

# 有线电视网络中光纤链路性能分析

朱继明 谢自美

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘要:** 结合有线电视网络, 从理论上对影响光纤链路的噪声、非线性指标的相关因数进行了分析, 提出了载噪比、组合二次差拍比、组合三次差拍比的近似表达式。并对武汉有线电视网络前端至京汉花园的光纤链路进行了实际测量。

**关键词:** 光纤链路; 载噪比; 组合二次差拍比; 组合三次差拍比

**中图分类号:** TN253      **文献标识码:** A

一个有线电视网络(HFC)由前端、光纤传输系统、电缆传输及分配系统三部分组成。前端将各种视频信号分别调制成为不同电视频道的射频信号, 并将其混合传输至光纤传输系统的室内单元--光发射机。光纤传输系统的室外单元--光接收机将接收的光信号转换成射频信号, 并将该射频信号送入电缆传输及分配系统, 最终送入千家万户。

有线电视网络系统性能的好坏, 通常用载噪比(C/N)、组合三次差拍比(CTB)、组合二次差拍比(CSO)进行衡量。国家广电行业标准(GY/7106-1999)规定: 有线电视系统的载噪比(C/N)≥43dB、组合三次差拍比(CTB)≥54dB、组合二次差拍比(CSO)≥54dB。只有以上三大指标得到保障, 信号质量才能有保障, 用户端才能接收到清晰的图像。

随着有线电视网络的发展, 光纤敷设越来越多, 电缆敷设相对减少。一个光接收机的电输出口通常只级联三级放大器。整个光节点所拖动的用户数量大约为 500 户左右。因此, 光纤链路的性能如何, 对整个系统的性能指标有着直接的影响。

光纤链路包括光发射机、光接收机、光纤、光纤连接器及其它无源器件, 光发射机使用半导体激光二极管(LD)将射频信号转换为光功率, 光接收机使用光电二极管(PIN 或 APD)将入射光功率转换为光生电流。整个链路性能指标同样用载噪比(C/N)、组合三次差拍比(CTB)、组合二次差拍比

(CSO)三个主要指标进行表征。

## 1 光纤链路噪声

这部分噪声主要来自光发射机的相对强度噪声(RIN), 光接收机的散粒噪声以及热噪声。

### 1.1 相对强度噪声

强度噪声是光源的量子噪声。即使光源的直流注入可以保持完全恒定, 由于自发辐射和电子-空穴对的复合的随机性, 其输出光功率也是随时间随机变化的。光接收机会将这种光功率的随机变化转变为噪声电流, 叠加在原有的散粒噪声和热噪声之上, 造成光接收机灵敏度下降。

相对强度噪声(RIN), 具有噪声功率和信号功率之比的形式, 其定义是输出光强的方差比平均值的平方, 即:  $RIN = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} (1\text{Hz 带宽})^{[4]}$ 。

可以证明 RIN 在光源张弛振荡频率附近取得最大值, 偏离此频率后, 由于器件对噪声抖动的响应变差, RIN 急剧下降。而对一定频率而言, RIN 与功率成函数关系, 当功率较小时是功率的-3 次方, 而在功率逐步加大后变为-1 次方。

RIN 在光接收机端可以直接看成是强度噪声的双边功率谱密度, 即强度噪声功率

$$d_{RIN}^2 = (1/2p) \int_{-\infty}^{\infty} RIN(w) dw \quad (1)$$

在光发射机发光功率很大的情况下， $d_{RIN}^2$  不再与频率  $w$  有关，而可以表示为

$$d_{RIN}^2 = (RIN)B(R_S P_{IN})^2 \quad (2)$$

式中  $d_{RIN}^2$  是强度噪声功率； $RIN$  在接收端可看成强度噪声功率谱； $B$  为接收机的带宽； $R_S = he/hu$  为光电二极管的接受响应度； $P_{IN}$  是照射到光电二极管光敏面上的光功率。

### 1.2 散粒噪声

对于光接收机，即使是完全恒定的光功率照射到光检测器的光敏面上，由于光量子过程的随机性，光生电流也是随机产生的，散粒噪声是检测器件本身引起的噪声，围绕着一个平均统计值而起伏，这种无规则的起伏就是散粒噪声。

