

# 光纤环形延迟线陷波器中 PIIN 对陷波特性的影响

王 旭 胡 力

(电子科技大学光纤重点实验室 成都 610054)

**提要** 研究了限制 FORDL 最佳陷波特性的主要系统因素——相位感生的强度噪声(PIIN), 给出了其在单模条件下的频率特性。由此出发, 分析了影响 PIIN 的几个因素, 提出了抑制 PIIN 的三个途径: (1) 采用极化控制器适当调节两个正交极化模式的强度 ( $r$ ); (2) 增加环路损耗  $e_L$ ; (3) 使 LD 工作于略高于  $I_{th}$  处, 降低其相干时间  $\tau_c$ 。实验中采用这些方法将 PIIN 降至  $-50$  dB/MHz。通过微调环路损耗以满足最佳陷波条件使 FORDL 的陷波深度达到了 65 dB。

**关键词** 光纤环形延迟线, 陷波滤波器, 相位噪声

## 1 引 言

由于光纤具有低色散、低损耗的优点, 因而光纤作为延迟媒质具有通常的延迟介质(如 SAW, CCD 等)所无法比拟的大时间带宽积 ( $TB$  积)。这就使光纤延迟线(FODL)在未来的雷达、电子对抗以及全光通信等宽带信号处理领域具有重要的应用潜力。其中, 光纤环形延迟线及其构成的阵列结构具有特别重要的意义。

光纤环形延迟线(FORDL)(图 1)是递归结构的 FODL 滤波器的原型, 属于无限冲激响应(IIR)滤波器。利用 FORDL 可以实现诸如高速脉冲序列的产生与相关运算、陷波、带通与全通滤波以及码率变换、射频信息存贮等多种信号处理功能<sup>[1]</sup>。而在 FORDL 作为陷波滤波器时, 其陷波深度则由于受到了系统动态范围的限制而小于 45 dB。因此, 提高 FORDL 系统的动态范围, 特别是降低系统的噪声电平对于提高其陷波深度、实现最佳陷波起着关键作用。

本文就 FORDL 系统噪声的主要来源——相位感生的强度噪声(PIIN)的特性及如何降低噪声电平实现最佳陷波进行了探讨。

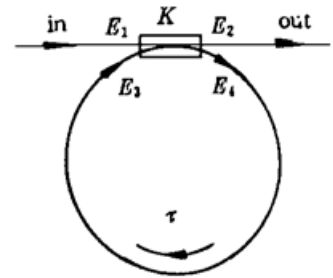


图 1 FORDL 的结构

Fig. 1 The structure of FORDL

## 2 FORDL 陷波器的最佳陷波条件及其实现

FORDL 的冲激响应是无限脉冲序列, 其冲激响应函数为

$$a_0 = e_c K$$

$$a_n = (1 - K)^2 K^{n-1} e_c^{n+1} e_l^n \tag{1}$$

式中  $n$  为正整数,  $a_n$  代表  $n\tau$  时的第  $n$  个冲激响应脉冲的值,  $K$  为定向耦合器的功率耦合系数,  $e_c, e_l$  分别为耦合器和环路的功率透过率。

其传输函数相应为冲激响应的  $Z$  变换

$$H(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^{-n} = \frac{e_c K z - (2K - 1) e_c^2 e_l}{z - K e_c e_l} \tag{2}$$

$H(z)$  分别在  $z_0 = (2K - 1) e_c e_l / K, z_p = K e_c e_l$  处有一阶的零点和极点, 因而是一阶零极系统。

当  $\omega\tau = 0$  有  $|H(\omega)|_{\max} = \frac{e_c K - (2K - 1) e_c^2 e_l}{1 - K e_c e_l} \tag{3}$

$\omega\tau = \pi$  有  $|H(\omega)|_{\min} = \frac{e_c K + (2K - 1) e_c^2 e_l}{1 + K e_c e_l} \tag{4}$

我们定义 FORDL 的陷波深度  $ND$  为

$$ND = -10 \log \frac{|H(\omega)|_{\max}}{|H(\omega)|_{\min}} = -10 \log \frac{[K - (2K - 1) e_c e_l](1 + K e_c e_l)}{[K + (2K - 1) e_c e_l](1 - K e_c e_l)} \tag{5}$$

当  $z_0 = -1$ , 即各参数满足

$$K = e_c e_l / (2e_c e_l + 1) \tag{6}$$

时,  $|H(\omega)|_{\min} = 0$ , 相应的  $ND \sim \infty$ , 此时 FORDL 具有最佳陷波器的滤波特性。因此(6)式即为 FORDL 作为最佳陷波器所满足的参数条件。

