

一种抑制OCDMA系统色散和非线性效应的方法

李月卉¹, 安晓强²

(1. 西华大学数学与计算机学院 成都 610039; 2. 西南技术物理研究所 成都 610041)

【摘要】色散和非线性效应对光CDMA系统性能会产生严重影响。针对此类问题,该文通过对采用严格最佳 $(F, k, 1)$ 光正交码的单极性光CDMA系统进行理论分析,得到了色散和非线性效应对光CDMA系统性能的影响的量化表达式。数值结果表明:光纤信道的色散和非线性效应会导致系统性能明显下降,因此,色散补偿技术必不可少。不同于传统的色散补偿方案,该文提出采用非零色散位移光纤(NZ-DSF)搭配色散补偿光纤(DCF)的新方案,在进行色散补偿的同时,尽可能弱化非线性效应的影响,从而有效地改善系统性能。

关键词 色散补偿光纤; 色散; 非线性效应; 非零色散位移光纤; 光码分多址
中图分类号 TN 929.11 文献标识码 A

A Method of Control of Dispersion and Non-Linear Effect in OCDMA System

LI Yue-hui¹, AN Xiao-qiang²

(1. School of Mathematics and Computer Science, Xihua University Chengdu 610039; 2. South-West Institute of Technical Physics Chengdu 610054)

Abstract The dispersion and non-linear effect on performance of optical Code Division Multiple Access (CDMA) system based on strict optimal $(F, k, 1)$ optical orthogonal codes are analyzed. Numerical result shows that the dispersion and non-linear effect can deteriorate the system performance, so the technology of dispersion compensation is necessary. Different from the traditional schemes, a new scheme of using None Zero Dispersion Shift Fibre (NZ-DSF) and Dispersion Compensate Fibre (DCF) is proposed to weak the non-linear effect when compensating the dispersion. Therefore the performance of system can be enhanced by the NZ-DSF.

Key words DCF; dispersion; nonlinear effect; NZ-DSF; optical code division multiple access

光码分多址(OCDMA)技术以其宽带、高速、抗干扰和保密等优势,已成功地 在无线通信领域得到广泛的应用。随着光通信系统比特速率由2.5 Gb/s发展到100 Gb/s甚至更高,色散和非线性效应已成为普通单模光纤传输系统的重要限制因素^[1-3]。为降低系统信道的色散和非线性效应带来的码间干扰,本文在引入色散和非线性因素的前提下,通过对非线性薛定谔方程求解来分析基于严格最佳 $(F, k, 1)$ 光正交码的单极性光CDMA系统的误码率性能,并通过系统仿真,提出采用非零色散位移光纤(None Zero Dispersion Shift Fibre, NZ-DSF)搭配色散补偿光纤(Dispersion Compensate Fibre, DCF),可以大大提高系统传输性能。

1 单极性光CDMA系统性能分析

在使用普通单模光纤(SMF)的单极性光CDMA系统中,基于对单模光纤中色散和非线性效应的理

论分析^[4],考虑到单极性编码系统中光脉冲工作在皮秒甚至以上量级,此时高阶色散效应不可忽略。因此,在对非线性薛定谔方程分析时引入高阶色散参量:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha A}{2} = i \gamma |A|^2 A + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i \frac{\beta_4}{24} \frac{\partial^4 A}{\partial t^4} - a_1 \frac{\partial}{\partial t} (|A|^2 A) - a_2 A \frac{\partial |A|^2}{\partial t} \quad (1)$$

式中 A 是沿光纤传播方向的慢变振幅,本文采用高斯模式:

$$A(0, T) = A_0 \exp \left[-\frac{1+iC}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中 C 为啁啾参量; T 为随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度; T_0 为初始脉冲半宽(在脉冲强度 $1/e$ 处); β_n 为 n 阶的色散参量; γ 、 a_1 、 a_2 分别表示自相位调制、自陡峭和自频移。

