

# 基于滤波反馈宽带平坦混沌信号的快速物理随机比特产生\*

刘远<sup>1)</sup> 袁冀扬<sup>1)</sup> 周心雨<sup>1)</sup> 谷双全<sup>1)</sup>

周沛<sup>1)2)†</sup> 穆鹏华<sup>3)</sup> 李念强<sup>1)2)‡</sup>

1) (光电科学与工程学院, 苏州纳米科技协同创新中心, 苏州大学, 苏州 215006)

2) (江苏省先进光学制造技术重点实验室, 教育部/江苏省现代光学技术重点 实验室, 苏州大学, 苏州 215006)

3) (光电信息科学技术学院, 烟台大学, 烟台 264005)

(2022 年 6 月 13 日收到; 2022 年 7 月 20 日收到修改稿)

本文提出并实验证明了一种利用具有单滤波器光反馈的半导体激光器产生带宽增强混沌信号的方案. 为了获得高品质的混沌信号, 方案中讨论了滤波器失谐频率和反馈功率等关键参数对混沌信号带宽和平坦度的影响. 结果表明, 通过选择合适的参数, 可以获得带宽为 24.4 GHz、平坦度为 5.7 dB 的混沌信号. 将这种混沌信号作为熵源, 采用 8 位模数转换采样量化和多位最低有效位异或提取处理实现了 320 Gbit/s 的随机比特生成并采用国际公认的随机数行业测试标准 (NIST SP 800-22) 来检验产生的序列, 结果表明, 通过单滤波器光反馈半导体激光器后处理的混沌熵源所获取的随机数序列具有均匀的分布特性, 可以成功通过 NIST SP 800-22 的全部测试.

**关键词:** 半导体激光器, 混沌, 滤波反馈, 随机数

**PACS:** 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.71.20221173

## 1 引言

混沌激光具有宽光谱和类噪声的特点, 已广泛应用于保密通信<sup>[1,2]</sup>、高速随机比特产生 (random bit generation, RBG)<sup>[3,4]</sup>、混沌雷达<sup>[5]</sup>、光学传感<sup>[6,7]</sup>等各个领域. 2008 年, 日本 Uchida 教授课题组<sup>[4]</sup>首次通过后处理两路混沌激光器信号, 实现了基于光学混沌的物理 RBG. 它展示出包括产生速率高和易操作在内的诸多优势. 此后, 人们从混沌带宽和平坦度的角度研究了光学混沌, 以上两者决定了 RBG 的速率和随机性. 由于半导体激光器的自

然稳定性, 在产生混沌信号时需要引入外部扰动, 例如常规光注入<sup>[8–13]</sup>、强度调制光注入<sup>[14,15]</sup>、光反馈<sup>[16–20]</sup>. 其中, 光反馈半导体激光器因其结构简单、动态特性丰富而受到广泛关注. 然而这种结构由于受到弛豫振荡的限制, 产生的混沌信号具有带宽有限 (通常几 GHz) 且功率谱不均匀的特点.

为了提升 RBG 的速率和随机性, 国内外学者提出了许多可行的方案. 例如, Bouchez 等<sup>[21]</sup>通过带有相位共轭反馈的激光二极管获得了 18 GHz 的混沌信号. Schires 等<sup>[22]</sup>为激光器引入两个外腔的双光反馈, 从而实现了 16 GHz 以上的宽带混沌. 在国内高校中, 太原理工大学的张建忠教授团队<sup>[23]</sup>

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62004135, 62001317, 62171305) 和江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (批准号: 20KJA416001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: peizhou@suda.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: nli@suda.edu.cn

通过将主动光反馈与高度非线性光纤结构相结合, 实验获得了频率范围超过 50 GHz、标准带宽为 38.9 GHz、平坦度为 4.2 dB 的混沌信号. 电子科技大学的江宁教授课题组<sup>[19,24]</sup>利用延迟干扰自相位调制反馈将混沌带宽增强至 30 GHz, 并提出了一种同时增强带宽并抑制时延特征的混沌产生方案. 西北工业大学的张若南教授课题组<sup>[25]</sup>提出利用两个光反馈作用下的法布里-珀罗半导体激光器产生的光外差, 实现宽带毫米波白噪声信号, 进而获得了没有任何时延特征且带宽超过 50 GHz 的混沌信号. 光学滤波反馈的方法同样也受到研究人员的青睐<sup>[26–29]</sup>, 例如西南大学的夏光琼教授课题组提出了一种利用滤波反馈从弱谐振腔法布里-珀罗激光二极管中产生可调谐宽带混沌信号的方法<sup>[26]</sup>. 太原理工大学李璞教授课题组使用带通滤波器的光反馈多模激光器, 通过实验获得了 3 dB 带宽达到 24 GHz 的混沌信号<sup>[27]</sup>. 太原理工大学的张明江教授课题组通过滤波模式和非滤波混沌模式之间的拍频效应, 产生了标准带宽为 36.1 GHz、频谱平坦度为 5.8 dB 的混沌信号<sup>[29]</sup>. 与此同时, 江宁教授课题组<sup>[30]</sup>还提出了利用外腔半导体激光器以及色散模块同时产生两组高质量混沌信号, 为多路并行混沌生成提供了一个有吸引力的解决方案. 另外, 中国科学院大学黄永箴教授课题组<sup>[31]</sup>提出了基于内模相互作用的双模微腔自混沌激光器, 为 RBG 提供了新的思路. 但是, 以上的解决方案中涉及到复杂的设备和精细的操作, 需要匹配多个参数, 不易于集成. 且大多数改良后的方案只能在某一方面进行优化, 不能对限制 RBG 质量的弛豫振荡、幅值分布偏斜和时延特征进行多方面考量. 因此其中一些方案在复杂性方面的成本可能会超过其带来的好处. 从实用的角度来看, 寻找一种系统结构简单、操作简便的方法来产生宽带和频谱平坦的混沌激光是很有意义的.