但在实际构造的采用熔融型光纤定向耦合器作为分支器件的 FORDL 中,  $K$  和  $e_c$  这两个参数是无法调节的, 而在通常的工艺条件下, 器件的分光比与设计值之间通常有 1~ 2% 的误差。由于 FORDL 的陷波特性和最佳陷波条件附近对于  $K$  的变化非常敏感,  $K$  值与最佳值有 1% 的微小误差将导致  $ND$  迅速降低至 40 dB。因而, 耦合器件的制作工艺首先就限制了 FORDL 最佳陷波特性的实现。为此, 我们提出利用微调环路损耗 ( $e_l$ ) 以满足(6)式条件实现最佳陷波方案<sup>[2]</sup>, 能够较为理想地实现最佳陷波条件, 使系统的  $ND$  仅受到测试系统自身动态范围的限制。

### 3 PIIN 及其对 FORDL 陷波特性的影响

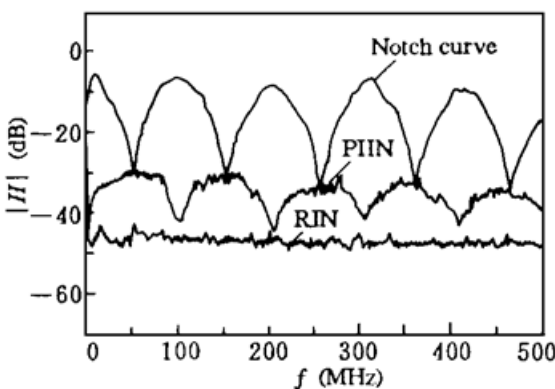


图 2 FORDL 的 PIIN 谱和 RIN

Fig. 2 The PIIN spectra of FORDL and RIN

由于 FORDL 系统是基于光功率叠加的非相干信号处理系统, 因而通常采用具有短相干时间的半导体激光器作为光源<sup>[1]</sup>。而半导体激光器的相位噪声则会在 FORDL 系统的输出功率谱中展现为强度噪声<sup>[3]</sup>。这种由激光器的相位噪声感生的强度噪声(PI-IN)不仅远强于激光器的相对强度噪声(RIN), 而且具有与 FORDL 的陷波特性和最佳陷波条件类似却在陷波频率  $f = 1/2\tau$  (及其谐波频率) 处有极大值的谱结构(如图 2 所示), 因此成为限制系统动态范围从而限制 FORDL 最佳陷波实现的主要噪声源。

通常采用的短相干时间激光器是多纵模 F-P 型

LD, 其每个纵模的输出场强度可写为如下形式

$$E(t) = E_0 \exp[i(\omega t + \Phi(t))] \quad (7)$$

这里由于 LD 的强度噪声与 PIIN 相比可以忽略(见图 2), 因此假设幅度复矢量  $E_0$  是不变的。 $\omega$  是模式的中心频率而  $\Phi(t)$  则代表相位噪声。 $\Phi(t)$  也可以由光源的频率噪声表示为  $\int dt [\omega(t') - \omega_0]$ 。假设频率噪声是具有零均值和平坦谱的平稳高斯过程, 则  $\Phi(t)$  是零均值并且结构函数为

$$D(t_1 - t_2) \equiv \langle [\Phi(t_1) - \Phi(t_2)]^2 \rangle = \frac{|t_1 - t_2|}{\tau_c}$$

的 Wiener-Levy 随机过程。其中  $\tau_c$  是模式的相干时间(对通常的 F-P 型 LD 约为 50~ 100 ps)。

同时, 一个极化无关的光纤定向耦合器输入和输出场量(见图 1) 之间的相互关系为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \delta_0 \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中  $\delta_0$  为幅度传输因子( $e_c = \delta_0^2$ ), 复量  $A, B, C, D$  构成归一化矩阵

$$\begin{aligned} |A|^2 + |B|^2 &= |C|^2 + |D|^2 = 1 \\ CA^* + DB^* &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

在理想的弱导单模光纤中, 存在着  $LP_{01}$  的两个简并正交的线性极化模式。而在实际传输中由于光纤的种种不均匀因素, 这两个模式不再简并, 因而存在着两个具有不同相速度的本征模式  $E_a$  和  $E_b$  (其相速度之差  $v/\Delta v$  大约为  $10^{-6}$  的量级, 在环中的时延分别为  $\tau_a$  和  $\tau_b$ )。由 LD 输入的场强  $E(t)$  则可分解为

$$\begin{aligned} E(t) &= gE_a(t) + hE_b(t) \\ |g|^2 + |h|^2 &= 1 \end{aligned} \quad (10)$$