收稿日期: 2007-03-26

作者简介: 李月卉(1971-),女,硕士,讲师,主要从事计算机及光纤通信方面的研究。

假设系统采用严格最佳 $(F, k, 1)$ 光正交码^[5]作为地址码, 系统为码片异步, 接收端收到的光子数为条件泊松变量 γ^1 (1代表期望用户)。定义干扰模式矢量 $\mathbf{K} = (k_1, k_2, \dots, k_k)$, k_i 为第 i 个脉冲位置上被干扰用户脉冲所击中。当系统有 N 个同时用户时, 定义 I_1 为 $N-1$ 个用户对期望用户(用户1)的多址干扰总和, 则 I_1 的概率密度函数为:

$$P_{I_1}^{(1)}(I_1^{(1)}) = q^{N-1} \delta(I_1) + (M-1)pq^{N-2} [I_1] + \binom{N-1}{2} \times p^2 q^{N-3} F(I_1) + \sum_{i=3}^{N-1} \binom{N-1}{i} p^i q^{N-1-i} G\left(\frac{i}{2}, \frac{i}{12}\right) \quad (3)$$

式中 碰撞概率 $p = \frac{K^2}{F}$, $q = 1 - \frac{K^2}{F}$, 且 $p+q=1$;
 $[I_1] = \begin{cases} 1 & 1 < I_1 < 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases}; F(I_1) = \begin{cases} 1 - |I_1 - 1| & 1 < I_1 < 2 \\ 0 & \text{else} \end{cases};$
 $G\left(\frac{i}{2}, \frac{i}{12}\right)$ 代表均值为 $i/2$, 方差为 $i/12$ 的高斯分布;
 $\delta(x)$ 为 δ 函数。设 th 为判决门限, 由此得到理想情况下码片异步时系统误码率计算公式为:

$$P_e = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-1} \int_{th}^{\infty} \delta(I_1) dI_1 + (N-1) \times \frac{K^2}{2F} \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-2} \int_{th}^{\infty} [I_1] dI_1 + \binom{N-1}{2} \times \left(\frac{K^2}{F}\right)^2 \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-3} \int_{th}^{\infty} F(I_1) dI_1 + \sum_{i=3}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{K^2}{F}\right)^i \left(1 - \frac{K^2}{F}\right)^{N-1-i} Q\left(\frac{th - i/2}{\sqrt{i/12}}\right) \quad (4)$$

式中 $Q(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2/2} dx$

光脉冲沿单模光纤传输距离 Z 后, 脉冲展宽为:

$$T_{FWHM} = T_0 \left[\left(1 + \frac{1.471 D_z \lambda_0^2 C_p}{T_0^2}\right)^2 + \left(\frac{1.471 D_z \lambda_0^2}{T_0^2}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 T_0 表示光脉冲的初始宽度, 单位为 ps, 通常定义为半强度最大值(Full Width of Half Maximum, FWHM)的带宽; D 表示单模光纤的色散系数, D_z 的单位为 ps/nm; λ_0 为光脉冲的峰值波长, 单位为 μm ; C_p 表示光源的啁啾效应大小。

$$P_e = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{T_{FWHM} K^2}{F}\right)^{N-1} \int_{th}^{\infty} \delta(I_1) dI_1 + (N-1) \frac{T_{FWHM} K^2}{2F} \left(1 - \frac{T_{FWHM} K^2}{F}\right)^{N-2} \int_{th}^{\infty} [I_1] dI_1 + \binom{N-1}{2} \left(\frac{T_{FWHM} K^2}{F}\right)^2 \left(1 - \frac{T_{FWHM} K^2}{F}\right)^{N-3} \times \int_{th}^{\infty} F(I_1) dI_1 + \sum_{i=3}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{T_{FWHM} K^2}{F}\right)^i \times \left(1 - \frac{T_{FWHM} K^2}{F}\right)^{N-1-i} Q\left(\frac{th - i/2}{\sqrt{i/12}}\right) \quad (6)$$

