

直接调制光反馈半导体激光器产生超宽带信号*

刘明¹⁾²⁾ 张明江^{1)2)3)†} 王安帮¹⁾²⁾ 王龙生¹⁾²⁾ 吉勇宁¹⁾²⁾ 马喆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) (太原理工大学光电工程研究所, 太原 030024)

3) (东南大学, 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

(2012年8月29日收到; 2012年10月9日收到修改稿)

利用直接电流调制光反馈半导体激光器产生了符合美国联邦通信委员会关于室内无线通信频谱限定的超宽带(UWB)微波信号. 基于光反馈半导体激光器速率方程组, 数值分析了偏置电流、反馈强度对混沌UWB脉冲信号的影响. 研究表明, 混沌UWB脉冲频谱的 -10 dB带宽分别随着偏置电流的增大和反馈强度的增强而逐渐增加; 中心频率分别随着偏置电流的增大和反馈强度的增强而逐渐增大. 实验中, 产生了中心频率为 6.6 GHz, -10 dB带宽为 9.6 GHz的混沌UWB信号. 进一步, 通过调节偏置电流和反馈强度, 可实现混沌UWB信号的中心频率和 -10 dB带宽的可调谐输出, 实验结果和数值分析相符合. 此外, 实验产生的混沌UWB信号经过 34.08 km的光纤传输后, 其频谱形状几乎没有发生变化, 表明该方法所产生的混沌UWB信号对光纤色散有较大的容忍度.

关键词: 超宽带, 混沌激光, 光反馈, 直接调制

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.62.064209

1 引言

2002年, 美国联邦通信委员会(FCC)容许了超宽带技术未经许可的商业应用, 为了避免超宽带(UWB)信号对现有无线通信系统的干扰, FCC一方面将UWB系统的带宽限制在 $3.1\text{--}10.6$ GHz频带内, 另一方面将UWB信号的功率谱密度限定在 -41.3 dBm/MHz以下^[1]. 由于UWB技术拥有高速率、抗多径衰落、低功耗、强穿透力、高精度定位以及高安全性等特点, 使其在无线通信、无线网络传感、穿墙雷达、智能交通、精确定位等众多领域有着广泛而重要的应用前景^[2,3]. 为了拓展UWB无线通信, 弥补高带宽、高频谱利用率的UWB信号在电域难以产生这一不足以及UWB信号在空间传输距离过短(一般为几米或十几米)这一应用限制, 使得本地UWB系统能够与有线网络以及其他无线网络实现互联, 2003年以来研究者们

先后提出验证了超宽带技术和光纤传输技术于一体的新技术——光载超宽带无线(UWB-over-fiber)技术, UWB-over-fiber技术既能利用光纤的巨大带宽和低损耗传输, 又能发挥超宽带无线通信灵活方便的优势, 已成为目前无线通信领域研究开发的一个热点^[4,5]. 在光域中直接产生UWB微波信号是实现UWB-over-fiber技术的核心问题, 这样不仅可以避免额外的电-光转换, 而且利用光学方法产生UWB信号还有低损耗、高带宽、抗电磁干扰等众多优点^[4-6].

目前, 国内外多家研究机构在光生UWB信号方面开展了工作, 并取得了重要进展. 2008年, Chen等^[7]利用同步的偏振调制和双折射时间延迟的原理产生了多频带的UWB脉冲信号; Chang等^[8]利用两路并行的马赫-曾德尔调制器产生了UWB脉冲信号. 2009年, Pan和Yao^[9]利用相位调制器和马赫-曾德尔干涉仪在光域内直接产生UWB脉冲;

* 国家自然科学基金(批准号: 60927007, 60908014, 61108027)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2010CB327806)、中国博士后科学基金(批准号: 2011M500048)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划(批准号: 20121fjy08)和光电信息技术教育部重点实验室(天津大学)开放基金(批准号: 2012 KFKT004)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangmingjiang@gmail.com

同年, Yu 等^[10] 利用光注入分布反馈式半导体激光器产生了 UWB 信号. 2010 年, Juan 和 Lin^[11] 利用脉冲注入半导体激光器产生 UWB 脉冲信号; Zhang 等^[12] 基于高非线性光子晶体光纤产生 UWB 脉冲信号; 冯新焕等^[13] 利用保偏光纤布拉格光栅作为鉴频器产生 UWB 脉冲信号; Zhou 等^[14] 利用高非线性光纤中的多重交叉相位调制以及多重的相位-强度调制转换产生 UWB 信号. 2011 年, Zhang 等分别利用级联的马赫-增德尔调制器^[15] 和光纤环形振荡器^[16] 产生 UWB 脉冲信号. 2012 年, 文献 [17, 18] 利用带有微波光子滤波器的光电振荡器产生 UWB 脉冲信号, 基于级联的微波光子滤波器产生 UWB 脉冲信号; 同年, Luo 等^[19] 利用半导体光放大器产生 UWB 脉冲信号. 上述研究主要集中在产生满足美国联邦通信委员会关于室内无线通信频谱辐射掩模 (FCC Indoor Mask) 的高斯脉冲一阶导数或高阶导数的 UWB 冲激脉冲信号 (impulse radio, IR), 其频率范围限定于 3.1—10.6 GHz. 然而, 迅猛发展的应用于不同环境下的无线通信系统需要不同频段、不同带宽且功率谱平滑的超宽带信号, 因此在光域产生中心频率可调谐、频谱带宽可控的 UWB 信号, 将大大拓展光载超宽带无线技术的应用领域. 2010 年 2 月, Khan 等^[20] 提出了一种基于光子学微腔的 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. 2010 年 11 月, Peled 等^[21] 提出了基于受激布里渊散射放大自发辐射的类噪声超宽带信号产生方法, 该方法具有信号中心频率可调节且带宽可变化的优点.

