

光注入下外光反馈半导体激光器输出自相关特性研究^{*}

范 燕 夏光琼 吴正茂[†]

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2008 年 4 月 2 日收到, 2008 年 8 月 15 日收到修改稿)

基于半导体激光器(SL)受到外部扰动(光反馈和光注入)下的速率方程组,研究了反馈系数、延迟时间、注入强度和频率失谐对半导体激光器输出混沌信号自相关特性的影响.研究表明:上述四个参量对SL输出混沌信号的自相关函数曲线的半高全宽(FWHM)以及边峰抑制比都有影响,通过合理选择各参量,可以使SL输出的混沌信号具有尖锐的自相关函数曲线分布,其FWHM可降到0.02 ns,比已有相关报道提高了一个数量级.

关键词:半导体激光器,光反馈,光注入,自相关函数

PACC:4255P, 0545

1. 引 言

雷达遥感技术具备全天时、全天候、多模式、多极化等技术优势,是可见光与红外多光谱遥感的重要补充,在国民经济诸多领域具有广阔的应用前景.随着相关技术的发展,各种方案不断涌现以期能进一步提高其工作性能,其中随机信号雷达由于具有传统雷达所不具备的众多优点而受到人们的格外关注^[1-3].2000年,Stephan等^[4]对频率位于10.7—12 GHz、带宽为1.3 GHz的宽带随机噪声信号雷达的工作特性进行了研究.由于噪声的产生和存储比较困难,人们又提出了另一类随机信号雷达——微波混沌雷达^[5-7].与噪声雷达相比,微波混沌雷达具有更高的带宽和更好的相关特性,因而其测量精度与定位能力优于噪声雷达,且可用于保密测量.目前,微波混沌信号大多采用电路来产生.近年来,Lin和Liu^[8-10]提出了一种基于光注入或者光电反馈半导体激光器(SL)的微波混沌雷达,即利用光注入或光电反馈SL的非线性动力学产生的混沌光信号,再通过一个光电探测器转换为可发射的微波混沌信号.实际发射的混沌信号的带宽为1.5—3 GHz,自相关函数曲线的半高全宽(FWHM)为0.28 ns,所对应测量的精度为4 cm.

为了提高混沌雷达的测量精度,要求混沌信号

的自相关函数的曲线尖锐(即具有小的FWHM).同时,为了减少对目标的误判,需要发射信号的自相关函数具有大的边峰抑制比(PSL).本文提出一种新的微波混沌雷达发射源方案,即基于光反馈和光注入共同作用下SL所产生的混沌信号,通过一个光电探测器转换为雷达提供可发射的微波混沌信号.我们将着重讨论光注入和光反馈共同作用下SL输出信号的自相关特性,详细分析与反馈和注入相关的各物理量的变化对自相关函数的FWHM以及PSL的影响.本文的研究结果可为提高混沌雷达的测量精度和准确度提供理论指导.

2. 理论模型

当外部光反馈和光注入的条件下,描述SL的动力学行为的速率方程组为^[11,12]

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha)g_n[n(t) - n_{th}]E(t) + \frac{k_{inj}}{\tau_{in}}E_{inj}(t)\exp(i2\pi\Delta ft) + \frac{k_f}{\tau_{in}}E(t - \tau_d)\exp(-i2\pi f\tau_d), \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n(t)}{\tau_c} - \left\{ g_n[n(t) - n_{th}] + \frac{1}{\tau_p} \right\} |E(t)|^2 \quad (2)$$

^{*} 重庆市自然科学基金(批准号:2007DB2333)毫米波国家重点实验室开放基金和西南大学高新技术培育基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

式中 $E(t)$ 为 SL 复场振幅, $E_{inj}(t)$ 为外部注入光场的复振幅, $n(t)$ 为载流子数密度, n_{th} 为载流子密度阈值, α 为线宽增强因子, g_n 为微分增益系数, J 为注入偏置电流, e 为电子电量, d 为激活层厚度, τ_{in} 为光在腔内往返一次所需的时间, τ_c 为载流子寿

命, τ_p 为光子寿命, k_{inj} 为光注入系数, f 为 SL 光场的频率, Δf 为注入光场与 SL 光场的频率失谐, k_f 为外腔光反馈系数, τ_d 为反馈延迟时间.