输出光强则为

$$I(t) = |g|^2 I_a(t) + |h|^2 I_b(t) \quad (11)$$

根据 Wiener-Khinchin 定理, 输出功率谱  $S(f)$  与  $I(t)$  的自相关函数  $Cov_I(t_1, t_2)$  构成傅里叶变换对。在  $\tau/\tau_c \gg 1$  的条件下, 将  $Cov_I(t_1, t_2)$  展开最后可以得到输出的功率谱为<sup>[3]</sup>

$$S(f) = T \cdot S_\delta(f) \cdot \frac{2\tau_c}{1 + (2\pi f \tau_c)^2} \quad (12)$$

其中,

$$T = |g|^4 + 2|g|^2|h|^2[\text{Re } S] + |h|^4 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} S_\delta(f) &= 2 \left[ \frac{|ACD|^2}{|B|^2} \cdot \frac{\delta_0^4 U}{1-U} + \frac{|AD|^4}{|B|^4} \cdot \frac{\delta_0^4 U^3}{(1-U)(1-U^2)} + \right. \\ & 2 \frac{|AD|^4}{|B|^4} \cdot \frac{\delta_0^4 U^4 \exp[-2\pi i f \tau]}{(1-U)(1-U^2)(1-U \exp[-2\pi i f \tau])} - \\ & \left. 2 \frac{|AD|^3 |C|}{|B|^3} \cdot \frac{\delta_0^4 U^4 \exp[-2\pi i f \tau]}{(1-U)(1-U \exp[-2\pi i f \tau])} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

$$U = \delta_0^2 \exp[-2\alpha_0 L] |B|^2 \quad (15)$$

$\alpha_0$  为光纤损耗因子,  $L$  为传输距离,  $e_L = \exp[-2\alpha_0 L]$

$$S = q^{-1} \frac{1-U}{1-Uq^{-1}} \quad (\text{其中 } q = \exp\{i[\omega(\tau_a - \tau_b)]\}) \quad (16)$$

在功率谱  $S(f)$  中,  $T$  反映了不同极化态的影响,  $(2\tau_c)/[1 + (2\pi f \tau_c)^2]$  则反映了与 LD 的相干性的关系, 而  $S_\delta(f)$  则是与 FORDL 结构相关决定 PIIN 谱结构的项。容易推出, 当  $f \tau = (2n + 1)/2 (n = 0, 1, 2, \dots)$  时,  $S_\delta(f)$  有极大值  $S_\delta(f)|_P$ ; 而当  $f \tau = n$  时,  $S_\delta(f)$  有极小值  $S_\delta(f)|_N$ :

$$S_\delta(f)|_P = [2(1 - |B|^2)^2 \delta_0^4] \frac{U[1 + U|B|^2]^2}{[1 + U][1 + U]^2} \tag{17}$$

$$S_\delta(f)|_N = [2(1 - |B|^2)^2 \delta_0^4] \frac{U[1 + U|B|^2]^2}{[1 - U]^3} \tag{18}$$

可见  $S_\delta(f)$  具有图 2 所示的谱结构。相应地在  $f \tau = (2n + 1)/2$  处  $S(f)$  有极大值, 决定了 FORDL 动态范围的下限, 因而限制了 FORDL 的陷波深度。所以, 抑制 PIIN, 尤其是降低陷波频率  $f = (2n + 1)/2\tau$  处的  $S(f)|_P$ , 是增大系统动态范围、提高  $ND$  的一个主要因素。

### 4 抑制 PIIN 的几个途径

抑制 PIIN, 关键是降低陷波频率  $f = (2n + 1)/2\tau$  处的  $S(f)|_P$ 。由(12) 式可得

$$S(f)|_P = T \cdot S_\delta(f)|_P \cdot H \quad \left[ H = \frac{2\tau_c}{1 + (2\pi f \tau_c)^2} \right] \tag{19}$$

其中  $T$  是由(13) 式决定的双折射因子。若定义两个正交极化模式的强度之比为

$$r = |h|^2 / |g|^2 \tag{20}$$

则

$$T = \frac{1}{(1 + r)^2} \frac{1 + r^2 + 2r[1 + U]\{\cos[\omega_0(\tau_a - \tau_b)] - U\}}{1 - 2U\cos[\omega_0(\tau_a - \tau_b)] + U^2} \tag{21}$$

