

doi: 10.3788/lop47.050602

三阶色散效应对光码分多址系统误码率的影响

林传亿 余向阳

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要 光码分多址(OCDMA)系统的误码率是评价系统性能的重要指标, 由于色散和非线性效应会导致超短光脉冲在光纤传输过程中脉宽的展宽, 进而影响 OCDMA 系统的误码率。在基于理想情况的 OCDMA 系统误码率定义的基础上, 研究了三阶色散和三阶非线性效应对系统误码率的影响, 进一步分析了有硬限幅器和二维 OCDMA 系统的误码率。结果表明, 三阶色散和三阶非线性效应都会导致 OCDMA 系统误码率的增大, 但三阶非线性效应对系统性能影响没有三阶色散效应明显; 在系统参数相同基础上, 接收端引入光硬限幅器和系统采用二维编码均可优化系统性能。

关键词 光通信; 光码分多址; 三阶色散; 误码率

中图分类号 TN929.11 OCIS 060.4510 060.2400 文献标识码 A

Effects of Third Order Dispersion on the BER of OCDMA System

Lin Chuanyi Yu Xiangyang

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University,
Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract The bit error rate (BER) of optical code-division multiple-access (OCDMA) system is an important index of evaluating system performance because it can reflect the premise of considering dispersion and nonlinear effect broadening in single-mode fibers. Based on the definition of BER in ideal condition, the influences of third-order dispersion (TOD) and third-order nonlinear on the BER are introduced and the BER of OCDMA system with optical hard-limiter (OHL) and 2D OCDMA system is analysed. The results show that BER will increase under the action of TOD and third-order nonlinear which has lower effect on system performance than TOD, and at the same time the performance of transmission system with OHL and using two-dimensional code will be improved under the same fiber condition.

Key words optical communications; optical code-division multiple-access; third-order dispersion; bit error rate

1 引言

基于光正交码的光码分多址(OCDMA)通信系统是未来高速全光通信网的重要方案之一, 在 20 世纪 80 年代提出以后^[1,2], 就一直引起了广泛的关注。目前 OCDMA 系统性能的研究大多假定光纤中传输的脉冲是理想的, 并且光纤信道也是理想的, 也就是忽略了色散和非线性效应^[3-5]。但由于现代光通信系统的信息传输速率不断提高, 光纤信道的影响变得不可忽略^[6], 同时, 信号光脉冲的宽度越来越短, 超短脉冲在光纤传输过程中由于色散和非线性效应会引起脉宽的展宽, 而脉冲展宽又会导致多用户码间干扰的增加,

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(10574166)和广东省自然科学基金(8151027501000062)资助课题。

作者简介: 林传亿(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事光传输和光编码等方面的研究。E-mail: linchy@mail2.sysu.edu.cn

导师简介: 余向阳(1965—), 男, 博士, 副教授, 主要从事量子光学、超快光电子学和光信息处理等方面的研究。

E-mail: cesyxy@mail.sysu.edu.cn (通信联系人)

从而导致系统误码率(BER)增大、性能劣化^[7]。因此综合考虑色散和非线性效应、多址干扰等因素对系统误码性能的影响,对光正交码的设计和光纤 OCDMA 系统的分析与设计都有着重要意义。目前,已有一些考虑到光纤色散和非线性效应对 OCDMA 系统误码性能影响的工作^[8~10]。本文在基于理想情况的 OCDMA 系统误码率定义和计算公式的基础上,修正了由于考虑三阶色散(TOD)和三阶非线性效应后的误码率计算公式,由此详细研究了三阶色散和三阶非线性效应对系统误码率的影响。在此基础上进行了引入光硬限幅器(OHL)系统和无光硬限幅器系统性能比较^[11],以及一维码和二维码误码性能的比较。

2 理论模型

OCDMA 系统采用的光地址序列码是一组 (0,1) 序列,其主要的设计参数为 $(F, K, \lambda_a, \lambda_c)$, F 为码字长度,即(0,1)序列的切普总数; K 为码字重量,即(0,1)序列中“1”的数目; λ_a 和 λ_c 分别为自相关和互相关限制。已提出了多种 OCDMA 光地址码集,如基本素数码(OPC)、修正素数码(MPC)、扩展素数码(EPC)、光正交码(OOC)、跳频码(FHC)、变重码(WVC)、二维矩阵码等^[12]。通常 OOC 并不是严格的正交序列,由于地址码的准正交性($\lambda_a = \lambda_c = 1$),则必然存在不同用户的光信号之间的多址干扰,最终导致系统误码。