为了描述 SL 输出的自相关特性, 引入自相关函数 $C^{[13]}$ 即

$$\alpha(\Delta t) = \frac{((E(t))^2 - \langle E^2 \rangle) ((E(t + \Delta t))^2 - \langle E^2 \rangle)}{\sqrt{((E(t))^2 - \langle E^2 \rangle)^2 ((E(t + \Delta t))^2 - \langle E^2 \rangle)^2}}, \quad (3)$$

式中“ \cdot ”表示对时间进行平均, Δt 为时移.

3. 结果及讨论

利用四阶龙格-库塔法对速率方程 (1) (2) 进行数值求解, 可得到 SL 输出的场振幅随时间的变化, 从而可对其功率谱以及自相关特性进行研究. 在数值计算中, 各参数取值如下^[14]: $\alpha = 3$, $g_n = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $n_{th} = 2.02 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau_{in} = 8.0 \text{ ps}$, $\tau_c = 2.04 \text{ ns}$, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $d = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$, $J = 1.3 J_{th}$ ($J_{th} = edn_{th}/\tau_c$ 为电流密度阈值), $f = 384 \text{ THz}$, $\tau_p = 1.93 \text{ ps}$.

3.1. 光反馈系数和延迟时间对 SL 输出自相关特性的影响

在光注入一定的情况下, 即 $\Delta f = -4 \text{ GHz}$, $k_{inj} = 0.143$ 时, 光反馈系数和延迟时间将对 SL 输出自相关特性产生影响.

图 1 给出了 $\Delta f = -4 \text{ GHz}$, $k_{inj} = 0.143$ SL 输出场振幅平方 $|E|^2$ 的极值随光反馈系数 k_f 变化的分岔图. 从图 1 可以看出, 在其他参数给定的情况下, 随着 k_f 的增加, SL 输出经过稳态、周期、准周期到混沌态. 根据我们的模拟结果, 当 k_f 在 0.1—0.6 之间变化时, 输出均为混沌态. 下面将着重讨论 k_f 在这一变化范围内输出混沌时间序列的自相关特性.

图 2 给出了 SL 输出混沌信号的 FWHM 和 PSL 随光反馈系数 k_f 的变化, 其中 PSL 是以 dB 为单位的自相关函数主峰与次峰之比. 从图 2 可以看出, 随着反馈系数的增加, 自相关函数曲线的 FWHM 总体呈现下降趋势, 在下降过程中伴随一些小的波动, 而自相关函数曲线的 PSL 随着反馈系数的增加, 总体呈现先减小后增大, 达到一极大值后再下降的趋势, 在变化过程中也存在一些起伏. 因此, 虽然提高反馈

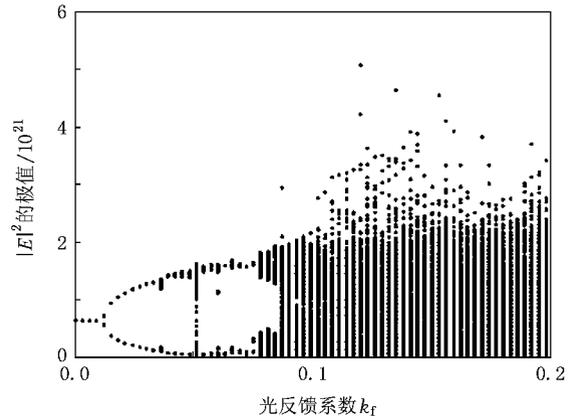


图 1 SL 输出场振幅平方 $|E|^2$ 的极值随光反馈系数 k_f 变化的分岔图

系数有利于提高自相关函数的尖锐程度, 但反馈系数过大会导致 PSL 下降, 从而增大混沌雷达的误判率. 在实际的应用过程中, 应根据需要合理选择反馈系数.