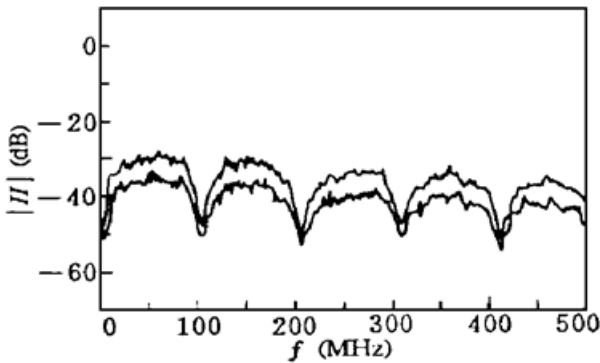


图 3 适当调节 FORDL 中的极化态, 使 PIIN 降低 6 dB 以上

Fig. 3 Properly adjusting the polarization state of FORDL, the PIIN can be reduced over 6 dB

采用极化控制器适当调节两个正交极化模式的强度 ( $r$ ), 可以将  $T$  降低 6 dB 以上(见图 3)。

同时, 由  $\partial(S_\delta(f)|_P) / \partial(|B|^2) = 0$  可得, 当

$$K = \frac{3 + e_{cEL} - \sqrt{(9 + 2e_{cEL} - 7e_{cEL}^2)}}{2e_{cEL}(2e_{cEL} + 1)} \tag{22}$$

( $K = |B|^2, e_c = \delta_0^2, e_L = \exp[-2\alpha_0 L]$ )

时,  $S_\delta(f)|_P$  具有最大值。在无损耗情形下 ( $\delta_0^2 = 1, \alpha_0 = 0$ ), 由此可得  $K = 1/3$ 。而由(6) 式可知此时 FORDL 具有最佳陷波特性的条件, 显然将有助于  $ND$  的提高。由(6) 式和(22)

式可知, 当  $e_{cEL} < 1$  时, 两式决定的条件将大不相同。随着  $e_{cEL}$  的减小, 满足(6) 式的  $K$  值也相应减小, 而由(22) 式所决定的  $K$  值则仅在 0.317 至 1/3 之间作微小的变化。因此, 增加环路损耗  $e_L$  也可以起到抑制 PIIN 的作用, 这一点在实验中得到了验证。特别是在环路损耗大于 3 dB 以后,  $S_\delta(f)|_P$  将迅速降低至 RIN 的水平。

在(19) 式中的  $H$  是与 LD 的相干性有关的因子。由于在  $\tau/\tau_c \gg 1$  的条件下,  $\partial H / \partial \tau_c > 0$ , 因此  $H$  随  $\tau_c$  的增加而增加。所以抑制 PIIN 的另一途径则是增加 LD 的光谱宽度, 降低其相干时间  $\tau_c$ 。实验证明[图 4(a)],  $S_\delta(f)|_P$  随 LD 偏置电流  $I (> I_{th})$  的升高而增加, 在  $I \sim I_{th}$  具有最小

值- 50 dB/MHz。这是由于 F-P 型 LD 的单模谱宽与  $I$  之间具有近似的反比关系<sup>[4]</sup>, 因而  $S|_p$  与  $I$  之间也具有近似的线性关系[图 4(b)]。因此, 通常应使 LD 工作于略高于  $I_{th}$  处以使 PIIN 的影响降至最低。

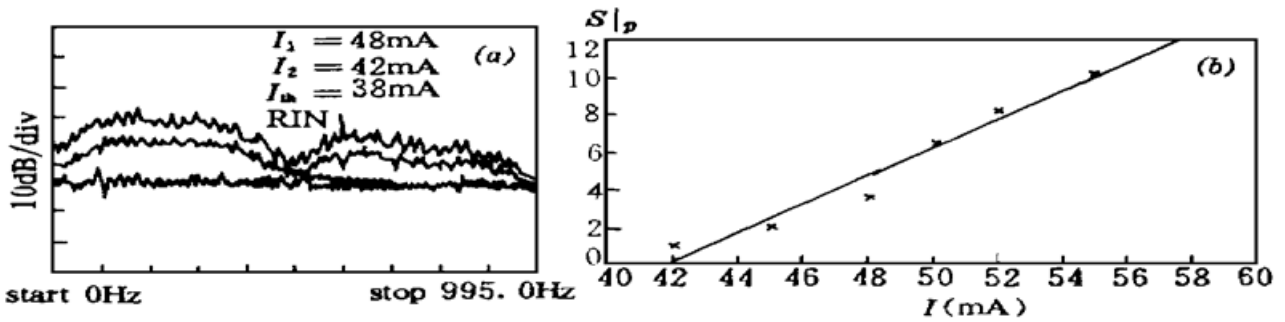


图 4 (a) FORDL 的 PIIN 谱随 LD 偏置电流而变; (b)  $S|_p$  的实验数据与  $I$  成近似线性关系  
 Fig. 4 (a) The PIIN spectra of FORDL under various LD bias currents;  
 (b) The experimental data of  $S|_p$  versus  $I$  and the fitted line

