

多噪声背景下光码分多址多用户干扰的抑制

李晓滨¹ 李传起²

(¹ 深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060; ² 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044)

摘要 针对光码分多址(OCDMA)的多用户干扰问题,研究采用 APD 光电检测器的系统中存在多种噪声情况下,基于最大值判决的光码分多址并行干扰抑制方法的多用户干扰抑制效果。阐述了其工作原理,即在发送端对比特“0”和比特“1”分别使用一个地址码和它的移位变形进行映射,以避免发送比特“0”时无光脉冲通过,实现并行干扰抑制;接收端判决电路采用最大值判决,以避免门限判决所引起的误判,进一步减小多用户干扰。系统采用光正交码作为地址码,分析推导了系统的误码率表达式。根据所得的误码率表达式,进行了数值仿真并与其他多用户干扰抑制方法进行比较。仿真结果表明,本方法对多用户干扰的抑制作用与系统用户数和码重有关;与引入双硬限幅器方法、多比特传输方法的多用户干扰抑制作用相比,抑制效果要优于多比特传输的方法;当接收功率较低时,该方法优于引入双硬限幅器的方法,因此可以有效的抑制多用户干扰。

关键词 光通信; 干扰抑制; 最大值判决; 光码分多址

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0174

Discussion on Multiple User Interference Suppressing Based on Maximal Value Decision for OCDMA System under Multiple Noise Existing Background

Li Xiaobin¹ Li Chuanqi²

¹ College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China
² College of Math and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract In term of the problem of multi-user interference existing in optical code division multiple access (OCDMA) system, a parallel interference suppressing method for OCDMA communication based on maximal value decision is examined, and the situation is that APD is adopted and multiple noises exist. The fundamental is stated, that is it avoids the case no optical pulse existing while bit 0 is transmitted by adopting a spread spectrum code and its shift as the address codes of bit 0 and bit 1, respectively; and maximal value decision instead of threshold decision is adopted as decision circuit. Optical orthogonal codes is applied as address codes, APD is used as opto-electro detector, and bit error probability of novel system is derived and analyzed. Simulations based on the expression are done and comparison with other multi-user interference suppressing methods is made. The results show that the effect of the method to suppress multiple access interference is changed with different number of system users and code weights; compared with other effective methods such as double hard-limiters method or multiple-bit transmitted method, the method is superior to multiple-bit transmitted method, it is also superior to double hard-limiters method in the case received power is low. So, the method can suppress multi-user interference effectively.

Key words optical communications; interference suppressing; maximal value decision; optical code division multiple access (OCDMA)

1 引 言

光码分多址(OCDMA)技术自 20 世纪 90 年代提出以来,一直是人们研究的热点。它所具有的能充分利用光纤带宽、软容量、异步接入等特点在高速局域

网、光接入网等方面越发引起人们浓厚的兴趣,被认为是光接入网甚至全光网络的理想方案之一^[1~3]。

目前 OCDMA 通信系统主要采用强度调制直接检测,地址码是单极性的、互相关约束不为“0”,存

基金项目: 深圳市科技计划(200730)、江苏省自然科学基金(BK2008437)和江苏省高校自然科学基金(07KJB510066)资助课题。

作者简介: 李晓滨(1966—),女,博士,副教授,主要从事移动通信、光纤通信等方面的研究。E-mail: lixbsz@126.com

在用户间的干扰即多用户干扰,多用户干扰是影响用户容量及通信质量的关键因素,因此如何减小多用户干扰是 OCDMA 通信的一个重要问题。

针对多用户干扰抑制问题,已提出的方法主要分为引入一个光硬限幅器的方法^[4]、引入两个光硬限幅器的方法^[5]、多比特传输的方法^[6]、并行干扰抑制的方法^[7]及多用户检测的方法^[8]。

在上述方法中,Ohtsuki. T^[5]已证明在理想情况下,和引入一个光硬限幅器相比,引入两个光硬限幅器可以具有更好的多用户干扰抑制作用;一种新的采用 PIN 光电检测器的并行干扰抑制方法^[9],从理论上证明了它对多用户干扰具有一定的抑制作用并比常规的并行干扰抑制方法具有更好的多用户干扰抑制效果;多用户检测是无线 CDMA 中的检测技术在 OCDMA 中的应用,在理论上对多用户干扰有一定的抑制作用,但每个接收机需要多个支路,使接收机结构复杂。