基于以上考虑, 本文在常规光反馈系统的反馈回路中加入光学滤波器和放大器, 以产生宽带混沌信号. 实验研究了滤波器失谐频率和反馈功率对混沌信号带宽和平坦度的影响. 实验结果表明, 通过适当调整反馈功率和失谐频率, 可以增加混沌输出功率谱的低频和低频分量, 最大混沌带宽可以达到 24.4 GHz, 平坦度为 5.7 dB. 产生这一现象的主要原因是激光滤波后模式之间的拍频物理过程. 此外, 利用所获得的混沌信号, 通过保留 4 个最低有

效位、延迟异或 (exclusive OR, XOR) 等操作处理优化混沌输出信号, 最终获得了生成速率为 320 Gbit/s 的物理随机数, 并成功通过随机数行业测试标准 (NIST SP 800-22) 测试.

## 2 实验装置

系统原理图如图 1 所示. 该系统由商用分布反馈激光二极管 (distributed feedback laser diode, DFB-LD)、光环行器、光耦合器、掺铒光纤放大器、可变光衰减器、带通滤波器和偏振控制器组成. 其中, DFB-LD(Wuhan69 BF14) 的阈值电流为 8 mA, 其偏置电流和温度由超低噪声高精度电流温度控制器 (ILX Lightwave, LDC-3724B) 控制, 分别设置为 25.02 mA 和 25.0 °C. 首先, DFB-LD 发出的光通过光环行器进入 20:80 光耦合器, 并被分成两部分. 80% 的光通过掺铒光纤放大器 (EDFA, KY-EDFA-15-FA) 放大, 提供更大的反馈功率, 然后依次通过可变光衰减器、光学滤波器 (FINISAR, Waveshaper 1000A), 最后反馈给 DFB-LD. 可变光衰减器控制反馈光功率. 这里, 滤波器频率失谐  $\Delta\nu = \nu_f - \nu_0$  (定义为滤波器中心频率  $\nu_f$  和自由运行 DFB-LD 的中心频率  $\nu_0$  之间的差值), 通过调整光学滤波器的中心频率来改变. 采用偏振控制器控制反馈光束的偏振, 确保光反馈对 DFB-LD 的动态影响得到优化. 测量的混沌输出被 10:90 的光耦

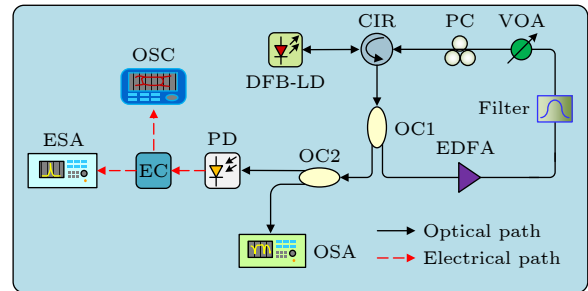


图 1 宽带混沌信号产生的实验装置, 其中 DFB-LD 为分布反馈半导体激光器; CIR 为循环器; OC 为光耦合器; EDFA 为掺铒光纤放大器; VOA 为可变光衰减器; PC 为偏振控制器; OSA 为光谱分析仪; PD 为光电探测器; EC 为电耦合器; ESA 为电频谱分析仪; OSC 为示波器

Fig. 1. Experimental setup for the generation of a broadband chaotic signal. DFB-LD: distributed feedback laser diode; CIR: circulator; OC: optical coupler; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; VOA: variable optical attenuator; PC: polarization controller; OSA: optical spectrum analyzer; PD: photoelectric detector; EC: electrical coupler; ESA: electrical spectrum analyzer; OSC: oscilloscope.

合器分成两束. 10% 的部分被发送到分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪 (OSA, ANDO, AQ6317B), 以测量激光的光学波长, 而另一部分则由 50 GHz 光电二极管 (MPD-M-50-K-FA) 接收并转换为电信号. 电信号通过功分器进一步分为两路信号, 分别发送至射频频谱分析仪 (ESA, FSV40, 40 GHz) 和实时数字示波器 (OSC, LeCroyWaveMaster820 Zi-B, 20 GHz 带宽, 80 Gs/s 采样率, 8 位垂直分辨率), 以获取功率谱和输出信号的时间序列.

