

文章编号: 0258-7025(2003)10-0921-04

# 光码分多址接入系统中远近效应的研究

沈成彬, 吴琛, 于金辉, 范戈

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要** 对光码分多址接入系统中由于各个用户距离和发射功率不同导致的远近效应进行研究。结果表明, 远近效应显著劣化了小功率用户的误码率和掉线率。而且, 系统中用户的信号功率方差越大, 各个用户的误码率和掉线率的劣化也越严重。提出了一种应用光硬限幅器消除远近效应的方法, 该方法还极大地降低了多用户干扰。

**关键词** 光纤通信技术; 光码分多址; 远近效应; 掉线率; 光硬限幅器

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Research on Near-far Effect in Optical Code-division Multiple Access Systems

SHEN Cheng-bin, WU Chen, YU Jin-hui, FAN Ge

(National Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract** This paper investigates the near-far effect stemming from different signal power of users in OCDMA system. Based on the assumption that user's signal power is Gauss-distributed, the impacts of near-far effect on system performance are presented. Results show that near-far effect significantly degrades the probability for the error and outage probability for the power-less users. Furthermore, increase of user's signal power variance degrades both probability of error and outage probability for all users in the system. A method of coping with near-far effect, i. e. using an optical hard-limiter in the ODN, is proposed. Additively, the optical hard-limiter alleviates the multiple access interference.

**Key words** fiber communication technique; OCDMA; near-far effect; outage probability; optical hard-limiter

### 1 引 言

如图 1 所示, 在典型的光码分多址 (OCDMA) 系统中, 用户的光编码器 (ONU) 按其地址码将用户数据编码成光脉冲序列, 该输出信号经过配线光纤后由一个光合路器和来自其他用户的信号一起进入馈线光纤被传输到光线路终端 (OLT), 由光解码器恢复出数据比特<sup>[1,2]</sup>。

对于星型拓扑的 OCDMA 接入系统来讲, 由于用户发送机的输出功率各不相同, ONU 的配线光纤长度各不相同, 其衰减亦不同, 而且系统中的无源器件 (如光合/分路器, WDM 器件等) 对不同端口信号的附加损耗不同, 所以 OLT 接收到的各个用户

的信号功率不同。另一方面, 光纤和各种无源器件性能也随环境温度、应力等改变, 而且这种变化是动态的, 难以实时补偿。在某些 OCDMA 系统中 [如快跳频-光码分多址 (FFH-OCDMA)], 采用多波长编码, 光纤和编、解码器中的滤波器件对不同波长的光信号衰减和延迟不同, 会导致接收机处的各个用户信号光功率有一定的差别。通过预调整用户输出光功率的方法也不能完全消除这种差异, 因而产生了类似于射频 CDMA 移动通信系统中的远近效应 (Near-Far Effect)<sup>[3]</sup>。本文对此进行了研究并提出了一种消除远近效应的方法。

收稿日期: 2002-05-24; 收到修改稿日期: 2002-09-26

作者简介: 沈成彬 (1974—), 男, 吉林人, 上海交通大学博士研究生, 主要从事光网络、宽带通信网络等方面的研究。E-mail: opticshen@sina.com

