

# 延迟线解调光 PSK 信号时的量子噪声谱\*

李林林

(郑州大学电子系, 450052)

**提要** 本文分析了延迟线法解调光 PSK 信号时的量子噪声谱, 讨论了检测条件、信号传输速率等对量子噪声的影响。

**关键词** 量子噪声, 半导体激光器, 光 PSK 信号解调, 延迟线法

## Quantum noise spectrum in demodulating optical PSK signal by delay line

*Li Linlin*

(Department of Electronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

**Abstract** The quantum noise spectrum in demodulating optical PSK signal by delay line is presented. The effects of bit rate and detection condition on the quantum noise are discussed.

**Key words** quantum noise, semiconductor laser, demodulating optical PSK signal, delay line

## 1 引 言

相干光通信系统对作为发射机振荡器与接收机本地振荡器(LO)的半导体激光器(LD)的噪声特性要求十分严格, 因此, 人们采取了许多措施来抑制 LD 的量子噪声<sup>[1-3]</sup>。

另一方面, 在相干光接收机设计时, 人们仅考虑了 LD 的线宽的影响<sup>[4]</sup>, 而忽略了 LD 的量子噪声谱并非平坦的特性, 尤其是采用光反馈抑制 LD 噪声时更为如此<sup>[3,5]</sup>。由于量子噪声方差为噪声功率谱的积分, 所以, 在接收机设计时, 必须按照噪声功率谱而非线宽的形式来进行<sup>[6]</sup>。

本文由描述 LD 的速率方程组出发, 分析了采用延迟线法检测 PSK 光信号时的量子噪声谱, 给出了解析表达式, 并进行了数值分析, 讨论了信号传输速率、本振光功率、检测相位等对噪声谱的影响。

收稿日期: 1990年12月3日; 收到修改稿日期: 1991年8月22日。

\*本课题由国家青年科学基金资助。

## 2 延迟线检测中的量子噪声谱

由描述 LD 动态特性的广义速率方程组,可得 LD 的量子强度噪声谱与量子相位噪声谱为

$$S_n(\omega) = [2D_{nn}(\omega^2 + \Gamma_N^2) + 2D_{NN}(G_N n_0)^2 + 4D_{nN}\Gamma_N G_N n_0] / |D(\omega)|^2 \quad (1)$$

$$S_\varphi(\omega) = \left(\frac{\alpha}{2}G_N\right)^2 [2D_{nn}G_0^2 + 2D_{NN}(\omega^2 + \Gamma_n^2) - 4D_{nN}G_0\Gamma_n] / |D(\omega)|^2 \omega^2 + 2D_{\varphi\varphi}/\omega^2 \quad (2)$$

$$D(\omega) = G_0 G_N n_0 + \Gamma_n \Gamma_N + j\omega(\Gamma_n + \Gamma_N) \quad (3)$$

式中,  $2D_{nn}$  等为稳态扩散系数,  $n_0$  为 LD 稳态光子数,  $G_N = \partial G / \partial N$ ,  $G$  为光增益,  $N$  为 LD 有源区载流子数,  $n$  为 LD 腔中光子数,  $G_n = \partial G / \partial n$ ,  $\alpha$  为线型展宽因子,  $G_0$  为稳态增益, 而

$$\Gamma_n = R_s/n_0 + G_n n_0 \quad (4)$$

$$\Gamma_N = S_N + G_N n_0 \quad (5)$$

$R_s$  为自发辐射到激射模的速率,  $S$  为载流子复合速率,  $S_N = \partial S / \partial N$ 。

(1)~(5)式的详细推导和各参数的具体含义可参见文献[3,7,8]。

信号光的光子数  $n_1(t)$  和 LO 的光子数  $n_2(t)$ , 均可表示为稳态均值与量子起伏的迭加。由发射机发送的信号光电场  $E_1(t)$  与 LO 光电场  $E_2(t)$  可分别表示为

$$E_1(t) = \sqrt{2P_1(t)}e^{j[\omega_1 t + \varphi_1(t)]} \quad (6)$$

$$E_2(t) = \sqrt{2P_2(t)}e^{j[\omega_2 t + \varphi_2(t)]} \quad (7)$$

$P_1(t)$  和  $P_2(t)$  分别为信号与 LO 光的光功率,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为其振荡频率,  $\varphi_1(t)$  与  $\varphi_2(t)$  分别为其相位。