在前期的工作中, 我们提出并论证了利用 10 GHz 的电吸收调制器对基于半导体激光器的非线性效应产生的混沌光进行外调制产生混沌 UWB 脉冲信号的方案^[22-24]. 文献 [22] 中提出并论证了对光反馈半导体激光器产生的混沌光进行外调制产生超宽带脉冲信号; 文献 [23, 24] 分别从理论和实验论证了对光反馈外加光注入半导体激光器产生的混沌光进行外调制产生混沌 UWB 脉冲信号. 虽然这两种方法利用外调制混沌激光的方法在光域直接产生了超宽带信号且实现了 UWB 信号频谱的 -10 dB 带宽和中心频率可调谐, 但前者所产生的超宽带信号的频谱并没有很好地满足 FCC 的要求, 后者虽然较好地满足了 FCC 频谱模板的要求, 提高了频谱利用率. 但外光注入必然会使得系统复杂以及增加系统的成本, 且这两种方法所用的电光调制器也会提高系统复杂度、增加系统

的成本. 本文提出并论证了一种简单、经济的方案——无须额外的电光调制器, 直接电流调制光反馈半导体激光器产生混沌 UWB 脉冲信号, 所产生的混沌 UWB 脉冲信号不仅具有可控的频率带宽和可调谐的中心频率, 而且在未经任何色散补偿情况下, 在频谱的形状几乎没有发生变化的条件下, 实现了 34.08 km 光纤传输, 相比于我们前期的工作^[25], 在 UWB 信号的传输距离与传输性能上有了明显的改善.

2 理论模型及模拟结果

2.1 理论模型

直接调制光反馈半导体激光器产生超宽带脉冲信号的系统模型如图 1 所示. 混沌激光源由一个分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD) 和一个反射系数可调的光纤反射镜 (FM) 组成. 在不同的偏置电流和反馈强度下, 激光器的输出将会出现单周期态、倍周期态、混沌态, 在适当的条件下可以使激光器输出混沌激光, 通过调节偏置电流和反馈强度可控制该混沌激光的频谱特性. 将一列速率为 960 Mb/s 的方波信号直接对此光反馈半导体激光器进行调制, 生成输出速率可变的纳秒量级的混沌超宽带光脉冲信号 (chaotic-UWB pulses). 当脉冲持续时间 T 满足 $T > 1/2\Delta F$, (ΔF 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 ΔF 一致^[26].

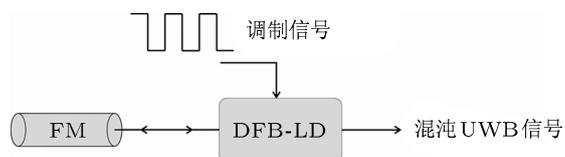


图 1 直接调制光反馈半导体激光器产生超宽带脉冲信号的系统模型 DFB-LD, 分布反馈式半导体激光器; FM, 光纤反射镜

直接电流调制光反馈半导体激光器的理论模型可由下列的光场复振幅 E 和载流子 N 的速率方程组来描述:

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

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

式中 E 和 N 分别表示激光器的电复振幅和载流子密度, k_f 为反馈系数, 反馈强度为 $10\lg(k_f^2)$ dB, 为了与实验系统相对应, 反馈延时设为 $\tau = 28$ ns. 模拟中用到的其他参数为: 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 $\tau_{in} = 7.38$ ps, 线宽增强因子 $\alpha = 5.0$, 增益饱和系数 $\varepsilon = 5 \times 10^{-5} \mu\text{m}^3$, 有源层体积 $V = 324 \mu\text{m}^3$. 方波信号直接对激光器进行电流调制时, $I = I_{th} + 1.5 \times I_{th} \times N$ (“0”或“1”), 当调制的方波信号为“0”时, 激光器的偏置电流为阈值电流, 此时激光器的输出光功率极弱; 当调制的方波信号为“1”时, 激光器的偏置电流为 2.5 倍的阈值电流, 此时激光器输出为混沌脉冲序列.

2.2 数值模拟结果

图 2(a) 为偏置电流 $2.5I_{th}$, 反馈强度 -12 dBm, 未加方波信号调制时的混沌脉冲的频谱图; 图 2(b), (c), (d) 所示为当偏置电流 $2.5I_{th}$, 反馈强度 -12 dBm, 调制速率 960 Mb/s 时混沌 UWB 脉冲信

号时序、频谱和光谱. 直接对混沌激光器进行调制后输出的混沌 UWB 脉冲序列如图 2(b) 所示, 从插图中可以看出混沌 UWB 脉冲序列的长度 0.52 ns, 大约包含了 8 个脉冲, 每一个脉冲的半高全宽约为 32.5 ps. 在图 2(c) 中, 蓝色的线为混沌 UWB 脉冲信号的频谱, 其 -10 dB 带宽可以达到 6.8 GHz, 中心频率 6.9 GHz, 相对带宽为 102%, 红色线为 FCC 室内频谱模板, 产生的混沌 UWB 脉冲信号的频谱较好地满足了 FCC 室内模板的要求. 图 2(d) 为直接调制光反馈半导体激光器的光谱图.

为了分析直接调制光反馈半导体激光器的频谱响应特性, 探究偏置电流、反馈强度对 -10 dB 带宽和中心的频率的影响, 数值模拟中, 固定反馈强度为 -12 dBm, 调节偏置电流, 从 $1.2I_{th}$ 到 $1.8I_{th}$ 到 $2.5I_{th}$, 结果如图 3(a)—(c) 所示, 随着偏置电流的逐渐增大, -10 dB 带宽逐渐从 4.2 GHz 增加到 5.2 GHz, 直到 6.8 GHz, 中心频率逐渐从 5.8 GHz 增大到 6.4 GHz, 直到 6.9 GHz; 固定偏置电流为 $2.5I_{th}$, 调节反馈强度分别为 $-24, -18, -12$ dBm, 随着反馈系数的逐渐增大, -10 dB 带宽逐渐增加为 5.6, 6.4, 6.8 GHz, 中心频率逐渐从 6.1 GHz 增大到 6.6 GHz, 直到 6.9 GHz, 结果如图 3(d)—(f) 所示.