实验中我们制作的单模 FORDL 陷波器分光比  $K$  为 30%, 耦合器插损  $e_c$  为 0.2 dB, 环长 20 cm。最佳陷波条件下  $e_L = e_{LM} \approx 0.785$ , 通过环路弯曲调节  $e_L$  以满足最佳陷波条件。在适当调节环路损耗、环路偏振态以及 LD 偏置电流后, 测得器件的陷波特性如图 5, 该器件对频率为 250 MHz 的信号(及其谐波)起陷波作用, 陷波深度 > 65 dB。其中, 实验中测试 FORDL 的  $ND$  大于静态测试时 PIIN 限制, 这是由于 LD 在调制下出现了模式增加和光谱展宽的现象<sup>[5]</sup>, 因而在调制工作下,  $S_\delta(f)|_p$  将会有所降低。

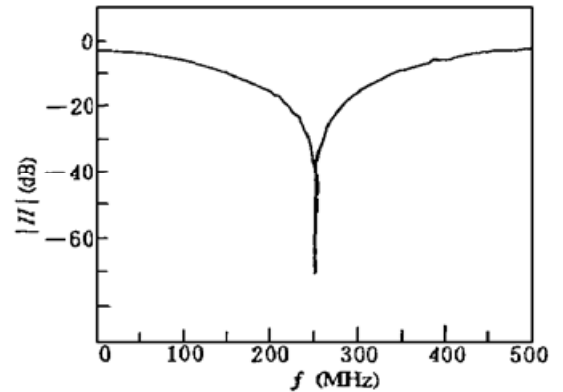


图 5 实际制作的 FORDL 的陷波特性 (1 MHz 分辨带宽)

Fig. 5 The notch filtering character of the actual FORDL (resolution bandwidth 1 MHz)

### 5 结 论

作为 IIR 滤波器, FORDL 具有陷波器的幅频响应特性, 其最佳陷波条件由(6)式给出。限制 FORDL 最佳陷波特性实现的系统因素主要是 PIIN 噪声。它是由光源的相干性导致的, 具有与 FORDL 的陷波特性类似却在陷波频率处有极大值的谱结构。在单模条件下, (12) 式决定了其幅频响应特性。而对于多模 LD, 由于模式间的独立性, 并不影响这里的分析结果。从(12)式出发, 本文讨论了影响 PIIN 的几个因素, 提出了抑制 PIIN 的三个途径: (1) 采用极化控制器适当调节两个正交极化模式的强度 ( $r$ ); (2) 增加环路损耗  $e_L$ ; (3) 使 LD 工作于略高于  $I_{th}$  处, 降低其相干时间  $\tau_c$ 。实验中采用这些方法将 PIIN 降至 - 50 dB/MHz。同时, 在调制下由于 LD 的模式增加及光谱展宽, PIIN 将有所降低, 所以实验中测试 FORDL 的陷波深度大于静态测试时 PIIN 的限制。实验中采用这些措施通过微调环路损耗以满足最佳陷波条件使 FORDL 的  $ND$  达到了 65 dB。

### 参 考 文 献

1 K. P. Jacksonetal, S. A. Newton, B. Moslehi *et al.*. Optical fiber delay-line signal processing. *IEEE Trans. M. T. T.*, 1985, **33**: 193~ 209

- 2 王 旭, 胡 力. OFDL 器件中损耗的影响. 系统工程与电子技术, 1992, **14**(12) : 30~ 33
- 3 M. Tur, B. Moslehi, J. W. Goodman. Theory of laser phase noise in recirculating fiber-optic delay lines. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3** : 20~ 30
- 4 美)W. T. Tsang 主编. 半导体注入型激光器(7). 江剑平等译. 北京: 清华大学、电子工业出版社, 1990, p198
- 5 美)W. T. Tsang 主编. 半导体注入型激光器(7). 江剑平等译. 北京: 清华大学、电子工业出版社, 1990, p140

## The Influence of PIIN in the FORDL Notch Filter

Wang Xu Hu Li

(National Key Lab. of Broadband Optical-fiber Transmissing and Communication Networks,  
UEST of China, Chengdu 610054)

**Abstract** The phase induced intensity noise (PIIN) of FORDL notch filter was analyzed and three ways of restraining PIIN were put forward. In the experement the PIIN was reduced to - 50 dB/MHz, and the notch depth reached the level of 65 dB.

**Key words** fiber-optic recirculating delay line, notch filter, phase noise