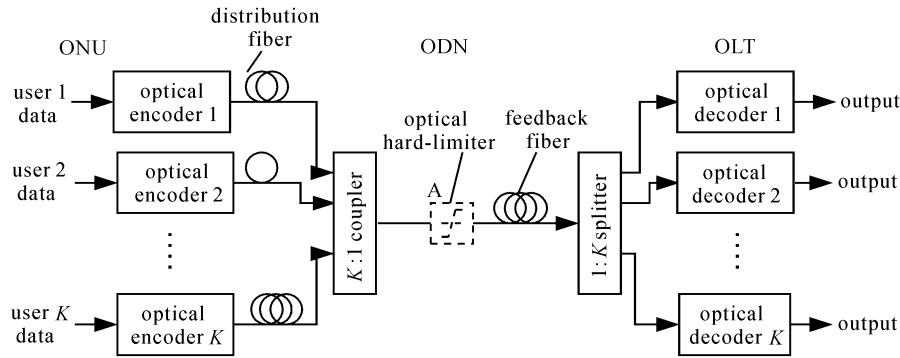


图 1 OCDMA 系统的结构  
Fig. 1 Architecture of OCDMA system

## 2 分析模型及结果

### 2.1 误码率

考虑开关键控(OOK)调制的 OCDMA 系统,假设  $s_k$  为接收机接收到的用户  $k$  信号的光功率,  $b_k(t)$  为用户  $k$  发送的二进制信息比特,  $c_k(t)$  为用户  $k$  的地址码;同时,为简便起见,假设所考察的用户信号可以表示为  $k = 1$  和  $\tau_1 = 0$ ,所考察系统接收端的用户功率的参考值为  $s_r = 1$ ,并令  $S_k = s_k/s_r$  为用户  $k$  的归一化功率,则光解码器的输出可表示为

$$y = \int_0^T c_1(t)r(t)dt = s_1 b_1 \int_0^T c_1(t)c_1(t)dt + \sum_{k=2}^K s_k b_k \int_0^T c_1(t)c_k(t - \tau_k)dt = s_1 b_1 \omega + \sum_{k=2}^K S_k I_k = b_1 \omega + \text{MAI} \quad (1)$$

式中,  $\tau_k: 0 \leq \tau_k \leq T_c$  为第  $k$  个用户的时延,  $K$  为用户总数,  $\omega$  为地址码的码重,  $I_k$  为用户  $k$  对所考察用户的码间干扰, MAI 为多用户干扰。

根据中心极值定理,当用户数很大时,  $I_k$  可以假设为高斯分布的,其均值和方差为

$$\mu_{I_k} = \overline{R_{k,1}} = \frac{\omega}{2N} \quad (2)$$

$$\sigma_{I_k}^2 = \frac{1}{2N-1} \sum_{s=-N+1}^{N-1} [R_{k,1}(s) - \overline{R_{k,1}}]^2 = \frac{\omega^2}{2N} \left(1 - \frac{\omega^2}{2N}\right) \quad (3)$$

式中,  $R_{m,p}(s)$  是时移为  $s$  的两个地址码  $c_m$  和  $c_p$  的互相关值,  $\overline{R_{m,p}}$  为  $R_{m,p}(s)$  的时移平均。另一方面,可将干扰用户的归一化功率近似为高斯变量,其均值为  $\mu_{S_k} = 1$ , 方差为  $\sigma_{S_k}^2$ 。

如(1)式所示,用户  $k$  对用户 1 的干扰为二维变

量  $S_k I_k$ 。由于  $I_k$  和  $S_k$  是不相关的随机变量,其联合中心矩  $\mu_{S_k, I_k}$  和归一化协方差  $\rho_{S_k, I_k}$  均为 0,所以  $S_k I_k$  的联合概率密度函数为

$$\rho(S_k, I_k) = \rho(S_k) \cdot \rho(I_k) = \frac{1}{2\pi\sigma_{I_k}\sigma_{S_k}} \times \exp\left[-\frac{(S_k - \mu_{S_k})^2}{2\sigma_{S_k}^2} - \frac{(I_k - \mu_{I_k})^2}{2\sigma_{I_k}^2}\right] \quad (4)$$

其均值和方差分别为

$$E(S_k I_k) = \mu_{S_k} \mu_{I_k} \quad (5)$$

$$\sigma_{S_k I_k}^2 = \sigma_{S_k}^2 \sigma_{I_k}^2 + \sigma_{S_k}^2 \mu_{I_k}^2 + \sigma_{I_k}^2 \mu_{S_k}^2 \quad (6)$$