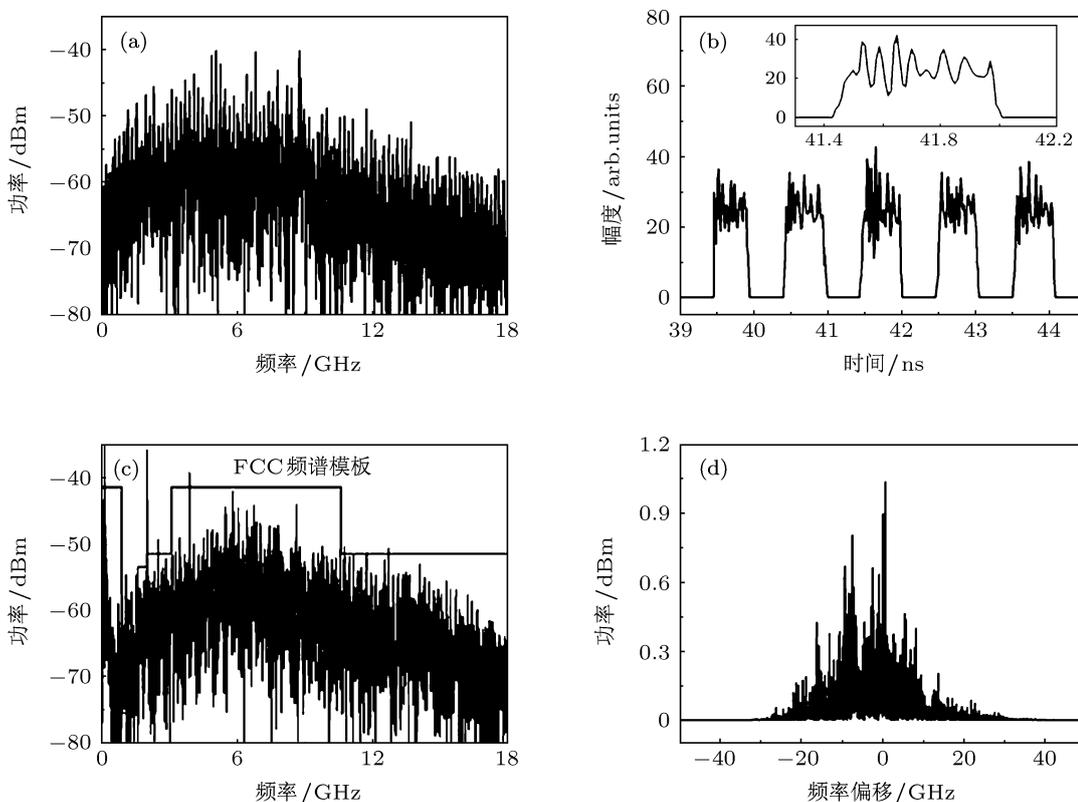


图 2 (a) 为偏置电流为 $2.5I_{th}$, 反馈强度为 -12 dBm 时的未进行调制的混沌脉冲的频谱图; (b), (c), (d) 分别为偏置电流 $2.5I_{th}$, 反馈强度 -12 dBm, 调制速率 960 Mb/s 的混沌 UWB 脉冲的时序图、频谱图、光谱图

