

# 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号

张明江<sup>1,2</sup> 刘铁根<sup>1</sup> 郑建宇<sup>2</sup> 王安帮<sup>2</sup> 王云才<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

<sup>2</sup>太原理工大学光电工程研究所, 山西 太原 030024

**摘要** 提出了一种基于光反馈半导体激光器的混沌特性产生超宽带(UWB)信号的新方法。一个商用的通信波段半导体激光器在外腔光反馈下实现混沌振荡,输出连续波混沌激光,经由一个电吸收调制器后,被调制为一系列混沌脉冲信号。该混沌脉冲信号的频谱特性可通过调节半导体激光器的偏置电流和反馈强度进行控制。实验分别获得了中心频率为 4.0 GHz、相对带宽为 181%和 214%的混沌脉冲 UWB 信号。进一步数值仿真了偏置电流和反馈系数对混沌脉冲 UWB 信号频谱特性的影响,实验结果与模拟验证相符。该方法实验装置简单,UWB 信号频谱特性易控,可用作未来 UWB 光纤无线通信系统的光生微波信号发生装置。

**关键词** 激光器;半导体激光器;混沌激光;光纤无线通信;超宽带信号

**中图分类号** TN249;TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0405002

## Demonstration of Ultrawideband Chaotic Signal Generating Utilizing External Feedback Laser Diode

Zhang Mingjiang<sup>1,2</sup> Liu Tiegeng<sup>1</sup> Zheng Jianyu<sup>2</sup> Wang Anbang<sup>2</sup> Wang Yuncai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup>Institute of Optoelectronic Engineering, Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** A novel approach to generating ultrawideband(UWB) chaotic pulse is proposed and demonstrated by using optical feedback laser diode. The chaotic laser is generated through a commercial C-band laser diode (LD) with external feedback. This continuous-wave chaotic laser is modulated by utilizing an electro-absorption modulator. And then, a series of chaotic pulses are generated, their radio frequency (RF) spectrum can be controlled by adjusting the bias current and feedback strength of the LD. The UWB chaotic pulses with center frequency of 4.0 GHz and fractional bandwidth of about 181% and 214% are obtained. The experimental results agree well with the numerical demonstration. The proposed method is simple, and the spectrum property can be controlled easily. It is suitable for UWB-over-fiber communication systems as photonic microwave signal source.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; chaotic laser; radio-over-fiber; ultrawideband signal

**OCIS codes** 140.1540; 060.5625; 070.4340; 140.5960

## 1 引言

超宽带(UWB)信号技术由于其本身所拥有的

诸多特性,如抗多径衰落、低功耗、高精度以及高安全性等优点,被期待用于解决短距离高速通信以及

收稿日期: 2010-08-12; 收到修改稿日期: 2011-01-18

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327800)和国家自然科学基金(60777041,60927007)资助课题。

作者简介: 张明江(1976—),男,博士研究生,主要从事半导体激光器的非线性动力学特性及其应用等方面的研究。

E-mail: zhangmingjiang@tyut.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、光电检测技术、光机电一体化等方面的研究。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn(中国光学学会会员号:S040130032S)

\* 通信联系人。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

无线传感网中的室内精确定位<sup>[1,2]</sup>。2002年,美国联邦通信委员会(FCC)公布将3.1~10.6 GHz的无执照频段开放用于UWB室内通信,并限定功率谱密度低于 $-41.3$  dBm<sup>[1,3]</sup>,进一步促进了UWB技术的发展。与此同时,在通信和传感领域,混沌无线通信以及混沌微波雷达技术由于其本身具有的宽带、平坦功率谱以及类噪声特性,引起了业内的广泛关注<sup>[4,5]</sup>。因此,建立了混沌超宽带(Chaotic-UWB)通信机制并成为IEEE802.15.4a标准的物理层候选方案,在此通信机制中,混沌脉冲信号作为一种形状极为特殊的脉冲信号用于信息传输<sup>[6,7]</sup>。在传统的UWB通信机制中常被应用的诸多调制方式,如开关键控(OOK)调制、脉冲位置调制、脉冲幅度调制(PAM),在这种新颖的通信方式中依然可以被采用<sup>[8]</sup>。然而,由于在电域上产生高速率、高频谱利用率的混沌脉冲序列十分困难,限制了此类通信方式的大规模应用。另外,Chaotic-UWB通信机制存在着与传统UWB通信机制相同的问题即短距离传输限制。这一问题,可以通过UWB光纤无线通信(UWB RoF)系统来解决<sup>[9]</sup>,但是在电域生成的UWB信号无法与光纤网络直接互联,因此,在此系统中,要求直接在光域中完成对UWB脉冲信号的产生、调制以及分配。由此可见,光生UWB微波技术是实现UWB RoF,进而实现高速无线接入网络、无线传感网以及光纤物联网的关键技术<sup>[9,10]</sup>。目前,已有几种在光域产生UWB信号的方案,诸如光脉冲整形技术<sup>[11~13]</sup>、微波光子滤波技术<sup>[14]</sup>以及相干光场叠加技术<sup>[15]</sup>。然而,这几种技术都很难调节所产生的UWB信号的中心频率和 $-10$  dB带宽,从而限制了它们在复杂环境下的进一步应用。