根据中心极值定理,当用户数较多时, MAI 可近似为高斯分布的随机变量,其均值和方差分别为  $\mu = (K-1)\mu_{S_k}\mu_{I_k} = (K-1)\overline{R_{K,1}}$  和  $\sigma^2 = (K-1)(\sigma_{S_k}^2\sigma_{I_k}^2 + \sigma_{S_k}^2\mu_{I_k}^2 + \sigma_{I_k}^2\mu_{S_k}^2)$ 。忽略其他噪声的影响,所考察用户的光解码器输出信号与 MAI 之比和误码率分别为

$$\text{SIR} = \frac{(S_1 \omega)^2}{\sigma^2} = \frac{(S_1 \omega)^2}{(K-1)(\sigma_{S_k}^2 \sigma_{I_k}^2 + \sigma_{S_k}^2 \mu_{I_k}^2 + \sigma_{I_k}^2 \mu_{S_k}^2)} \quad (7)$$

$$P_{e_1} = \text{Prob}(y \geq \eta | b_1 = 0) \cdot \text{Prob}(b_1 = 0) + \text{Prob}(y \leq \eta | b_1 = 1) \cdot \text{Prob}(b_1 = 1) = \frac{1}{2} \{ \text{Prob}(y \geq \eta | b_1 = 0) + \text{Prob}(y \leq \eta | b_1 = 1) \} = \frac{1}{2} \text{erfc}\left[\frac{\sqrt{\text{SIR}}}{2\sqrt{2}}\right] \quad (8)$$

其中  $\text{erfc}(x)$  为误差函数。

分别计算了  $\sigma_s^2 = 0.5$  时比较典型的直接序列(DS)和快跳频(FFH)OCDMA 系统中几个不同功率的用户的误码率。对 DS-OCDMA 系统取  $N =$

300,  $\omega = 5$ ; 对 FFH-OCDMA 系统, 码长为  $N = 10$ , 结果如图 2 所示。可以看出, 对于大功率的用户, 其误码率得到改善, 但小功率用户的误码率严重恶化, 甚至达到几个数量级。同时, 针对不同功率的用户, 研究了这两种 OCDMA 系统中误码率与用户光功率方差  $\sigma_{s_k}^2$  的关系, 结果如图 3 所示。从该图可以看出, 对于所有的用户, 其误码率随系统光功率方差增大而劣化。对于功率较大的用户, 光功率方差增大导致的误码率劣化更明显。

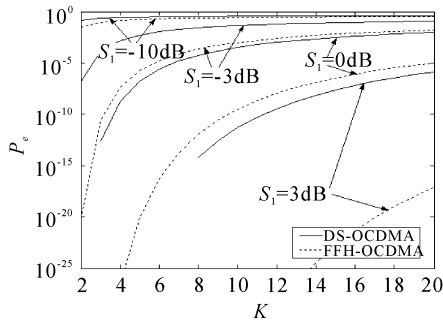


图 2 DS-OCDMA 和 FFH-OCDMA 系统中不同功率用户的误码率

Fig. 2 Probability of error of users in DS-OCDMA and FFH-OCDMA systems for different user power

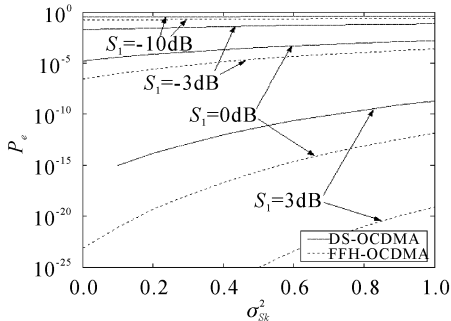


图 3 DS-OCDMA 和 FFH-OCDMA 系统中不同功率用户的误码率和接收端用户信号功率方差的关系

Fig. 3 Probability of error vs  $\sigma_{s_k}^2$  for power-different users in DS-OCDMA and FFH-OCDMA systems