### 3 实验结果与分析

实验获得的频谱和光谱如图 2 所示. 本文使用标准带宽来确定混沌信号的带宽, 其定义为包含从直流分量到频率的 80% 能量所对应频率的范围<sup>[32]</sup>. 频谱平坦度是频谱分量在上述标准带宽范围内幅度最大值与最小值之差. 在图 2(a) 中, 灰色曲线表示背景噪声, 绿色曲线是反馈功率为 3.46 mW 时典型单光反馈的功率谱, 其中功率谱的能量集中在近弛豫振荡频率 (约 8 GHz) 上. 计算得到单光反馈的混沌带宽为 15.7 GHz, 平坦度为 23.9 dB. 实验中, 滤波器频率失谐和滤波器带宽分别设置为 -24 GHz 和 100 GHz, 图 2(a) 中的蓝色曲线为混沌输出的平坦宽带功率谱, 其中混沌带宽增大到 24.4 GHz, 平坦度降低到 5.7 dB. 图 2(b) 给出了自由运行时 DFB-LD 在 1551.12 nm 的波长下发射的相应光谱. 对于单反馈的情况, 由于红移效应, 与原始波长 (暗线, 其中 25 dB 线宽为 0.61 nm) 相比, 中心波长移动, 光谱 (绿线) 展宽. 而当采用滤波光反馈时, 光谱进一步展宽, 25 dB 线宽增强到 0.82 nm, 这表明更多的光学频率成分得到保留.

实验通过调整滤波器频率失谐和滤波反馈回路的强度, 进一步研究了混沌输出对两者的依赖关系. 图 3(a1)—(c1) 展示了不同失谐频率下的混沌输出, 其中滤波器带宽和反馈功率分别设置为 100 GHz 和 3.46 mW. 绿色曲线是光学带通滤波器的反射光谱, 粉色虚线表示光学带通滤波器的中心频率, 黑色曲线表示 DFB-LD 自由运行下的光谱, 蓝色曲线表示滤波反馈下的激光光谱. 相应的功率谱如图 3(a2)—(c2) 所示, 其中灰色曲线为背景噪声的频谱, 蓝色曲线为滤波反馈下激光器输出混沌的频谱. 当失谐频率为 -64 GHz 时, 混沌输出频谱中有两个峰值. 左峰位于 1551.17 nm 处, 代表激光器的内部模式. 另一个位于 1551.52 nm 处, 为滤波器光反馈回路中产生的主频分量. 在这种情况下, 混沌带宽由于 DFB-LD 内部模式和滤波模式之间发生的拍频效应而得到提高, 其中低频分量得到了改善. 这种现象被称为延迟自拍<sup>[23]</sup>. 如图 3(a2) 所示, 在这种情况下, 弛豫振荡的峰值被消除, 频率分量均匀分布. 相应的混沌带宽和平坦度分别为 22.8 GHz 和 5.9 dB. 当频率失谐调整为 -54 GHz 时, 激光器的内模被显著抑制, 从而导致低频成分减少, 而高频成分得到改善. 相应的带宽和平坦度分别为 27.4 GHz 和 12 dB. 当频率失谐变为 -24 GHz 时, 激光器的原始内部模式重新出现, 并且比图 3(a1) 中的模式更接近滤波模式, 从而产生更充分的非线性混频. 低频部分进一步增强, 功率谱变平, 如图 3(c2) 所示. 在这种情况下, 带宽和平坦度分别为 24.4 GHz 和 5.7 dB. 需要注意的是, 低频分量的改善有利于提高混沌信号的能量利用率<sup>[28]</sup>.

混沌带宽和平坦度随着滤波器频率失谐量的改变而变化的趋势如图 3(d) 所示. 其中, 蓝色星点

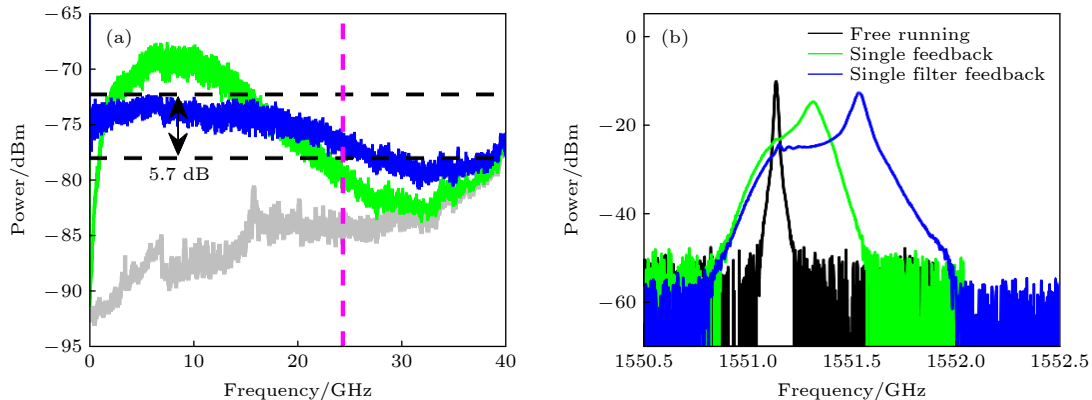


图 2 (a) 功率谱; (b) 光谱

Fig. 2. (a) The power spectra; (b) the optical spectra.