此外,又出现基于被动锁模光纤激光器<sup>[16]</sup>和基于并联半导体光放大(SOA)和电吸收(EA)<sup>[17]</sup>的光子UWB信号产生方法。2010年2月,普渡大学研究人员提出基于光子学微腔的UWB任意波形生成技术,实现了UWB信号中心频率的大范围调谐,但昂贵且复杂的控制装置,降低了系统本身的稳定性<sup>[18]</sup>。另外,受限于现有的硅基光波导材料的加工工艺水平,此装置实际产生的频带噪声极大,频谱纯净度亦不太理想。与此同时,混沌激光的产生与应用也受到了研究者的广泛关注,其中混沌光通信尤为引人注目<sup>[19~21]</sup>。在混沌光通信系统中,混沌激光作为载波,利用混沌激光本身的类随机噪声特性,将传输信息掩埋在混沌激光之中,在接收端,通过参数

匹配的激光器实现同步进行信息再提取,完成物理层硬件光通信保密,被视为可彻底解决现有软件保密方案可破译性的可行性方案之一<sup>[22,23]</sup>。由于混沌激光具有类噪声的性质,从而拥有天然的宽频谱特性,可通过利用OOK调制获得完全区别于传统冲击脉冲(IR)形式的混沌脉冲UWB信号,从而发展利用混沌激光实现光生UWB微波的方法,以及混沌UWB光纤无线通信(Chaotic UWB RoF)技术。

本文提出并论证了利用光反馈半导体激光器(LD)的混沌输出的宽频谱特性实现光生UWB混沌脉冲信号的新方法。用此方法所产生的UWB混沌脉冲不仅具有较传统电学方法更高的传输速率和频谱效率,而且其频谱特性可以便捷地通过改变半导体激光器的偏置电流以及反馈强度进行控制和调节。

## 2 实验装置与结果

图1为实验装置与工作原理示意图。一个商用的通信波段的分布反馈(DFB)半导体激光器通过外加光纤环反馈系统构成一个混沌振荡源。反馈光强度的大小通过可调节光衰减器(VA)进行控制,反馈光的偏振态由偏振控制器2(PC2)来控制,以调高其与激光器的耦合效率。在适当的反馈光强度下,半导体激光器将由稳态进入混沌态,从而射出混沌连续光波。该混沌连续光经过一个光隔离器后入射到一个10 GHz带宽的电吸收强度调制器(EAM)。实验中利用一系列码长为3 ns,重复速率为300 MHz的脉冲序列对此混沌连续光进行OOK调制,生成一系列纳秒量级的混沌光脉冲序列,如图1中虚线框所示。之后,生成的UWB混沌光脉冲在经过一段单模光纤(SMF)传输后,经由一个50 GHz带宽的光电探测器(PD)被转化为一列Chaotic-UWB电脉冲信号,由频谱分析仪(ESA)采集。

实验中输出的光信号经由光谱仪(Agilent 86140B)观测,输出的电信号由一带宽26.5 GHz的频谱仪(Agilent N9020A)测量。当脉冲持续时间 $T$ 满足 $T > 1/(2\Delta F)$ ( $\Delta F$ 为原始混沌信号的 $-10$  dB带宽)时,混沌脉冲信号的带宽将与原始连续混沌信号的带宽 $\Delta F$ 一致<sup>[24]</sup>。因此,此光生混沌UWB OOK脉冲信号的频谱特性,可以通过调节光反馈半导体激光器的相关参数来进行控制。