上述方法对多用户干扰的抑制作用都是在理想情况下进行研究的,而实际通信系统一般采用雪崩光电二极管(APD)作为光电检测器,系统中不仅存在多用户干扰,还存在热噪声、APD 光电检测器散粒噪声、背景光影响、表面漏电流、体漏电流等。多噪声背景下,上述方法的多用户干扰抑制效果与理想情况下相比会有所不同,需要进一步研究;并且无论是理想情况下还是多噪声背景下,关于三种方法,即引入两个硬限幅器方法、多比特传输方法及并行干扰抑制方法,哪种方法对多用户干扰的抑制作用最好未有研究见报,而要解决多用户干扰抑制问题

迫切需要研究目前各种多用户干扰抑制方法的应用环境及最优方法。

本文首先研究多噪声背景下基于最大值判决的新型并行干扰抑制方法的误码性能;在此基础上研究引入两个光硬限幅器方法、多比特传输方法及新型并行干扰抑制方法对多用户干扰的抑制效果。

2 多噪声背景下基于最大值判决的并行干扰抑制

2.1 系统结构

采用 APD 光电检测器基于最大值判决的并行干扰抑制系统如图 1 所示。系统通过在发送端,对输入数据比特“1”和比特“0”分别用同一光正交码及其一个移位变形来进行扩频,接收机也对比特“1”和比特“0”同时进行相关检测来实现并行干扰抑制。与其他并行干扰抑制方法不同的是,接收机采用两个并行支路来对比特“1”和“0”分别进行相关处理,取两个支路的最大输出值来判断是比特“1”还是比特“0”,避免了门限判决所存在的问题,即当多用户干扰引起的光强度累加超过判决门限时将引起的误判;同时该系统不仅适用于素数码还适用于光正交码。

在发送端,由于同一光正交码的不同移位变形的相关值为 1,不同光正交码的互相关值也为 1,这样存在着多用户干扰,但由于系统不存在发送比特为“0”时无光信号的情形,因此减小了多用户干扰对发送比特“0”时所造成的影响,从而减小了系统误码的概率。

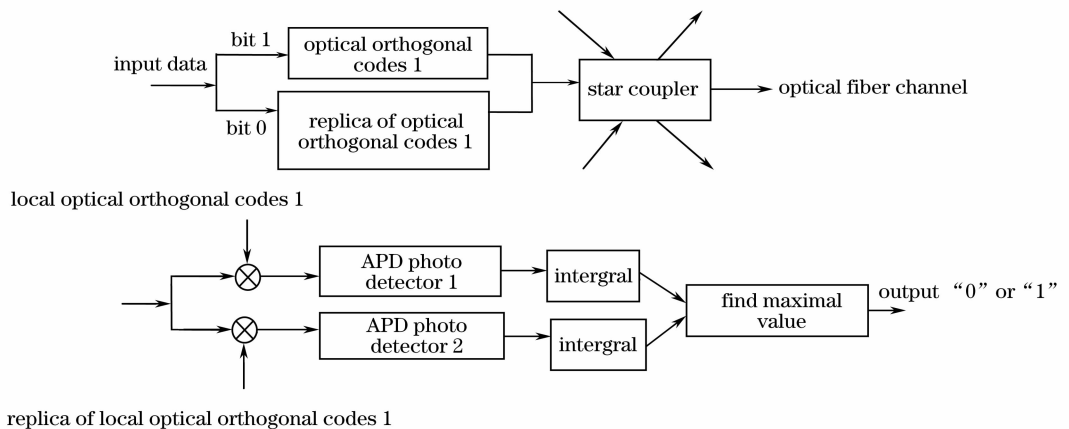


图 1 基于最大值判决的并行干扰抑制方法

Fig. 1 Parallel interference suppressing method based maximal value decision

每个接收机由两个并行支路构成,接收机接收到的信号同时送到支路 1 和支路 2。支路 1 使用本地产生的与发送端发送比特为“1”时所使用的相同

的光正交码进行相关运算来识别是否是发送给该接收机的数据,并对比特“1”进行识别;支路 2 使用本地产生的该光正交码的一个移位变形进行相关运

算,用以识别该接收机的比特“0”。接收机对比特“1”和比特“0”的识别采用最大峰值判决,这样就避免了门限判决所引起的误判。

当发送比特为“1”时,接收机支路 1 得到的是自相关值加上多用户干扰,支路 2 得到的是多用户干扰;同样当发送比特为“0”时,支路 2 得到的是自相关值加上干扰,支路 1 得到的是多用户干扰,由于自相关值加上多用户干扰一般要比纯多用户干扰大,且多用户干扰同时影响比特“1”和比特“0”,因此通过比较两个支路的输出值来识别发送端发送的是比特“0”还是比特“1”的正确概率会很大,从而减小了常规系统在发送比特“0”时多用户干扰所造成的误判。