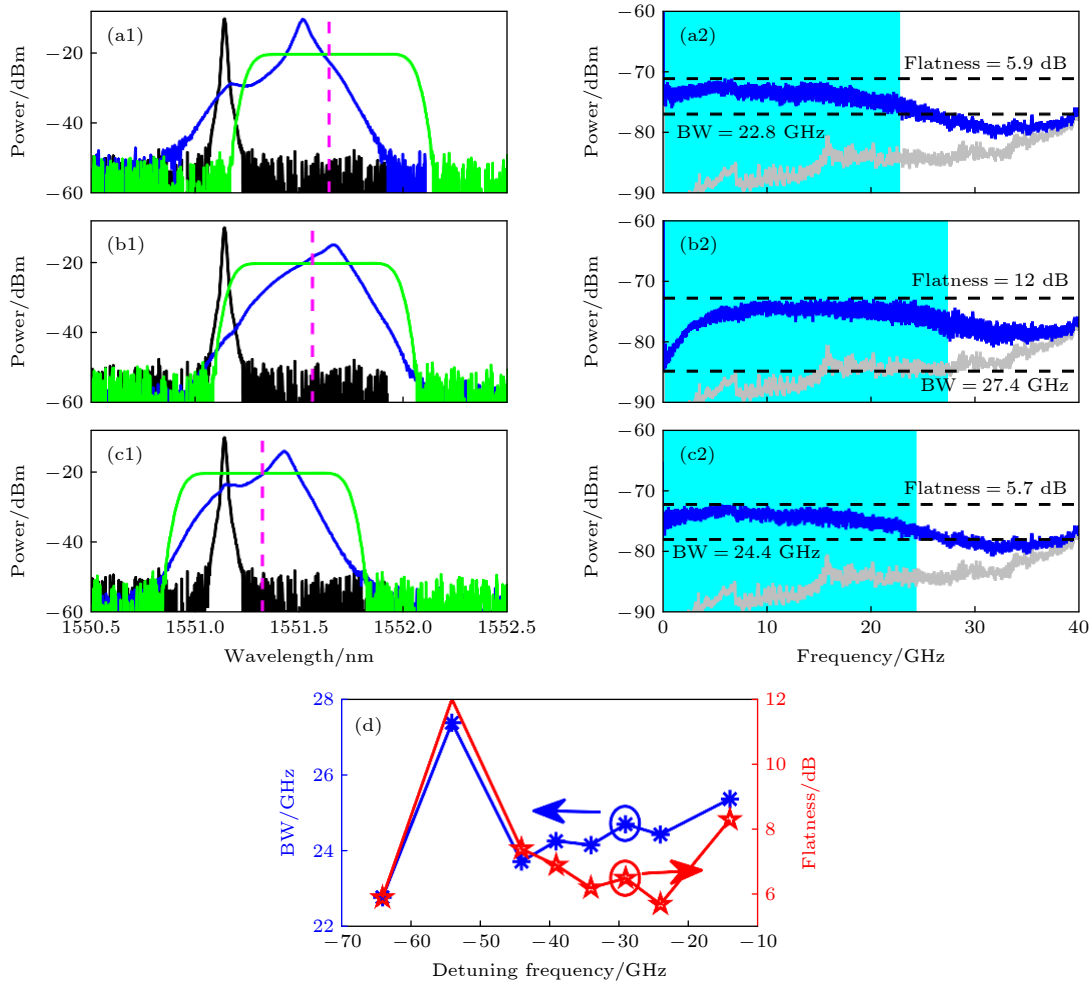


图 3 频率失谐  $\Delta\nu$  对混沌输出的影响. 光谱 (左列), 功率谱 (右列), 其中 (a1), (a2)  $\Delta\nu = -64$  GHz; (b1), (b2)  $\Delta\nu = -54$  GHz; (c1), (c2)  $\Delta\nu = -24$  GHz; (d) 混沌带宽和平坦度随频率失谐的演化情况

Fig. 3. The effects of filter frequency detuning  $\Delta\nu$  on the output of chaos. The optical spectra (left column) and corresponding power spectra (right column) of chaos generated with the filter frequency detuning (a1) (a2)  $\Delta\nu = -64$  GHz; (b1) (b2)  $-54$  GHz; (c1) (c2)  $-24$  GHz; (d) the BW and flatness of chaos as functions of filter frequency detuning.

代表混沌带宽, 红色五角星代表平坦度. 随着频率失谐从  $-64$  GHz 变化到  $-14$  GHz, 混沌带宽呈现出先增大后减小, 最后缓慢增大的趋势. 而功率谱在滤波器频率失谐达到  $-24$  GHz 时最平坦, 值得注意的是, 当  $\Delta\nu > -10$  GHz 时, 激光输出不再为混沌态.

当频率失谐  $\Delta\nu = -24$  GHz、滤波器带宽为  $100$  GHz 时, 滤波反馈功率对混沌输出的影响如图 4 所示. 图 4(a1)—(c1) 给出了光谱图, 绿色曲线表示光学带通滤波器反射光谱, 粉色虚线表示光学带通滤波器的中心频率, 黑色曲线表示 DFB-LD 自由运行时的光谱, 蓝色曲线表示滤波光反馈下的光谱. 当滤波器反馈功率从  $0.718$  mW 增大到  $3.46$  mW,  $25$  dB 谱宽从  $0.63$  nm 增大到了  $0.78$  nm, 这表明在反馈功率的影响下, 频谱得到了有效拓宽. 当反馈功率低至  $0.718$  mW 时, 得到的混沌类

似于图 2(a) 所示的常规单反馈激光器输出混沌. 当反馈功率增大到  $1.46$  mW 时, 弛豫振荡以下的频率分量增大. 因此, 如图 4(b2) 所示, 混沌带宽略有提高, 而平坦度显著提升. 当反馈功率增大至  $3$  mW 时, 光频分量继续增大, 如图 4(c2) 所示, 功率谱变得愈加平坦. 除此以外, 图 4(d) 给出了混沌带宽和平坦度随滤波反馈强度变化的图像. 蓝色曲线表示带宽, 红色曲线表示平坦度. 可以看出, 随着滤波反馈功率的增大, 混沌带宽逐渐增大, 功率谱也趋于平坦. 由于实验条件限制, 反馈功率并未进一步增大, 但理论上继续增大反馈功率, 带宽和平坦度可能会进一步提升.