图 3 给出了 FWHM 和 PSL 随外腔反馈时间的变化曲线. 计算表明, 对于 $\Delta f = -4 \text{ GHz}$, $k_{inj} = 0.143$, 当 τ_d 处于 1—10 ns, SL 输出为混沌态. 此时, FWHM 和 PSL 随着 τ_d 的增加都呈现很明显的振荡特性. 因此, 可以通过选取反馈时间, 使 FWHM 处于波谷而 PSL 位于波峰, 以提高混沌雷达探测的性能.

3.2. 光注入强度和频率失谐对 SL 输出自相关特性的影响

在光反馈一定, 即 $k_f = 0.188$, $\tau_d = 6.1 \text{ ns}$ 时, 光注入强度和频率失谐也会对 SL 输出的自相关特性产生影响.

图 4 给出了 $k_f = 0.188$, $\tau_d = 6.1 \text{ ns}$ 时, 激光器输出混沌信号的场振幅平方 $|E|^2$ 的极值随注入系数 k_{inj} 变化的分岔图. 从图 4 可以看出, 当 k_{inj} 值相对

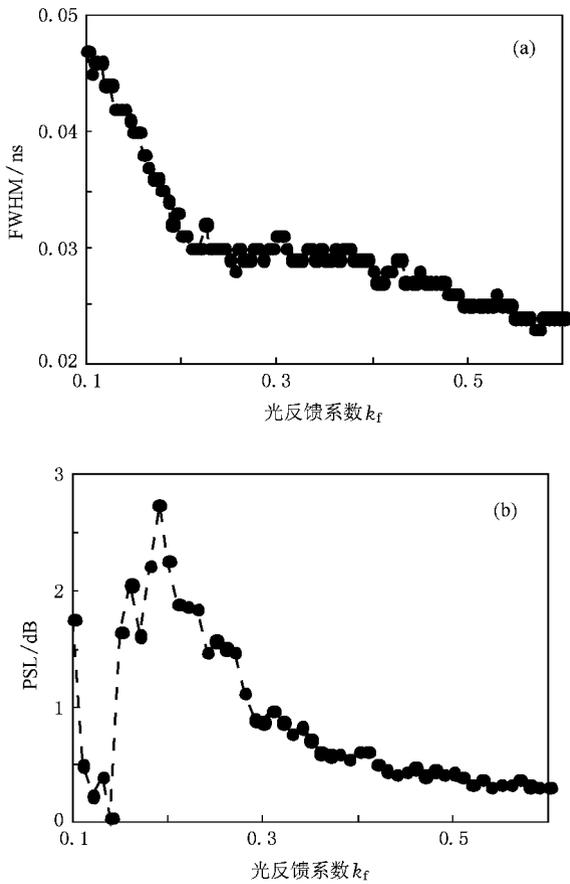


图2 SL混沌信号的 FWHM 和 PSL 随光反馈系数 k_f 的变化
(a) FWHM, (b) PSL

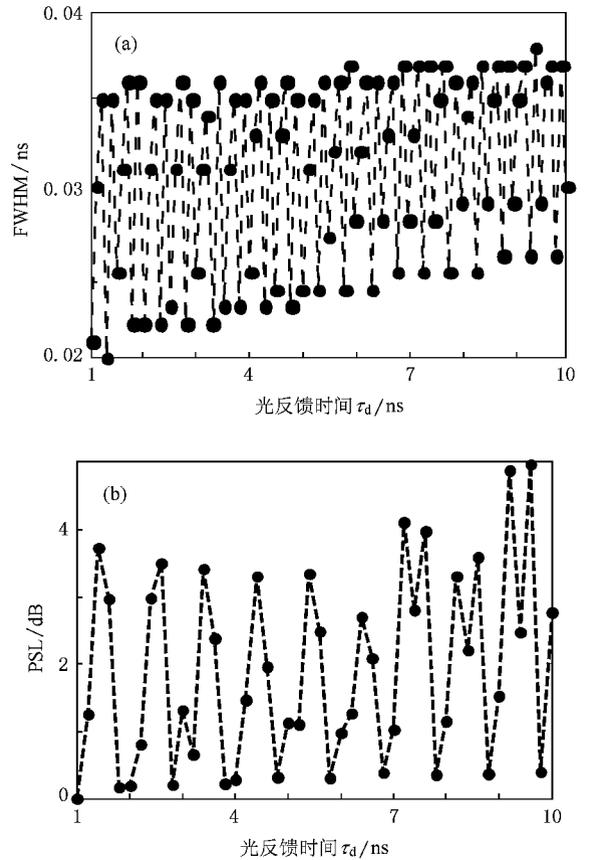


图3 SL混沌信号的 FWHM 和 PSL 随反馈时间 τ_d 的变化
(a) FWHM (b) PSL

较小时激光器输出为混沌态,随着 k_{inj} 值逐渐增大到 0.6,激光器输出将从混沌态进入稳定态.图 5 给出了光注入系数 k_{inj} 从 0.1 增大到 0.6,SL 输出混沌信号自相关函数曲线的 FWHM 以及 PSL 随 k_{inj} 的变化关系.通过比较图 2 和图 5 可知, k_{inj} 对 SL 输出混沌信号的自相关特性的影响类似于反馈系数的影响.