数; $F_\gamma(t) = \sqrt{2\beta\xi(t)}$ 是激光器自发辐射产生的噪声, 其中, $\xi(t)$ 为高斯白噪声, β 为自发辐射率. 对应实验结果, 本文将数值模拟的中心模式波长 ($m = 0$) 对应于 1549 nm, 纵模间隔为 1.1 nm, 自发辐射噪声设置在 -30 dB 量级. 具体参数如表 1 所列.

表 1 光反馈 FP 激光器仿真参数
Table 1. Simulation parameters of FP-LD with optical feedback.

参数	符号	参考值
模式总数目	M	15
线宽增强因子	α	3.5
内腔损耗系数	γ	0.283 ps ⁻¹
载流子损耗系数	γ_e	6.21 × 10 ⁻⁴ ps ⁻¹
归一化电流系数	C	1.5
内腔环行时间	τ	7.3 ps
增益峰值频率	ω_c	2π × 193.7 THz
增益宽度	$\Delta\omega_g$	2π × 10 THz
增益饱和系数	s	1 × 10 ⁻⁷
微分增益系数	g_c	3.2 × 10 ⁻⁹
透明载流子数	N_0	1.25 × 10 ⁸
反馈系数	k_t	0.020 ps ⁻¹
反馈延时	τ_t	2 ns
自发辐射率	β	5 ps ⁻¹

图 4(a) 是模拟获得的 15 纵模光反馈 FP 激光器直接输出多模混沌激光的光谱. 横坐标为光谱模式的相对波长, $\Delta\lambda = 0$ nm 对应的模式波长为 1549 nm. 光谱中可以清楚地看到有 15 个纵模状态存在, 且纵模间隔在 1.1 nm. 图 4(b) 是相应多模混沌信号的频谱图. 与图 2(b) 对比可知: 本仿真结果和上述实验现象一致, 多模混沌信号的大部分能量主要集中在弛豫振荡处, 低频成分的能量存在缺失.

图 5 为滤波后 3 个模式 ($m = -1, 0, +1$) 下单

模混沌信号结果. 图 5(a1)—(a3) 对应不同模式下的频谱图, 可以发现中心模式 ($m = 0$) 的能量最高, 两侧纵模能量递减, 这与实验结果 (图 3(b1)—(b3)) 一致. 图 5(b1)—(b3) 为 FP 激光器在 $m = -1, 0, +1$ 模式下输出的单模混沌信号的时序图. 从时序波动状态上可以看出, $m = -1$ 和 $m = 0$ 模

式的时序起伏趋势相似, 而 $m = -1$ 和 $m = +1$ 模式的时序起伏趋势在一定程度上相反, 这意味着多模激光器模式因为共享载流子, 相互之间存在着不同程度的竞争关系.

定量地, 我们利用关联函数来进一步分析各纵模模式间的这种竞争关系. 关联函数 CC 定义如下:

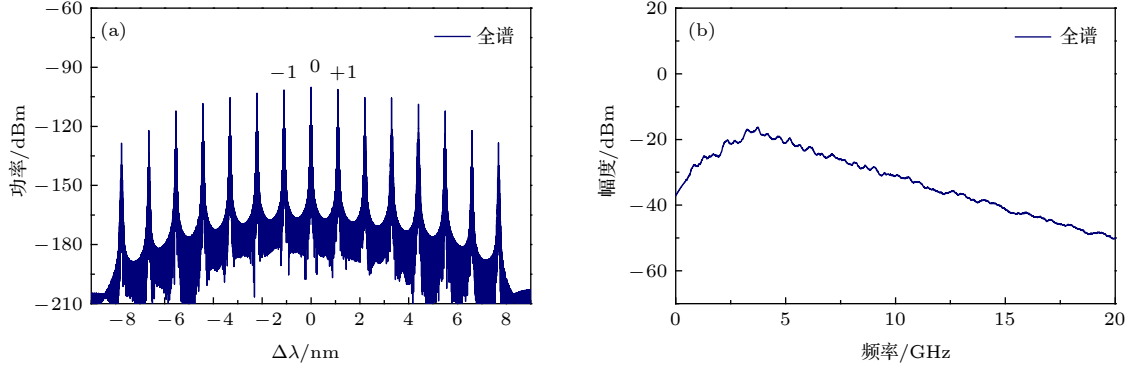


图 4 多纵模光反馈 FP 激光器数值仿真结果 (a) 光谱 ($M = 15$); (b) 频谱

Fig. 4. Numerical results of multi-mode FP-LD with optical feedback: (a) Optical spectrum ($M = 15$); (b) power spectrum.

