

注入锁定对激光锁相环性能的影响

李林林

(郑州大学电子系, 郑州)

摘要: 本文研究了注入锁定对半导体激光锁相环性能的影响, 给出了注入锁定半导体激光器作为激光锁相环本振的相位传递函数及激光锁相环的噪声特性。

Effects of injection locking on the performance
of optical phase-locked loop

Li Linlin

(Department of Electronics, Zhengzhou University)

Abstract: The effects of injection locking on the performance of an optical phase-locked loop are presented. The phase transfer function and the noise properties of an optical phase-locked loop using injection-locked semiconductor laser as local oscillator are discussed.

一、前 言

相干光通信系统以其接收机灵敏度高、选择性好及可采用波分复用等优点引起了人们广泛的关注^[1]。相干PSK系统则具有灵敏度最高的特点。因此, 光PSK信号解调的研究就具有十分重要的意义。

半导体激光锁相环可以解调光PSK信号, 且具有体积小、构造简单等优点^[2,3]。然而, 普通单腔半导体激光器的噪声性能较差, 很难满足作为激光锁相环本振的要求^[1~3]。

注入锁定可以抑制半导体激光器的相位噪声(尤其是线宽)^[4,5], 改善其调制特性^[6]。本文则指出: 使用注入锁定技术也可以改善激光锁相环的噪声特性, 从而满足相干PSK系统的需要。

二、注入锁定半导体激光器的相位传递函数

描述注入锁定对半导体激光器动力学特性影响的速率方程为^[7]:

$$\dot{E}_0 = G_N \Delta N E_0 / 2 + f_0 E_1 \cos \Delta + F \quad (1)$$

$$\dot{\varphi}_0 = \alpha G_N \Delta N / 2 + f_d E_1 \sin \Delta / E_0 + F_\varphi \quad (2)$$

$$\dot{N} = I/e - N/\tau_s - G_N(N - N_0)E_0^2 + F_N \quad (3)$$

式中, G_N 和 N_0 是表示激光器材料特性的参数; f_d 为激光器纵模间隔; α 为线型展宽因子; E_1 为注入光场; I 为激光器注入电流; e 为电子电荷; τ_s 为自发辐射寿命; $E_0(t)$ 为激光器的电场; $\varphi_0(t)$ 为其相位; $N(t)$ 为载流子密度; $\Delta N(t) = N(t) - N_{th}$, N_{th} 为阈值载流子密度; $\Delta(t) = \Delta\omega t + \varphi_0(t)$, $\Delta\omega$ 为注入激光器与被注入激光器的角频率差; 为方便计, (1)~(3)式已假设注入光源很稳定; 而 $F_N(t)$ 等为朗之万噪声源。

当激光器用作激光锁相环本振时, 其注入电流有一变化 $\Delta I(t)$

$$I(t) = I_b + \Delta I(t) \quad (4)$$

式中, I_b 为偏置电流。

由于 $\Delta I(t)$ 的存在, $E_0(t)$ 等均含有随时间变化的分量

$$E_0(t) = \bar{E}_0 + \Delta E_0(t) \quad (5)$$

式中, \bar{E}_0 等为(1)~(3)式的稳态解。

将(4)、(5)两式代入到(1)~(3)式中, 即可求得(不考虑噪声的影响):

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{E}_0 \\ \Delta \dot{\varphi}_0 \\ \Delta \dot{N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_N \Delta N / 2 & -Z E_0 \sin \varphi_L & G_N E_0 / 2 \\ Z \sin \varphi_L / E_0 & -Z \cos \varphi_L & \alpha G_N / 2 \\ 2 E_0 (\frac{1}{\tau_p} - 2 Z \cos \varphi_L) & 0 & -\frac{1}{\tau_R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E_0 \\ \Delta \varphi_0 \\ \Delta N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\Delta I}{e} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, 利用了 $Z = f_d E_1 / E_0$, $1/\tau_R = (1/\tau_s) + G_N E_0^2$; τ_p 为光子寿命; φ_L 为稳态锁定相位^[7]。为方便计, 表示稳态解的符号均省略了。

对(6)式进行Laplace变换, 也即令 $L(\varphi_0) = \Phi(s)$ 等, 则可得(6)式的判别式为:

$$D(s) = s^3 + s^2 \left(\frac{1}{\tau_R} + 2Z \cos \varphi_L \right) + s (\omega_R^2 + Z^2 + 2Z \cos \varphi_L / \tau_R) + Z \omega_R^2 (\cos \varphi_L - \alpha \sin \varphi_L) \quad (7)$$

式中, $\omega_R^2 = G_N E_0^2 / \tau_p$ 。

为便于分析, 设 $\omega_R^2 \gg Z^2$, $\omega_R^2 \gg Z / \tau_R$, 这样, 判别式则可近似为:

$$D(s) \approx \omega_R^2 [s + Z (\cos \varphi_L - \alpha \sin \varphi_L)] \quad (8)$$