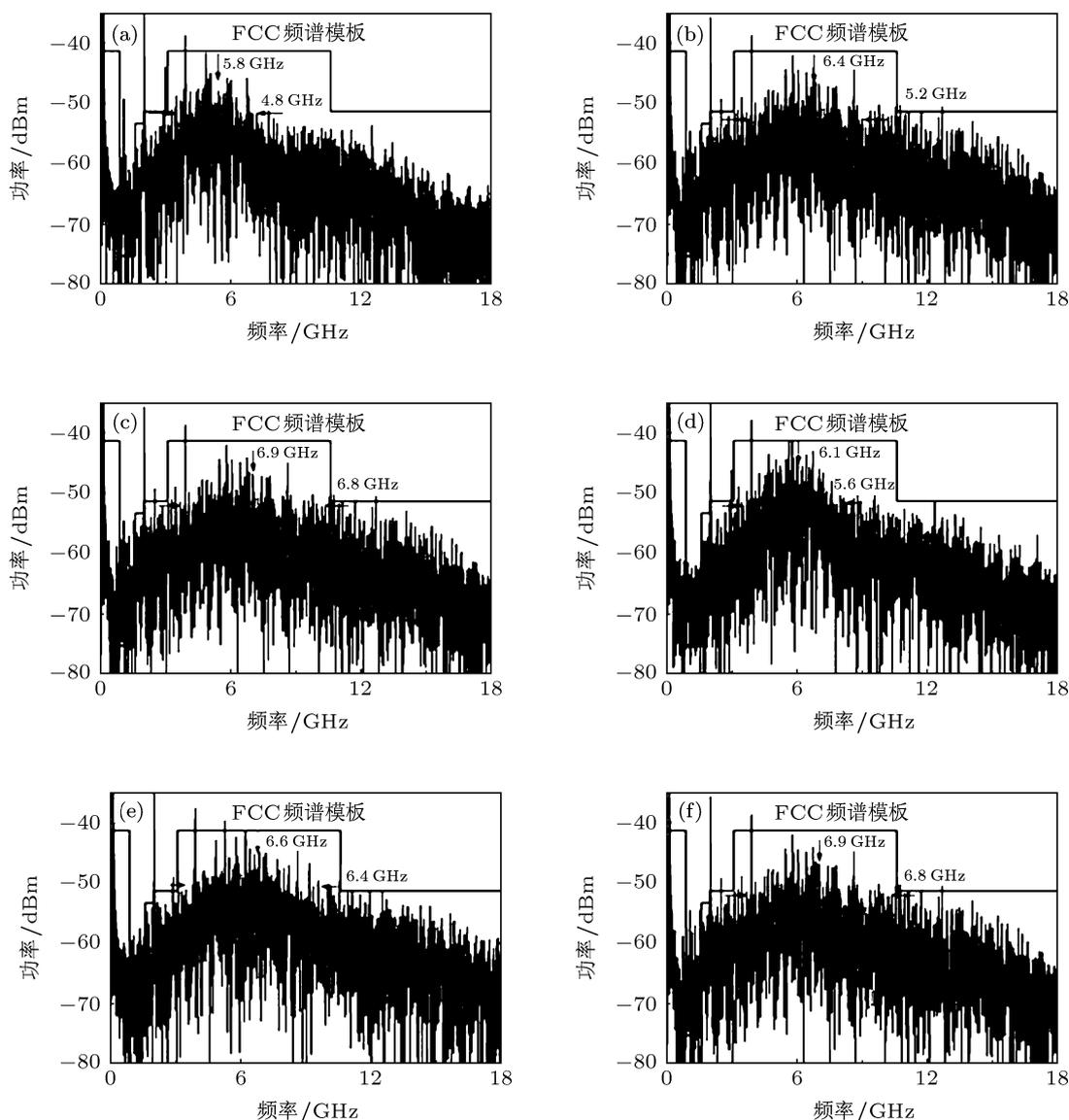


图3 混沌UWB脉冲在不同状态下的频谱图 (a) 偏置电流为 $1.2I_{th}$, 反馈强度为 -12 dBm 时的频谱图; (b) 偏置电流为 $1.8I_{th}$, 反馈强度为 -12 dBm 时的频谱图; (c) 偏置电流为 $2.5I_{th}$, 反馈强度为 -12 dBm 时的频谱图; (d) 偏置电流为 $2.5I_{th}$, 反馈强度为 -24 dBm 时的频谱图; (e) 偏置电流为 $2.5I_{th}$, 反馈强度为 -18 dBm 时的频谱图; (f) 偏置电流为 $2.5I_{th}$, 反馈强度为 -12 dBm 时的频谱图

偏置电流和反馈强度是使得混沌UWB信号的频谱发生变化的重要影响因素, 当激光器进入混沌状态, 它的本征振荡, 即弛豫振荡将变为非阻尼的状态, 混沌激光的主要能量在频域上将分布在弛豫振荡频率附近, 这使得频谱的中心频率大致与激光器的弛豫振荡频率一致. 随着偏置电流的增加, 加剧了激光模式间的相互作用, 导致光谱展宽^[27], 从而频谱的中心频率和带宽逐渐增大; 反馈强度的增强, 增加了混沌态的复杂度, 也会使得混沌激光的中心频率和频谱带宽进一步增加.

3 实验装置和实验结果

3.1 实验装置

图4为混沌超宽带信号产生的实验装置图, 一个商用的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD), 通过外加光纤环反馈系统用来产生混沌激光, 输出光经一个 $50:50$ 的耦合器后分为两路, 其中一路作为输出, 另一路作为反馈光源, 光衰减器(VA)和两个偏振控制器(PC1和PC2)分别用来控制反馈光的强度和偏振状态. 利用本课题组研制的码率可调的随机数发生器(NRZ-RDG)^[28]产生的非

归零码随机序列直接调制半导体激光器产生混沌 UWB 光脉冲信号, 混沌 UWB 光脉冲经由一个带宽为 45 GHz 的光电探测器转化为混沌 UWB 电脉冲, 为了分析 UWB 信号的传输特性, 生成的 UWB 信号的时序、功率谱以及对应的光谱分别用 6 GHz 的实时示波器 (Lecroy SDA8Zi-A), 26.5 GHz 的频谱分析仪 (Agilent N9010A) 和光谱仪 (Agilent 86140B) 进行观测。

3.2 混沌超宽带信号的产生

混沌激光是激光器输出不稳定性的一种特殊形式, 此时尽管激光器的动态特性同样可以由确定的速率方程来描述, 但是激光器的输出 (光强、波

长、相位) 在时域上不再是稳态, 而是类噪声的随机变化, 半导体激光器受到反馈光的扰动, 其输出会出现从低频起伏到混沌^[29], 从倍周期到混沌的演变过程. 实验中, 将半导体激光器的偏置电流和反馈强度调节到适当的条件下, 使得激光器产生混沌振荡后输出连续的混沌光, 而后利用随机序列直接对激光器进行内调制, 产生混沌脉冲序列, 每一个混沌脉冲序列包含数十个幅度随机起伏的混沌脉冲. 实验中, 激光器的阈值电流为 16 mA, 光纤反馈环长为 5.6 m. 为了产生符合 FCC 室内模板要求的频谱, 通过优化偏置电流、反馈强度, 调制速率来实现, 图 5 所示为直接调制半导体激光器的随机码的时序图以及当偏置电流为 32 mA, 反馈强度为

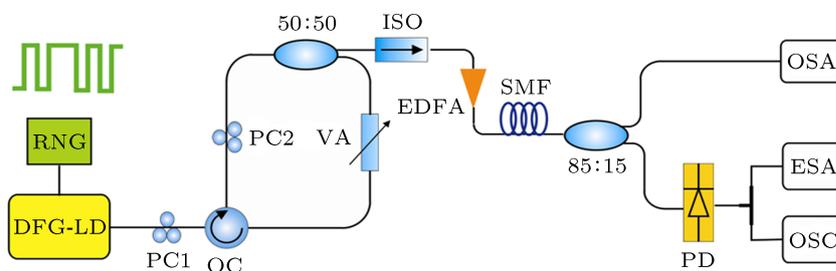


图 4 实验装置图 LD, 半导体激光器; RNG, 随机数发生器; PC, 偏振控制器; OC, 光环行器; VA, 可调光衰减器; SO, 光隔离器; EDFA, 掺铒光纤放大器; PD, 光电探测器; OSA, 光谱分析仪; ESA, 频谱分析仪; OSC, 示波器