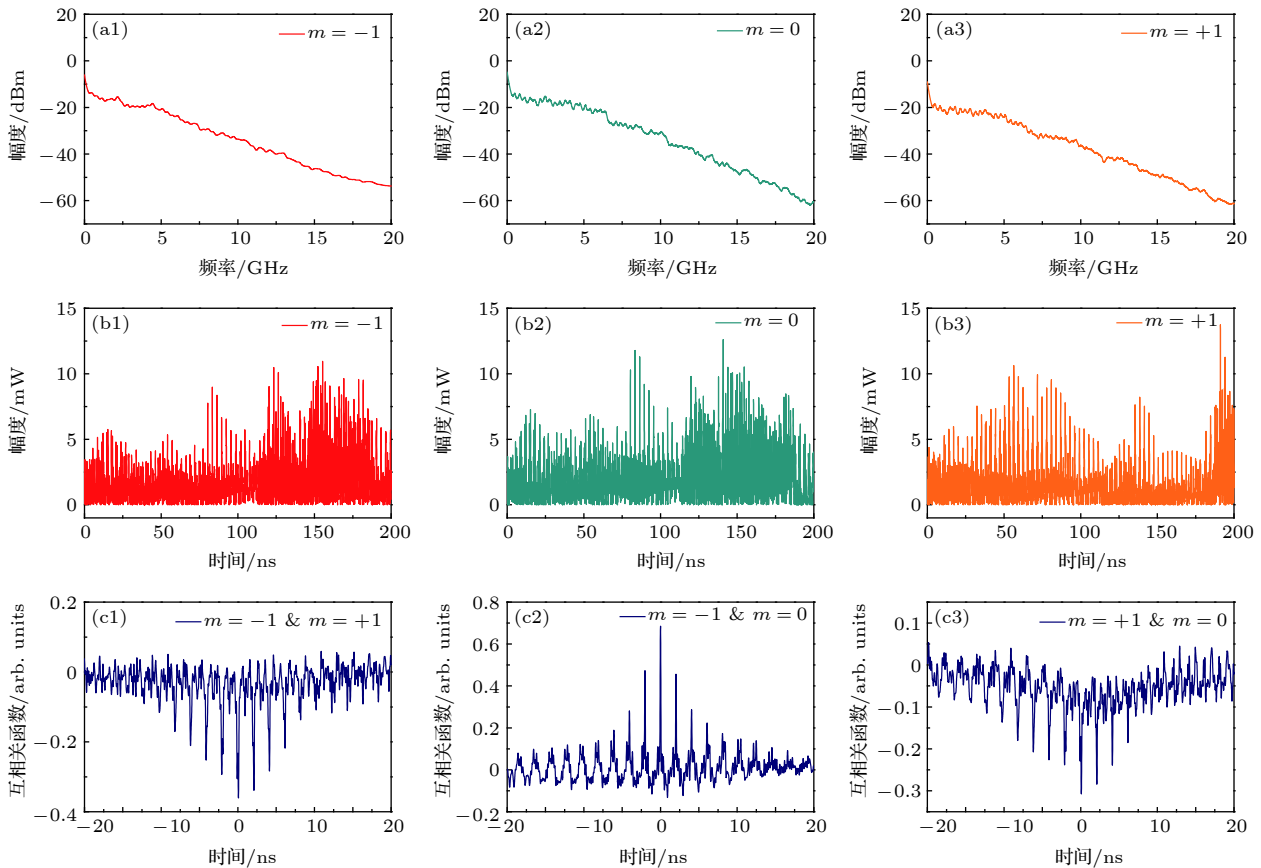


图 5 光反馈多模激光器在 3 个模式 ($m = -1, 0, +1$) 下单模混沌信号的模拟结果 (a1)—(a3) 频谱; (b1)—(b3) 时序; (c1)—(c3) 互相关函数