OCDMA 系统的误码率公式可以由多址干扰概率密度函数来推求。由干扰项的概率密度函数推出理想情况下切普同步系统的误码率上限^[13]

$$N_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{i=N_{\text{th}}}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{K^2}{2F} \right)^i \left(1 - \frac{K^2}{2F} \right)^{N-1-i}, \quad (1)$$

式中 N 为系统用户数, N_{th} 为判决门限。

若在接收器上引入一个光硬限幅器,同样可由干扰项的概率密度函数求出理想情况下切普同步系统的误码率上限^[14]

$$N_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^K (-1)^i \binom{K}{i} \left(1 - \frac{Ki}{2F} \right)^{N-1}. \quad (2)$$

由一维 OCMDA 的误码率公式可导出二维 Wavelength/Time MPR 码系统误码率的修正公式^[15]

$$N_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{i=N_{\text{th}}}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{RW_p^2}{2L_T} \right)^i \left(1 - \frac{RW_p^2}{2L_T} \right)^{N-1-i}, \quad (3)$$

式中 R 为光地址码矩阵的行数, L_T 为列数, $W_p = W/R$ 是单位行数上的码重。

在 OCDMA 系统中,光脉冲的光纤中传输的规律依然可用非线性薛定谔方程描述^[16]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2} A - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + i\gamma A |A|^2, \quad (4)$$

式中 $A(z, T)$ 为光脉冲的慢变振幅包络, z 为沿光纤传播的距离, $T = t - \beta_1 z$, $\beta_1 = 1/v_g$, v_g 为群速率; β_1 , β_2 和 β_3 分别为光纤的一阶、二阶和三阶色散常数,其中, β_2 又称群速度色散; α 为吸收系数,称为光纤损耗; $\gamma = n_2 \omega_0 / (cA_{\text{eff}})$ 为三阶非线性折射率系数, n_2 为三阶非线性折射率, ω_0 为光脉冲的载波中心频率, A_{eff} 为三阶非线性下的有效纤芯截面。

OCDMA 系统通常采用色散位移光纤,它不仅能降低光纤损耗,而且能使皮秒量级光脉冲的二阶色散效应降低到近似为零,这样就需要考虑三阶色散效应。当脉冲峰值功率较大,通常还需考虑三阶非线性效应,即自相位调制。当考虑三阶色散和三阶非线性效应时,由(4)式可求得在 L 处脉冲展宽因子^[17]

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left\{ 1 + \left[\frac{1}{4} + \frac{2}{\sqrt{3}} \phi_{\max}^2 + \left(\frac{6}{25\sqrt{5}} - \frac{2}{27} \right) \phi_{\max}^4 \right] \frac{L^2}{L_D^2} \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

式中 $\sigma = [\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2]^{1/2}$ 为均方根脉宽, σ_0 为初始脉冲均方根宽度, $\sigma_0 = T_0 / \sqrt{2}$, T_0 为初始脉冲宽度(在光强度峰值的 $1/e$ 处), $\phi_{\max} = L_{\text{eff}} / L_{\text{NL}} = \gamma P_0 L_{\text{eff}}$ 为自相位调制所致的最大相移, $L_{\text{NL}} = 1 / (\gamma P_0)$ 为非线性长度, P_0 为峰值功率, $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$ 为有限长度(当光纤无损耗即 $\alpha = 0$ 时, $L_{\text{eff}} = L$), $L_D' = T_0^3 / |\beta_3|$ 为三阶色散长度。

目前关于 OCDMA 系统性能的研究大多认为光纤信道是理想的,但在实际系统中,光纤传输不可能是理想的。在 OCDMA 系统中,编码后码元的传输速率非常高,光脉冲通常也是工作在皮秒量级甚至飞秒量级,因此光纤信道对光脉冲的影响以及光脉冲之间相互作用的影响就不可忽略。这样,综合考虑光纤色散和非线性效应因素时,(1)式的误码率公式可修正为^[10]

$$N_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{i=N_{\text{th}}}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{bK^2}{2F} \right)^i \left(1 - \frac{bK^2}{2F} \right)^{N-1-i}, \quad (6)$$