### 2.2 掉线率

考虑以分组业务为主的 DS-OCDMA 接入系统, 当某个码分信道的误码率达到  $10^{-3}$  以上时, 就会发生掉线。根据(8)式可知, 该误码率对应的 SIR 为 38.19, 称为捕获比  $\alpha^{[4]}$ 。掉线的概率就是信号干扰比小于捕获比的概率, 即

$$P_{out} = \Pr\left(\frac{S_1\omega}{P_{MAI}} \leq \sqrt{\alpha}\right) = \Pr\left(\frac{S_1\omega}{\sum_{k=2}^K S_k I_k} \leq \sqrt{\alpha}\right) \quad (9)$$

根据前面的分析, 对每个用户来讲, 其他用户的

干扰信号功率也是高斯分布的, 则有

$$P_{out} = \Pr\left(P_{MAI} \geq \frac{S_1\omega}{\sqrt{\alpha}}\right) = \int_{\frac{S_1\omega}{\sqrt{\alpha}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{\left(\frac{S_1\omega}{\sqrt{\alpha}} - \mu\right)}{\sqrt{2}\sigma}\right] \quad (10)$$

计算上述两种典型系统中不同功率用户的掉线率与系统用户数和接收端用户光功率方差的关系, 结果如图 4, 5 所示。可以看出, 高功率用户的掉线率有所改善, 但功率较小的用户的掉线率显著增大, 即使对于仅仅低于参考功率 3 dB 的用户其掉线率增加了几个数量级。当系统光功率方差增大时, 系统中每个用户, 无论其功率大还是小, 其掉线率都随之增加, 进而导致系统通信的效率降低。

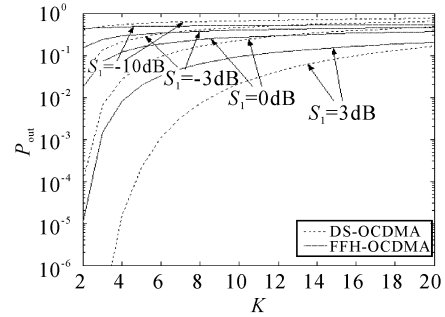


图 4 DS-OCDMA 和 FFH-OCDMA 系统中不同功率用户的掉线率

Fig. 4 Probability of outage for power-different users in DS-OCDMA and FFH-OCDMA systems

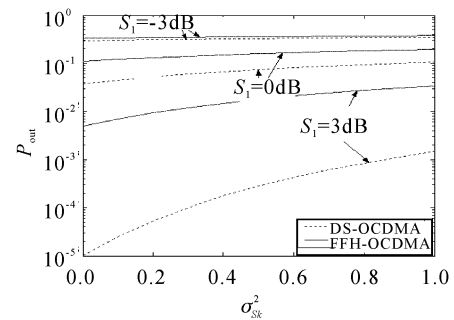


图 5 DS-OCDMA 和 FFH-OCDMA 系统中不同功率用户的掉线率和  $\sigma_{s_k}^2$  的关系

Fig. 5 Probability of outage vs  $\sigma_{s_k}^2$  for power-different users in DS-OCDMA and FFH-OCDMA systems

上述研究表明, 对系统中所有用户的光功率进行严格的控制是保证系统性能的关键, 也就是使各个用户信号在接收端的光功率在一定的容限内, 从

图中可以看出,接收端用户信号功率在±3 dB的容限内才能保证用户误码率劣化在一个数量级左右。

### 3 一种消除远近效应的方法

如何消除远近效应是 OCDMA 技术是否成熟的关键之一。基于对 OCDMA 和光硬限幅器(Optical Hard-Limiter, OHL)的研究,提出了将光硬限幅器用于消除远近效应的方法。

光硬限幅器是一种非常重要的非线性光学元件,其归一化输入输出响应函数为

$$y = \begin{cases} 1 & x \geq \text{阈值} \\ 0 & x \leq \text{阈值} \end{cases} \quad (11)$$