这是由于光反馈本身可以视为一种特殊的光注入.只是前面讨论的光注入是用连续光注入,而光反馈是将 SL 在 $t - \tau_d$ 时刻的值注入到 t 时刻的 SL 光波场中.因此,图 2 和图 5 中各相应曲线虽然存在一些差异,但变化趋势大体相同.SL 输出场振幅平方 $|E|^2$ 的极值随反馈系数 k_f (图 1)、光注入系数 k_{inj} (图 4) 变化的分岔图之间存在着较大差异.随着反馈系数的增加,SL 从稳态经历周期、准周期进入混沌,而随着注入系数的增加,SL 从混沌态经历准周期而进入稳定的注入锁定态.导致这一现象的原因并非是光注入和光反馈强度的增加,而是这两个图是在不同的初始条件下得到的.图 1 是在固定注入

光参数 ($\Delta f = -4$ GHz, $k_{inj} = 0.143$) 情况下得到的,初始时(无光反馈)激光器的输出为稳定注入锁定态.随着反馈的增加注入锁定被破坏,激光器的输出经历周期和准周期进入混沌态.图 4 则是在固定反馈参量 ($k_f = 0.188$, $\tau_d = 6.1$ ns) 的情况下得到的,初始时(无外光注入)激光器的输出已经是混沌态,外部光注入后,当注入强度较小时激光器的输出仍为混沌态,当注入光强度太强(大于 0.52)时激光器将被注入锁定而呈现稳定态.因而,正是由于 SL 初始状态的不同才导致两分岔图不同.

失谐频率同样作为另一个注入参量也将对 SL 输出混沌信号的自相关特性产生影响.计算表明,在以上给定的参数下, Δf 介于 -10 — 10 GHz 范围内,SL 输出均为混沌态.下面我们将对这一频率失谐范围进行讨论.图 6 给出了失谐频率 Δf 从 -10 GHz 增大到 10 GHz,SL 输出混沌信号自相关函数的 FWHM 和 PSL 随 Δf 的变化关系.从图 6 可以看出,半导体激光器输出混沌信号的 FWHM 在零失谐频率处取得极小值,左右两端变化趋势基本对称,同时在 Δf