式中 $b = \sigma / \sigma_0$ 为(5)式所表达的脉冲展宽因子。同理,引入光硬限幅器的系统误码率(2)式可修正为

$$N_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^K (-1)^i \binom{K}{i} \left(1 - \frac{bKi}{2F} \right)^{N-1}, \quad (7)$$

展宽因子对二维 OCDMA 系统的误码率(3)式可修正为

$$N_{\text{BER}} = \frac{1}{2} \sum_{i=N_{\text{th}}}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{bRW_p^2}{2L_T} \right)^i \left(1 - \frac{bRW_p^2}{2L_T} \right)^{N-1-i}. \quad (8)$$

3 数值计算结果与分析

二阶色散对一维 OCDMA 系统误码率的影响在文献[10]已有研究。这里主要研究三阶色散对一维 OCDMA 系统误码率的影响以及三阶色散对存在硬限幅器系统和二维 OCDMA 系统误码率的影响。计算针对光正交码,计算时各物理量的单位为:传输距离为 km,时间为 ps,功率为 W,二阶色散为 $\text{ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$,三阶色散为 $\text{ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$,三阶非线性折射率系数为 $\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

3.1 三阶色散参数对 OCDMA 系统误码率的影响

图 1 显示较低峰值功率时三阶色散效应对系统误码率的影响。此时可忽略三阶非线性效应,即 $\gamma = 0$,在本文的理论模型中,功率大小不影响误码率。计算时初始脉冲为高斯型,脉宽为 $T_0 = 1$ 。图 1(a)为 $F = 2000$, $K = 7$, $N = 10$ 和 $N_{\text{th}} = 5$ 时三阶色散对信号传输不同距离时误码率的距离曲线。从图中可知,当传输距离相同时,三阶色散值 β_3 越大,系统误码率越高,对系统性能的影响也越大。例如传输距离为 50, $\beta_3 = 0.05$ 时,系统误码率为 1.7×10^{-7} , $\beta_3 = 0.10$ 时,系统误码率增大到 2.2×10^{-6} ; $\beta_3 = 0.20$ 时,系统误码率则高达 4.8×10^{-5} 。当三阶色散值 β_3 一定时,随着传输距离增加,系统误码率会逐渐升高。例如三阶色散值 $\beta_3 = 0.10$ 且传输距离为 10 时,系统误码率为 10^{-8} ,传输距离为 40 时,系统误码率为 10^{-6} ,而传输距离为 100 时,系统误码率则高达 10^{-3} 。由此可见,三阶色散效应会引起一维 OCDMA 系统性能的劣化。

图 1(b)为 $F = 2000$, $K = 7$, $L = 20$ 和 $N_{\text{th}} = 5$ 时三阶色散对接入不同用户后误码率的用户数曲线。从图中可知,当三阶色散值 β_3 一定时,随着接入用户的增加,系统误码率会逐渐升高。当系统误码率上限一

定时，三阶色散 β_3 越大，同时接入的用户数就越少。例如系统误码率上限为 10^{-6} ， $\beta_3=0.05$ 时，最多可同时接入用户数 23 个； $\beta_3=0.10$ 时，最多可同时接入用户数 18 个，而 $\beta_3=0.20$ 时，最多只能同时接入 14 个用户。计算结果表明在设定码长、码重和阈值的前提下，三阶色散 β_3 越大的系统，为了能满足系统误码率的要求，则只能接入少的用户。