因此, 由(6)式和(8)式可得复频域的相位为:

$$\Phi(s) = \frac{G_N I(s)}{2e\omega_R^2} \cdot \frac{\alpha s + \Delta\omega_L \sin(\varphi_L + \psi)}{s + \Delta\omega_L \cos(\varphi_L + \psi)} \quad (9)$$

式中, $\Delta\omega_L = Z \sqrt{1 + \alpha^2}$, $\psi = \text{tg}^{-1} \alpha$ 。

故激光锁相环本振的传递函数为:

$$T(s) = \Phi(s)/I(s) = \frac{G_N}{2e\omega_R^2} \cdot \frac{\alpha s + \Delta\omega_L \sin(\varphi_L + \psi)}{s + \Delta\omega_L \cos(\varphi_L + \psi)} = \frac{as + b}{s + d} \quad (10)$$

式中, $a = \frac{G_N \alpha}{2e\omega_R^2}$; $b = \frac{G_N \Delta\omega_L}{2e\omega_R^2} \sin(\varphi_L + \psi)$; $d = \Delta\omega_L \cos(\varphi_L + \psi)$ 。

而无注入锁定时本振的传递函数则为〔8〕:

$$T(s) = K_0 + K_1/s \quad (11)$$

式中, K_0 、 K_1 是与激光器参数有关的常量。

比较(10)、(11)式可知,注入锁定改变了激光锁相环本振的相位传递函数。

图1给出了注入锁定半导体激光器作为本振时的相位传递函数 $|T(s)|$ 。 $\alpha = 4$, $G_N = 5 \times 10^3 s^{-1}$, $f_d = 125 \text{GHz}$, $E_0^2 = 10^5$, $R_0 = E_1/E_0$ 为参数, $R_0 = 0$ 表示普通半导体激光器, $\varphi_L = 14^\circ$ 。由图1可以看到,注入锁定改善了传递函数,且随着注入光功率的增大(R 增大),改善更明显。

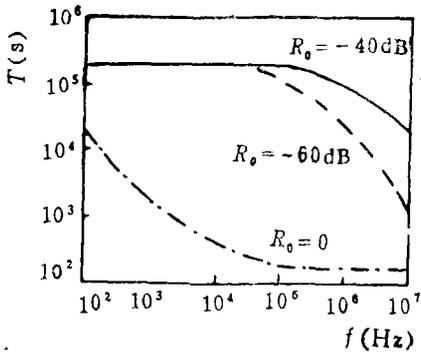


图1 相位传递函数

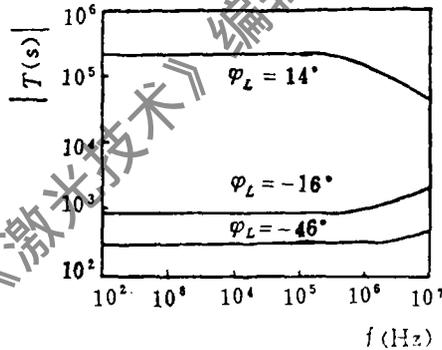


图2 锁定相位的影响

图2表示了锁定相位对相位传递函数的影响。图2中 $R_0 = -40 \text{dB}$ 。从图2可以看到,锁定相位的微小改变将使得传递函数改变甚大。因此,在实际应用中,应通过调整注入光与激光器光的频率差,从而改变锁定相位,获得最佳的相位传递特性。

三、噪声特性分析

激光锁相环的框图如图3所示。 K_D 表示相位检波器的增益; E_n 表示信号光; $F(s)$ 表示环路滤波器。通常令〔2,3〕

$$F(s) = (1 + s\tau_2) / s\tau_1 \quad (12)$$

类似于通常锁相环的分析,可得整个环路的闭环传递函数为:

$$H(s) \approx \frac{As^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (13)$$

式中, ξ 为激光锁相环的阻尼常数; ω_n 为环路自然频率;

$$\omega_n^2 = K_D b / (\tau_1 + K_D a \tau_2) \quad (14)$$

$$2\xi\omega_n = (d\tau_1 + K_{DA} + K_{DB}\tau_2) / (\tau_1 + K_{DA}\tau_2) \quad (15)$$

$$A = K_{DA}\tau_2 / (\tau_1 + K_{DA}\tau_2) \quad (16)$$

激光锁相环的噪声方差可写为^[2,3]:

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & \int_{-\infty}^{\infty} S_{\varphi}(f) |1 - H(j2\pi f)|^2 df \\ & + \int_{-\infty}^{\infty} S_N(f) |H(j2\pi f)|^2 / K_D^2 df \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $S_{\varphi}(f)$ 为相位噪声谱, $S_{\varphi}(f) = \Delta f_{\tau} / 2\pi f^2$; Δf_{τ} 为载波及本振的线宽之和, 本振的线宽在注入锁定时近似等于注入光的窄线宽^[5]; $S_N(f)$ 为相位检波器输出的散粒噪声谱, $S_N(f) = eRP_L$, R 为响应度, P_L 为本振输出光功率。