式(6)为系统采用严格最佳 $(F, k, 1)$ 光正交码时, 光纤信道色散和非线性效应影响下的系统误码率公式。此时单个用户产生的多址干扰的概率相应增大为原来的 T_{FWHM} 倍。其中, $Q(x)$ 表达式同前。

2 数值分析

以下的分析和仿真均采用以无源星型耦合器为中心的非相干单极性OCDMA系统^[6], 光学编/解码器采用并行光纤延迟线结构, 用户地址码采用严格最佳 $(601, 4, 1)$ 光正交码, 接收机为雪崩探测器(APD), 分析中忽略系统插入损耗。设系统工作波长 λ_0 为 1 550 nm, 用户基带数字信号比特率为 150 Mb/s, 标准SMF单模光纤, 色散系数为 15 ps/nm·km, 衰减系数 $\alpha = 0.2$ dB/km, 由公式:

$$\Phi(F, K, \lambda) = \frac{(F-1)(F-2)\cdots(F-\lambda)}{K(K-1)\cdots(K-\lambda)}$$

可得此时系统最大活动用户数 $N=50$, 光码片速率为 90.15 Gb/s, 脉冲宽度 $T_0=11.1$ ps。

为减小传输信道的群速度色散对OCDMA系统BER性能的影响, 可采用DCF在线补偿技术^[7], 利用基模色散补偿光纤是较理想的色散及色散斜率补偿办法, 但同时也会带来较大的非线性效应, 其中一些非线性效应在零色散波长处尤为严重。G.655光纤为非零色散位移光纤, 在 1 550 nm 波长具有最小衰减系数和合适的低色散(非零色散), 不仅克服了SMF在 1 550 nm 波长的高色散值对传输系统的限制, 也克服了G.653光纤因在 1 550 nm 波长零色散造成的非线性效应的缺点。因此本文采用NZ-DSF搭配DCF方法, 根据系统传输信道的具体色散特性与发射机和接收机间的通信距离, 确定色散补偿光纤的长度, 实现信道色散的在线补偿。具体色散补偿方案如图1所示。

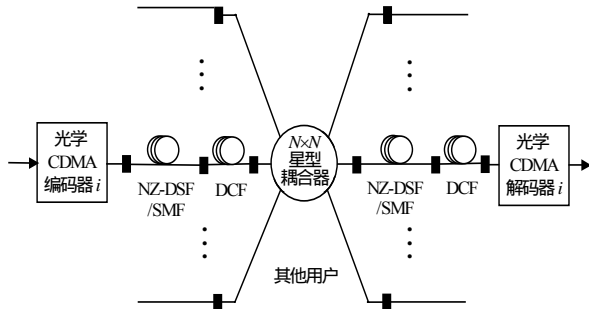


图1 采用NZ-DSF+DCF色散在线补偿技术的OCDMA系统结构配置

本方案中系统参数设置:DCF的色散系数 $D = -170 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$, 衰减系数为 $\alpha = 0.5 \text{ dB/km}$; NZ-DSF色散系数 $D = 3.5 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$ 。当发射光功率为 10 dBm , 传输 15 km 后, 色散补偿前后解码器端输出序列如图 2 所示。两者相差约 7 dB 。由此可见, 采用 NZ-DSF+DC 的单极性 OCDMA 系统, 不仅输出信号序列更准确, 而且对系统发射光信号功率的要求也比采用普通单模光纤的系统低。

