

文章编号: 1001-3806(2011)05-0705-03

## 色散和非线性对异步光码分多址系统的影响

曾仁芬, 王英莲

(景德镇陶瓷学院 机械电子工程学院, 景德镇 333403)

**摘要:** 为了研究色散和非线性对异步光码分多址系统性能的影响, 基于非线性薛定谔方程, 采用数值模拟的方法, 取得了异步光码分多址系统误比特率与传输距离的关系曲线和与用户数关系曲线。结果表明, 光纤中的群速度色散、3阶色散和非线性效应都会引起异步光码分多址系统性能劣化, 其中以群速度色散效应的影响最为严重; 系统传输媒质可以采用色散位移光纤, 改善由此造成的系统性能下降。

**关键词:** 光通信; 异步光码分多址系统; 色散; 非线性效应; 光正交码

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.034

### Effect of dispersion and nonlinearity on performance of asynchronous OCDMA systems

ZENG Ren-fen, WANG Ying-lian

(Department of Mechatronics Engineering, Jingdezhen Ceramics Institute, Jingdezhen 333403, China)

**Abstract:** In order to study the influence of dispersion and nonlinearity on asynchronous optic code division multiple access (OCDMA) systems based on nonlinear Schrödinger equation, the functions of the bit error rate of an asynchronous OCDMA system with the transmission distance and the number of users were obtained by means of simulation. The results show that the performance of an asynchronous OCDMA system can be deteriorated severely by the group velocity dispersion, the third-order dispersion and nonlinear effects, especially the group velocity dispersion. Dispersed shift fiber can be used as system transmission medium so as to compensate the consequent system performance degradation.

**Key words:** optical communication; asynchronous optic code division multiple access systems; dispersion; nonlinear effect; optical orthogonal code

## 引言

光码分多址(optic code division multiple access, OCDMA)系统由于具有随机异步接入、网络控制简单、地址配置灵活和业务透明性好等优点而成为光纤网络系统研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。根据各用户接入时间不同, OCDMA系统可分为同步系统和异步系统<sup>[3-4]</sup>。在实际的OCDMA系统中, 每个用户的接入都是异步的, 当接入多个用户时, 异步系统的误比特率(bit error rate, BER)远低于同步系统<sup>[5]</sup>。目前对异步OCDMA系统性能的研究<sup>[6]</sup>大多假定光纤信道是理想的, 而未考虑色散和非线性效应对系统性能的影响。作者以异步OCDMA系统为研究模型, 采用普通单模光纤, 码片异步, 光正交码(optical orthogonal code, OOC)的设计, 结合非线性薛定谔方程, 采

用系统误比特率的方法对异步OCDMA系统性能进行研究。这对多用户OCDMA系统进行深入研究及实际的系统设计具有重要指导意义。

## 1 异步OCDMA系统性能分析

### 1.1 理想异步OCDMA系统误比特率的计算

理想异步时, 两个用户的地址码关于彼此无相邻标志脉冲, 随机变量 $I_1$ 取值在区间(0, 1)上, 故两个用户干扰的概率密度可表示为:

$$P(I_1) = q\delta(I_1) + p|I_1| \quad (1)$$

式中,  $\delta(I_1)$ 为Dirac函数,  $p$ 为碰撞概率, 且 $p + q = 1$ 。

从(1)式中可设 $I_1$ 的数学期望值为 $p$ , 对于通断键控, 干扰的数学期望值为 $\frac{K^2}{F}$ ,  $F$ 为码长,  $K$ 为码重。

故可得:  $q = 1 - \frac{K^2}{F}$ 。因此(1)式变为<sup>[2]</sup>:

$$P(I_1) = \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)\delta(I_1) + \frac{K^2}{F}|I_1| \quad (2)$$

式中, 当 $0 < I_1 < 1$ 时,  $|I_1| = 1$ ;  $I_1$ 取其它值时,  $|I_1| = 0$ 。

作者简介: 曾仁芬(1982-), 女, 讲师, 从事非平衡态统计及光传输等方面的研究。

E-mail: rfzeng@163.com

收稿日期: 2010-09-06; 收到修改稿日期: 2010-03-02

当系统中有  $N$  个用户时,多用户干扰的概率密度函数为:

$$P(I_1) = q^{N-1} \delta(I_1) + (N-1)pq^{N-2} |I_1| + C_{N-1}^2 p^2 q^{N-3} f(I_1) + \sum_{i=3}^{N-1} C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} G\left(\frac{i}{2}, \frac{i}{12}\right) \quad (3)$$