与常规单反馈方案相比, 含滤波器的反馈方案可实现混沌带宽的增强, 其原因是内部模式和滤波模的拍频效应使得功率谱的低频分量和高频分量



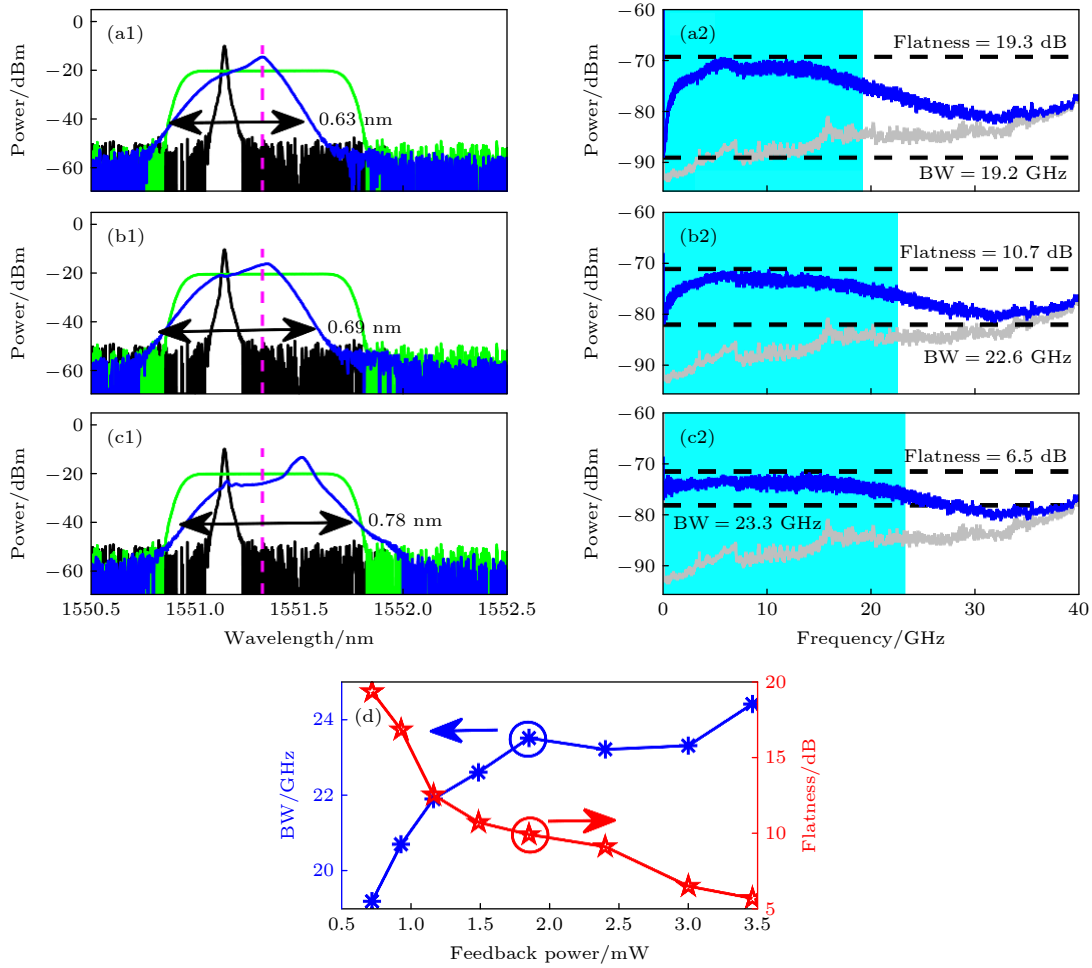


图 4 滤波反馈功率对混沌输出的影响. 光谱 (左列), 功率谱 (右列), 其中反馈功率  $P_f$  (a1) (a2) 0.718 mW; (b1) (b2) 1.486 mW; (c1) (c2) 3 mW; (d) 混沌带宽和平坦度随反馈功率的演化情况

Fig. 4. The effects of filter feedback power on the output of chaos. optical spectra (left column) and corresponding power spectra (right column) of chaos generated from the filter feedback scheme, where the feedback power  $P_f$  (a1) (a2) 0.718 mW; (b1) (b2) 1.486 mW; (c1) (c2) 3 mW; (d) the BW and flatness of chaos as functions of the filter feedback power.

同时得到提高. 光波在滤波光反馈下产生非线性效应, 即产生了更多新的不同频率的光波, 进一步拓宽了频谱. 此外, 随着反馈功率的增大, EDFA 的自发辐射光放大可能导致光谱中较低频率光波的增强 [33,34].