若信号光与 LO 光偏振方向匹配, 则两束光在光电检波器(PD)表面混频后, 由于 PD 的平方律特性, PD 输出的电流则为<sup>[9]</sup>

$$I(t) = R\{P_1(t) + P_2(t) + 2\sqrt{P_1(t)P_2(t)}\cos[\Delta\omega t + \Delta\varphi(t)]\} + n_s(t) \quad (8)$$

式中,  $R$  为 PD 的响应度,  $n_s(t)$  为 PD 光电检测过程引入的量子散弹噪声, 而

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \quad (9)$$

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) \quad (10)$$

设中频滤波器具有冲击响应  $h(t)$ , 则  $I(t)$  通过中频滤波器后, 成为

$$I_{IF}(t) = I(t) * h(t) \quad (11)$$

延迟线法解调光 PSK 信号的原理如[10]所述。  $I_{IF}(t)$  被分为两束, 一束被延时  $T$  (比特率的倒数) 后与另一束相乘, 即得到基带信号电流<sup>[10]</sup>。该基带电流为

$$I_b(t) = \frac{1}{4}I_{IF}(t)I_{IF}(t - T) \quad (12)$$

通常, 到达光接收机的信号光功率与本振光功率相比可忽略不计, 即  $P_1(t) \ll P_2(t)$ , 因此, 信号光中的光功率起伏对基带电流的变化影响甚小, 故本文不考虑其影响。所以, 对式(12)进行一阶近似, 即令

$$P_2(t) = P_2 + \delta P_2(t), \quad \varphi_2(t) = \varphi_2 + \delta\varphi_2(t),$$

$$\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x, \quad \sin x = x$$

在不考虑直流分量的情况下, 可得基带信号电流中的噪声分量在频域的表达

$$\Delta I_{db}(\omega) \approx M_1 \Delta n_2(\omega) + M_3 j\omega \Delta n_2(\omega) + M_2 j\omega [\Delta\varphi_1(\omega) - \Delta\varphi_2(\omega)]$$

$$+ \frac{1}{4} RCn_2 \Delta n(\omega) (1 - e^{j\omega T}) H(\omega) + \frac{1}{4} N_s(\omega) H(\omega) \quad (13)$$

式中,  $N_s(\omega)$  为  $n_s(t)$  的傅里叶变换, 而

$$M_1 = \frac{1}{2} RCn_1 \cos\Phi \quad (14)$$

$$M_2 = -\frac{1}{2} RCn_1 n_2 T \sin\Phi \quad (15)$$

$$M_3 = -\frac{1}{4} RCn_1 T \cos\Phi \quad (16)$$

$$\Phi = \Delta\omega T + \varphi_1 - \varphi_2 \quad (17)$$

在式(23)的推导中, 利用了 LO 光功率与 LO 腔中光子数的关系

$$P_2(t) = Cn_2(t) \quad (18)$$

$$C = \hbar\omega_2 c \ln(1/\gamma) / 2L \quad (19)$$

$\hbar$  为普朗克常数除以  $2\pi$ ,  $c$  为光速,  $\gamma$  为 LD 镜面反射率,  $L$  为 LD 腔长。并且, 假设  $h(t)$  是理想带通系统, 即对信号频率范围内,  $H(\omega) = 1$ , 在此范围外,  $H(\omega) = 0$ 。