当输入光强  $x$  大于阈值时,输出光强  $y$  为一个确定的值,表示为 1;当输入光强  $x$  小于阈值时,输出光强为 0<sup>[4~6]</sup>。为了消除远近效应,将光硬限幅器应用于 OCDMA 接入系统中的光分配网(ODN)的合路器的 OLT 侧,如图 1 中的 A 点。所有用户的信号经过光硬限幅器后,信号功率全部相同,远近效应被消除。这种方法可以简化光发送机和接收机的结构,改善系统性能,而且整个系统只需一个光硬限幅器,成本较低,是一种非常好的克服 OCDMA 系统中远近效应的方法。同时,光硬限幅器的应用可以减少多用户干扰<sup>[1]</sup>。基于切普(chip)同步假设,得到了 DS-OCDMA 接入系统中 ODN 处没有 OHL 和有 OHL 情况下的系统误码率的上边界,即

$$P_e(\text{without optical hard-limiter}) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{K-1} \binom{K-1}{i} \left(\frac{\omega^2}{2N}\right)^i \left(1 - \frac{\omega^2}{2N}\right)^{K-1-i} \quad (12)$$

$$P_e(\text{with optical hard-limiter}) = \frac{1}{2} \prod_{i=0}^{\omega-1} \left[1 - \left(1 - \frac{\omega}{2N}\right)^{K-1-i}\right] \quad (13)$$

图 6 给出了  $N = 300, \omega = 5$  的 DS-OCDMA 系统中有无光硬限幅器情况下的误码率。可以看出,光硬限幅器在消除了远近效应的同时也显著降低了系统的误码率。

### 4 结 论

分析了 OCDMA 系统中导致用户信号功率不同(即远近效应)的各种因素。基于用户信号功率为高斯分布的假设,分析了典型的 OCDMA 系统中远

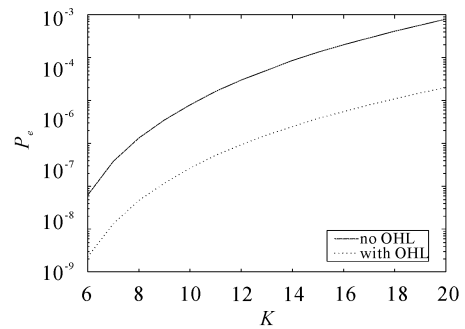


图 6 DS-OCDMA 系统中 ODN 处应用光硬限幅器前后的误码率

Fig. 6 Optical hardlimiter at ODN of DS-OCDMA system improves the system's performance of probability of error

近效应对系统中不同功率用户误码率和掉线率的影响。结果表明,由于远近效应,小功率用户的误码率和掉线率显著增加。同时,所有用户的误码率和掉线率都随系统的用户功率方差的增大而提高。对典型系统,用户信号功率容限必须小于 3 dB。最后,提出一种将光硬限幅器应用于光分配网的 OLT 侧的方法,以消除远近效应对系统的影响。该方法还可以显著降低系统的误码率。

### 参 考 文 献

- 1 J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks—Part I: Fundamental principles [J]. *IEEE Trans. Comm.*, 1989, **37**(8):824~833
- 2 H. Fathallah, L. A. Rusch, S. LaRochelle. Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):397~405
- 3 R. Prasad, A. Kegel, M. G. Jansen. Effect of imperfect power control on cellular code division multiple access system [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(9):848~849
- 4 K. Ogusu. Dynamic behavior of reflection optical bistability in a nonlinear fiber ring resonator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(9):1537~1543
- 5 A. L. Steele, S. Lynch, J. E. Hoad. Analysis of optical instabilities and bistability in a nonlinear fiber loop mirror with feedback [J]. *Opt. Comm.*, 1997, **137**(1~3):136~142
- 6 Lukasz Brzozowski, Edward H. Sargent. Optical signal processing using nonlinear distributed feedback structures [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(5):550~555