#### 4 高速物理随机比特生成

基于上述的平坦宽带混沌源, 提出了一种高速物理随机比特产生方案. 下面将详细说明该方案的实现过程: 选择图 2 中滤波光反馈的参数, 并使用采样速率为 80 Gs/s 的实时示波器进行数据获取, 将混沌信号转换为 8 位二进制序列. 混沌信号的时域波形如图 5(a) 所示, 呈现出亚纳秒量级的类噪声强度振荡. 时域波形的概率密度函数 (probability

density function, PDF) 如图 5(b) 所示, 从图中可以看出, 虽然概率分布类似于高斯正态分布, 但与拟合的高斯曲线 (图 5(b) 中的蓝线) 相比, 概率分布仍然存在非对称性. 相应的偏度和尖峰值分别为 0.48 和 4.49, 而理想正态分布对应的偏度和尖峰值分别为 0 和 3. 文献 [35] 指出, 要获得均匀分布的随机比特, 必须保证随机数据分布的高度对称性, 这意味着直接从示波器获取的数据流很难通过随机性测试. 因此, 有必要对数据进行后处理使之满足理想分布. 图 6 给出了提取随机比特的具体流程. 在此, 采用文献 [36] 中的后处理方案, 即舍弃 8 位分辨率原始信号中的 4 个最高有效位, 对随后的 4 个最低有效位 (least significant bit, LSB) 数据进行延迟异或处理, 以获得物理随机位. 最后, 为了验证生成的随机比特序列的质量, 使用美国国

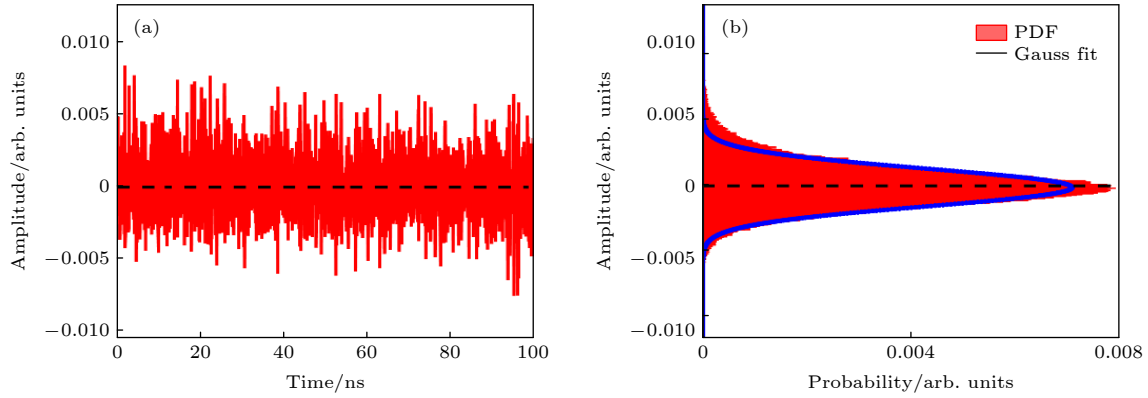


图 5 (a) 时间序列; (b) 概率密度分布

Fig. 5. (a) Time trace; (b) probability density distribution.

家标准与技术研究所 (NIST SP800-22) 测试套件的 15 项统计测试来检查获得的随机比特. 测试结果如图 7 所示, 使用 1000 个 1 Mbit 数据样本进行计算, 显著性水平  $\alpha = 0.01$ , 若  $P$ -value 值大于 0.0001, 且通过比例在  $0.99 \pm 0.0094392$  范围内, 则表示通过该项测试. 对于产生多个  $P$  值和比例的测试, 图中展示了最差的情况. 结果表明基于 4 位 LSB 提取的物理随机比特流可以通过全部的 15 项 NIST 测试. 因此, 根据参考文献 [36] 的算法,

随机比特的生成速率高达 320 Gbit/s ( $80 \text{ Gs/s} \times 4 \text{ bit}$ ). 若采用参考文献 [37] 的后处理方法, 随机比特的生成速率可轻松突破 Tbit/s 量级.

## 5 结 论

综上所述, 本文提出了一种基于单滤波光反馈半导体激光器的平坦宽带混沌信号产生方案. 本工作为解决功率谱中低频功率的下降问题提供了一种简单的方法. 实验分析了滤波器失谐频率和反馈功率对混沌宽度和平坦度的影响. 产生宽带平坦混沌信号的原因是内部模式和反馈滤波模之间的拍频效应, 因此, 通过适当调整滤波器失谐频率和反馈功率, 可以获得带宽为 24.4 GHz、平坦度为 5.7 dB 的混沌信号. 此外, 通过保留 4 位 LSB、延迟异或等方法对优化后的混沌信号进行处理, 可以获得速率高达 320 Gbit/s 的物理随机比特. 这些随机比特序列可以通过 15 项 NIST 测试, 这表明序列的随机性满足主流信息论评估的严格标准.

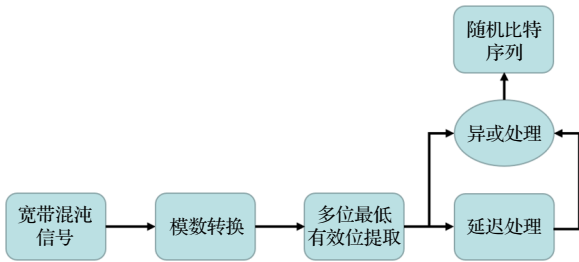


图 6 高速物理随机数生成的后处理流程图.

Fig. 6. Flow chart of post-processing for high-speed physical random number generation.