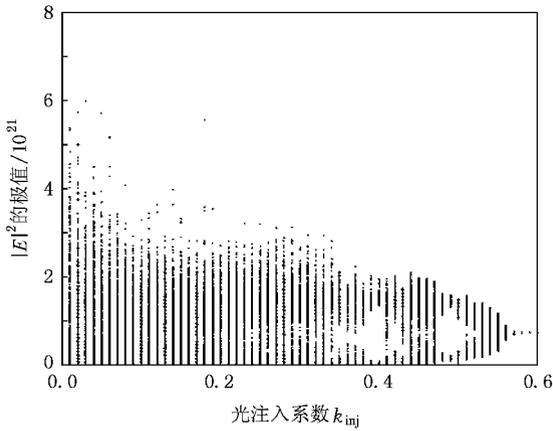


图4 SL输出场振幅平方 $|E|^2$ 的极值随光注入系数 k_{inj} 变化的分岔图

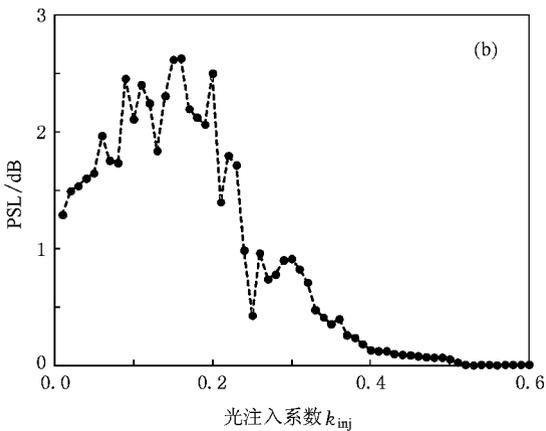
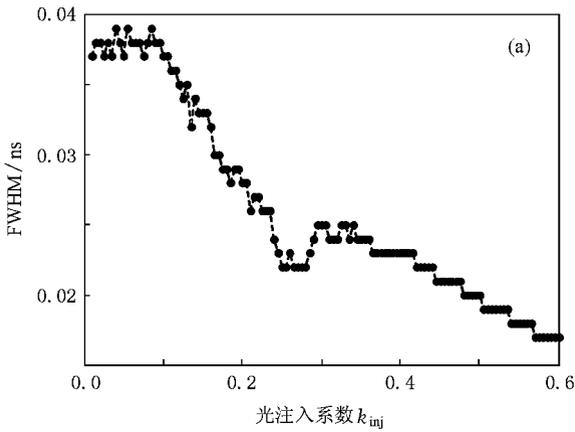


图5 SL混沌信号的FWHM和PSL随光注入系数 k_{inj} 的变化 (a)FWHM, (b)PSL

$= 0$ 时也可得到较大的PSL; 当 $\Delta f = 0.8$ GHz时, PSL取得极大值, 但此时自相关函数的FWHM比 $\Delta f = 0$ 时的FWHM要大一些。

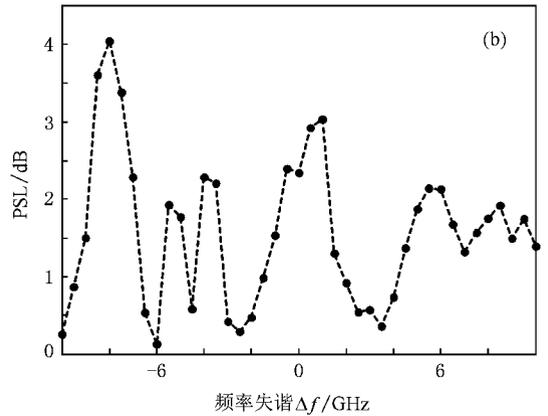
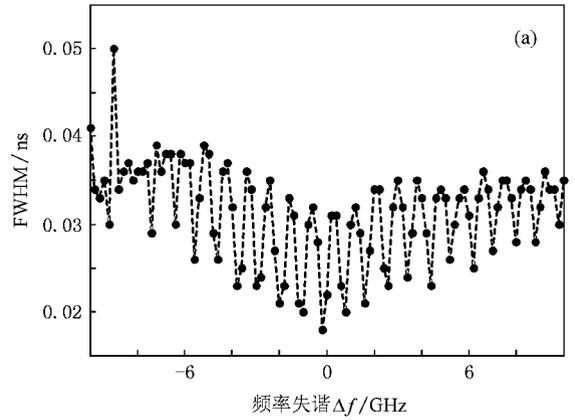


