

AM-CATV 光纤传输系统中 EDFA 非线性失真的补偿

韩煜国 顾婉仪 徐大雄

(北京邮电大学电信科学院 北京 100088)

提要 分析计算了掺铒光纤放大器(EDFA)在 AM-CATV 光纤传输系统中引入的非线性失真,在总结了两种补偿方法的同时,提出了一种新的补偿方法——光补偿,计算机模拟和实验结果表明,它对 EDFA 的非线性失真有一定的改善。最后对这三种补偿方法进行了简单的比较。

关键词 有线电视,掺铒光纤放大器,谐波失真,光补偿

AM-CATV 光纤传输系统以其独特的优势而被广泛应用,尤其是随着宽带接入网的发展,使得 AM-CATV 传输系统占有更重要的地位。但 AM-CATV 系统对激光器的线性度要求很高,为了保证系统的非线性指标,系统的光调制度受到很大限制。另外,系统的载噪比要求很高,使整个系统的功率预算很低,从而使系统在用户分配网中的应用受到限制。为了解决这一难题,人们在 AM-CATV 光纤传输系统中引入了光放大器,以提高系统的功率预算。1988 年, Bellcore 首次把掺铒光纤放大器(EDFA)引入 AM-CATV 系统中,使整个系统的功率预算提高了 15 dB^[1]。光放大器虽然提高了系统的功率预算,但也给系统引入了噪声和非线性失真。本文首先分析 EDFA 产生非线性失真的机理,给出计算公式,然后介绍三种补偿失真的方法:自补偿、电补偿和光补偿。光补偿是本文提出的一种新的补偿方法。计算机模拟和实验结果表明,它对 EDFA 的谐波失真有一定的改善。

1 理论分析

EDFA 在 AM-CATV 传输系统中产生非线性失真的原因是,当对分布反馈(DFB)激光器进行直接强度调制时,会产生频率啁啾,带有啁啾的光信号通过 EDFA 时,由于 EDFA 的增益不平坦,使输出信号叠加了非线性失真的成分。啁啾的产生相当于对光信号进行调频,EDFA 的增益谱不平坦相当于对光信号进行调幅,因而,EDFA 产生非线性失真的过程相当于一个 FM-AM 变换。

EDFA 的输入光功率为

$$P_{in}(t) = K(I_b + I_m \sin \omega t) \quad (1)$$

这里 K 是激光器 $P-I$ 曲线的斜率, I_m 是调制电流, $I_b = I_{bias} - I_{th}$, I_{bias} 是激光器的偏置电流, I_{th}

是激光器的阈值电流, ω 是调制信号的角频率。激光器经过调制后, 产生的波长偏移为

$$\Delta\lambda(t) = S \cdot I_m \sin\omega t + S_b \cdot I_b \quad (2)$$

这里 S 是调制电流引起的波长偏移, S_b 是直流偏置引起的波长偏移。通常激光器的啁啾效应是用频率偏移来表征的, 假定频率偏移为 $\Delta\nu$, 那么 $\Delta\nu$ 与 $\Delta\lambda$ 的关系为

$$\Delta\lambda \approx -\frac{\lambda^2}{c} \Delta\nu$$

这里 c 是光速, λ 是工作波长。

EDFA 的增益是平均输入光功率和工作波长的函数, 在某一工作波长处, 可以展开成泰勒级数的形式, 表示为

$$G(t) = \bar{G} + G_t \cdot \Delta\lambda(t) \quad (3)$$

这里 \bar{G} 是工作波长处的增益, G_t 是工作波长处增益的斜率。

EDFA 的输出光功率为

$$P_{out}(t) = G(t) \cdot P_{in}(t) \quad (4)$$

把(1)式和(3)式代入(4)式可得

$$\begin{aligned} P_{out}(t) = & [\bar{G} + G_t \cdot \Delta\lambda(t)] \cdot K[I_b + I_m \sin(\omega t)] = \\ & K \left[\left[I_b(\bar{G} + G_t S_b I_b) + \frac{I_m^2}{2} G_t S \right] + I_m [\bar{G} + I_b G_t (S + S_b)] \sin\omega t + \right. \\ & \left. \left[-\frac{1}{2} I_m^2 S \cdot G_t \right] \cos\omega t \right] \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式可以得出 EDFA 的谐波失真为