$$P_e = \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-1} \int_T^\infty \delta(I_1) dI_1 + (N-1) \frac{K^2}{F} \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-1} \int_T^\infty |I_1| dI_1 + \right.$$

$$\left. C_{N-1}^2 \left(\frac{K^2}{F}\right)^2 \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-3} \int_T^\infty f(I_1) dI_1 + \sum_{i=3}^{N-1} C_{N-1}^i \left(\frac{K^2}{F}\right)^i \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-1-i} Q\left[\frac{T - \frac{i}{2}}{\sqrt{\frac{i}{12}}}\right] \right\} \quad (4)$$

式中,  $T$  为系统判决门限,  $Q(x)$  为 Gaussian 积分函数,

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{u^2}{2}} du, u \text{ 为变量.}$$

### 1.2 异步 OCDMA 系统误比特率公式的修正

目前关于单极性 OCDMA 系统性能的研究都假定光纤中传输的脉冲是理想的矩形,且光纤信道也是理想的,即忽略了色散和非线性效应。而在实际系统中,

$$P_e = \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{bK^2}{F}\right)^{N-1} \int_T^\infty \delta(I_1) dI_1 + (N-1) \frac{bK^2}{F} \left(1 - \frac{bK^2}{F}\right)^{N-2} \int_T^\infty |I_1| dI_1 + \right.$$

$$\left. C_{N-1}^2 \left(\frac{bK^2}{F}\right)^2 \left(1 - \frac{bK^2}{F}\right)^{N-3} \int_T^\infty f(I_1) dI_1 + \sum_{i=3}^{N-1} C_{N-1}^i \left(\frac{bK^2}{F}\right)^i \left(1 - \frac{bK^2}{F}\right)^{N-1-i} Q\left[\frac{T - \frac{i}{2}}{\sqrt{\frac{i}{12}}}\right] \right\} \quad (5)$$

式中,  $b$  为光纤输出光脉冲和输入光脉冲半峰全宽的比值,即脉冲展宽因子。

对于异步 OCDMA 系统,当脉宽大于 1ps 时,可由光脉冲在单模光纤内传输的非线性薛定谔 (nonlinear Schrödinger, NLS) 方程描述<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A = -\frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma |A|^2 A \quad (6)$$

式中,  $A$  为光脉冲的慢变振幅包络,  $\alpha$  为吸收系数,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  分别是 2 阶和 3 阶色散常数,  $\gamma$  是 3 阶非线性系数,  $z$  为光纤传输的距离,  $T_1$  是随脉冲以群速度  $v_g$  移动的参考系中的时间量度 ( $T_1 = t - z/v_g$ ,  $t$  为时间)。通过求解 NLS 方程即可得到  $b$  值。(1) 假定采用普通标准光纤,在传输过程中只需考虑群速度色散效应 (group velocity dispersion, GVD) 与自相位调制 (self phase modulation, SPM) 的联合效应。在联合效应的基础上由 NLS 方程推求出的脉冲展宽因子为<sup>[9]</sup>:

$$b = \left[ 1 + \sqrt{2} \phi_{\max} \frac{L}{L_d} + \left( 1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \phi_{\max}^2 \right) \frac{L^2}{L_d^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

假定采用色散位移光纤,在传输过程中可以忽略 2 阶色散效应,只需考虑 3 阶色散效应 (third order disper-

式中,  $f(I_1) = \begin{cases} 1 - |I_1 - 1|, & (0 \leq I_1 \leq 2) \\ 0, & (\text{其它}) \end{cases}$ ,  $G\left(\frac{i}{2}, \frac{i}{12}\right)$  是均

值为  $i/2$ 、方差为  $i/12$  的 Gaussian 概率密度函数。

在不考虑系统其它噪声的情况下,当  $0 \leq T \leq K$  时,系统误比特率变为:

光纤传输不可能是理想的,系统需要考虑色散<sup>[7]</sup>和非线性的共同作用。故这种情况下计算误比特率,就应对理想误比特率公式进行修正。假设经光纤传输后,输出光脉冲的脉宽为输入光脉冲的  $b$  倍,就相当于一个用户产生的多址干扰的概率由  $\frac{K^2}{F}$  变为  $\frac{bK^2}{F}$ 。因此考虑光纤传输影响后的 BER 修正公式应为<sup>[8]</sup>:

tion, TOD) 与自相位调制的联合效应。在联合效应的基础上由 NLS 方程推求出的脉冲展宽因子为<sup>[10]</sup>:

$$b = \left\{ 1 + \left[ \frac{1}{4} + \frac{2\phi_{\max}^2}{\sqrt{3}} + \left( \frac{6}{25\sqrt{5}} - \frac{2}{27} \right) \phi_{\max}^4 \right] \frac{L^2}{L_d'^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中,  $\phi_{\max} = L_{\text{eff}}/L_{\text{nl}} = \gamma P_0 L_{\text{eff}}$ ,  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ ;  $\phi_{\max}$  为最大相移,  $L_d, L_d'$  为色散长度 ( $L_d = T_0^2/|\beta_2|$ ,  $L_d' = T_0^3/|\beta_3|$ ,  $T_0$  表示初始脉宽),  $L$  为传输距离,  $L_{\text{nl}}$  为非线性长度 ( $L_{\text{nl}} = 1/(\gamma P_0)$ ,  $P_0$  是峰值功率),  $L_{\text{eff}}$  为有效长度。

## 2 数值计算结果与分析

### 2.1 异步 OCDMA 系统误比特率-距离曲线

(1) 基本参量:短脉冲光源,无啁啾高斯脉冲,  $T_0 = 5\text{ps}$ ,  $P_0 = 0.03\text{W}$ ;传输光纤为普通单模光纤,光纤损耗  $\alpha = 0.2\text{dB/km}$ 。分别改变 2 阶色散和非线性参量,可以得到如图 1 所示的系统误比特率与传输距离的关系曲线。

(2) 基本参量:短脉冲光源,无啁啾高斯脉冲,  $T_0 = 1\text{ps}$ ,  $P_0 = 0.03\text{W}$ ;传输光纤为色散位移光纤,光纤损耗  $\alpha = 0.2\text{dB/km}$ , 2 阶度色散常数  $\beta_2 = 0$ 。分别改变

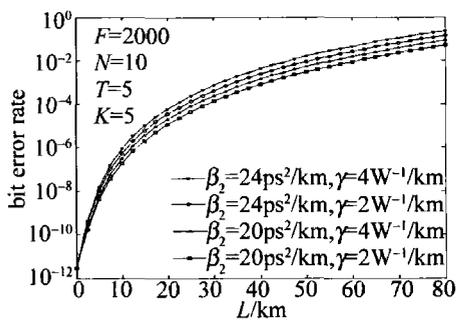


Fig. 1 BER changing with different dispersion and nonlinearity

3阶色散和非线性参量,可以得到如图2所示的系统误比特率与传输距离的关系曲线。

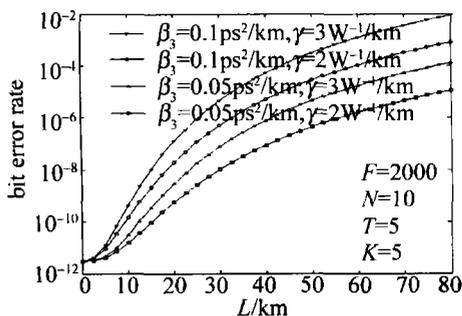


Fig. 2 BER changing with different third order dispersion and nonlinearity

从图1和图2可知,当传输距离为0时,系统的误比特率并不为0,说明该系统的误比特率是固有的,是由系统本身多址干扰造成的;当传输距离为10km时,普通单模光纤中的群速度色散和非线性的联合效应会使系统性能恶化5个数量级,而色散位移光纤中的3阶色散和非线性的联合效应才使系统性能恶化不到2个数量级。由此说明光纤中的群速度色散效应、3阶色散效应、非线性效应都会引起异步OCDMA系统性能的劣化,其中以普通单模光纤中的群速度色散效应影响最为严重。

### 2.2 异步OCDMA系统误比特率-用户数曲线

(1) 基本参量:短脉冲光源,无啁啾高斯脉冲, \$T\_0 = 5\text{ps}, P\_0 = 0.03\text{W}\$;传输光纤分别为普通单模光纤 (\$\beta\_2 = 20\text{ps}^2/\text{km}, \gamma = 3\text{W}^{-1}/\text{km}\$ 和 \$\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}\$)、非零色散位移光纤 (\$\beta\_2 = 0.8\text{ps}^2/\text{km}, \gamma = 3\text{W}^{-1}/\text{km}\$ 和 \$\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}\$)和理想光纤(不考虑色散、非线性效应和损耗)。根据不同的光纤参量,可以得到如图3所示的系统误比特率与用户数的关系曲线。