2.2 误码性能分析

假定每个用户分配一个码长为 F 、码重为 W 的光正交码作为地址码。对于比特“0”和“1”,分别使用同一光正交码及其的一个移位变形进行映射。系统采用 APD 光电检测器,系统除存在 APD 光电检测器散粒噪声外,还存在热噪声、背景光、表面漏电流、体漏电流等。

接收端经过相关运算,期望接收机(假定为用户 1)的 APD 输出为

$$y(t) = \frac{1}{T_c} \int_0^T r(t) a^k(t) dt, \quad (1)$$

式中 $r(t)$ 为接收机的输入信号, $a^k(t)$ 是第 k 个用户的地址码。假定期望信号的光子到达率为 λ_s , $I^1(l^*)$ 是用户 1 接收正确比特时的多用户干扰, $I^1(l)$ 是用户 1 接收错误比特时的多用户干扰, APD 的输出假定为独立的高斯随机变量。因此,在 W 个码片时间内,对于期望用户的相关器,期望信号的光子及 $N-1$ 个用户的多用户干扰将通过 APD 光电检测器,期望用户地址码的另外 $F-W$ 个码片时隙将没有光子通过。对于 N 个同时接入用户的接收信号,整个 WN 个码片的累加输出中,有 $W + I^1(l^*)$ 个码片以 λ_s 光子入射率到达, $WN - [W + I^1(l^*)]$ 个码片以 λ_s/M_c 光子入射率到达, M_c 是消光比。当发送比特“1”时,期望用户接收机上面支路相关器输出的概率密度函数为:

$$PY_1[I^1(l^*)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp[-(y - \mu_1)^2 / (2\sigma_1^2)], \quad (2)$$

$$\mu_1 = GT_c \left\{ [W + I^1(l^*)] \lambda_s + \frac{[WN - W - I^1(l^*)] \lambda_s}{M_c} + F \frac{I_b}{e} \right\} + FT_c \frac{I_s}{e}, \quad (3)$$

$$\sigma_1^2 = G^2 F_c T_c \left\{ [W + I^1(l^*)] \lambda_s + [WN - W - I^1(l^*)] \frac{\lambda_s}{M_c} + F \frac{I_b}{e} \right\} + F \left(T_c \frac{I_s}{e} + \sigma_{th}^2 \right), \quad (4)$$

式中 G 是 APD 平均增益, I_s 和 I_b 是 APD 表面漏电流和体漏电流, e 是电荷, F_c 是过剩噪声因子

$$F_c = K_{eff} G + (2 - 1/G)(1 - K_{eff}), \quad (5)$$

式中 K_{eff} 为 APD 有效电离率, σ_{th}^2 为热噪声方差,表示为:

$$\sigma_{th}^2 = 2k_B T_r T_c / (e^2 R_L), \quad (6)$$

式中 T_r 为接收机噪声温度, R_L 为接收机负载电阻。

期望用户下面支路相关器的输出,只有 $I^1(l) = m$ 个传号以 λ_s 光子到达率入射, $WN - m$ 个空号以 λ_s/M_c 光子到达率入射。因此,该相关器输出的均值 μ_2 和方差 σ_2^2 为

$$\mu_2 = GT_c \left[m \lambda_s + \frac{(WN - m) \lambda_s}{M_c} + F \frac{I_b}{e} \right] + FT_c \frac{I_s}{e}, \quad (7)$$

$$\sigma_2^2 = G^2 F_c T_c \left[m \lambda_s + (WN - m) \frac{\lambda_s}{M_c} + F \frac{I_b}{e} \right] + F \left(T_c \frac{I_s}{e} + \sigma_{th}^2 \right). \quad (8)$$