$$2HD_{EDFA} = -\frac{I_m \cdot S \cdot G_t}{2[\bar{G} + I_b \cdot G_t \cdot (S + S_b)]} \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 当激光器的偏置电流一定时, $2HD_{EDFA}$ 与 EDFA 增益谱的不平坦度、激光器的频率啁啾和调制电流成正比。图 1 是实验中得到的 EDFA 增益谱曲线, 根据这条曲线, 再结合 DFB 激光器的啁啾效应和调制度的大小, 就可以计算出每个工作波长下产生的二次谐波失真。图 2 是计算出的谐波失真和工作波长的关系曲线。实际工作参数为 $I_m = 1 \text{ mA}$, $I_{bias} = 20 \text{ mA}$, $S_b = 6 \text{ GHz/mA}$, $S = 300 \text{ MHz/mA}$ 。

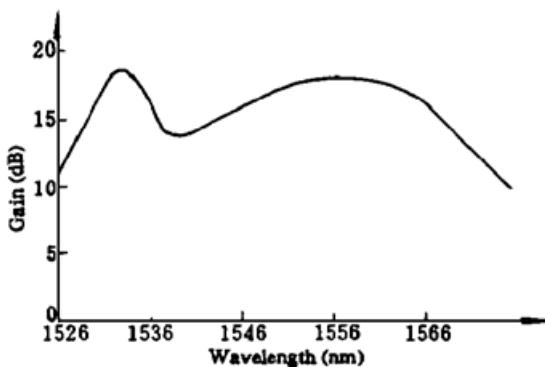


图 1 测量得到的 EDFA 的增益谱

Fig. 1 The measured gain as a function of wavelength of EDFA

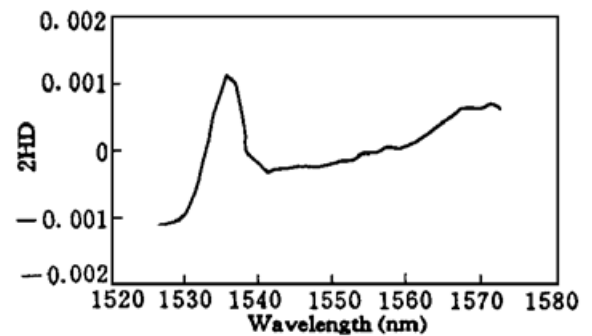


图 2 根据图 1 的 EDFA 增益谱计算出的二次谐波失真与波长的关系

Fig. 2 The calculated second-order harmonic distortions as a function of wavelength using the gain curve of EDFA showed in Fig. 1

2 补偿方法

从图 2 可以看出 EDFA 在某些工作波长处的谐波失真比较严重, 为了对这些非线性失真进行补偿, 人们提出了一些方法, 其中主要有两种: 自补偿和电补偿。本文提出一种新的补偿方法——光补偿, 这种方法是在光路中加入光学器件, 通过改变光学器件的特性参数和系统的工作状态, 达到补偿 EDFA 非线性失真的目的。下面分别介绍这三种补偿方法, 着重介绍光补偿。

2.1 自补偿

由于 DFB 激光器存在固有的非线性^[2], 使 EDFA 的输入信号中就含有失真分量。经过 EDFA 后, 总的失真量会增加, 但也会减少, 这取决于 DFB 激光器和 EDFA 各自产生失真的相位。实验表明^[3], 当 EDFA 的增益斜率为正时, 两失真相加, 当增益的斜率为负时, 两失真相消。因此, 当工作波长处增益的斜率为负时, 整个系统的非线性失真会减少。

2.2 电补偿

由于 EDFA 产生的非线性失真基本上与信号频率无关, 所以可在发射机的调制电路中加入一个预失真网络, 使它产生的非线性失真抵消 EDFA 产生的失真。图 3 是预失真网络的原理框图^[4]。实验表明, 它对 EDFA 的谐波失真有 10~ 15 dB 的改善。