(2) 基本参量:短脉冲光源,无啁啾高斯脉冲, \$T\_0 = 1\text{ps}, P\_0 = 0.03\text{W}\$;传输光纤分别为非零色散位移光纤 (\$\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}, \beta\_2 = 0.8\text{ps}^2/\text{km}\$ 和 \$\gamma = 3\text{W}^{-1}/\text{km}\$)、色散位移光纤 (\$\alpha = 0.2\text{dB}/\text{km}, \beta\_2 = 0, \beta\_3 = 0.05\text{ps}^3/\text{km}\$ 和 \$\gamma = 3\text{W}^{-1}/\text{km}\$)和理想光纤(不考虑色散、非线性效应和损耗)。根据不同的光纤参量,可以得到如图4所示的系统误比特率与用户数的关系曲线。

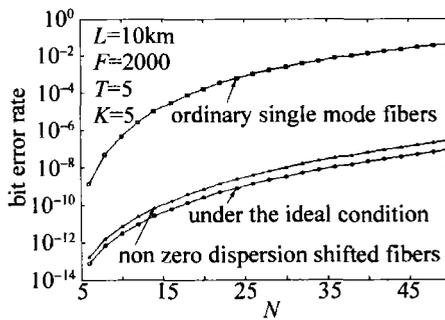


Fig. 3 BER changing with different fiber under \$T\_0 = 5\text{ps}\$

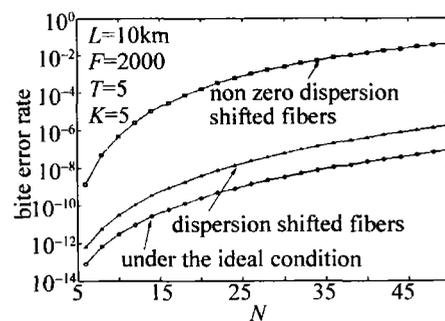


Fig. 4 BER changing with different fiber under \$T\_0 = 1\text{ps}\$

从图3中可知,30个用户同时接入时,采用非零色散位移光纤情形与采用普通单模光纤情形相比,系统性能改善了5个数量级,接近于理想情况时的误比特率曲线。从图4中可知,30个用户同时接入时,采用色散位移光纤情形与采用非零色散位移光纤情形相比,系统性能改善了4个数量级,更接近于理想情况时的误比特率曲线。因此,为了减少光纤的色散和非线性效应对系统性能的影响,传输光纤最好选择色散位移光纤。

### 3 小结

分析了理想异步OCDMA系统误比特率计算公式的基础上,结合非线性薛定谔方程,重新分析了异步OCDMA系统的误码特性,提出了误比特率计算的修正公式,并用计算机进行了仿真。结果表明,光纤中的群速度色散,3阶色散和非线性效应都会影响异步OCDMA系统性能,其中以群速度色散效应的影响最为严重;为了改善由此造成的系统性能下降,系统传输媒质可以采用色散位移光纤。

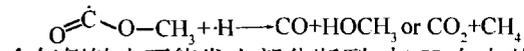
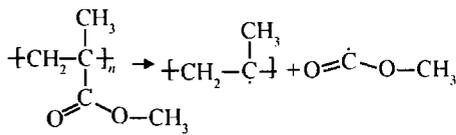
#### 参考文献

[1] SALEHI J A. Code division multiple-access techniques inoptical fiber networks——Part I:Fundamental principles[J]. IEEE Transactions Communication, 1989, 37(8): 824-833.

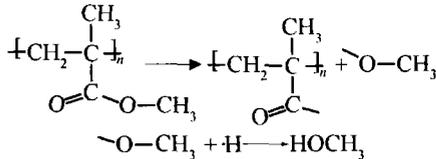
[2] SALEHI J A, BRACKETT C. A Code division multiple-accesstechniques in optical fiber net works——Part II: Systems performance analysis[J]. IEEE Transactions Communication, 1989, 37(8): 834-842.