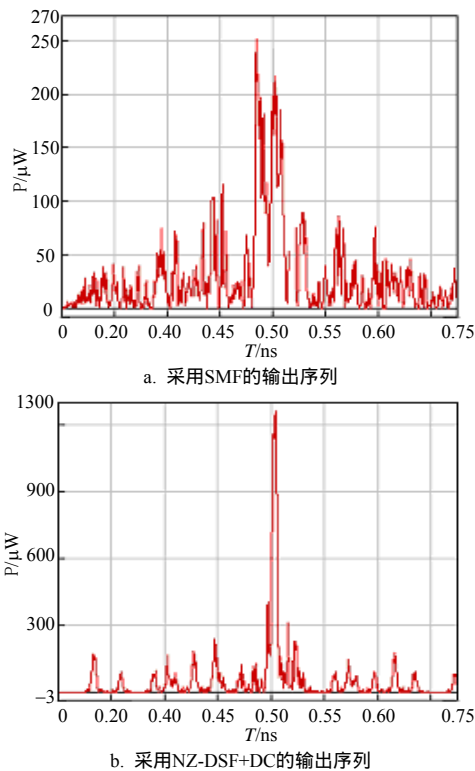


图2 采用不同系统时解码器端的输出序列

图3为采用不同方案时, 系统中同时活动用户数 $N = 50$ 时的系统误码率 BER 与传输距离 z 的关系(系统其他参数设置、编解码方案等同前)。由图3可见, 在保证误码率为 10^{-9} 前提下, 采用普通 SMF 的系统传输距离约为 2.8 km , 采用 NZ-SDF+DCF 系统的传

输距离约为 8.2 km 。

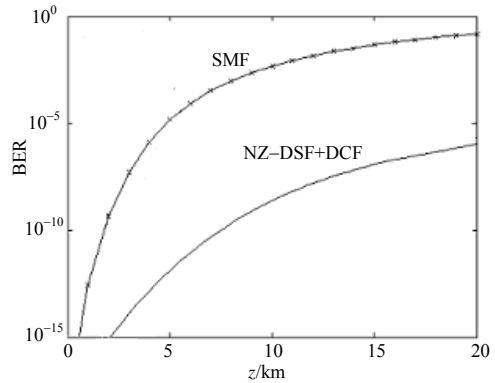


图3 采用不同方案的误码率-传输距离关系

图4列出了采用不同方案时, 传输距离 15 km 时的系统误码率-同时用户数 (N) 关系曲线(系统其他参数设置、编解码方案等同前)。在保证系统误码率为 10^{-9} 前提下, 采用 SMF 的系统同时用户数 N 仅为 8 , 而采用 NZ-DSF+DCF 的系统, 同时用户数达到 27 , 系统容量有较大提高。

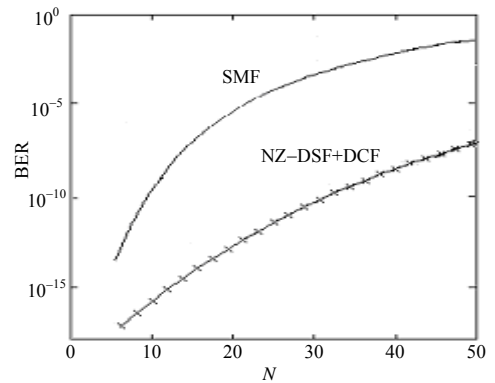


图4 采用不同方案的系统误码率-同时用户数(N)关系

3 结束语

在超过 40 Gb/s 的单极性光 CDMA 系统中, 对色散进行补偿必不可少, 此外, 随着输入光功率的加大, 非线性效应的影响迅速增大, 尤其是在光纤零色散点处。因此, 本文提出采用 NZ-DSF 搭配 DCF 的方法, 来进行色散补偿的同时, 尽可能弱化非线性效应的影响。数值结果表明, 用 NZ-DSF 搭配 DCF 的单极性光 CDMA 系统性能, 比采用普通 SMF 系统性能有较大改善, 若采用负色散光纤, 将会有更多优势。当前负色散光纤已有成熟的商用产品^[8], 对此也有进一步的理论和实验探索^[9-10]。

本文的研究得到了西华大学青年基金(Q0522609 142817)的资助, 在此表示感谢。

(下转第914页)