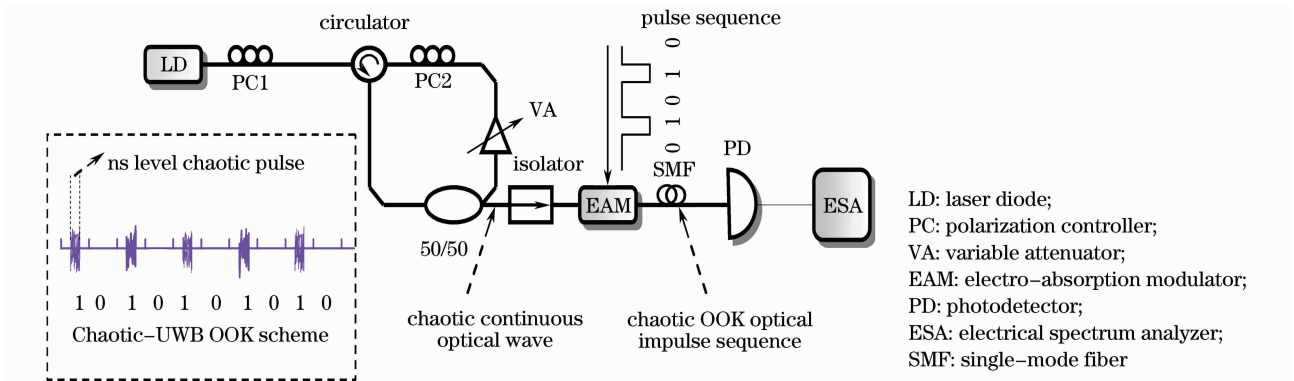


图 1 UWB 混沌脉冲信号产生装置示意图

Fig.1 Experimental setup for chaotic-UWB OOK signal generation

实验中,半导体激光器的波长通过精密温度控制系统稳定在 1553.84 nm,光谱线宽为 0.3 nm (-20 dB),边模抑制比为 35 dB。光纤环反馈腔的长度为 4 m。图 2 为实验中得到的半导体激光器在不同偏置电流下,所产生的 UWB 混沌脉冲信号的频谱特性,此时反馈强度被固定为 -7.7 dBm。图中红色曲线表示偏置电流为 1.27 倍的阈值电流 (22 mA) 时的混沌脉冲信号的频谱,在此偏置水平下,激光器在自由运行情况下的弛豫振荡频率约为 4 GHz,输出功率为 -1.6 dBm。从图中可以看出,混沌脉冲信号的频谱能量大部分集中分布在弛豫振荡频率附近,中心频率为 4.00 GHz, -10 dB 带宽为 7.25 GHz。这意味着此混沌脉冲的相对带宽达到了 181%。相对带宽的定义为  $\Delta f/f_0$ ,  $\Delta f$  为 -10 dB 带宽,  $f_0$  为中心频率。图中蓝色曲线表示反馈强度不变时,当偏置电流调节为 2.07 $I_{th}$  (此偏置电流水平下,该半导体激光器的弛豫振荡频率约为 5 GHz) 时的混沌脉冲信号的频谱。此时, UWB 混沌脉冲信号频谱的中心频率移至 5.00 GHz, -10 dB 带宽增加至 7.31 GHz, 对应的相对带宽为 146%。从上述结果可以看出,由于偏置电流的增加,导致半导体激光器的弛豫振荡频率增加,从而引起了混沌脉冲信号的 UWB 频谱的能量重新分布,使其中心频率和带宽都随偏置电流的增大而增大。进一步研究了在相同偏置电流水平下,反馈强度的变化对 UWB 混沌脉冲信号的频率特性的影响,结果如图 3 所示。图 3 中红色曲线与图 2 中红色曲线所表示的状态相同,均为在反馈强度为 -7.7 dBm, 偏置电流为 1.27 $I_{th}$  时的 UWB 混沌脉冲信号的频谱。蓝色曲线表示当反馈光强度增加为 -5.2 dBm 时,输出的混沌脉冲的频谱。此时,其频谱的中心频率基本保持不变,依然为 4.00 GHz,但是其 -10 dB

带宽显著地增加至 8.56 GHz, 对应的相对带宽达到了 214%。而且,频谱也变得更加平坦: 在 2.40 ~ 8.90 GHz 的频率范围内,在 -57.5 dBm 附近的能量分布的起伏不超过  $\pm 2.5$  dBm。由此可以看出,在一定的偏置电流水平下,随着反馈强度的增大,混沌脉冲信号的 UWB 频谱的中心频率基本保持不变,但其 -10 dB 带宽会随着反馈强度的增大而增大(彩图详见电子版)。