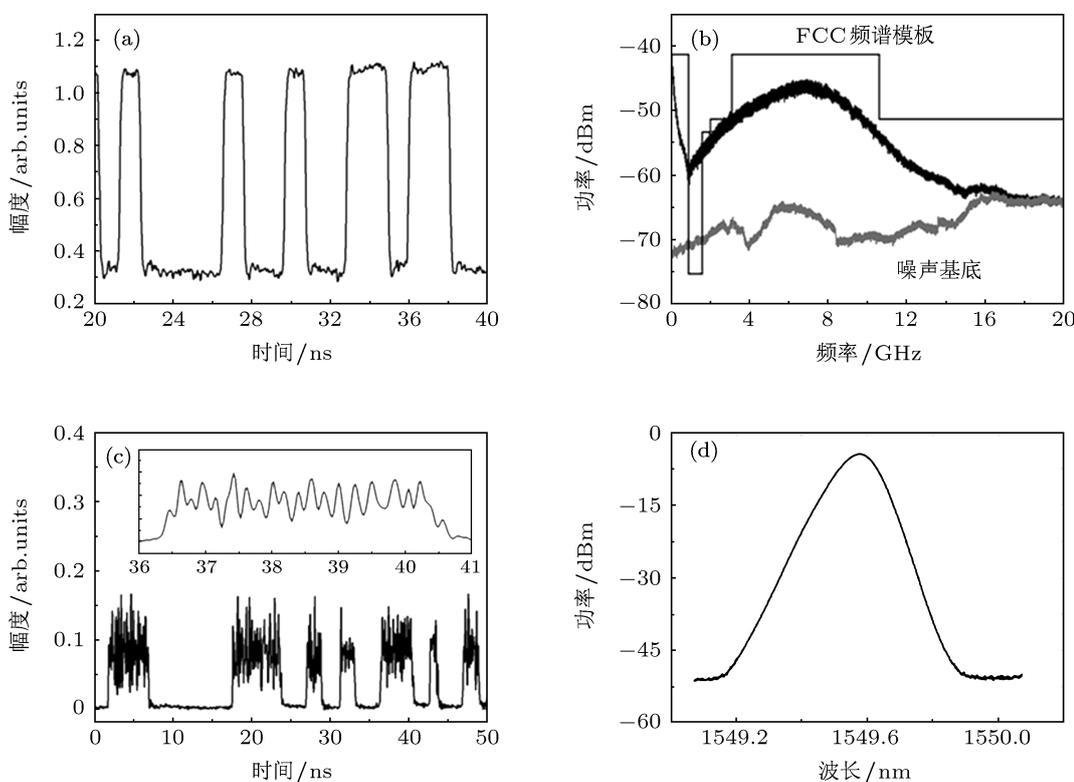


图 5 (a) 直接调制激光器的随机码的时序; (b) 实验产生的混沌 UWB 脉冲信号的频谱; (c) 时序; (d) 光谱

-4 dBm, 调制速率为 960 Mb/s 时混沌 UWB 脉冲信号的频谱图、时序图、调制前后的光谱图. 图 5(a) 为用于直接半导体激光器的随机码的时序图; 在图 5(b) 中, 蓝色的线为所产生混沌 UWB 脉冲信号的频谱, 其 -10 dB 带宽可以达到 9.6 GHz, 相对带宽为 155%, 中心频率为 6 GHz, 红色的线为 FCC 室内频谱模板, 灰色的线为频谱仪基底噪声, 可以看出实验产生的混沌 UWB 脉冲信号的频谱较好地满足了 FCC 室内模板的要求; 直接调制光反馈半导体激光器输出的混沌 UWB 脉冲序列如图 5(c) 所示, 从插图中可以看出混沌 UWB 脉冲序列的长度为 4 ns, 大约包含了 20 个脉冲, 所以每一个脉冲的半高全宽为 100 ps. 通过温度控制器将分布反馈式半导体激光器的中心波长稳固在 1549.572 nm, -20 dB 的线宽为 0.2 nm, 如图 5(d) 所示.

3.3 偏置电流、反馈强度和调制速率对 -10 dB 带宽和中心频率的影响

实验研究了偏置电流、反馈强度、调制速率对所产生的混沌 UWB 信号的频谱特性的影响, 实现了混沌 UWB 信号的频谱带宽可控、中心频率可调谐输出. 实验中, 固定反馈强度为 -4 dBm, 调制速率为 960 Mb/s, 调节偏置电流, 如图 6(a)–(c) 所示, 当偏置电流分别为 $1.4I_{th}$, $1.7I_{th}$, $2.0I_{th}$ 时, 对应的

混沌 UWB 信号的 -10 dB 带宽分别为 7.8, 8.7, 9.6 GHz, 中心频率分别为 4.9, 6.2, 6.6 GHz; UWB 信号的 -10 dB 带宽和中心频率与偏置电流的关系曲线如图 6(d) 所示, 随着偏置电流的逐渐增大 ($1.1I_{th}$ — $2.0I_{th}$), -10 dB 带宽逐渐增加 (5.6—9.6 GHz), 中心频率逐渐增大 (3.8—6.6 GHz).

固定偏置电流为 $2.0I_{th}$, 调制速率为 960 Mb/s, 调节反馈强度, 如图 7(a)–(c) 所示. 当反馈强度分别为 -12, -8, -4 dBm 时, 对应的混沌 UWB 信号的 -10 dB 带宽分别为 8.0, 8.75, 9.6 GHz, 中心频率分别为 4.2, 5.7, 6.6 GHz; 混沌 UWB 信号的 -10 dB 带宽和中心频率与反馈强度的关系曲线如图 7(d) 所示, 随着反馈强度的逐渐增大 (-14.0—4.0 dBm), -10 dB 带宽逐渐增加 (7.8—9.6 GHz), 中心频率逐渐增大 (4.0—6.6 GHz).

固定偏置电流为 32 mA, 反馈强度为 -4 dBm, 改变调制速率, 当调制速率分别为 360, 720, 960 Mb/s 时的频谱图如图 8(a)–(c) 所示; UWB 信号的 -10 dB 带宽和中心频率与调制速率的关系曲线如图 8(d) 所示, 随着调制速率的逐渐增大 (240—960 Mb/s), -10 dB 带宽会出现小幅度的增加, 中心频率几乎没有发生变化, 这和文献 [23] 中表述是一致的. 随着调制速率的增大, 混沌脉冲序列的宽度逐渐变窄, 导致混沌 UWB 信号的频谱出现小幅度的展宽, 而中心频率几乎没有变化.