Fig. 5. Simulation results of single-mode chaotic signals ($m = -1, 0, +1$): (a1)—(a3) Power spectra; (b1)—(b3) time series; (c1)—(c3) cross-correlations.

$$CC = \frac{\langle \left((E_i(t))^2 - \langle (E_i)^2 \rangle \right) \left((E_j(t))^2 - \langle (E_j)^2 \rangle \right) \rangle}{\sqrt{\langle \left((E_i(t))^2 - \langle (E_i)^2 \rangle \right)^2 \rangle \langle \left((E_j(t))^2 - \langle (E_j)^2 \rangle \right)^2 \rangle}}, \quad (2)$$

式中 E_i 和 E_j 分别表示不同模式的复振幅. 当关联函数的 CC 值越趋向于 1 时, 表明模式间同相性越高; 当关联函数的 CC 值越趋向于 -1 时, 表明模式间反相性越高. 图 5(c1)—(c3) 是不同模式间的关联函数曲线. 结果表明, FP 激光器模式间同时存在着不同程度的同相和反相振荡关系. 这证明了单模混沌信号中频谱低频能量获得显著增加的原因在于多纵模激光器的模式竞争. 而所有模式共同作用下输出时的多模混沌信号在低频处的能量部分会因模式竞争关系而被抵消.

5 结 论

实验上通过对光反馈多模半导体激光器进行简单的滤波作用, 可实现常规混沌信号低频能量的显著提升 (25 dB), 使混沌信号频谱相对平坦化, 3 dB 有效带宽得到大幅度增强 (6 GHz). 理论上, 利用光反馈多模激光器数值模型, 分析出滤波后单模混沌激光信号低频部分振荡能量的有效提升的本质原因在于多模激光器模式竞争. 不同模式信号之间的反相关联, 导致了所有模式共存时的多模混沌信号低频能量被互相抵消.

利用低成本多模激光器结合滤波器这种简单结构来产生频谱平坦、无低频能量缺失的宽带混沌信号, 有利于提高混沌信号在实际应用中的能量利用率, 对于混沌相关应用 (如混沌通信、密钥产生、测距雷达及光时域反射仪等) 具有重要意义.

参考文献

[1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P,

- Fischer I, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [2] Lin F L, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 991
- [3] Al-Suhail, G A, Tahir, F R, Abd, M H, Pham, V T, Fortuna L 2018 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **57** 80
- [4] Wang Y C, Wang B J, Wang A B 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1636
- [5] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano K, Naito S, Someya H, Oowada I, Kurashige T, Shiki M, Yoshimori S, Yoshimura K, Davis P 2008 *Nat. Photon.* **2** 728
- [6] Kanter I, Aviad Y, Reidler I, Cohen E, Rosenbluh M 2010 *Nat. Photon.* **4** 58
- [7] Li P, Wang Y C, Zhang J Z 2010 *Opt. Express* **18** 20360
- [8] Tang X, Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 110509 (in Chinese) [唐曦, 吴加贵, 夏光琼, 吴正茂 2011 物理学报 **60** 110509]
- [9] Wang A B, Li P, Zhang J G, Zhang J Z, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 20452
- [10] Li N Q, Kim B, Chizhevsky V N, Loequet A, Bloch M, Citrin D S, Pan W 2014 *Opt. Express* **22** 6634
- [11] Quay C H L, Maxwell I Z, Hudgings J A 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 5856
- [12] Rontani D, Loequet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [13] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Deng T, Fan Li, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [14] Li N Q, Pan W, Loequet A, Chizhevsky V N, Citrin, D S 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 1
- [15] Al-Bayati B M, Ahmad A K, Al-Naimee K A M 2018 *J. Opt. Soc. Am. B* **35** 918
- [16] Huang H M, Lin L C, Chen C Y, Arsenijevic D, Bimberg D, Lin F Y, Grillot F 2018 *Opt. Express* **26** 1743
- [17] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, Zhang B B, Li L, Wang Y C 2013 *Opt. Express* **21** 8701
- [18] Wang A B, Wang B J, Li L, Wang Y C, Shore K A 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 531
- [19] Wang A B, Wang Y C, Yang Y B, Zhang M J, Xu H, Wang B J 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 031112
- [20] Buldu J M, Garcia-Ojalvo J, Torrent M C 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 164
- [21] Yang Q, Wu Z M, Wu G J, Xia G Q 2008 *Opt. Commun.* **281** 5025