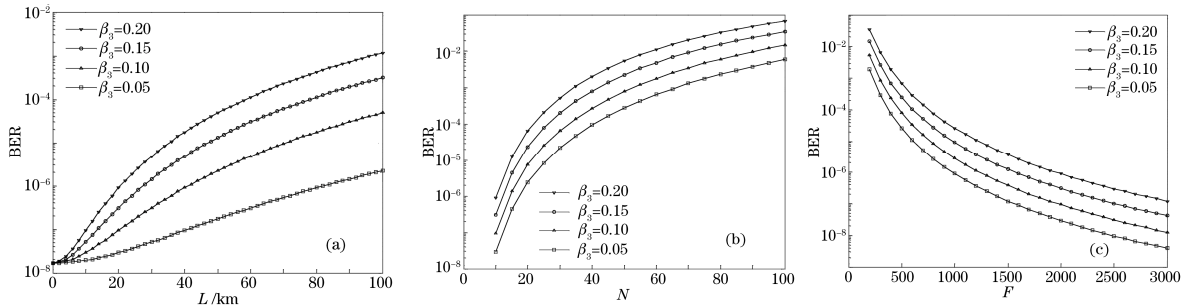


图 1 三阶色散参数下的误码率变化与距离 (a)、用户数 (b) 和码长 (c) 变化的曲线
Fig.1 BER changing with different β_3 and distance (a), user number (b) and code length (c) cuures

图 1 (c) 为 $K = 7$ ， $N = 10$ ， $L = 20$ 和 $N_{th} = 5$ 时误码率的码长曲线。从图中可知，当三阶色散值 β_3 一定时，随着码字码长的增加，系统误码率会逐渐降低；当系统误码率一定时，三阶色散 β_3 越大，系统则需要更长的码字。例如系统误码率上限为 10^{-6} ， $\beta_3=0.05$ 时，需要的码长至少为 1000； $\beta_3=0.10$ 时，最需要的码长至少为 1250； $\beta_3=0.20$ 时，需要的码长则至少为 1900。计算结果表明三阶色散 β_3 越大的系统，则要选择码长越长的码字来传输，才能满足系统误码率的要求。由此可见，在设计 OCDMA 系统时，需要依据同时接入的用户数、具体的光纤参数和传输距离，由误码率与码长关系设计出适合实际系统传输的码字。

3.2 三阶非线性效应对 OCDMA 系统误码率的影响

图 2 为在较高峰值功率时考虑三阶非线性效应的情况下，三阶色散效应对系统误码率的影响。计算参数为： $F = 2000$ ； $K = 7$ ； $N = 10$ 、 $N_{th} = 5$ 和 $P_0 = 0.01$ 。

图 2(a) 为 $\gamma = 3$ 时不同三阶色散情况下系统误码率与距离的曲线。从图中可知，当传输距离相同时，三阶色散值 β_3 越大，系统误码率越高，对系统性能的影响也越大；当三阶色散值 β_3 一定时，随着传输距离的增加，系统误码率不断上升，误码率的变化率却在不断减小。在传输距离和三阶色散值 β_3 相同情况下，与不考虑三阶非线性效应时图 1(a) 的情形相比较可以看出，三阶非线性效应会使 OCDMA 系统性能劣化更加严重。

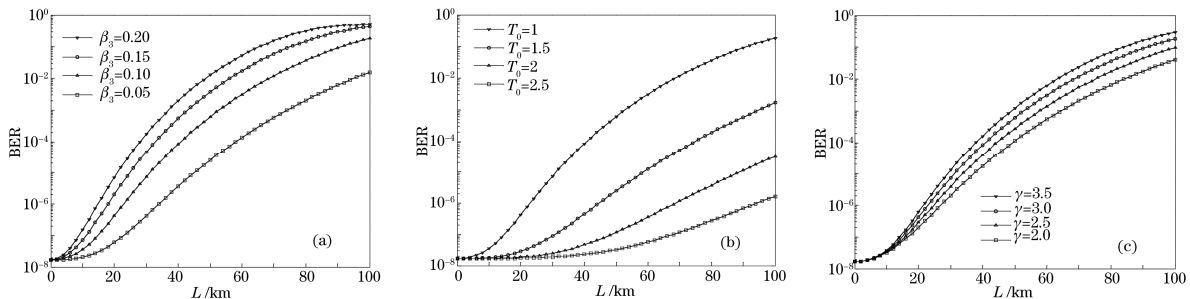


图 2 考虑三阶非线性效应时三阶色散(a), 初始脉宽(b)和折射率系数(c)对误码率的影响
Fig.2 BER changing with different β_3 (a), T_0 (b) and L (c) considering third-order nonlinear effect