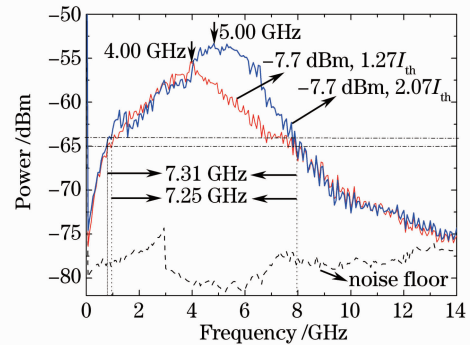


图 2 不同偏置电流下 UWB 混沌脉冲的频谱图

Fig.2 Experimentally obtained spectra of the UWB chaotic pulses with different bias currents

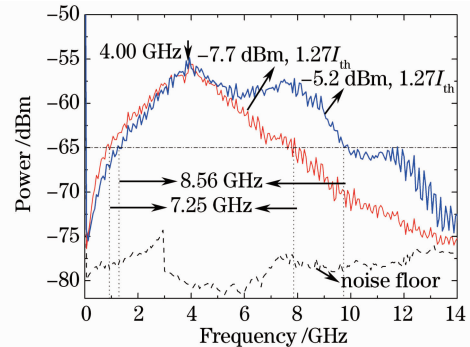


图 3 不同反馈强度下 UWB 混沌脉冲信号的频谱特性

Fig.3 Experimentally obtained spectra of the UWB chaotic pulses with different feedback optical powers

在反馈强度固定为  $-7.7$  dBm 时, UWB 混沌信号的中心频率与偏置电流的关系曲线如图 4(a) 所示。可以看出, 当偏置电流从  $22.0$  mA 变化为  $41.2$  mA 时, UWB 信号的中心频率从  $4.0$  GHz 增长至  $5.58$  GHz, 变化趋势与上述实验结果分析相

符。此外, 当混沌激光器的偏置电流固定为  $1.27I_{th}$  时, UWB 信号的  $-10$  dB 带宽随反馈强度变化的关系曲线如图 4(b) 所示。当反馈强度由  $-22.2$  dBm 增大至  $-5.2$  dBm 时, UWB 信号的带宽从  $3.45$  GHz 增大至  $8.56$  GHz, 变化趋势符合上述分析结果。

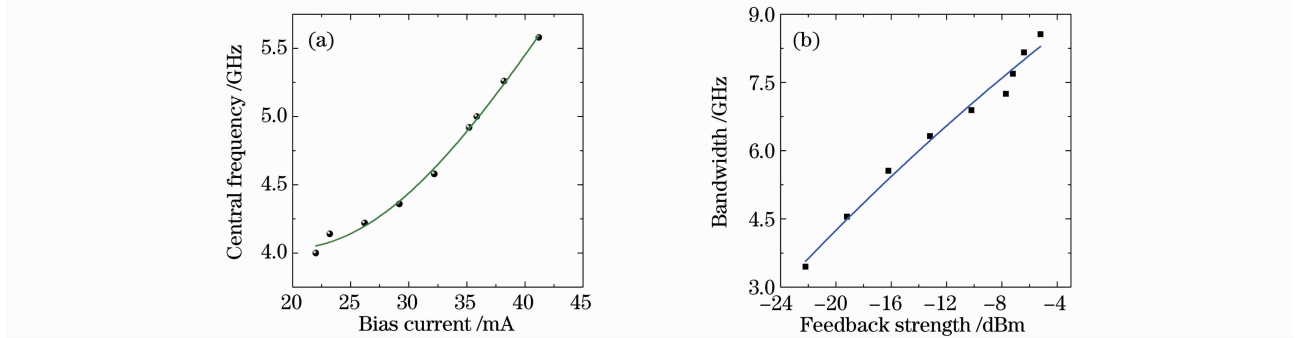


图 4 (a) 当  $I = -7.7$  dBm 时, UWB 混沌脉冲的频谱中心频率与半导体激光器偏置电流的关系曲线, (b) 当  $I = 1.27I_{th}$  时, UWB 混沌脉冲的  $-10$  dB 带宽与反馈强度的关系曲线

Fig. 4 (a) Measured center frequency of UWB chaotic signal as a functions of bias current when  $I = -7.7$  dBm, (b) measured  $-10$  dB bandwidth of UWB chaotic signal as a functions of feedback strength when  $I = 1.27I_{th}$