下面支路相关器的概率密度函数为:

$$p_{Y_1}[I^1(l)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}} \exp[-(y - \mu_2)^2 / (2\sigma_2^2)]. \quad (9)$$

期望用户正确接收比特“1”其他用户产生多用户干扰 $I^1(l^*)$ 时的概率密度函数为^[10]

$$P_{I^1}(l^*) = \sum_{i=0}^{N-1} C_{N-1}^i \left(\frac{W^2}{2F} \right)^i \left(1 - \frac{W^2}{2F} \right)^{N-1-i} \delta(I^1 - i). \quad (10)$$

当多用户干扰 $I^1(l)$ 被期望用户接收时, $I^1(l)$ 不同于 $I^1(l^*)$, 它是由其他非期望用户产生的多用户干扰及期望用户接收正确比特支路产生的干扰之和,其概率密度函数为

$$P_{I^1}(l) = \sum_{i=0}^N C_N^i \left(\frac{W^2}{2F}\right)^i \left(1 - \frac{W^2}{2F}\right)^{N-i} \delta(I^1 - i). \quad (11)$$

当发送比特“1”时,如果 $Y(1) > Y(0)$ 则判决正确,否则判决错误;同样对于比特“0”被发送的情况。假设比特“1”和比特“0”等概率出现,即 $P(b_0^1 = 1) = P(b_0^1 = 0) = 1/2$, 易得 $P\{Y(1) > Y(0)/b_0^1 = 0\} = P\{Y(0) > Y(1)/b_0^1 = 1\}$, 则比特错误概率为

$$P_E = P\{Y(1) > Y(0)/b_0^1 = 0\}P(b_0^1 = 0) + P\{Y(0) > Y(1)/b_0^1 = 1\}P(b_0^1 = 1) = P\{Y(0) > Y(1)/b_0^1 = 1\}, \quad (12)$$

$$P_E = P\{Y(0) > Y(1)/b_0^1 = 1\} = P\{Y(0) > Y(1), I^1(l^*) = m/I^1(l), b_0^1 = 1\} p_{I^1}(l) p_{I^1}(l^*) = \sum_{n=0}^N \left\{ C_N^n \left(\frac{W^2}{2F}\right)^n \left(1 - \frac{W^2}{2F}\right)^{N-n} \left[\sum_{m=0}^n C_{N-1}^m \left(\frac{W^2}{2F}\right)^m \left(1 - \frac{W^2}{2F}\right)^{N-1-m} \int_{-\infty}^{\infty} p_{Y_1[I^1(l)]}(y) \int_{-\infty}^y p_{Y_1[I^1(l^*)]}(x) dx dy \right] \right\} = \sum_{n=0}^N \left\{ C_N^n \left(\frac{W^2}{2F}\right)^n \left(1 - \frac{W^2}{2F}\right)^{N-n} \left\{ \sum_{m=0}^n C_{N-1}^m \left(\frac{W^2}{2F}\right)^m \left(1 - \frac{W^2}{2F}\right)^{N-1-m} \left[1 - Q\left(\frac{\sigma_2 x + \mu_2 - \mu_1}{\sigma_1}\right) \right] \right\} \right\}, \quad (13)$$

这里 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$.

3 仿真结果

仿真参数如下表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	1.55
APD quantum efficiency η	0.6
APD gain G	100
APD effective ionization ration k_{eff}	0.02
APD bulk leakage current I_b / nA	0.1
APD surface leakage current I_s / nA	10
Background light photon arrival rate $\lambda_B / \text{s}^{-1}$	10^9
Modulation extinction ratio M_e	100
Data bit rate for 1 bit/sequence-period	30
$R_b = 1/T / (\text{Mb/s})$	
Receive noise temperature T_r / K	1100
Receiver load resistor R_L / Ω	1030

当 $F = 1000, N = 20, W = 5, W = 10$ 及 $W = 20$ 时,并行干扰抑制系统关于接收光功率的误比特率

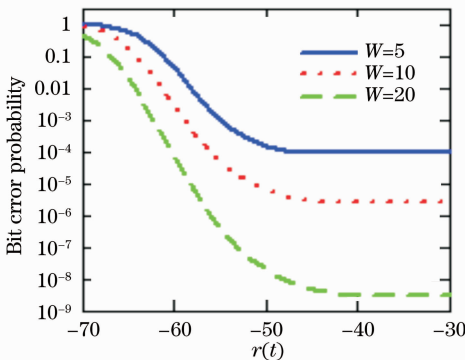


图 2 系统的误比特率关于接收功率 $r(t)$ 的关系

Fig. 2 Bit error probability versus received power in the parallel interference suppressing system