可以证明，散粒噪声的统计特征为泊松分布，实际上常用高斯分布近似，双边功率谱与频率无关，入射光功率产生的光电二极管电流为：

$$I(t) = I_p + i_S(t) \quad (3)$$

式中  $I_p = R_S P_{IN}$  是平均信号光电流， $i_S(t)$  是散粒噪声的电流起伏，与之有关的散粒噪声功率为：

$$d_S^2 = \langle i_S^2(t) \rangle = 2eI_p B \quad (4)$$

式中  $B$  是接收机带宽， $e$  是电子电荷。当暗电流  $I_d$  的存在不可忽略时，散粒噪声功率应该是：

$$d_S^2 = 2e(I_p + I_d)B \quad (5)$$

### 1.3 热噪声

由于电子在光电二极管负载电阻  $R_L$  上随机热运动，即使在外加电压为零时，也产生电流的随机起伏。这种附加的噪声成分就是热噪声电流，记作  $i_T(t)$ ，与此有关的热噪声功率  $d_T^2$  为

$$d_T^2 = \langle i_T^2(t) \rangle = (4KT/R_L)B \quad (6)$$

该噪声经放大器放大后要扩大  $F$  倍，于是 (6) 式变为

$$d_T^2 = (4KT/R_L)FB \quad (7)$$

这里  $F$  是放大器噪声指数； $T$  为温度，单位是 K； $B$  是接收机带宽； $K$  为波尔兹曼常数。

另外在单模光纤链路中的模式噪声，模分配噪声以及啁啾噪声较小，在此不讨论，LD 对光路上的反射比较敏感，可以通过在 LD 和输出光纤之间加隔离器来减小，使光路上的反射降到最低。因此链路上总的噪声功率近似为：

$$d^2 = d_T^2 + d_S^2 + d_{RIN}^2 \quad (8)$$

## 2 光纤链路载噪比

光接收机的噪声性能取决于载噪比，载噪比定义为：

$$C/N = 10\lg(\text{载波功率} / \text{噪声功率}) \quad (9)$$

对于使用 PIN 光电二极管作为光电探测器的接收机，考虑到电功率与电流的平方成正比，这时  $C/N$

可由下式求出

$$C/N = 10\lg(I_p^2 / d^2) \quad (10)$$

将  $I_p = R_S P_{IN}$  以及 (2)、(5)、(7) 式代入式 (10)，可获得  $C/N$  与入射光功率的关系：

$$C/N = 10\lg \left\{ R_S^2 P_{IN}^2 / \left[ \frac{2e(R_S P_{IN} + I_d)B + 4(KT/R_L)FB + d_{RIN}^2}{(RIN)B(R_S P_{IN})^2} \right] \right\} \quad (11)$$

考虑到 SCM-AM 链路光发射机中 LD 单频道调制度  $m$ ，(11) 式变为：

$$C/N = 10\lg \left\{ 1/2 \left( m^2 R_S^2 P_{IN}^2 \right) \left[ \frac{2e(R_S P_{IN} + I_d)B + 4(KT/R_L)FB + (RIN)B(R_S P_{IN})^2}{4(KT/R_L)FB + (RIN)B(R_S P_{IN})^2} \right] \right\} \quad (12)$$

(12) 式中光调制度  $m$  定义为 LD 驱动电流峰值之半与直流偏置电流的百分比：

$$m = (I_{p-p} / 2I_O) \times 100\% \quad (13)$$

其调制特性如下图 1：

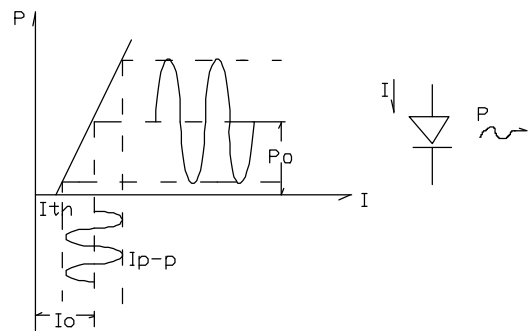


图 1 DFB 直接光强度调制原理  
Fig.1 The principle of modulation of DFB direct light strength

