

半导体激光器的噪声特性神经网络仿真*

李九生 鲍振武 金杰

(天津大学电信学院,天津 300072)

摘要 通过求解含朗之万噪声项的速率方程,给出了噪声特性解析表达式,建立了半导体激光器噪声特性神经网络模型.利用该模型对噪声进行了计算机仿真,取得了与数值计算相一致的结果.训练好的神经网络模型具有精度高、速度快等优点.

关键词 半导体激光器;噪声特性;朗之万噪声;人工神经网络

中图分类号 TN23 **文献标识码** A

0 引言

半导体激光器的噪声主要包括强度噪声、频率噪声等.激光器的噪声不仅是决定光通信系统质量及接收机信噪比的重要因数,而且可以根据其噪声大小来评估器件的可靠性及质量.半导体激光器是光纤通信中重要的光源,它的性能的优劣将直接影响到光通信系统的性能.在高速调制时 LD 的噪声直接影响着光通信系统的性能^[1,2].本文利用神经网络对半导体激光器噪声特性进行了建模,通过该模型进行模拟仿真.该模型亦可有效的分析强度噪声特性、频率噪声特性,这为 LD 单片光发射机的设计提供了方便.

1 理论分析

半导体激光器的输出噪声表现为强度、相位和频率的随机波动,即使在恒定电流偏置下,这些波动亦总是存在的.这些噪声源于自发辐射,每个自发辐射光子与受激辐射所建立的相干光场叠加成一个相位随机变化的小的场分量,并以随机方式干扰光场的振幅和相位.由于半导体激光器的自发辐射速率和随机扰动的速率都很高,导致辐射光强度的波动速率亦很高,并使激光器的调制光脉冲输出信噪比(SNR)降低.激光器的带噪声项的速率方程如下^[3-8]

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{J}{dq} - \frac{N}{\tau_s} - \Gamma G_S + f_N(t) \\ \frac{dS}{dt} = \Gamma G_S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \beta \frac{N}{\tau_s} + f_S(t) \\ \frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} \alpha_c (\Gamma G - \frac{1}{\tau_{ph}}) + f_\Phi(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 N 是有源区中载流子浓度, Γ 为光波限制系数, α_c 为线宽扩大系数, S 是光腔中的光子浓度, J 是激发电流密度, τ_s 为载流子的自发辐射寿命, τ_{ph} 为光腔内光子的寿命, β 是进入激光模式的自发发射分量, $f_N(t)$, $f_S(t)$ 和 $f_\Phi(t)$ 分别为朗之万约束噪声源(Langevin noise source).

噪声是由载流子密度、光子密度、光波相位的起伏产生的,分别用 $\delta N, \delta S, \delta \Phi$ 来表示.为了分析噪声特性,采用一阶近似,令 $N(t) = N + \delta N(t), S(t) = S + \delta S(t), \Phi(t) = \Phi + \delta \Phi(t)$. 将其代入式(1), 则有

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \delta N(t) = -\Gamma(G + G_S) \delta S(t) - \\ \quad (\Gamma G_N S + 1/\tau_s) \delta N(t) + f_N(t) \\ \frac{d}{dt} \delta S(t) = -(C_S N/\tau_s S - \Gamma G_S S) \delta S(t) + \\ \quad (\Gamma G_N S + C_S/\tau_s) \delta N(t) + f_S(t) \\ \frac{d}{dt} \delta \Phi(t) = \frac{\alpha_c}{2} \Gamma G \delta N(t) + f_\Phi(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $G_N = [\partial G/\partial N]_0$ 为微分增益, $G_S = [\partial G/\partial S]_0$ 是表示饱和增益系数.