曲线如图 2 所示。从图中可以看出, W 越大误比特率改善量越大,即对多用户干扰的抑制作用越强。这是因为采用该并行干扰抑制方法的系统,不存在发送比特为“0”的情况,随着码重 W 增加,多用户干扰增加的很少,而和其他干扰相比,比特“1”或比特“0”的强度更大,因此误比特率改善量增大,这和基于门限判决的常规 OCDMA 系统刚好相反,从而也说明了采用最大值判决的并行干扰抑制方法克服了门限判决增加误判的缺点。因此,该系统通过采用码重大的光正交码可以进一步改善误比特率特性。

当 $F = 1000, W = 5, N = 10$ 及 $N = 20$ 时,并行干扰抑制系统关于接收光功率的误比特率曲线如图 3 所示。从图中可以看出, N 越大误比特率越大,这与常规 OCDMA 系统是一致的。因为 N 越大,即系统的用户数越多,多用户干扰也就越大。

当 $F = 1000, W = 10, N = 10$ 时,基于最大值判决的并行干扰抑制方法、双硬限幅器方法及多比特传输方法对多用户干扰抑制作用的比较如图 4 所

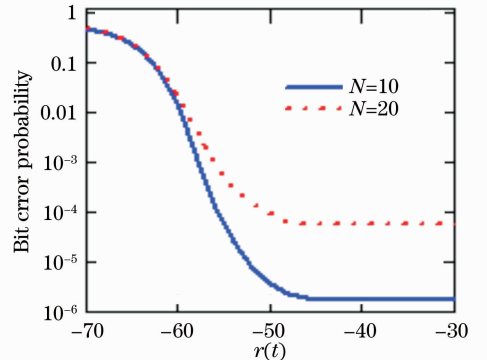


图 3 系统的误比特率关于接收功率 $r(t)$ 的关系

Fig. 3 Bit error probability versus received power in the parallel interference suppressing system

示。从图中可以看出,双硬限幅器方法和并行干扰抑制方法对多用户干扰的抑制作用优于多比特传输的方法。当接收功率较低时(小于 -52 dBm)时,并行干扰抑制方法优于双硬限幅器的方法。所以当接收功率较低时,基于最大值判决的并行干扰抑制方法能更有效的减小多用户干扰。

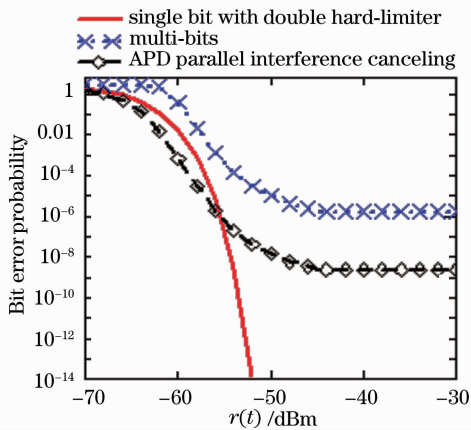


图4 双硬限幅器方法、多比特方法及并行干扰抑制方法误比特率关于接收功率 $r(t)$ 的关系

Fig. 4 Bit error probability versus received power double hard-limiters method, multi-bits method and the parallel interference suppressing system

图4中 $F=1000, N=10, W=10$ 对应的是系统的最大用户数,从图4可以看出双硬限幅器方法当接收功率大于 -52 dBm时,系统的误码率非常低。实际上在 $F=1000, N=10$ 同样条件下, $W=5$ 时引入双硬限幅器方法也有一定的误码率局限,如图5所示。这是因为, $N>W$ 时,有一些多用户干扰

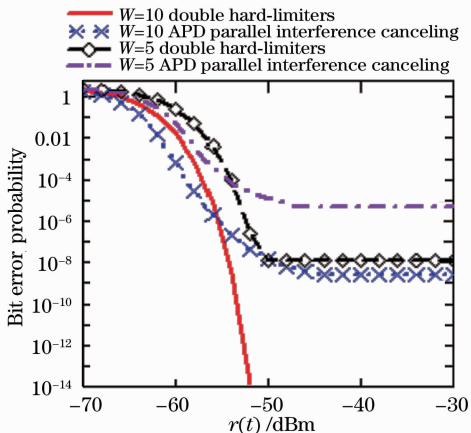


图5 $F=1000, N=10, W=10$ 与 $W=5$ 时双硬限幅器方法、并行干扰抑制方法误比特率关于接收功率 $r(t)$ 的关系

Fig. 5 Bit error probability versus received power while $F=1000, N=10, W=10$ and $W=5$ for double hard-limiters method and the parallel interference suppressing system