用围线积分的方法可求得噪声方差为^[2,3]:

$$\sigma^2 = (1-A)^2 \Delta f_{\tau} \pi / 2\xi\omega_n + \omega_n [A^2/\pi + (1-A)^2 (\xi + \frac{1}{4\xi})] / KQ^2 f_B \quad (18)$$

式中, K 是表示载波功率与信号功率的一个参数; f_B 为信号的比特率 (bit/s); $Q=6$ 表示误码率为 10^{-9} 。

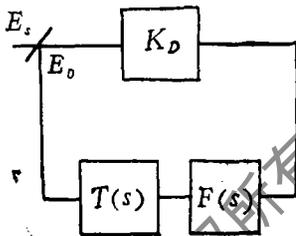


图3 锁相环框图

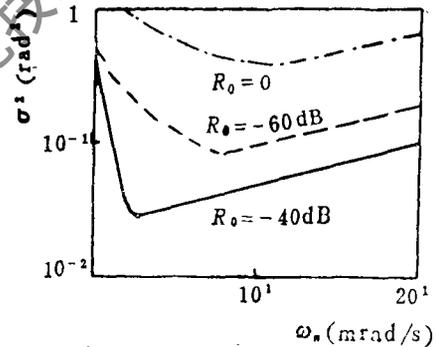


图4 噪声方差

图4给出了 $K=0.1$, $Q=6$, $f_B=1\text{Gbit/s}$, $\xi=1/\sqrt{2}$, $R=0.85\text{W/A}$ 情况下的噪声方差, $\varphi_L=14^\circ$ 。 $R_0=0$ 表示普通半导体激光器作为本振时的情况。图4说明, 注入锁定改善了光锁相环的噪声特性, 但是, 这种改善取决于注入光功率的大小以及锁定相位的大小。

由图4还可以看到, 对每一注入光功率, 都存在一个最佳的环路自然频率使得噪声方差最小。

对(18)式微分, 则可得这个最小噪声方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\min}^2 = & \sqrt{\Delta f_{\tau}} [4\xi(1+B)^2 + (1 + \frac{1}{B})^2] \\ & \cdot (4\xi^2 + 1)\pi]^{1/2} / \xi Q (\sqrt{B} + \frac{1}{\sqrt{B}})^2 \sqrt{2Kf_B} \end{aligned} \quad (19)$$

$$B = K_D a \tau_2 / \tau_1 \quad (20)$$

而最佳环路自然频率则为:

$$\begin{aligned} \omega_{opt} = \pi Q \left(\sqrt{B} + \frac{1}{\sqrt{B}} \right)^2 (2 \Delta f_T K f_B)^{1/2} / [4\xi^2 (1+B^2) \\ + \left(1 + \frac{1}{B} \right)^2 (4\xi^2 + 1) \pi]^{1/2} \end{aligned} \quad (21)$$

显然, 最佳自然频率与最小噪声方差与注入锁定条件(注入光功率、锁定相位)有关。

图5给出了最小噪声方差。横坐标为比特率, 其它参数同图4。显然, 注入锁定改善了最小噪声方差, 这对相干光PSK系统是非常有利的。

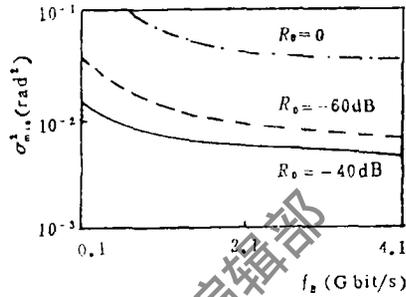


图5 最小噪声方差

四、结 论

本文讨论了注入锁定对光锁相环特性的影响, 分析了本振的相位传递函数, 给出了最佳环路自然频率和最小噪声方差, 从而为相干光锁相接收机的分析与设计提供了理论上的依据。

作者对河南省基础及应用研究所的支持表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. Kimura, J. Lightwave Technol., 1987, Vol. LT-5, No. 4, P. 414.
- [2] T. G. Hodgkinson, Electron. Lett., 1985, Vol. 21, P. 1202.
- [3] T. G. Hodgkinson, J. Lightwave Technol., 1987, Vol. LT-5, P. 573.
- [4] 李林林, 《中国激光》, 1988年, 第15卷, 第2期, 第117页。
- [5] 李林林, 《激光与红外》, 1988年, 第18卷, 第10期, 第15页。
- [6] Li Linlin et al., Proceeding of ICCT, Nanjing, 1987, P. 62.
- [7] F. Mogensen et al., IEEE J. Q. E., 1985, Vol. QE-21, P. 784.
- [8] 李林林等, 《全国第四次光通信会议论文集》, 上海, 1989年, 第208页。

收稿日期: 1989年11月27日。

· 简 讯 ·

光学信息处理学术交流会在成都召开

1990年8月中国光学学会全息与光信息处理专委会将在成都举办光学信息处理学术交流会, 专题讨论光学信息处理在国民经济中的作用与地位。

(摘自学会活动计划)