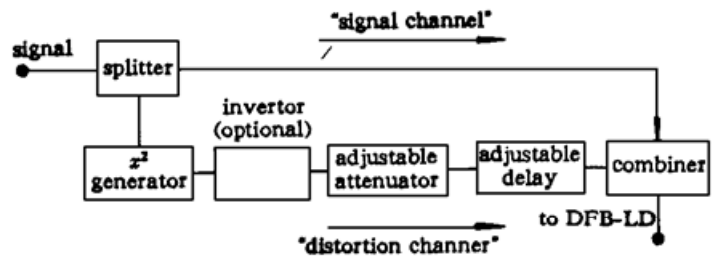


图 3 使用 EDFA 的 AM-CATV 系统中预失真电路的框图

Fig. 3 Block diagram of the predistorter for the AM-CATV system using EDFA

2.3 光补偿

由于 EDFA 产生非线性失真的机理是 FM-AM 变换, 而某些光学器件也具有这样的特性, 如 F-P 标准具, 所以可以在光路中加入这样的光学器件, 使它产生的非线性失真抵消 EDFA 产生的失真, 从而起到补偿的作用。

图 4 是光补偿的原理框图。假定光源是线性很好的 DFB 激光器, 暂时不考虑它产生的谐波失真。DFB 激光器通过一个光隔离器与光纤耦合, 此光隔离器的作用是防止光链路中产生的反射对 DFB 激光器的线性和噪声特性产生危害。EDFA 和 F-P 标准具通过光隔离器相连, 以避免反射造成的影响。

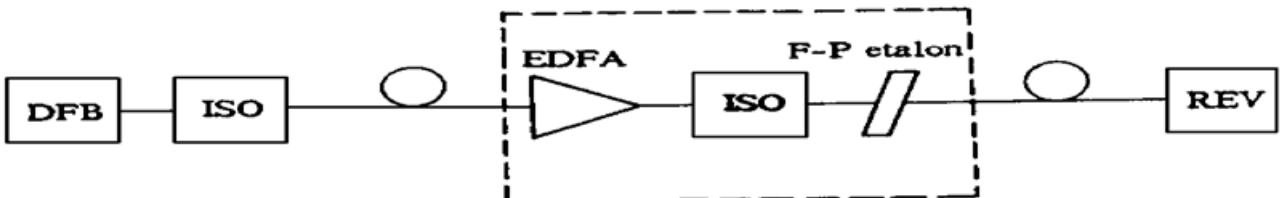


图 4 使用 EDFA 的 AM-CATV 系统中光补偿的原理框图

Fig. 4 Block diagram of optical compensation for the AM-CATV system using EDFA

2.3.1 理论分析

F-P 标准具是一块由玻璃或石英构成的表面互相平行并镀有高反射率多层介质膜的平板, 它相当于一块随波长而变的透射滤波器, 对于一个低精细度的 F-P 标准具, 它的传递函数

为

$$F(t) = 1 + \frac{R}{2} \sin \left[\frac{2\pi \cdot \Delta\lambda(t)}{FSR} + \phi_0 \right] \quad (7)$$

这里 R 是波动值, $\Delta\lambda(t)$ 是波长偏移, FSR 是自由谱宽, ϕ_0 是初始相位。把(2)式代入(7)式可得

$$F(t) = 1 + \frac{R}{2} \sin \left[\frac{2\pi \cdot S \cdot I_m}{FSR} \cdot \sin\omega t + \frac{2\pi \cdot S_b \cdot I_b}{FSR} + \phi_0 \right] \quad (8)$$

F-P 标准具的输出光功率为

$$P(t) = F(t) \cdot [G(t) \cdot P_{in}(t)] \quad (9)$$

把(1), (3)和(8)式代入(9)式, 并利用贝赛尔函数展开式, 最后得到 F-P 标准具输出光功率中的基波项和二次谐波项分别为

$$M_f = B + \frac{R \cdot B}{2} [J_0(z) - J_2(z)] \cdot \sin(\phi) + \frac{R}{2} [(2A - C)J_1(z) + C \cdot J_3(z)] \cdot \cos(\phi)$$

$$M_{2f} = C + \frac{R}{2} [C \cdot J_0(z) + 2A \cdot J_2(z)] \cdot \sin(\phi) - \frac{R \cdot B}{2} [J_3(z) - J_1(z)] \cdot \cos(\phi)$$