条件和处理方式下, AF模式相对于DF模式有较大的优势, 虽然两者有相同的分集增益, AF模式阵列增益大些, 但是AF的灵活性较低, DF有更高的灵活性。

参 考 文 献

- [1] KARAMMI E, SHIVA M, ABTAHI M. Coded CDMA in cooperative channels[C]//Vehicular Technology Conference, [S. l.]: IEEE Press, 2005: 310-313.
- [2] VAN R P, LOTTER M P, VAN W D. Space-time processing for CDMA mobile communications[M]. Boston, London: Kluwer Academic Pub., 2000.
- [3] SENDONARIS A, ERIKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity. Part I: System description communications[J]. IEEE Transactions on Commun., 2003, 51(11): 1927-1938.
- [4] SENDONARIS A, ERIKIP E, AAZHANG B. User cooperation diversity. Part II: Implementation aspects and performance analysis communications[J]. IEEE Transactions on, 2003, 51(11): 1939-1948.
- [5] HUNTER T E, NOSRATINIA A. Diversity through coded cooperation. Wireless Communications[J]. IEEE Transactions on Commun., 2006, 5 (2): 283-289.

- [6] LANEMAN J N, WORNELLI G W, TSE D N C. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks[C]//Information Theory. Washington DC: [s. n.], 2001. Proceedings. 2001 IEEE International Symposium, 2001: 294-298.
- [7] HARMMERSTROM I, KUHN M, WITTNEBEN A. Impact of relay gain allocation on the performance of cooperative diversity networks[C]//Vehicular Technology Conference. Los Angeles: IEEE Press, 2004, 3: 1815-1819.
- [8] PAUL A A, MOSTAFA K. Exact symbol error probability of a cooperative network in a Rayleigh-fading environment[J]. IEEE Trans. Commun. 2004, 3(5): 1416-1421.
- [9] SIMON M K, ALOUINI M S. Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis[M]. New York: Wiley, 2000.
- [10] LOSKOT P, BEAULIEU, C N. Average error rate evaluation of digital modulations in slow fading by prony approximation. Communications[C]//2004 IEEE International Conference, Paris, France: IEEE Press, 2004: 3353-3357.

编辑 张俊

(上接第902页)

参 考 文 献

- [1] 石 颖. 高速光通信系统中色散监测和动态色散补偿技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] KIECHBUSCH S, FERBER S, ROSENFELDT H, et al. Automatic PMD compencator in a 160 Gb/s OTDM transmission over deployed fiber using RZ-DPSK modulation format[J]. IEEE J. Lightwave Technol, 2005, 23(1): 165-171.
- [3] LIU J H, XU R F. Laser devices and techniques[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [4] GOVIND P A. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. 贾东方, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [5] 安晓强, 张宗富, 邱 昆. 一种严格最佳 $(v, k, 1)$ 光正交码的设计方法[J]. 中国应用光学. 2006, 27(4): 268-273.
- [6] AN Xiao-qiang, QIU Kun. Influence of single-mode fiber dispersion and pulse linear chirp on direct-detection optical

CDMA systems[J]. J Opt. Commun., 2006, 27(1): 20-25.

- [7] 原 荣. 色散补偿技术及其进展[J]. 光通信技术, 2002, 26(5): 4-9.
- [8] TOMKOS I, HALLOED B, ROUDAS I, et al. 10 Gb/s transmission of 1.55 μm directly modulated signal over 100 km of negative dispersion fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13: 735-737.
- [9] CHUNG H S, CHUNG Y C. Directly modulated CWDM/DWDM system² sing negative dispersion fiber for metro network application[J]. Optics Communications, 2005, 24(5): 171-176.
- [10] XIAO Chun-xian, GUO Ying, DAI Ju-feng. Dynamic routing and wave length assignment in all optical network [J]. Journal of Optoelectronics Laser(光电子·激光), 2005, 16(9): 1062-1066.

编辑 张俊