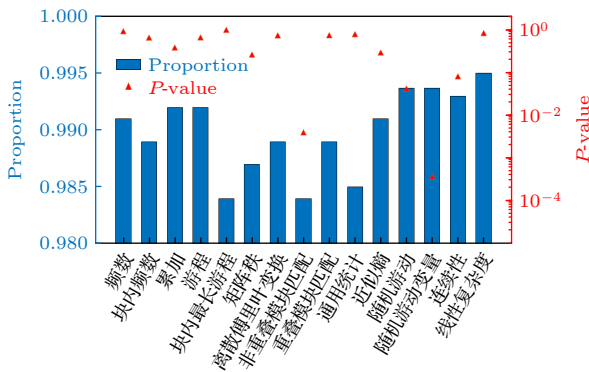


图 7 物理随机比特的 NIST 统计测试结果.

Fig. 7. Results of NIST statistical tests for physical random bits.

## 参考文献

- [1] Li H Y, Yang Y, Huang C M, Dai L Q, Cheng M F, Xiong X, Yang Q, Tang M, Liu D M, Deng L 2022 *Opt. Lett.* **47** 118
- [2] Ke J X, Yi L L, Yang Z, Yang Y P, Zhuge Q B, Chen Y P, Hu W S 2019 *Opt. Lett.* **44** 5776
- [3] Li N Q, Kim B, Chizhevsky V N, Locquet A, Bloch M, Citrin D S, Pan W 2014 *Opt. Express* **22** 6634
- [4] 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. Photonics* **2** 728
- [5] Cheng C H, Chen C Y, Chen J D, Pan D K, Ting K T, Lin F Y 2018 *Opt. Express* **26** 12230
- [6] Zhang M J, Liu H, Zhang J Z, Liu Y, Liu R X 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1600610
- [7] Zhong D Z, Zeng N, Yang H, Xu Z 2021 *Acta Phys. Sin.* **70**

- 074206 (in Chinese) [钟东洲, 曾能, 杨华, 徐喆 2021 物理学报 **70** 074206]
- [8] Chai M M, Qiao L J, Zhang M J, Wang A B, Yang Q, Zhang J Z, Wang T, Gao S H 2020 *IEEE J. Quantum Electron.* **56** 1
- [9] Han H, Zhang M J, Shore K A 2019 *IEEE J. Quantum Electron.* **55** 1
- [10] Yin X M, Zhong Z Q, Zhao L J, Lu D, Qiu H Y, Xia G Q, Wu Z M 2015 *Opt. Commun.* **355** 551
- [11] Chen J J, Wu Z M, Tang X, Deng T, Fan L, Zhong Z Q, Xia G Q 2015 *Opt. Express* **23** 7173
- [12] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2014 *IEEE J. Quantum Electron.* **50** 236
- [13] Chen J, Chen J J, Jiang B, Xia G Q 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 164204 (in Chinese) [陈俊, 陈建军, 吴正茂, 蒋波, 夏光琼 2016 物理学报 **65** 164204]
- [14] Chan S C, Tang W K S 2009 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **19** 3417
- [15] Zeng Y, Zhou P, Huang Y, Li N Q 2021 *Appl. Optics* **60** 7963
- [16] Ruan J, Chan S C 2022 *Opt. Lett.* **47** 858
- [17] Hao Y Z, Ma C G, Shen Z Z, Li J C, Xiao J L, Yang Y D, Huang Y Z 2021 *Opt. Lett.* **46** 2115
- [18] Chang D, Zhong Z, Tang J, Spencer P S, Hong Y 2020 *Opt. Express* **28** 39076
- [19] Zhao A K, Jiang N, Liu S Q, Xue C P, Tang J M, Qiu K 2019 *Opt. Express* **27** 12336
- [20] Jiang N, Zhao A K, Liu S Q, Xue C P, Wang B Y, Qiu K 2018 *Opt. Lett.* **43** 5359
- [21] Bouchez G, Uy C H, Macias B, Wolfersberger D, Sciamanna M 2019 *Opt. Lett.* **44** 975
- [22] Schires K, Gomez S, Gallet A, Duan G H, Grillot F 2017 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **23** 1
- [23] Yang Q, Qiao L J, Zhang M J, Zhang J Z, Wang T, Gao S H, Chai M M, Mohiuddin P M 2020 *Opt. Lett.* **45** 1750
- [24] Jiang N, Wang Y J, Zhao A K, Liu S Q, Zhang Y Q, Chen L, Li B C, Qiu K 2020 *Opt. Express* **28** 1999
- [25] Guo Y, Liu W, Huang Y, Sun Y, Zinsou R, He Y, Zhang R 2022 *Opt. Express* **30** 3148
- [26] Zhong Z Q, Lin G R, Wu Z M, Yang J Y, Chen J J, Yi L L, Xia G Q 2017 *IEEE Photonic. Tech. L* **29** 1506
- [27] Wang L S, He Q Q, Wang A B, Wang Y C 2022 *IEICE Nonlin. Theory Appl.* **13** 36
- [28] Li P, Cai Q, Zhang J G, Xu B J, Liu Y M, Bogris A, Shore K A, Wang Y C 2019 *Opt. Express* **27** 17859
- [29] Yang Q, Qiao L J, Wei X J, Zhang B X, Chai M M, Zhang J Z, Zhang M J 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 6246
- [30] Zhao A K, Jiang N, Peng J F, Liu S Q, Zhang Y Q, Qiu K 2022 *Opto-Electron Adv.* **5** 200026
- [31] Ma C G, Xiao J L, Xiao Z X, Yang Y D, Huang Y Z 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 187
- [32] Lin F Y, Liu J M 2003 *Opt. Commun.* **221** 173
- [33] Hong Y H, Chen X F, Spencer P S, Shore K A 2015 *IEEE J. Quantum Electron.* **51** 1200106
- [34] Hart J D, Terashima Y, Uchida A, Baumgartner G B, Murphy T E, Roy R 2017 *APL Photonics* **2** 090901
- [35] Chizhevsky V N 2010 *Phys. Rev. E* **82** 050101
- [36] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, Kanter I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 024102
- [37] Li X Z, Chan S C 2013 *IEEE J. Quantum Electron.* **49** 829