因此, 可得基带信号中的噪声电流功率谱为

$$S_{I_b}(\omega) = \langle |\Delta I_{bb}(\omega)|^2 \rangle \quad (20)$$

$\langle \rangle$  表示求集平均运算。

### 3 讨 论

由式(13)~(20)可以看到, 延迟线法检测光 PSK 信号所得的量子噪声电流功率谱受如下几个因素的影响: 信号光的量子相位噪声、检测相位  $\Phi$ 、信号传输速率  $1/T$ 、本振的偏置(光功率或光子数)以及信号光子数。为了便于讨论, 下面进行一些数值计算。所需参数如下:  $R = 0.85 \text{ mA/mW}$ ,  $\gamma = 0.32$ ,  $L = 200 \mu\text{m}$ , 其激励波长为  $1.3 \mu\text{m}$ , 其它参数同文献[3, 7, 8]。

图 1 给出了检测相位  $\Phi$  对量子电流噪声谱的影响。在图 1 中, 为方便计, 设信号光的线宽为  $10^7 \text{ Hz}$ ,  $n_1 = 10$ ,  $T = 10^{-8} \text{ s}$ ,  $n_2 = 7.5 \times 10^4$ 。由图 1 可见, 噪声谱对  $\Phi$  的影响是敏感的。 $\Phi$  的变化将引起噪声谱的变化很大, 特别是当  $\Phi = 0^\circ$  时噪声谱变得很小。其原因在于当  $\Phi = 0^\circ$  时, 噪声谱已不反映信号光与 LO 光场的相位噪声了。因此, 在实际应用中, 应通过调整稳态相位差  $\varphi_1 - \varphi_2$  (调整发射机或 LO 的偏置) 来获得适当的检测相位  $\Phi$ 。

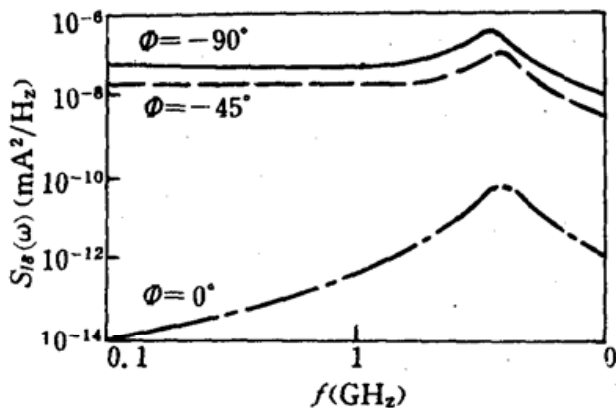


Fig. 1 Effects of detection phase on  $S_{I_b}(10)$

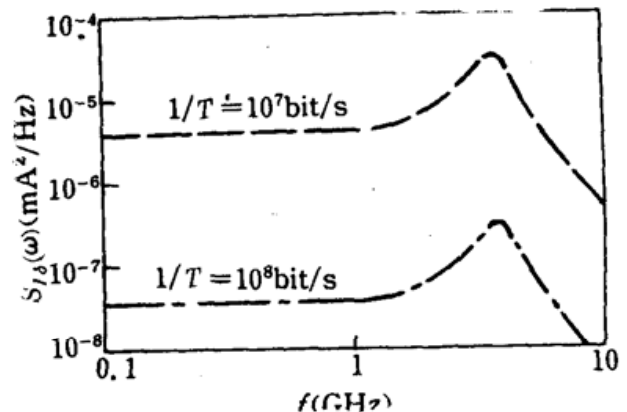


Fig. 2 Effects of bit rate on  $S_{I_b}(10)$

图 2 给出了比特率 ( $1/T$ ) 对量子噪声谱的影响。  $n_1 = 10$ ,  $n_2 = 7.5 \times 10^4$ ,  $\Phi = -90^\circ$ , 信号

光线宽  $\Delta\nu_{1/2s} = 10^7$  Hz。由图中可以看到, 比特率越低, 则检测到的噪声电流谱强度越大, 也即相位噪声方差越大。这与以前的分析是一致的, 它类似于 DPSK 光信号的解调。