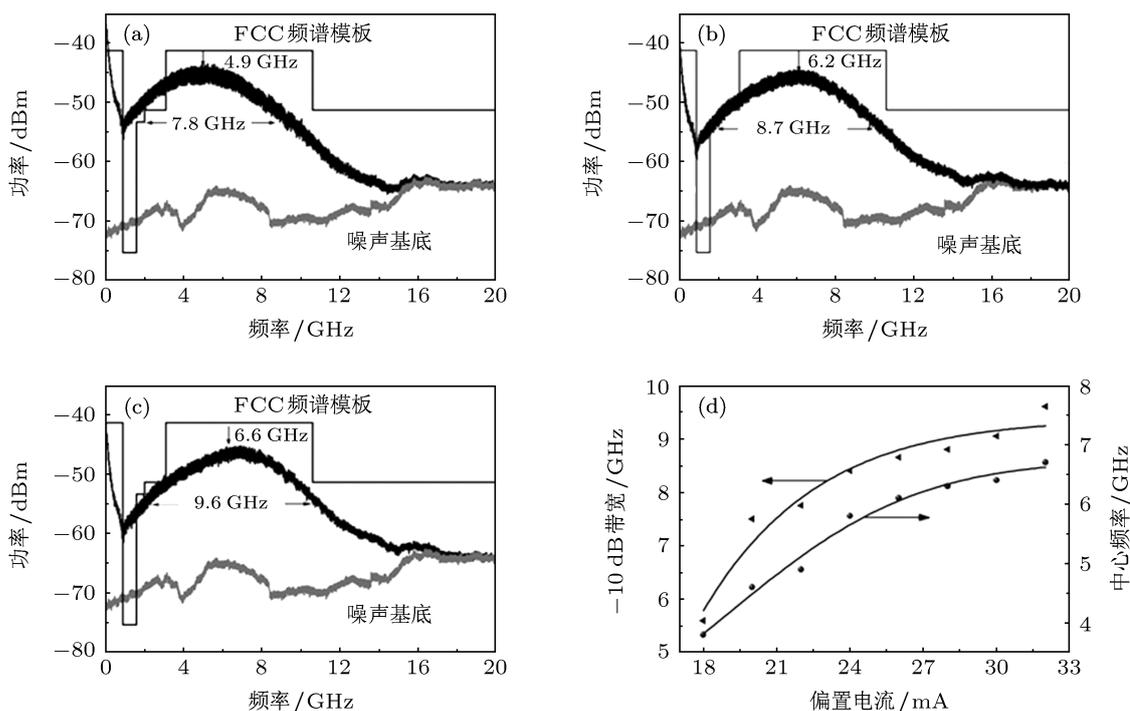


图 6 (a), (b), (c) 为偏置电流分别为 22, 27, 32 mA 的实验频谱图; (d) -10 dB 带宽和中心频率随偏置电流变化的实验曲线图

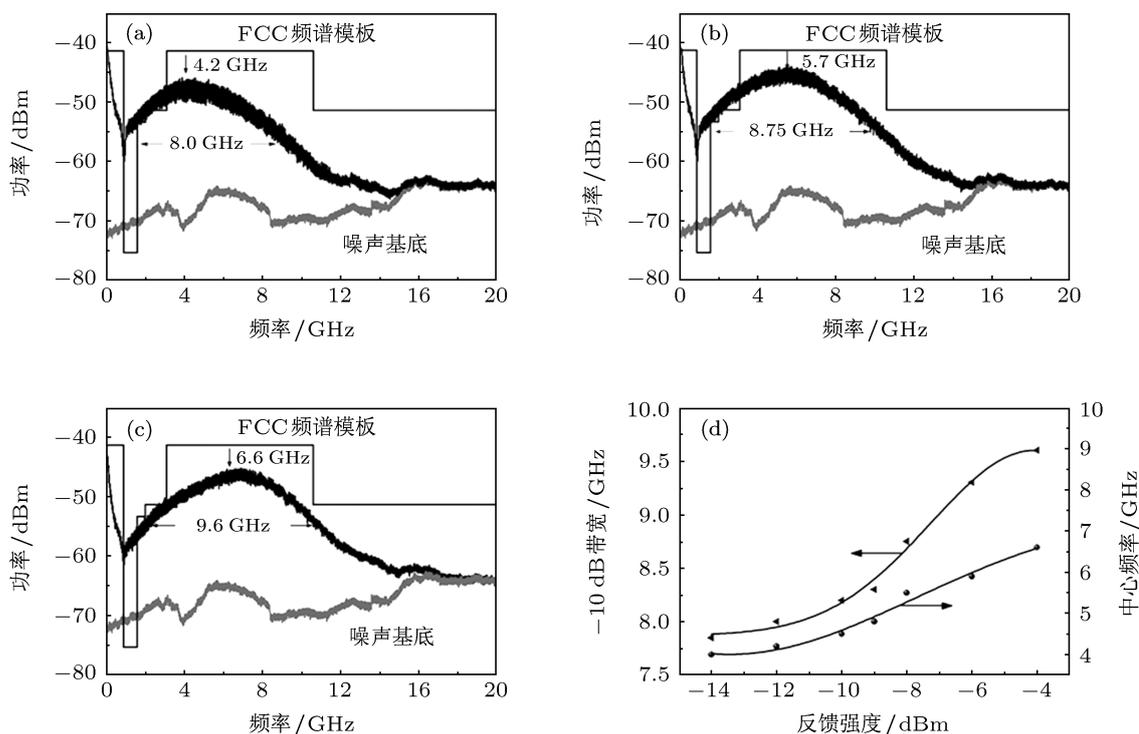


图 7 (a), (b), (c) 反馈强度分别为 -12 , -8 , -4 dBm 的实验频谱图; (d) -10 dB 带宽和中心频率随反馈强度变化的实验曲线图