图 2(b) 为在不同初始脉冲宽度 T_0 情况下系统误码率与距离曲线。从图中可知，随着脉宽的增大，系统的误码率减小，这是由于初始脉冲宽度越大，由三阶色散和非线性效应所引起的脉冲展宽越小，系统性能

变化也越小。由此可见,在相同条件下,存在三阶色散和非线性效应时所使用的脉宽越小,OCDMA系统性能也劣化的越严重。

图2(c)为在不同非线性参数 γ 情况下系统误码率与距离曲线。从图中可知,随着非线性效应的增强,系统的误码率也在增大,如 γ 取值均匀增加,系统误码率基本上也均匀升高。与图2(a)相比,图2(c)的非线性效应对误码率的影响并没有三阶色散效应的显著。

3.3 光硬限幅器 OCDMA 系统和二维 OCDMA 系统

图3为引入光硬限幅器的情况下,存在三阶色散情况时传输不同距离后误码率的距离曲线。计算参数为: $F=2000$, $K=5$, $N=10$ 和 $N_{th}=5$ 。从图中可知,在三阶色散参数相同的情况下,当传输距离为零时,引入光硬限幅器 OCDMA 系统误码性能要比无光硬限幅器 OCDMA 系统误码性能改善 2~3 个数量级;随着传输距离的增加,两种系统误码性能都有所下降,但引入光硬限幅器 OCDMA 系统性能仍明显优于无光硬限幅器 OCDMA 系统。由此可见,接收端引入光硬限幅器可以优化系统性能。

图4为二维 OCDMA 系统在考虑三阶色散情况下误码率的距离曲线。计算参数为: $F=2000$, $K=7$, $N=10$, $N_{th}=5$ 和占用频率片数 $R=5$ 。与图2(a)相比可知,在三阶色散与非线性效应相同的情况下,当传输距离为零时,二维码系统性能高于一维码系统性能 3 个数量级;随着传输距离的增加,两个系统误码性能都有所下降,但二维 OCDMA 系统受三阶色散与非线性效应影响更小。例如 $\beta_3=0.10$,传输距离为 0 时,二维系统误码率为 1.9×10^{-13} ,一维系统误码率为 1.7×10^{-8} ;传输距离为 50 时,二维系统误码率为 9.5×10^{-10} ,一维系统误码率则高达 6.1×10^{-4} 。由此可见,系统采用二维编码可以优化系统性能。

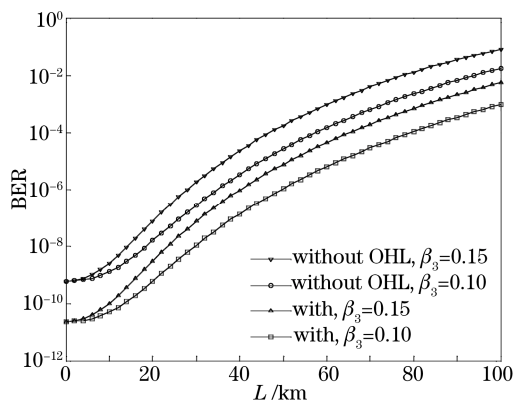


图3 有无光硬限幅器系统比较
Fig.3 System comparison of with and without OHL

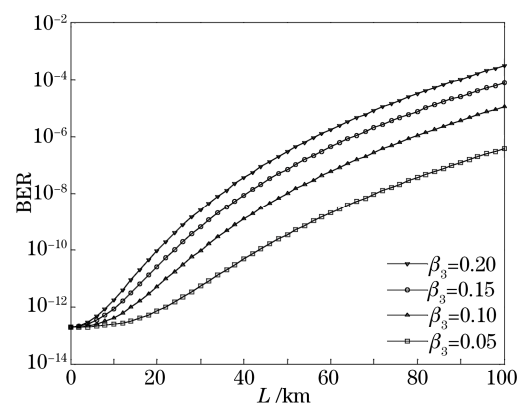


图4 三阶色散参数下的二维系统误码率变化
Fig.4 BER of two-dimensional system changing with different β_3