# Fast physical random bit generation of wideband flat chaos signal based on filter feedback\*

Liu Yuan<sup>1)</sup> Yuan Ji-Yang<sup>1)</sup> Zhou Xin-Yu<sup>1)</sup> Gu Shuang-Quan<sup>1)</sup>  
 Zhou Pei<sup>1)2)†</sup> Mu Peng-Hua<sup>3)</sup> Li Nian-Qiang<sup>1)2)‡</sup>

<sup>1)</sup> (*School of Optoelectronic Science and Engineering & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

<sup>2)</sup> (*Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province & Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China*)

<sup>3)</sup> (*Institute of Science and Technology for Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China*)

( Received 13 June 2022; revised manuscript received 20 July 2022 )

## Abstract

Chaotic lasers feature wide spectrum and noise-like features, and extensively used in various fields, such as secure communications and random bit generation (RBG). Since the physical RBG using optical chaos was demonstrated first by Uchida et al., the optical chaos has been widely investigated in terms of chaos bandwidth and flatness, which determines the rate and randomness of RBG. Owing to the natural stability of semiconductor lasers, external perturbation is required to generate chaotic signals, such as optical injection, current modulation, and optical feedback. Among them, a semiconductor laser with optical feedback has attracted wide attention because of its simple structure and rich dynamic behaviors. Nonetheless, this configuration suffers the influence of the relaxation oscillation, which results in a limited bandwidth (a few GHz) and an uneven power spectrum. To obtain broad-spectrum chaotic signals, considerable efforts have been made in recent years. However, these solutions are associated with complex structures that require delicate manipulation because multiple parameters should be matched, so the cost of some of these schemes in terms of the system complexity can potentially outweigh the benefits.

In this work, we incorporate an optical filter and an amplifier into the feedback loop of a conventional optical feedback system to generate broadband chaotic signals. The effects of the filter detuning frequency and feedback power on the bandwidth and flatness of the chaotic output are investigated experimentally. The experimental results demonstrate that by appropriately adjusting the feedback power and detuning frequency, both the low-frequency components and the high-frequency components of the chaotic output power spectrum can be increased, and the maximum chaotic bandwidth can reach 24.4 GHz with a flatness of 5.7 dB. This phenomenon is attributed to the physical process of beating between the filtered mode and the internal modes of the laser. Furthermore, the optimized chaotic output is processed by retaining the 4 least significant bits and implementing the delayed exclusive-OR (XOR) operation. Our scheme is capable of generating physical random number of the bit rate of 320 Gbit/s, and successfully passes the standard randomness test, i.e. the NIST test (NIST SP 800-22).

**Keywords:** semiconductor laser, chaos, filter feedback, random bits generation

**PACS:** 42.55.Px, 05.45.-a, 05.45.Pq

**DOI:** 10.7498/aps.71.20221173

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62004135, 62001317, 62171305) and the Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education Institutions (Grant No. 20KJA416001).

† Corresponding author. E-mail: [peizhou@suda.edu.cn](mailto:peizhou@suda.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [nli@suda.edu.cn](mailto:nli@suda.edu.cn)





## 基于滤波反馈宽带平坦混沌信号的快速物理随机比特产生

刘远 袁冀扬 周心雨 谷双全 周沛 穆鹏华 李念强

### Fast physical random bit generation of wideband flat chaos signal based on filter feedback

Liu Yuan Yuan Ji-Yang Zhou Xin-Yu Gu Shuang-Quan Zhou Pei Mu Peng-Hua Li Nian-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 224203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221173

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221173>

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

#### 基于激光器阵列后处理的混沌熵源获取高品质随机数

High-quality random number sequences extracted from chaos post-processed by phased-array semiconductor laser

物理学报. 2021, 70(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202034>

#### 半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽

Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output from semiconductor laser

物理学报. 2020, 69(9): 090501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191881>

#### 利用光反馈多模激光器结合滤波器产生平坦混沌

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

物理学报. 2019, 68(11): 110501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190171>

#### 基于双路光电反馈下光注入半导体激光器的高性能线性调频信号产生

High-performance linear frequency-modulated signal generation based on optically injected semiconductor laser with dual-loop optoelectronic feedback

物理学报. 2022, 71(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221308>

#### 自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性

Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self-chaotic phase modulation and optical feedback

物理学报. 2022, 71(15): 150502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220204>

#### 半导体激光器输出混沌光的延时特性和带宽

Time delay characteristics and bandwidth of chaotic laser from semiconductor laser

物理学报. 2018, 67(14): 140501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180035>