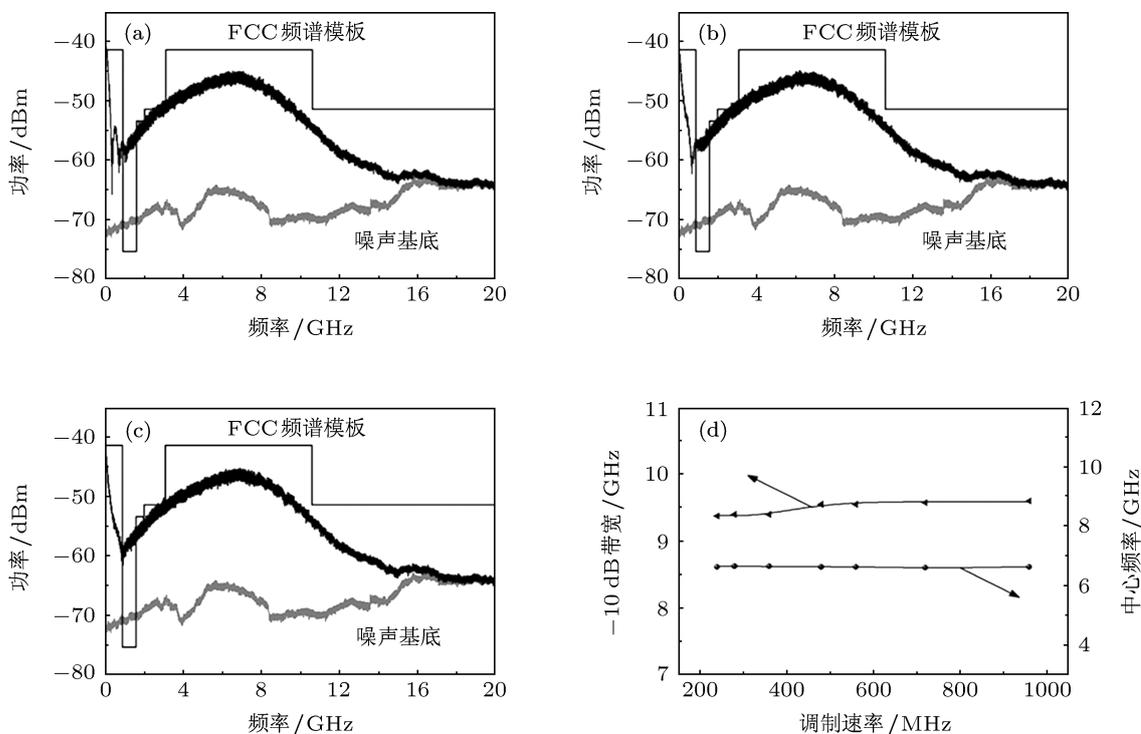


图 8 (a), (b), (c) 调制速率分别为 360, 720, 960 Mb/s 的实验频谱图; (d) UWB 信号的频谱的 -10 dB 带宽和中心频率随调制速率变化的实验曲线图

如果进一步增大偏置电流和反馈强度, -10 dB 带宽和中心频率将会继续增加, 但是产生的混沌 UWB 脉冲信号的频谱将超出 FCC 室内频

谱模板的限制. 直接调制光反馈半导体激光器会出现很丰富的动态特性, 例如周期振荡、低频振荡、混沌 [30-32]. 本文中, 直接调制光反馈半导体激光器

产生混沌 UWB 信号, 我们的研究仅限于偏置电流从 $1.1I_{th}$ 到 $2.0I_{th}$, 反馈强度从 -14 dBm 到 -4 dBm, 调制速率从 240 Mb/s 到 960 Mb/s 这样的范围内, 如果三个参量超出上述的变化范围, 直接调制光反馈半导体激光器的输出特性将会出现其他的动态特性.

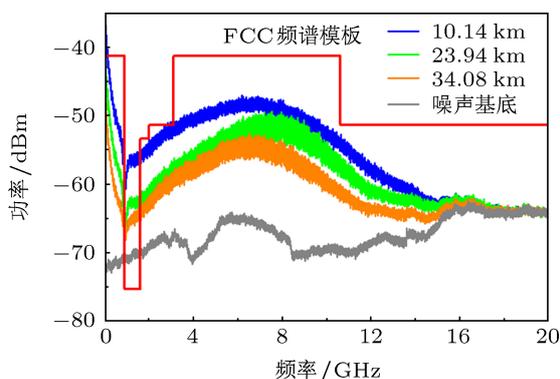


图9 在不同长度的传输光纤下, 混沌 UWB 信号的频谱形状变化趋势的实验曲线图

3.4 混沌 UWB 信号的传输特性

进一步研究了所产生的混沌 UWB 信号在光纤中的传输特性, 检测了混沌 UWB 信号频谱形状随传输距离的变化趋势. 如图 9 所示, 设定偏置电流为 32 mA, 反馈强度为 -4 dBm, 调制速率为 960 Mb/s, 将混沌光脉冲经 EDFA 放大后进行长距离的光纤传输, 可以看到分别经 10.14, 23.94, 34.08 km 的光纤传输后, 混沌 UWB 信号的频谱形状几乎没有变化, 只是在能量上因为光纤的传输损耗有着不同幅度的衰减, 这是因为频谱形状的变化主要取决于混沌 UWB 脉冲的形状变化, 而实验中, 对于直接调制的光反馈 DFB 激光器的输出光的线宽相对较窄, 在光纤传输中, 窄线宽的混沌 UWB 脉冲受光

纤色散的影响较小, 所以光纤色散效应并没有导致 UWB 信号的脉冲形状发生明显的畸变, 从而使得混沌 UWB 信号的频谱几乎没有变化, 这意味着此系统下所产生的混沌 UWB 信号受光纤色散的影响非常小. 此外, 在混沌 UWB 信号的功率谱中没有出现离散的谱线, 这说明无需引入抖动^[33] 或者优化调制格式^[34] 来缓解由于离散的功率谱所带来的消极影响, 降低了系统的成本和复杂度.

4 结论

本文提出并论证了一种有效、经济的方案产生混沌 UWB 信号——直接电流调制光反馈半导体激光器产生混沌 UWB 信号. 理论分析了偏置电流、反馈强度对混沌 UWB 脉冲信号频谱的 -10 dB 带宽和中心频率的影响. 研究表明, 混沌 UWB 脉冲频谱的 -10 dB 带宽分别随着偏置电流的逐渐增大和反馈强度的逐渐增强而逐渐增加; 中心频率分别随着偏置电流的逐渐增大和反馈强度的逐渐增强而逐渐增大. 实验中, 直接在光域产生了速率为 960 Mb/s 的混沌 UWB 脉冲信号, 其频谱的中心频率为 6 GHz, -10 dB 带宽为 9.6 GHz, 相对带宽为 155%. 通过调谐偏置电流和反馈强度, 实现了混沌 UWB 信号的中心频率和 -10 dB 带宽大范围可调. 此外, 经过长距离 (34.08 km) 的光纤传输后, 频谱的形状几乎没有发生变化, 这意味着光纤色散对所产生的混沌 UWB 信号的几乎没有影响, 而且混沌 UWB 信号的功率谱中没有出现离散的谱线, 这说明可以忽略由于离散的功率谱所带来的消极影响, 无需优化调制格式. 这使得所提出的系统将在未来的光载超宽带无线接入网中拥有潜在的应用前景.