1.1 强度噪声特性

单模激光器的输出光功率是以平均值为中心而起伏的,因为起伏是无规则的,所以强度噪声具有很宽的频谱.作为表示强度噪声和其频谱的量,经常用归一化功率频谱表示相对强度噪声 RIN (Relative Intensity Noise), 得到 RIN 的表达式^[8]

$$RIN(f) = [2K(\tau_{ph} K/\Gamma G_N P)^2 |H(f)|^2 \times \{ (C_S N/\tau_s + \Gamma G_S P/KV_a) (2\pi f)^2 + (C_S N/\tau_s^3) + (\Gamma^2 G_N^2 N/\tau_s V_a + \Gamma G_S/\tau_s^2 V_a) (P/K) + (\Gamma^2 G_N G_S/\tau_s V_a) (P/K)^2 \} + 1]/P \quad (3)$$

式中, V_a 为有源区体积, $|H(f)| = \frac{\pi f_r^2}{\sqrt{\pi^2 (f_r^2 - f^2)^2 + \Gamma_R^2 f^2}}$, C_S 为激光振荡模的光子比率, f_r 是张弛振荡频率, Γ_R 是载流子衰减常数, $P =$

*天津大学2002优博基金(编号:TJU.No.2002-05)与电信工程学院科研基金资助
Tel:022-27402798 Email:jshli@126.com
收稿日期:2003-11-24

$KS, K \equiv \eta V_a / \tau_{ph}, \eta$ 为输出耦合系数, $0 < \eta < 1$. 式中强度噪声主要表现为过剩噪声和量子极限噪声.

1.2 频率噪声特性

载流子的起伏引起的折射率起伏以及自然发射向振荡模的耦合, 从而产生频率起伏. 用信号调制激光的频率或者在测试应用中, 频率的起伏作为噪声叠加在信号上. 频率噪声频谱可以由下式表示^[8]

$$S(f) \approx (C_s N / 2\tau_s S) [\alpha_c^2 |H(f)|^2 + 1] \quad (4)$$

式中, 第一项是伴随着载流子起伏的折射率起伏引起的频率噪声, 第二项为自然发射向振荡模的耦合产生的频率噪声.

1.3 期望的模型

通过分析, 期望建立的激光器噪声特性模型是如下的映射关系

$$L_1 = F_1(d, f, P) \quad (5)$$

$$L_2 = F_2(d, f, P) \quad (6)$$

式中, d 半导体激光器有源层的厚度, f 输出光频率, P 输出光功率. 数值计算表明上述的多输入映射关系是非线性的, 我们采用神经网络模型来逼近这种关系.

2 神经网络建模

本文应用广义回归神经网络 (Generalized Regression Neural Network) 来实现上述强度噪声、频率噪声的映射逼近. GRNN 包含一个输入层, 一个隐层, 一个输出层, 它是一种规则化的径向基函数网络, 其模型结构如图 1. 该网络隐层的神经元个数与输入样本矢量的个数相同, 其输出层是特殊线性层, 可以运用线性的方法调节权值, 计算量较小. 网络可以提供完备的、最优逼近功能, 常用于解决函数逼近问题. 当隐层神经元足够多时, 该网络能够以任意精度逼近一个平滑函数^[9].

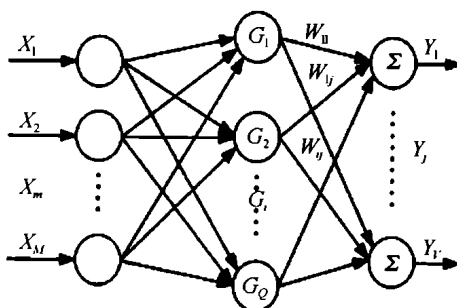


图 1 广义回归神经网络结构
Fig. 1 The structure of GRNN

隐层节点中的作用函数(基函数)对输入信号将在局部产生响应, 也就是说, 当输入信号靠近基函数的中央范围时, 隐层节点将产生较大的输出, 由此看出这种网络具有局部逼近能力. 作为基函数的形

式, 隐层最常用的是高斯函数, 对于第 i 个隐层节点的输出为

$$G_i(x) = \exp(-\|x_m - c_i\| / \sigma_i) \quad (8)$$

式中, x_m 是输入矢量 ($m = 1, 2, \dots, M$); c_i 是第 i 个隐层节点的高斯函数中心; $\|\dots\|$ 是欧式范数; σ_i 是第 i 个隐层节点的变量, 它决定了基函数围绕中心点的宽度.

该 GRNN 网络的第 j 个输出节点的输出可以表示为

$$Y_j = \sum_{i=1}^M W_{ij} G_i(\|x_m - c_i\|) \quad (i=1, 2, \dots, Q) \quad (9)$$

式中, W_{ij} 是第 i 个隐层节点到第 j 个输出层节点的权值, 隐层为非线性映射, 输出层为隐层输出的线性组合.