型引入双硬限幅器方法也抑制不掉;但当 $N \leq W$ 时,尤其是当接收功率较大时,双硬限幅器几乎能排除所有的多用户干扰型,此时误码主要由系统的其他噪声引起。但在实际系统中,系统中的用户数都大于所使用地址码的码重。但无论是 $N > W$ 还是 $N \leq W$ 情况,当接收功率较低时,并行干扰抑制方法优于引入双硬限幅器方法。

4 结 论

多用户干扰是影响 OCDMA 通信系统用户容量及可靠性的重要因素,目前提出的几种方法如引入硬限幅器方法、多比特传输方法及作者提出的基于最大值判决的并行干扰抑制方法在一定程度上都能对多用户干扰进行抑制,但前述研究方法都是在理想情况下进行的。而实际通信系统中存在着多种噪声,本文在采用 APD 光电检测器,系统中不仅存在多用户干扰,而且存在热噪声、APD 光电检测器散粒噪声、背景光影响、表面漏电流、体漏电流等多噪声,先对基于最大值判决的并行干扰抑制方法的误码性能进行研究,进而研究三种方法的多用户干扰抑制效果。研究结果表明,和常规 OCDMA 系统不同,所提出的并行干扰抑制方法的误码性能与码重的大小成正比,码重越大,多用户干扰抑制效果越强,因此该方法通过采用码重大的光正交码可以进一步改善误比特率特性,在一定程度上体现了本方法的有效性;双硬限幅器方法和并行干扰抑制方法对多用户干扰的抑制作用都优于多比特传输的方法;双硬限幅器方法适合于接收功率较大场合,而并行干扰抑制方法适合于接收功率较小的场合,在实际通信过程中,接收功率小时的多用户干扰抑制更重要。

参 考 文 献

- Jonathan P. H., Andrew M. W.. Advances in spectral optical code-division multiple-access communications [J]. *IEEE J. Telected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(5): 1351~1369
- Waldimar A., Daniel P., José C.. Modeling of a time-spreading OCDMA system[J]. *J. Light Wave Technology*, 2008, **26**(7): 768~775
- Mahdi K., Nasiri-Kenari M.. An internally coded TH/OCDMA scheme for fiber optic communication systems and its performance analysis—Part I: using optical orthogonal code [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, **55**(2): 333~344
- Jou Liang-Lin, Lee Yan-Han. Synchronous optical-CDMA systems using tunable hard limiters [J]. *J. Opt. Commun.*, 2003, **24**(16): 217~222
- Ohtsuki T, Sato K, Sasase I *et al.*. Performance analysis of direct-detection optical asynchronous CDMA systems with double optical hard-limiters [J]. *J. Light Wave Technology*, 1997,

- 15(3): 452~457
- 6 Kwon H. M. . Optical code division multiple access system——Part II: multi-bits/sequence period OCDMA [J]. *IEEE Transaction on Commun.* , 1994, **42**(8): 2592~2599
- 7 M. Y. Liu, E. Lai, Y. H. Lee. Suppression of interference for fiber-optic synchronous code division multiple access networks [J]. *J. Opt. Commun.* , 1998, **19**(4): 126~132
- 8 Tawfig Eltaif, Hossam M. H. Shalaby, Sahbudin Shaari *et al.* . A novel successive interference cancellation scheme in OCDMA system[C]. *ICSE2006 Proc.* 2006, Kuala Lumpur, Malaysia, 299~303
- 9 Li Xiaobin. A novel method for suppressing multi-user interference of optical code division multiple access system[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(9): 1096~1099
李晓滨. 一种新的光码分多址多用户干扰抑制方法[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(9): 1096~1099
- 10 J. A. Salehi. Code division multiple access technique in optical fiber network——part I: fundamental principles [J]. *IEEE Transaction on Commun.* , 1989, **37**(8): 824~833