这里

$$A = I_b(\bar{G} + G_t S_b I_b) + \frac{I_m^2}{2} G_t S$$

$$B = I_m[\bar{G} + I_b \cdot G_t \cdot (S + S_b)]$$

$$C = -\frac{1}{2} I_m^2 \cdot S \cdot G_t$$

$$z = \frac{2\pi \cdot S \cdot I_m}{FSR}$$

$$\phi = \phi_0 + S_b I_b \cdot \frac{2\pi}{FSR}$$

经过 EDFA 和 F-P 标准具后产生的谐波失真为

$$2HD_{\text{Tot}} = \frac{M_{2f}}{M_f}$$

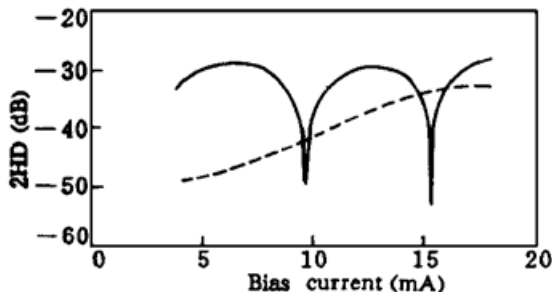


图 5 在 1550 nm 处光补偿的模拟结果
(横轴为已减去阈值电流的偏置电流)

——有标准具; ——无标准具

Fig. 5 The simulated results of optical compensation at 1550 nm, note that the bias current of x -axis is obtained after subtracting the threshold current
——with etalon; ——without etalon

2.3.2 计算机模拟分析

选择的计算参数如下: $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $I_m = 1 \text{ mA}$, $S_b = 6 \text{ GHz/mA}$, $S = 300 \text{ MHz/mA}$, $FSR = 0.6 \text{ nm}$, $R = 20\%$, 模拟结果如图 5 所示。

从模拟结果可以看出, EDFA 的谐波失真随激光器偏置电流的增加而增大, 但在引入 F-P 标准具后, 在激光器的两个偏置电流处, EDFA 的非线性失真有明显的改善。

2.3.3 实验结果

图 6 是光补偿的实验系统框图。F-P 标准具用可调谐 F-P 腔滤波器来模拟, 测量结果如图 7 所示。实验结果基本上能够验证计算机模拟分析的结果, 但它有两个主要的误差来源, 一是实验