文中 $M = V = 1, Q = 1000$. 由于 GRNN 网络的隐神经元个数与输入样点的个数相同, 因此可将第 i 个输入样点作为第 i 个隐神经元的中心, 方差 σ_i 和输出层权值矩阵 W_{ij} 只需按照下式更新网络参数即可

$$\sigma(k+1) = \sigma(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial \sigma(k)} \quad (10)$$

$$W(k+1) = W(k) + \eta \frac{\partial E}{\partial W(k)} \quad (11)$$

其中 k 为迭代次数, E 为误差, h 为学习速率且 $0 \leq \eta \leq 1$.

3 仿真结果与讨论

模型输入-输出关系的建立是通过学习样本的训练确立的. 文中所用的参数取值由文献[10]、[11]得到. 网络训练样本的输入参数的范围如表 1, 其中 f 在 0.01 ~ 100 GHz 之间, 以 0.1 GHz 为间隔, 取 1000 个频率数值作为神经网络模型的输入样本; 强度噪声 $RIN(f)$ 和频率噪声 $S(f)$ 作为输出. 理论数值计算得到强度噪声曲线如图 2, 频率噪声如图 3.

表 1 网络训练样本的输入参数

网络输入参数	参数值		
d/nm	10		
p/mW	0.3	1	3
f/GHz	0.01 ~ 100		

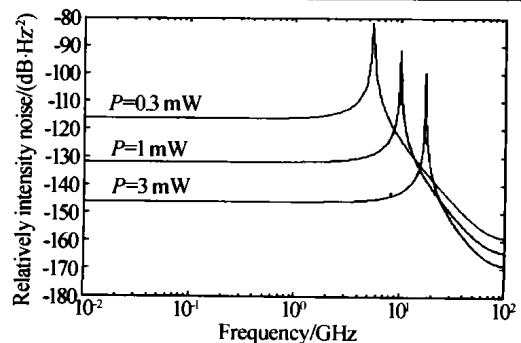


图 2 强度噪声理论曲线

Fig. 2 The theoretical curves of intensity noise

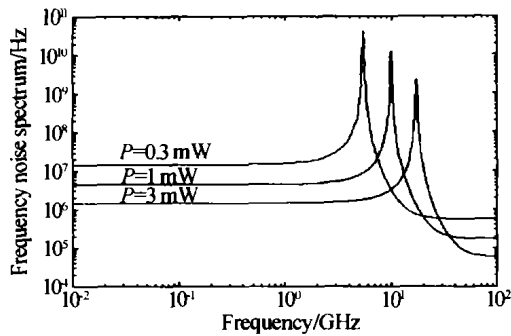


图3 频率噪声理论曲线

Fig. 3 The theoretical curves of frequency noise

训练好神经网络后,选择与训练样本不同的一组数据作为测试样本,对训练好的 GRNN 模型进行测试,得到如图 4,图 5 所示的仿真校验曲线.可以看出,低频区比较平坦,输出功率增大对噪声有压制作用,在张弛振荡频率处噪声出现峰值.图 4,图 5 分别与理论分析计算图 2 和图 3 曲线能够很好的相符,可以看出 GRNN 模型具有和理论分析计算相同的精度.由于测试样本对输入参数的内插性进行了检验,验证了该网络模型具有很好的推广性.