从上述实验结果可以看出, 对于利用光反馈半导体激光器系统产生的 UWB 混沌脉冲信号, 其频谱特性可以便捷地通过改变半导体激光器的偏置电流水平与反馈强度而进行有效的控制, 大大提高了光生 UWB 信号的灵活性。

### 3 数值模拟与结果

为进一步研究半导体激光器的偏置电流与反馈系统的反馈强度对混沌脉冲信号 UWB 频谱特性的影响, 数值仿真了光反馈半导体激光器的混沌输出特性。仿真模型可由包含反馈项的半导体激光器的光场复振幅  $E$  和载流子  $N$  速率方程来描述<sup>[25]</sup>

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1 + i\alpha}{2} \left[ \frac{g(N - N_0)}{1 + \epsilon |E|^2} - \tau_p^{-1} \right] E + \frac{\kappa_f}{\tau_m} E(t - \tau) \exp(-i2\pi\nu_s \tau), \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N}{\tau_N} - \frac{g(N - N_0)}{1 + \epsilon |E|^2} |E|^2, \quad (2)$$

式中  $\nu_s$  为半导体激光器的激光光场的中心频率,  $\kappa_f$  为反馈系数, 反馈延时  $\tau = 20$  ns, 透明载流子浓度  $N_0 = 0.445 \times 10^6 \mu\text{m}^{-3}$ , 阈值电流  $I_{th} = 22$  mA, 小信号增益系数  $g = 1.414 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3 \cdot \text{ns}^{-1}$ , 载流子寿命  $\tau_N = 2.5$  ns, 光子寿命  $\tau_p = 1.17$  ps, 激光在腔内往返周期  $\tau_m = 7.38$  ps, 线宽增强因子  $\alpha = 5.0$ , 增益饱和系数  $\epsilon = 5 \times 10^{-5} \mu\text{m}^3$ , 有源层体积  $V = 324 \mu\text{m}^3$ 。

在模拟中发现, 随着  $\kappa_f$  的增加, 将导致系统经由周期振荡进入混沌状态, 然后, 又越出混沌状态进

入周期振荡状态<sup>[25]</sup>。因此, 详细的模拟工作将在混沌区域内进行, 以便讨论光生 UWB 混沌信号的频谱特性与光反馈半导体激光器的内部参数之间的联系。偏置电流以及反馈系数对混沌脉冲信号的脉冲形状以及频谱的影响的仿真结果如图 5 所示。图 5(a) 为当模拟的激光器的偏置电流在  $2.2$  倍的阈值电流时(在此偏置电流水平下, 该半导体激光器的弛豫振荡频率约为  $4.4$  GHz), 不同反馈强度对混沌脉冲特性的影响。当反馈系数为  $0.0708$  时, 系统已经进入混沌状态, 波形时序图如图 5(a1) 所示, 产生的 UWB 混沌脉冲的频谱中心频率与带宽分别为  $4.48$  GHz 和  $2.70$  GHz, 如图 5(a2) 所示。当反馈系数增大至  $0.1413$  时, 波形时序图如图 5(a3) 所示, 混沌脉冲的频谱中心频率为  $4.50$  GHz, 带宽达到  $4.10$  GHz, 如图 5(a4) 所示。当偏置电流等于  $3.0$  倍阈值电流时(在此偏置电流水平下, 该半导体激光器的弛豫振荡频率约为  $6.0$  GHz), 反馈系数依旧分别设定为  $0.0708$  和  $0.1413$ , 混沌脉冲的波形以及频谱特性的变化如图 5(b) 所示。图 5(b2) 显示, 当  $\kappa_f = 0.0708$  时, UWB 混沌脉冲的频谱中心频率移动到  $6.03$  GHz, 其带宽也增加至  $4.55$  GHz, 对应的波形时序图如图 5(b1) 所示。当反馈系数增加到  $0.1413$  时, 波形时序图如图 5(b3) 所示, 混沌脉冲的中心频率和带宽分别增加至  $6.09$  GHz 和  $6.33$  GHz, 如图 5(b4) 所示。通过分析图 5 的仿真结果, 可以得出如下结论: 混沌振荡的大部分能量分布在半导

体激光器的弛豫振荡频率附近；改变反馈强度，可以得到不同的带宽值。这一结论与实验相符。这意味着，Chaotic-UWB 脉冲信号的频谱特性完全可以通过调节光反馈半导体激光器的偏置电流和反馈强度而得到控制。图 6(a)和(b)分别为半导体激光器的