使用雪崩光电二极管 (APD) 的光接收机，在相同的入射光功率下，通常具有较高的  $C/N$ 。这是由于

APD 的内部增益使产生的光电流扩大了  $M$  倍，即：

$$I_p = M \cdot R_S P_{IN} = R_{APD} P_{IN} \quad (14)$$

式中  $P_{APD} = MR_S$  是 APD 的响应度，与 PIN 光电二极管相比增大了  $M$  倍。假如接收机的噪声不受 APD 的

内部增益机理的影响,  $C/N$  就有可能提高  $M^2$  倍。但实际上, APD 接收机的噪声也增加了, 从而限制了  $C/N$  的提高。

APD 接收机的热噪声与 PIN 的相同, 但是散粒噪声却受到平均雪崩增益的影响, 其值为

$$d_s^2 = 2eM^2 F_A (R_S P_{IN} + I_d) B \quad (15)$$

式中  $F_A$  是 APD 有的过剩噪声指数, 由下式给出

$$F_A(M) = k_A M + (1 - k_A)(2 - 1/M) \quad (16)$$

式中  $k_A$  是电率率之比, 对于电子控制的雪崩过程, 空穴电离率小于电子电离率 ( $a_e > a_h$ ),  $k_A = a_h/a_e$ ; 对于空穴控制的雪崩过程,  $a_h > a_e$ ,  $k_A = a_e/a_h$ 。为了使 APD 的性能最好,  $k_A$  应该尽可能小。

在实际的接收机中, 热噪声和散粒噪声都存在时, APD 接收机的载噪比为:

$$C/N = 10 \lg \left\{ \frac{1/2(m^2 M^2 R_S^2 P_{IN}^2)/}{2eM^2 F_A (R_S P_{IN} + I_d) B + 4(KT/R_L) FB + (RIN) B (R_S P_{IN})^2} \right\} \quad (17)$$

为了获得足够的载噪比, 要求激光器的相对强度噪声功率  $RIN < -150\text{dB}$  (1Hz 带宽)

### 3 光纤链路非线性分析

#### 3.1 产生非线性失真的原因主要有:

(1) 光发射机中激光二极管的非线性调制特性;

(2) 光发射机中激光二极管的附加频率调制;

(3) 光纤的色散与激光二极管的频率啁啾相结合产生的非线性;

(4) 采用 1550nm 波长窗口长距离传输, 注入光纤的功率较大, 在光纤中会产生受激布里渊散射, 自相位调制以及波分复用时的四波混频;

(5) 光接收机中放大模块的多频道调制。

在有线电视光纤网络中, 光发射机中激光二极管的非线性调制特性又是最主要问题。

#### 3.2 非线性失真分析

激光器输出光功率与驱动电流的关系 (调制特性) 在门限电流 ( $I_{th}$ ) 之上基本成线性关系, 但在门限附近发生急剧转折, 在电流过高时也会出现弯曲趋势。因此, 工作时的非线性分以下两种情况:

(1) 在正常工作点 (调制特性线性中点) 附近, 小信号的非线性失真指标 CTB 及 CSO, 理论推得 CTB、CSO 近似为:

$$CTB = k_1 / N^3 m^4 \quad (18)$$

$$CSO = k_2 / N^2 m^2 \quad (19)$$

(18)、(19) 式中  $k_1$ 、 $k_2$  为比例系数,  $N$  为工作中的频道数,  $m$  为单频道调制度。

(2) 当驱动电流小到门限电流以下或大到进入饱和区时, 就因削波而产生强烈的非线性失真。理论计算出的失真功率统计平均值 ( $I_{NLD}^2$ ) 及由此决

定的载波干扰比 ( $C/I$ ) 分别为:

$$I_{NLD}^2 = (2/p)^{0.5} [1/2^{0.5}] N m^2 e^{-0.5} \quad (20)$$

$$C/I = 4p^{0.5} [1 + 3(m^2 N)] / (m^2 N)^{3/2} \times e^{1/2N} \quad (21)$$

两式中  $N$  为工作中的频道数,  $m$  为单频道调制度。

多路射频电视信号的叠加具有随机性, 真正由叠加而产生过大信号的概率很小, 只要维持 ( $Nm^2$ ) 在足够小的值, 大信号削波的影响就足够小。

实验已经证明, AM-VSB 光发射机的 CTB, CSO 值基本由 ( $Nm^2$ ) 的值决定, 这说明: 一方面激光器的非线性失真主要由削波决定; 另一方面, 单频道光调制度  $m$  应选择得与频道数的平方根 ( $N^{0.5}$ ) 成反比。多频道传输时的合成光调制度 (或称为方均根光调制度) OMI 定义为

$$OMI = mN^{0.5} \quad (22)$$

通常为保证  $CSO \approx 65\text{dB}$ ,  $CTB \approx 65\text{dB}$ , OMI 应取在 35% 左右, 这样对于 77 个频道情况, 每一频道的光调制度约为  $m=4\%$ 。