Flat chaos generated by optical feedback multi-mode laser with filter*

Li Kun-Ying¹⁾²⁾ Li Pu^{1)2)3)4)5)†} Guo Xiao-Min¹⁾²⁾ Guo Yan-Qiang¹⁾²⁾
Zhang Jian-Guo¹⁾²⁾ Liu Yi-Ming⁴⁾⁵⁾ Xu Bing-Jie⁴⁾⁵⁾ Wang Yun-Cai¹⁾²⁾

1) (*Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

2) (*College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

3) (*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China*)

4) (*No.30 Institute of China Electronic Technology Corporation, Chengdu 610041, China*)

5) (*Science and Technology on Communication Laboratory, Institute of Southwestern Communication, Chengdu 610041, China*)

(Received 29 January 2019; revised manuscript received 25 March 2019)

Abstract

Optical chaos has a wide range of applications in communications, such as secure communication, high-resolution lidar ranging, optical time domain reflectometer, and high-rate physical random bit generator.

In recent years, external-cavity feedback semiconductor lasers (ECLs) are the most common chaotic laser generation systems due to their characteristics of wide bandwidth, large amplitude, and simple structure, and the dynamic characteristics of chaotic signals have attracted much attention. However, limited by the relaxation oscillation of the laser, the energy of the chaotic signal directly generated by ECL is mainly concentrated at high relaxation oscillation frequency. Thus, the low-frequency component encounters the problem of energy loss.

In practical applications, the signal detection/acquisition device usually responds to a 3-dB low-pass filtering characteristic. Therefore, the available effective bandwidth of the chaotic signal should actually be 3-dB bandwidth. The lack of low-frequency components will limit the energy utilization rate of chaotic signals and restrict the relevant performances of chaotic applications (such as reliability and transmission of chaotic secure communication, randomness and generation rate of physical random bits, measurement accuracy and range of lidar ranging or optical time-domain reflectometer).

In the paper, we propose a broadband chaos generation scheme with simple structure and losing no low-frequency components. Specifically, we experimentally analyze the radio frequency (RF) spectra of the single-mode and the multi-mode output from an optical feedback Fabry-Perot (FP) semiconductor laser after and before filtering. The experimental results show that comparing with the multi-mode chaotic signal, the low-frequency energy of the single-mode chaotic spectrum is enhanced by 25 dB, and the 3-dB bandwidth of the single-mode chaotic signal can reach 6 GHz. Further theoretical analysis demonstrates that the enhancement of low-frequency component in the single-mode chaotic signal is caused by the mode-competing in multi-mode laser. It is concluded that this method can well solve the problem of low-frequency energy loss in conventional optical feedback chaotic systems, and is beneficial to improving the energy utilization rate of chaotic signals, which is of great significance for improving the performance of chaotic secure communication, random bit generation, lidar ranging, optical time domain reflectometer, and other relevant applications.

Keywords: chaotic laser, multi-mode laser, mode-competing

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.68.20190171

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61775158, 61731014, 61671316, 61875147, 61771439), the National Cryptography Development Fund, China (Grant No. MMJJ20170127), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M630283), the Program for the Top Young Academic Leaders of High Learning Institutions of Shanxi, China, and the Science and Technology Commission of Shanghai Municipal (STCSM), China (Grant No. SKLSFO2018-03).

† Corresponding author. E-mail: lipu8603@126.com