偏置电流和反馈系数的变化对 UWB 混沌脉冲信号的中心频率和-10 dB 带宽的影响。图 6(a)为当反馈系数为 0.0750 时，偏置电流从 1.7 到 3.2 倍阈值电流的变化情况下，中心频率的变化趋势曲线。图 6(b)表示了当偏置电流为 2.7 倍阈值电流时，

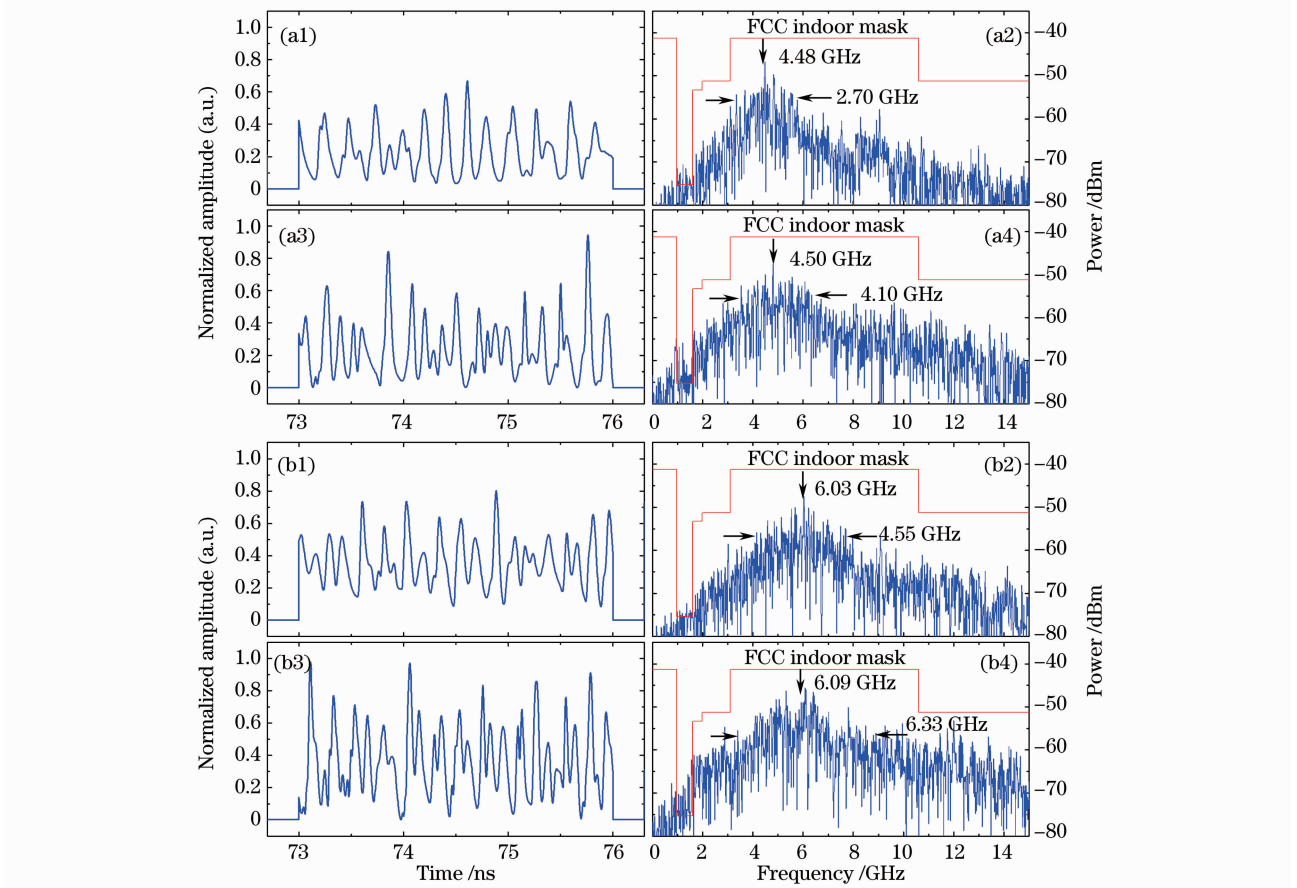


图 5 模拟的 UWB 混沌脉冲的波形(左列)与频谱(右列)。(a1)和(a2)中  $I=2.2I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.0708$ , (a3)和(a4)中  $I=2.2I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.1413$ , (b1)和(b2)中  $I=3.0I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.0708$ , (b3)和(b4)中  $I=3.0I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.1413$