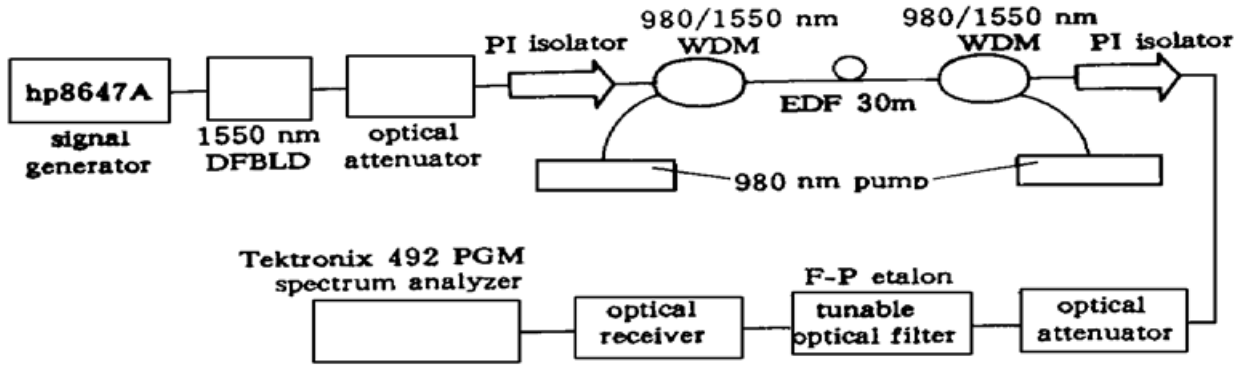


图 6 光补偿的实验装置框图

Fig. 6 Experimental setup of optical compensation

中 DFB 激光器不是理想的, 它会产生一定的非线性失真, 二是可调谐 F-P 腔滤波器的 FSR 和 R 是固定的, 无法根据 EDFA 的情况作相应的调整, 这些都会对实验结果产生影响。计算机模拟分析的结果是最理想的情况, 实际的结果和它会有一定的差距。

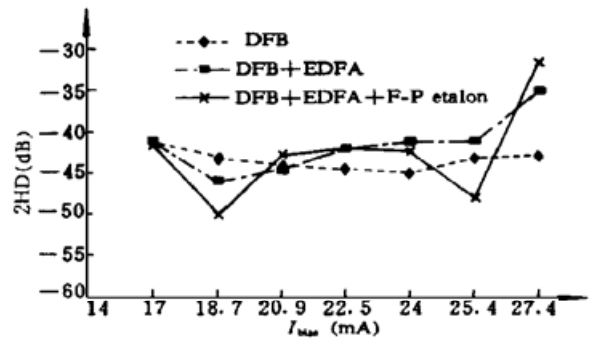


图 7 加与不加 F-P 标准具的 EDFA 谐波失真测量结果
Fig. 7 Measured harmonic distortions of EDFA with or without a F-P etalon

3 三种补偿方法的比较

自补偿虽然在某些波长上可以改善系统的非线性指标, 但改善的程度有限, 并且不能加以控制, 通用性不强。电补偿的通用性较好, 但会引入一定量的衰减, 通常只针对 DFB 激光器进行补偿, 若要兼顾到 EDFA, 调整时会有一定的困难。我们给出的光补偿法可根据系统的工作波长确定 F-P 标准具的性能参数, 然后在发射端调整合适的激光器偏流, 就可以对 EDFA 产生的非线性失真进行补偿。所以, 在使用 EDFA 的 AM-CATV 系统中, 可以用电的预失真网络对 DFB 激光器的非线性失真进行补偿, 用 F-P 标准具对 EDFA 产生的非线性失真进行补偿, 这两种补偿方法相互独立, 相辅相成, 从而可大大改善系统的非线性指标。

参 考 文 献

- 1 W. I. Way, M. M. Choy, A. Yi-Yan *et al.*. Multichannel AM-VSB television signal transmission using an erbium-doped optical fiber power amplifier. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(10) : 343~ 345
- 2 C. Y. Kuo, E. E. Bergmann. Second-order distortion and electronic compensation in analog links containing fiber amplifiers. *J. of Lightwave Technol.*, 1992, **LT-10**(11) : 1751~ 1754
- 3 Jun Ohya, H. Sato, T. Fujita. Cancellation of the second-order distortion of a directly modulated laser in an erbium-doped-fiber amplifier. *OFC/IOOC '93 Technical Digest*, 1993, 177~ 178
- 4 C. Y. Kuo, E. E. Bergmann. Erbium-doped fiber amplifiers second-order distortion in analog links and electronic compensation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(9) : 829~ 831

The Compensation for the Nonlinear Distortions of the Erbium-doped Fiber Amplifier (EDFA) in the AM-CATV Optical Transmission System

Han Yuguo Gu Wanyi Xu Daxiong

(Dept. of Telecommunication Eng., Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract The nonlinear distortions of the erbium-doped fiber amplifier (EDFA) in the AM-CATV optical transmission system is analyzed and calculated. A new scheme compensating the nonlinearities of EDFA—optical compensation is proposed and the other two compensation methods are introduced. The results of the computer simulation and experiment indicate the distinct improvements for the nonlinear distortions of the EDFA using the optical compensation. At last, the three compensation methods are compared.

Key words cable television, erbium-doped fiber amplifier, harmonic distortion, optical compensation