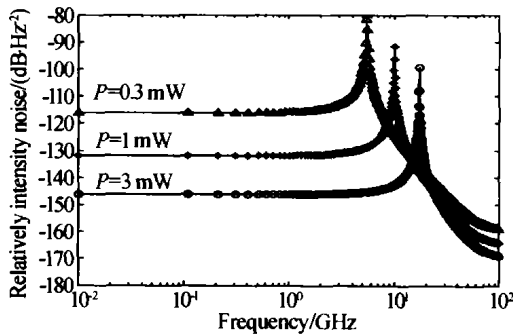


图4 强度噪声仿真校验曲线

Fig. 4 The simulation curves of intensity noise

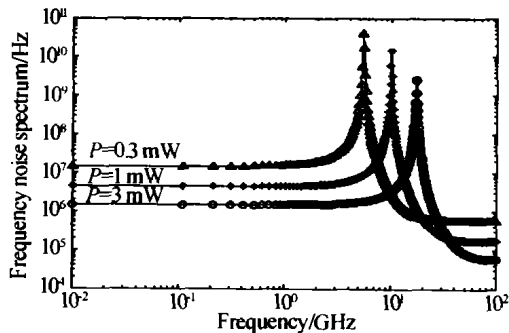


图5 频率噪声仿真校验曲线

Fig. 5 The simulation curves of frequency noise

4 结论

本文对半导体激光器的噪声特性进行了 GRNN 神经网络建模,用此模型对噪声特性进行了深入分析.通过激光器的噪声特性的分析与仿真,模型的

分析结果与已报导的理论和实验一致^[8].而且可以看出该模型具有比数值计算方法快得多的速度、比经验公式精确、模型的构建简单、对研究对象的局限性小等特点.利用该网络可以对半导体激光器进行多种性能的分析,可以确定一些半导体激光器结构参数,对激光器的分析、设计和应用具有重要的参考意义.

参考文献

- 1 Koch T L, Koren U. Semiconductor lasers for coherent optical fiber communications. *IEEE Journal of Light-wave Technology*, 1990, **8**(3): 274 ~ 293
- 2 Cartledge J C, Srinivasan R C. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes. *IEEE Light-wave Technology*, 1997, **15**(5): 852 ~ 860
- 3 Marcuse D. Computer simulation of laser photon fluctuations: theory of single cavity laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, **20**(10): 1139 ~ 1148
- 4 Josephkatz C H, Margalith S, Shacham J, et al. Noise equivalent circuit of a semiconductor laser diode. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, **18**(3): 333 ~ 337
- 5 栖原明敏著,周南生译. 半导体激光器基础. 北京: 科学出版社, 2002
Xi Y M M, translated by Zhou N Sh. Semiconductor laser base. Beijing: Science Press, 2002
- 6 伦秀君,黄永清,任晓敏. DFB 激光器件自脉动的研究. *光子学报*, 2003, **32**(3): 290 ~ 293
Lun X J, Huang Y Q, Ren X M. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 290 ~ 293
- 7 Ma Junshan, Yang Yongcai, Qiang Xifu. Theoretical model on self-mixing interference in a linear frequency modulated laser diode. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5): 553 ~ 556
- 8 杨玲珍,杨慧岩,王云才,等. 外腔光反馈的半导体激光器基本模型的运行模式. *光子学报*, 2000, **29**(12): 1118 ~ 1120
Yang L Z, Yang H Y, Wang Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(12): 1118 ~ 1120
- 9 Wasserman P D. *Advanced Methods in Neural Computing*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993
- 10 Lu M F, Deng J S, Juang C, et al. Equivalent circuit model quantum-well lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, **31**(8): 1418 ~ 1422
- 11 Tartwijk G H M V, Waardt H D, Verbeek B H, et al. Resonant optical amplification in a laser diode: theory and experiment. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, **31**(8): 1763 ~ 1768

Neural Network Model for the Noise Characteristics of Semiconductor Laser

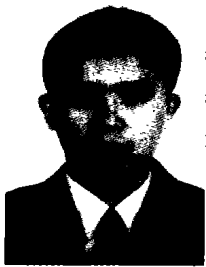
Li Jiusheng, Bao Zhenwu, Jin Jie

College of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date:2003-11-24

Abstract Through the solution of rate equation with Langevin noise of semiconductor laser, the noise characteristics of semiconductor laser are given. Its artificial neural network (ANN) model is developed. The theoretical calculation is used to provide training and testing samples for the ANN. We find that the results of simulation are well agreed with numerical calculation results. The model has the advantages of accuracy and high efficiency.

Keywords Semiconductor laser; Noise characteristics; Langevin noise; ANN



Li Jiusheng was born in 1976. He received his B. S. degree and M. S. degree in material science from Tianjin University, Tianjin, China, in 1997 and 2001 respectively. Currently, he studies for Ph. D. degree in electronic information engineering in 2001 at Tianjin University. His research interests include photonic device, optical access networks, optics communications.