Fig. 5 Simulated pulse waveforms (left column) and RF spectra (right column) of the UWB chaotic pulse. (a1) and (a2):  $I=2.2I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.0708$ , (a3) and (a4):  $I=2.2I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.1413$ , (b1) and (b2):  $I=3.0I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.0708$ , (b3) and (b4):  $I=3.0I_{th}$ ,  $\kappa_f=0.1413$

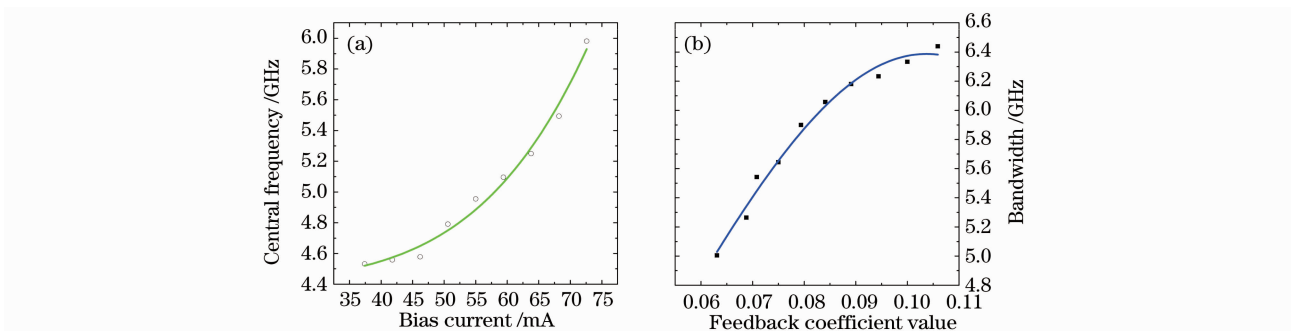


图 6 (a)当  $\kappa_f=0.0750$  时,UWB 混沌脉冲的频谱中心频率与半导体激光器偏置电流的关系曲线,(b)当  $I=2.7I_{th}$  时,UWB 混沌脉冲的-10 dB 带宽与反馈系数的关系曲线

Fig. 6 (a) Simulated center frequency as a functions of bias current when  $\kappa_f=0.0750$ , (b) simulated -10 dB bandwidth as a functions of feedback coefficient value when  $I=2.7I_{th}$



-10 dB带宽随反馈系数的增加(0.0631~0.1059)而增加的趋势。上述变化趋势可从混沌激光的光谱特性予以解释:当半导体激光器进入混沌状态时,由于不同频率成分的光场的相互作用,其弛豫振荡几乎变为一无阻尼振荡且其光谱线宽大大展宽。因为激光器的弛豫振荡频率随偏置电流的增加而增加,所以,由于偏置电流的增加而导致混沌脉冲的能量在频域上重新分布,混沌脉冲的中心频率向高频方向移动。而随着反馈强度的增加,混沌状态变得更为复杂,光谱展宽加剧,更多的光频模式相互作用使得混沌的带宽变宽且更加平坦。

基于光反馈半导体激光器实现了光生混沌 UWB 微波信号,实验结果和模拟结果相符。对于混沌 OOK 光脉冲在长距离光纤中传播,并利用天线发射和接收混沌 UWB 微波信号,从而实现 Chaotic UWB RoF 技术,有待在未来做进一步的研究。

## 4 结 论

提出了一种简单的基于光反馈半导体激光器的混沌特性的光生 UWB 混沌脉冲信号的方法。在此装置中,用一个电吸收强度调制器来直接调制混沌连续光而生成混沌 OOK 光脉冲序列,脉冲宽度为 3 ns,重复速率达到 300 MHz,相对带宽可分别达到 181%或 214%。通过调节光反馈半导体激光器的偏置电流和反馈强度,可便捷地调节该 UWB 信号的中心频率和带宽。同时利用光反馈半导体激光器的光场和载流子速率方程较为详细地数值模拟了偏置电流和反馈系数对混沌脉冲的波形和频谱特性的影响,仿真结果和实验结果基本相符。在传输速率和频谱利用率方面,此装置优于传统的电学方法。另外,仅需要通过改变光反馈半导体激光器的偏置电流和反馈强度,即可控制改善 UWB 脉冲信号的频谱特性,使该方法有潜力成为未来 UWB RoF 系统的光生微波信号源的优选方案。