(下转第711页)

CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 等气体:



含氧侧链也可能发生部分断裂,与 H 自由基结合生成易挥发的甲醇(HOCH<sub>3</sub>):



同时,与主链结合的一CH<sub>3</sub>支链断裂后也会产生甲烷(CH<sub>4</sub>)气体。总之,由于含氧支链的完全或部分断裂导致 PMMA 中的 C 元素以气体形式释放出去,因此实验中观察到 C1s 电子峰强度减弱。而断裂后的空位很可能由背景气体中的 O 来填补从而导致 O1s 峰增强。

#### 4 结论

研究了 PMMA(有机玻璃)经 KrF 准分子脉冲激光烧蚀后表面形貌及化学结构的改变,并对刻蚀率、粗糙度以及表面所发生的光化学反应进行了分析。实验结果表明,在激光照射过程中,高能量的紫外光子可以直接破坏 PMMA 的支链化学键,形成一些分子碎片和气体产物,这些气体在溢出表面的过程中产生孔状结构。利用 3 维形貌分析仪对刻蚀率和粗糙度进行了测试,发现随着激光能量密度和脉冲数的增加,刻蚀率和表面粗糙度并不是一直增加。通过比较照射前后 PMMA 的光电子能谱,发现激光照射使样品表面 C 的含量减少而 O

的含量有所增加,据此推测 PMMA 支链上的甲基被刻蚀并且刻蚀过程中背景气体中的氧气参与了反应。

#### 参考文献

- [1] CHU X M, GU P L, YANG J X. Study on technical parameters of laser welding HDPE plastics[J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 116-119 (in Chinese).
- [2] XU R Q, CUI Y P, ZHAO R, *et al.* A ttenuation of laser generated shock waves in Plexiglas[J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 225-227, 243 (in Chinese).
- [3] CHEN J, ZHANG Q L, YAO J H, *et al.* Influence of surface roughness on laser absorptivity[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 624-627 (in Chinese).
- [4] LI Y L, WANG W P. Laser interaction with polymers and its applications[J]. Electro-optic Technology Application, 2010, 25(2): 8-13 (in Chinese).
- [5] ZHANG L, LOU Q H, WEI Y R, *et al.* Comparison of etching characteristics of polymers by 193nm and 308nm excimer laser radiation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(1): 25-28 (in Chinese).
- [6] LIU A H, ZHANG Y H, MAN B Y. Surface modification and ablation of polytetrafluorethylene by excimer laser irradiation [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1073-1077 (in Chinese).
- [7] ZHU X L, LIU Sh B, CHENG T, *et al.* Analysis of X-ray photoelectron spectroscopy of polymethyl methacrylate etched by a KrF excimer laser[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22(6): 1526-1529.
- [8] WEI R X, JIANG D Sh, ZHOU Z D. Relationship between average etching velocity and laser pulse energy density during excimer laser direct etching[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(2): 231-234 (in Chinese).
- [9] WANG J Q, WU W H, FENG D M. Introduction to electron spectroscopy (XPS/XAES/UPS) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992: 190-191 (in Chinese).
- [10] ZHAO Zh Y, HOU D Sh, DONG X Ch, *et al.* Research on etching properties of polycarbonate by KrF excimer laser[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(2): 4-7 (in Chinese).
- [11] WOCHNOWSKI C, METEV S, SEPOLD G. UV-laser-assisted modification of the optical properties of polymethylmethacrylate[J]. Applied Surface Science, 2000, 154/155(1): 706-711.

(上接第 707 页)

- [3] JI J H, YANG Sh W, XU M, *et al.* Performance analysis of WDM + OCDMA system[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(10): 1197-1200 (in Chinese).
- [4] WU Ch, SHEN Ch B, JI J H, *et al.* Impact of fibers dispersion on BER of FFH-OCDMA systems [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2003, 14(12): 1252-1255 (in Chinese).
- [5] KWONG W C, PERRIER P A, PRUCNAL P R. Performance comparison of asynchronous and synchronous code-division multiple-access [J]. IEEE Transactions Communication, 1991, 39(11): 1625-1634.
- [6] DING Y, PAN W, LUO B, *et al.* Bit error performance analysis of asynchronous OCDMA systems with double optical hard-limiter [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(5): 582-586 (in Chinese).

nese).

- [7] SONG Y, WANG L. Effect of fiber dispersion on pulse width[J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 568-571 (in Chinese).
- [8] WAN X W. The study of multiple access interrupt in optical code division multiplexing access system[D]. Hefei: Anhui University, 2005: 13-17 (in Chinese).
- [9] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 12 (in Chinese).
- [10] POTASEK M J, AGRAWAL G P. Analytic and numerical study of pulse broadening in nonlinear dispersive optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1986, 3(2): 205-207.