图 3 给出了本振光功率(本振偏置)时检测结果的影响。在图 3 中,  $n_1 = 10$ ,  $\phi = -90^\circ$ ,  $T = 10^{-9}$  s,  $\Delta\nu_{1/2s} = 10^7$  Hz。本振光功率的大小对检测结果有两种影响: 首先, 它决定着作为本振的 LO 的量子噪声谱, 本振光功率越大, 量子相位噪声则越低<sup>[5]</sup>; 其次, 它决定着“本振增益”, 本振光功率越大, “本振增益”也越大。这种双重作用使得在低频率一端, 本振光功率越大, 基带电流中的噪声越大, 式(8)~(20)及图 3 均说明了这一点。但是, 本振光功率较大时, 基带电流中的直流分量(PSK 信号分量)也越大, 因此, 应该用信噪比的方式来估价系统的性能, 如同[8]中所做的那样, 这也说明了用量子噪声功率谱之积分表示噪声较用线宽的方式要为优越<sup>[6,7]</sup>。

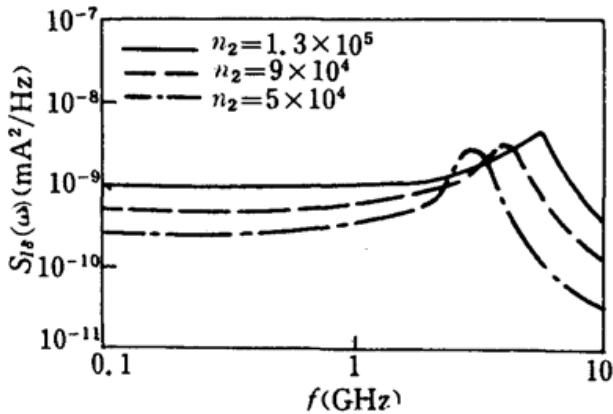


Fig. 3 Effects of optical power in LO on  $S_{ib}(10)$

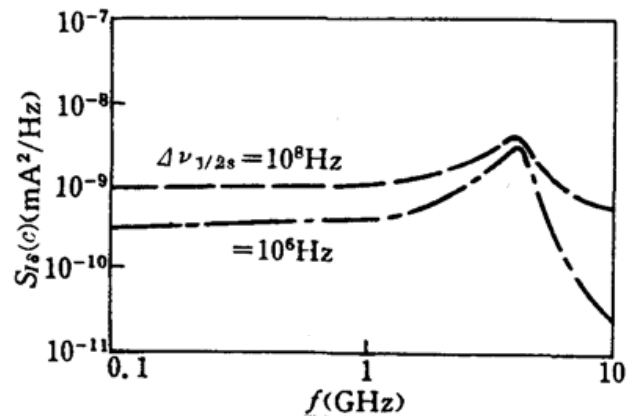


Fig. 4 Effects of the noise in optical signal on  $S_{ib}(10)$

影响到检测结果的另外一个因素是信号光的噪声特性。图 4 给出了这种影响。图 4 中,  $n_1 = 10$ ,  $n_2 = 7.5 \times 10^4$ ,  $\phi = -90^\circ$ ,  $T = 10^{-9}$  s。显然, 当信号光的噪声特性越好时, 量子电流噪声谱的取值也就越小。因此, 采用某种方式抑制光发射机的量子相位噪声是有利的。

同理, 也可讨论信号光功率的影响。

作者对河南省基础及应用科学研究所的支持表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 李林林 *et al.*, 电子学报, **15**(4), 62(1987)
- 2 李林林 *et al.*, 中国激光, **15**(2), 117(1988)
- 3 李林林 *et al.*, 中国激光, **17**(5), 305(1990)
- 4 K. Kikuchi *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, **LT-2**, 1024(1984)
- 5 李林林 *et al.*, 中国激光, **14**(9), 529(1987)
- 6 李林林 *et al.*, 中国激光, **18**(5), 390(1991)
- 7 L. Li *et al.*, Proc. SBOFC, OF1.8 (Beijing, 1990)
- 8 李林林 *et al.*, 中国激光, **15**(10), 631(1988)
- 9 L. Li, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-26**(10), 1774(1990)
- 10 T. Chikama *et al.*, *J. Lightwave Technol.*, **LT-8**, 309(1990)