#### 3.3 $m$ 的选择

$m$  的选择一般采取折中的办法, 当频道数较少时, 在维持 CTB, CSO 足够高的情况下, 选用较大的  $m$  值, 从而获得较高的载噪比。反之, 若频道数较多时, 则只能选择较小的  $m$  值。

## 4 光纤链路的实际测量

在武汉有线电视光纤环网改造时, 我们对前端至京汉花园的光纤链路进行了实际测量, 所使用的仪器: 泰克 2714, CNR 测试用的是 Interactive 方法, 测量日期: 2002, 6。结果如下表 1:

Table 1 Testing data of optical fiber link from the headend of WHCATV to Jinghan Garden

Channels	C/N (dB $\mu$ v)	CTB (dB $\mu$ v)	CSO (dB $\mu$ v)	Testing levels (dB $\mu$ v)
Z1(112MHz)	54.8	59.7	59.2	89.2
Z16(288 MHz)	53.5	66.5	66.7	87.7
Z19(312 MHz)	53.0	67.5	67.8	87.4
Z24(352 MHz)	53.7	68.8	68.4	87.4
Z35(440 MHz)	55.4	68.8	68.8	87.1

## 5 结 论

(1)对于确定的光发射机、光接收机, 要保证链路的载噪比, 由式(12)及式(17)知必须保证一定的  $P_{IN}$ , 为此必须控制链路的总损耗  $P_{LOSS}$ 。实际调试时, 我们将  $P_{IN}$  控制在  $-5\text{dBm} \sim +2\text{dBm}$  之间, 当  $P_{IN}$  小于  $-7\text{dBm}$  时, CNR 明显开始劣化, 这与式(12)、(17)一致。

(2)链路的非线性失真指标是在满频道工作时给出的。频道较少时, 如 40 个频道, 由式(18)、(19)知 CTB、CSO 能得到较大的改善, 在维持 CTB, CSO 足够高的情况下, 我们将武汉有线电视前端光发射机的输入电平调至  $78\text{dBm}$  左右, 以便获得较大的  $m$  值, 从而获得较高的载噪比。将来若频道数较多

时, 如 70 个频道, 则只能将光发射机的输入电平调至  $75\text{dBm}$  左右, 从而选择较小的  $m$  值。

参考文献:

- [1] Low-Power Chemical Laser Backed up Army's Troubled MIRACL Test Shot, 《Inside the Air Force》Oct. 24, 1997, pp8~10
- [1] 原荣. 光纤通信网络. 电子工业出版社: 1999.
- [2] 林如俭. 有线电视光纤传输技术. 广电总局科学技术委员会: 1999.
- [3] 武秀玲, 沈伟慈. 高频电子线路. 西安电子科技大学出版社: 1994.
- [4] 董天临, 谈新权, 陈京文. 光纤通信原理和新技术: 1998: 108.

# Performance Analysis of Optical Fiber Link in HFC

ZHU Ji-ming XIE Zi-mei

(Dept of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This article analyses in theory the factors that affect the specifications of noise and nonlinearity in optical fiber link, gives the expressions of CNR, CSO and CTB as well as the results measured in practical optical fiber link from the headend of WHCATV to Jinghan Garden.

**Key words:** optical fiber link; CNR; CSO; CTB

(上接第 8 页)

# Random Laser Action in Nanoparticles

CHEN Lei LOU Qi-hong WANG Zhi-jiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** This paper describes ZnO nanoparticle as gain medium to produce random laser. The fundamental characteristics, development history and potential applications of random laser are introduced. Finally, some methods for studying random laser based on random laser theory are discussed.

**Key words:** random laser; ZnO; nanoparticle