图6 SL混沌信号的FWHM和PSL随失谐频率 Δf 的变化 (a)FWHM (b)PSL

4. 结 论

本文对光注入下光反馈半导体激光器输出混沌信号的自相关特性进行了详细的研究. 研究表明, 光反馈参量(反馈系数和反馈延迟时间)以及光注入参量(注入强度和频率失谐)都将对SL输出混沌信号自相关函数的FWHM和PSL产生影响. 通过合理选取以上参数, 可使SL产生的混沌信号具有良好的自相关特性, 能够为混沌雷达提供优质的发射混沌信号. 利用光注入和光反馈同时作用SL, 可使SL输出混沌信号的自相关函数的FWHM小于0.02 ns, 这比文献8—10中利用光注入或者光电反馈所得到的0.28 ns自相关函数FWHM提高了一个数量级. 当然, 由于采用了外腔反馈, SL输出混沌信号的自相关函数总存在一些旁瓣, 但通过引入一些机制可以减小旁瓣, 这将是我们的下一步的工作。

- [1] Liu G , Gu H , Su W 1997 *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **12** 35
- [2] Sobhy M I , Shehata A R 2000 *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* **3** 1701
- [3] Liu G , Gu H , Su W , Sun H B , Zhang J H 2003 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **39** 489
- [4] Stephan R , Loele H 2000 *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* **3** 1555
- [5] Shen Y , Liu G 1999 *Proc. SPIE* **3702** 144
- [6] Flores B C , Solis E A , Thomas F 2002 *Proc. SPIE* **4727** 100
- [7] Shi Z G , Ran L X 2006 *J. Electromagn. Waves Appl.* **20** 1335
- [8] Lin F Y , Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 815
- [9] Lin F Y , Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 682
- [10] Lin F Y , Liu J M 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1732
- [11] Takiguchi Y , Ohayagi K , Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 319
- [12] Liu S F , Xia G Q , Wu J G , Li L F , Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1502 (in Chinese) [刘胜芳、夏光琼、吴加贵、李林福、吴正茂 2008 物理学报 **57** 1502]
- [13] Wu J G , Wu Z M , Lin X D , Zhang Y , Zhong D Z , Xia G Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4169 (in Chinese) [吴加贵、吴正茂、林晓东、张毅、钟东洲、夏光琼 2005 物理学报 **54** 4169]
- [14] Kikuchi N , Liu Y , Ohtsubo J 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 56

The self-correlation performance of semiconductor lasers with optical feedback and optical injection^{*}

Fan Yan Xia Guang-Qiong Wu Zheng-Mao[†]

(School of Physics , Southwest University , Chongqing 400715 , China)

(Received 2 April 2008 ; revised manuscript received 15 August 2008)

Abstract

Based on the rate equations describing the semiconductor lasers with optical feedback and optical injection , the influences of the feedback strength and delay time , injection strength and frequency detuning on the self-correlation performance of the output chaotic signal have been investigated. The results show that the full-width at half-maximum (FWHM) and peak sidelobe level of the output self-correlation function is critically dependent on parameters related to injection and feedback. Through reasonably selecting the parameters , the self-correlation function with 0.02 ns FWHM can be obtained , which is superior to the reported results.

Keywords : semiconductor lasers , optical feedback , optical injection , self-correlation function

PACC : 4255P , 0545

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing , China (Grant No. 2007DB2333) , the Foundation from State Key Laboratory of Millimeter Waves , China and the High Technology Foundation of Southwest University , China.

[†] Corresponding author. E-mail : zmwu@swu.edu.cn