4 结 论

在实际传输条件下,考虑由三阶色散和三阶非线性效应作用下,由脉冲展宽因子修正后的系统误码率的公式,进行了各种参数条件下的误码率计算。结果表明:1) 三阶色散效应会导致一维 OCDMA 系统性能劣化;2) 在满足系统误码率指标要求条件下,可以根据实际用户数和光纤参数设计出最适合系统传输的码字;3) 当三阶非线性效应共同作用时,两者都会引起 OCDMA 系统性能劣化,但三阶非线性效应对系统性能影响没有三阶色散效应明显;4) 接收端引入光硬限幅器和系统采用二维编码均可优化系统性能。

参 考 文 献

- 1 P. A. Davies, A. A. Shaar. Asynchronous multiplexing for an optical-fiber local area network[J]. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(10):

- 390~392
- 2 J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks - Part I: Fundamental principles[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 824~833
 - 3 Wang Wenrui, Yu Jinlong, Fu Xiaomei *et al.*. Study on scheme realizing novel multi-rate optical code-division multiple-access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1303~1307
王文睿, 于晋龙, 付晓梅 等. 新型多速率光码分多址实现方案的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1303~1307
 - 4 Zhu Yingxun, Wang Rong, Ding Xiaoguang *et al.*. Performance analysis of temporal phase optical code-division multiple access system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1874~1882
朱英勋, 王 荣, 丁晓光 等. 时域相位光码分多址系统性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1874~1882
 - 5 Ding Meiling, Chen Kangsheng. Novel frequency-hop optical code division multiple access based on quadratic congruence-hop codes[J]. *Chinese J. Lasers*. 2008, **36**(5): 879~883
丁美玲, 陈抗生. 基于二次全等跳频码的跳频光码分多址系统[J]. *中国激光*, 2008, **36**(5): 879~883
 - 6 X. S. Yao, J. Feinberg, R. Logan *et al.*. Limitations on peak pulse power, pulse width, and coding mask misalignment in a fiber-optic code division multiple access system[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(5~6): 836~846
 - 7 F. R. K. Chung, J. A. Salehi, V. K. Wei. Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications[J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1989, **35**(3): 595~604
 - 8 Hou Fenfei, Sun Xiaohan. Impact of dispersion on the performance of optical CDMA transmission system[J]. *J. Southeast University (Nat. Sci. Ed.)*, 2007, **37**(1): 18~21
侯奋飞, 孙小菡. 色散对光CDMA传输系统性能的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2007, **37**(1): 18~21
 - 9 Wu Chen, Shen Chengbin, Ji Jianhua *at el.*. Impact of fiber's dispersion on BER of FFG-OCDMA systems[J]. *J. Optoelectronics-Laser*, 2002, **13**(12): 1252~1255
吴 琛, 沈成彬, 吉建华 等. 光纤色散对FFH-OCDMA系统误码率的影响[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(12): 1252~1255
 - 10 Duan Wei. Study on Effect of Dispersion and Nonlinearity on the BER of OCDMA System[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006
段 巍. 色散和非线性对OCDMA系统误码率影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006
 - 11 T. Ohtsuki. Channel interference cancellation using electrooptic switch and optical hardlimiters for direct-detection optical CDMA systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(4): 520~526
 - 12 Li Chuanqi, Li Xiaobin. Optical Fiber Communication OCDMA System[M]. Beijing: Science Press, 2008
李传起, 李晓滨. 光纤通信OCDMA系统[M]. 北京: 科学出版社, 2008
 - 13 J. A. Salehi, C. A. Brackett. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-Part II: Systems performance analysis[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1989, **37**(8): 834~842
 - 14 M. Azizoglu, J. A. Salehi, Y. Li. Optical CDMA via temporal codes[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **40**(7): 1162~1170
 - 15 E. S. Shivaleela, A. Selvarajan, T. Srinivas. Two-dimensional optical orthogonal codes for fiber-optic CDMA Networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(2): 647~654
 - 16 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition[M]. Singapore: Elsevier Pte Ltd., 2009. 25~50
 - 17 M. J. Potasek, Govind P. Agrawal. Analytic and numerical study of pulse broadening in nonlinear dispersive optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(2): 205~211