[1] Roy S, Foerster J R, Somayazulu V S, Leeper D G 2004 *Proc. IEEE* **92** 295
 [2] Aiello G R, Rogerson G D 2003 *IEEE Microw. Mag.* **4** 36
 [3] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramanian Y, Cayirci E 2002 *IEEE Comput. Mag.* **40** 102
 [4] Yao J P, Zeng F, Wang Q 2007 *J. Lightw. Technol.* **25** 3219
 [5] Ran M, Lembrikov B I, Ezra Y B 2010 *IEEE Photon. J.* **2** 36
 [6] Zeng F, Yao J P 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2062
 [7] Chen H W, Wang T L, Li M, Chen M H, Xie S Z 2008 *Opt. Express* **16** 7447
 [8] Chang Q J, Tian Y, Ye T, Gao J M, Su Y K 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 1651

[9] Pan S L, Yao J P 2009 *Opt. Lett.* **34** 1312
 [10] Yu X B, Gibbon T B, Monroy I T 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 1235
 [11] Juan Y S, Lin F Y 2010 *Opt. Express* **18** 9664
 [12] Zhang F Z, Wu J, Fu S N, Li Y, Hong X B, Shum P, Lin J T 2010 *Opt. Express* **18** 15870
 [13] Feng X H, Li Z H, Guan B, Lu C, Tam H Y, Wai P K A 2010 *Opt. Express* **18** 3643
 [14] Zhou E B, Xu X, Lui K S, Wong K 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1063
 [15] Yuan Y, Dong J J, Li X, Zhang X L 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1754

- [16] Zhang Y, Zhang X L, Zhang F Z, Wu J, Wang G H, Shum P P 2011 *Opt. Com.* **284** 1803
- [17] Wang L X, Zhu N H, Zheng J Y, Liu J G, Li W 2012 *Appl. Opt.* **51** 1
- [18] Zheng J Y, Zhu N H, Wang L X, Liu J G, Liang H G 2012 *Appl. Opt.* **4** 657
- [19] Luo B W, Dong J J, Yu Y, Yang T, Zhang X L 2012 *Opt. Lett.* **37** 2217
- [20] Khan M H, Shen H, Xuan Y, Zhao L, Xiao S, Leaird D E, Weiner A M, Qi M 2010 *Nature Photon.* **4** 117
- [21] Peled Y, Tur M, Zadok A 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 1692
- [22] Zheng J Y, Zhang M J, Wang A B, Wang Y C 2010 *Opt. Lett.* **35** 1734
- [23] Meng L N, Zhang M J, Zheng J Y, Zhang Z X, Wang Y C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124212 (in Chinese) [孟丽娜, 张明江, 郑建宇, 张朝霞, 王云才 2011 物理学报 **60** 124212]
- [24] Zhang M J, Liu T G, Wang A B, Zheng J Y, Meng L N, Zhang Z X, Wang Y C 2011 *Opt. Lett.* **36** 1008
- [25] Liu L, Zheng J Y, Zhang M J, Meng L N, Zhang Z X, Wang Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084204 (in Chinese) [刘臻, 郑建宇, 张明江, 孟丽娜, 张朝霞, 王云才 2012 物理学报 **61** 084204]
- [26] Dmitriev A S, Hasler M, Panas A I, Zakharchenko K V 2003 *Nonlinear Phenom. Complex Sys.* **6** 488
- [27] Wang A B, Wang Y C, Wang J F 2009 *Opt. Lett.* **34** 1144
- [28] Zhang J Z, Wang Y C, Liu M, Xue L G, Li Pu, Wang A B, Zhang M J 2012 *Opt. Express* **20** 7496
- [29] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴, 王安邦, 王海红, 王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
- [30] Liu Y, Kikuchi N, Ohtsubo J 1995 *Phys. Rev. E* **51** 2697
- [31] Takiguchi Y, Liu Y, Ohtsubo J 1998 *Opt. Lett.* **23** 1369
- [32] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 160
- [33] Win M Z 2002 *IEEE Commun. Lett.* **6** 526
- [34] Nakache Y, Molisch A F 2003 *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference* **4** 2510

Generation of ultra-wideband signals by directly current-modulating distributed feedback laser diode subjected to optical feedback*

Liu Ming¹⁾²⁾ Zhang Ming-Jiang^{1)2)3)†} Wang An-Bang¹⁾²⁾ Wang Long-Sheng¹⁾²⁾
Ji Yong-Ning¹⁾²⁾ Ma Zhe¹⁾²⁾

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

2) (*Institute of Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

3) (*The State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

(Received 29 August 2012; revised manuscript received 9 October 2012)

Abstract

The chaotic ultra-wideband (UWB) pulse signals are generated by directly modulating semiconductor laser subjected to optical feedback. We simulate that the -10 dB bandwidth and the central frequency of the RF spectrum of the chaotic UWB signals are influenced by the bias current and feedback strength. The research results demonstrate that the -10 dB bandwidth of the RF spectrum of the UWB signals increases with the increases of the bias current of the semiconductor laser and the feedback, the central frequency also increases with the increases of the bias current and the feedback. In our experiments, chaotic UWB signals with steerable and flatted power spectrum are generated by directly modulating DFB-LD subjected to optical feedback. The power spectrum of UWB signals is fully compliant with the FCC indoor mask, while a large fractional bandwidth of 133% and a central frequency of 6.6 GHz are achieved. The central frequency and -10 dB bandwidth of the chaotic UWB signals are on a large scale tunable by adjusting the bias current and feedback power. In addition, the chaotic UWB signals transmit through a 34.08 km single mode fiber and the power spectrum does not have any discrete spectrum line.

Keywords: ultra-wideband, chaotic laser, optical feedback, direct modulation

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf, 42.79.Sz

DOI: 10.7498/aps.62.064209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 60927007, 60908014, 61108027), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327806), the China Postdoctoral Science Foundation, the Program for the Top Young Academic Leaders of Higher Learning Institutions of Shanxi, China (Grant No. 2012lfjyt08), and the Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education (Tianjin University), China (Grant No. 2012KFKT004).

† Corresponding author. E-mail: zhangmingjiang@gmail.com