## 参 考 文 献

- 1 G. R. Aiello, G. D. Rogerson. Ultra-wideband wireless systems [J]. *IEEE Microw. Mag.*, 2003, **4**(2): 36~47
- 2 I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam *et al.*. Wireless sensor networks: a survey[J]. *Comput. Netw.*, 2002, **38**(4): 102~114
- 3 S. Roy, J. R. Foerster, V. S. Somayazulu *et al.*. Ultrawideband radio design: the promise of high-speed, short-range wireless connectivity [J]. *Proc. IEEE*, 2004, **92**(2): 295~311
- 4 G. Kolumbán, M. P. Kennedy, Z. Jákó *et al.*. Chaotic communications with correlator receivers: theory and performance limits[J]. *Proc. IEEE*, 2002, **90**(5): 711~732
- 5 Z. G. Shi, K. S. Chen, W. Z. Cui *et al.*. Ambiguity functions

- of direct chaotic radar employing microwave chaotic colpitts oscillator[J]. *Prog. Electromagn. Res.*, 2007, **77**: 1~14
- 6 C. C. Chong, S. K. Yong. UWB direct chaotic communication technology for low-rate WPAN applications[J]. *IEEE T. Veh. Technol.*, 2008, **57**(3): 1527~1536
- 7 M. I. Jeong, J. N. Lee, C. S. Lee. Design of quasi-chaotic signal generation circuit for UWB Chaotic-OOK system[J]. *J. Electromagnet. Waves*, 2008, **22**(13): 1725~1733
- 8 A. S. Dmitriev, M. Hasler, A. I. Pamas *et al.*. Basic principles of direct chaotic communications[J]. *Nonlinear Phenomena in Complex System*, 2002, **4**(1): 1~14
- 9 M. Ran, B. I. Lembrikov, Y. Ben Ezra. Ultra-wideband radio-over-optical fiber concepts, technologies and applications[J]. *IEEE Photon. J.*, 2010, **2**(1): 36~48
- 10 J. Capmany, D. Novak. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photon.*, 2007, **1**(6): 319~330
- 11 S. Pan, J. Yao. Switchable UWB pulse generation using a phase modulator and a reconfigurable asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 160~162
- 12 Jing Li, Tigang Ning, Li Pei *et al.*. Optical ultra-wideband pulse generation and distribution using a dual-electrode Mach-Zehnder modulator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(2): 138~141
- 13 Ying Zhao, Xiaoping Zheng, Hanyi Zhang *et al.*. UWB-over-Fiber transmission system using a dual-output Mach-Zehnder modulator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 454~456
- 14 M. Bolea, J. Mora, B. Ortega *et al.*. Optical UWB pulse generator using N tap microwave photonic filter and phase inversion adaptable to different pulse modulation formats[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5023~5032
- 15 X. Yu, T. B. Gibbon, I. T. Monroy. Experimental demonstration of all-optical 781.25-Mb/s binary-coded UWB signals generation and transmission[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(17): 1235~1237
- 16 Zhao Yu, Zhao Deshuang, Liu Yongzhi *et al.*. Photonic generation of ultra-wideband signal using a passively mode-locked fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 92~95
- 赵羽, 赵德双, 刘永智等. 基于被动锁模光纤激光器的光子超宽带脉冲源[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 92~95
- 17 Bingbing Wu, Jian Wu, Kun Xu *et al.*. Photonic ultra-wideband monocycle pulses generation using semiconductor optical amplifier and electro-absorber in parallel [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(9): 902~905
- 18 M. H. Khan, H. Shen, Y. Xuan *et al.*. Ultrabroad-bandwidth arbitrary radiofrequency waveform generation with a silicon photonic chip-based spectral shaper[J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(2): 117~122
- 19 J. M. Liu, H. F. Chen, S. Tang. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1184~1196
- 20 F. Rogister, D. Pieroux, M. Sciamanna *et al.*. Anticipating synchronization of two chaotic laser diodes by incoherent optical coupling and its application to secure communications[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**(1-6): 295~306
- 21 I. Fischer, Y. Liu, P. Davis. Synchronization of chaotic semiconductor laser dynamics on subnanosecond time scales and its potential for chaos communication[J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(1): 011801(R)
- 22 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343~346
- 23 J. Ohtsubo. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9): 1141~1154
- 24 H. Leung, S. Shanmugam, N. Xie *et al.*. An ergodic approach for chaotic signal estimation at low SNR with application to ultra-wide-band communication[J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2006, **54**(3): 1091~1103
- 25 A. B. Wang, Y. C. Wang, J. F. Wang. Route broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1144~1146