

# 基于最大似然准则的多波长 OCDMA 接收机的最佳判决门限研究\*

吉建华, 徐铭, 杨淑雯

(深圳大学新技术研究中心, 深圳, 518060)

**摘 要:**采用最大似然准则,研究了多波长光码分多址接收机的最佳判决门限值. 通过检测信道的光信号能量,接收端估计出信道的并发用户数,并通过最大似然准则得到了最佳判决门限值与并发用户数、码字参量的变化关系. 当并发用户数超过一定值后,最佳判决门限值将随并发用户数量变化,相应地改变接收机的判决门限值. 根据最佳判决门限值,得到了多波长光码分多址系统误码率与并发用户数的关系. 理论分析和模拟结果表明,采用最大似然准则得到的最佳判决门限值, MW OCDMA 系统的误码率将明显降低.

**关键词:**光通信;多波长光码分多址;误码率;判决门限;最大似然准则

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2007)04-0698-4

## 0 引言

光码分多址 (Optical Code Division Multi Access, OCDMA) 结合光纤的巨大带宽和电 CDMA 的优点,具有异步、宽带、可靠和随机即时接入等特点,是未来光接入网和高速局域网的方案之一<sup>[1-8]</sup>. 为了支持较多的同时用户数,目前一般采用多波长 OCDMA 系统 (Multi-Wavelength OCDMA, MW OCDMA),即每个用户的地址码不仅在时域上扩展,同时还在波长上扩展. 在分析 MW OCDMA 系统的误码率时,以往的文献都假设接收机的判决门限等于码重. 然而,当系统的多址干扰比较大时,判决门限等于码重将使系统的误码率增加. 文献[9]分析了采用二维 MPR 码字的 MW OCDMA 系统,通过实时检测信道的光信号能量,估计出信道的并发用户数,动态设置接收机的判决门限. 结果表明,该方案在并发用户数较大时,能有效改善 MW OCDMA 系统的误码率. 为了进一步改善 MW OCDMA 系统性能,本文首次从最大似然准则出发,得出了接收机的最佳判决门限与并发用户数、码字参量的变化关系,分析了系统的误码率性能,并与文献[9]的分析结果进行了比较.

## 1 理论分析

MPR<sup>[9]</sup>是一类在时域和波长扩展的二维光正交码,  $N_w$  表示有效波长数,  $L_t$  表示码长 (扩频系

数),每个波长上有  $R$  个脉冲,因此码重  $W = N_w R$ . 对于互相关限为 1 的 MPR 码字,互相关均值为

$$\mu = \frac{N_w R^2}{2L_t} \quad (1)$$

为了简化分析,假设:1)用户数据比特之间异步,但切普之间是同步的,即用户之间的互相关干扰只能是“0”或“1”,此时系统的互相关干扰达到最大;2)只考虑用户之间的互相关干扰,忽略其他噪音的影响;3)用户等概率地发送数据比特“0”和“1”.

为了使 MW OCDMA 系统的误码率最小,文献[9]提出一种动态接收机,如图 1. 接收端的输入光信号经分路器后,一路通过 APD 和积分器,实时检测信道的光信号能量,估计出信道的并发用户数,并根据并发用户数的变化而相应地改变判决器的判决门限. 另一路由光解码器进行光相关处理,经 APD 光电转换后送到判决器,判决器根据当前的判决门限值进行判决,最后输出估计的数据比特信号.

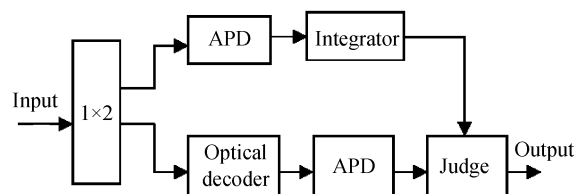


图 1 动态接收机框图

Fig. 1 Structure of dynamic receiver

文献[9]提出判决门限的取值为

$$\alpha_{opt} = \begin{cases} \frac{N_w R}{2} \left( \frac{N_{su} R}{L_t} + 1 \right), & \frac{N_{su} R}{L_t} \geq 1 \\ N_w R, & \frac{N_{su} R}{L_t} < 1 \end{cases} \quad (2)$$

根据数字通信的最佳接收机理论,在用户等概

\*国家自然科学基金重点项目(60132040)和广东省自然科学基金项目(5301028; 04300855)资助

Tel: 0755-26536153 Email: jjh@szu.edu.cn

收稿日期: 2005-12-08

率发送数据“0”和“1”的条件下,最小差错概率的判决规则为最大似然准则. 以下从最大似然准则出发,分析 MW OCDMA 系统的最佳判决门限.

在并发用户数为  $N_{su}$ ,接收机输出为  $y=L$  时,发送数据  $x$  为“0”和“1”的先验条件概率分别为

$$P(y=L/x=0) = \binom{N_{su}-1}{L} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^L \cdot \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-L}$$

$$P(y=L/x=1) = \binom{N_{su}-1}{L-N_w R} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{L-N_w R} \cdot \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-L+N_w R} = P(y=L-N_w R/x=0) \quad (3)$$

在已经估计的  $N_{su}$  情况下,这两个先验条件概率与  $L$  的关系如图 2,它们之间的水平距离等于码重  $N_w R$ , $L$  的取值范围  $N_w R \leq L \leq N_{su}-1$ . 这是因为,当  $L < N_w R$  时,用户发送的数据比特一定是“0”;当  $L \geq N_{su}$  时,用户发送的数据比特一定是“1”.

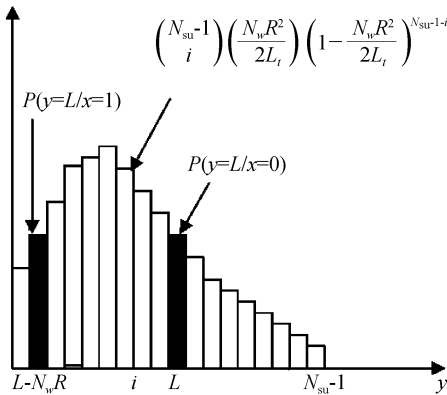


图 2 输出为  $y=L$  时先验概率  
Fig. 2 Prior-probability of output  $y=L$

根据最大似然准则,接收机输出为  $y=L$  时的判决输出为

$$\hat{x} = \begin{cases} 0 & P(y=L/x=0) > P(y=L/x=1) \\ 1 & P(y=L/x=1) \geq P(y=L/x=0) \end{cases} \quad (4)$$

为得到最佳判决门限,令

$$P(y=L/x=0) = P(y=L/x=1) \quad (5)$$

即

$$\binom{N_{su}-1}{L} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^L \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-L} = \binom{N_{su}-1}{L-N_w R} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{L-N_w R} \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-L+N_w R} \quad (6)$$

化简得到

$$\binom{N_{su}-1}{L} = \left(\frac{2L_t}{N_w R^2} - 1\right)^{N_w R} \binom{N_{su}-1}{L-N_w R} \quad (7)$$

根据式(7),在不同的并发用户数时,最佳判决

门限  $Th$  为:1)当式(7)存在整数解  $L$  时,取判决门限  $Th=L$ ;2)当式(7)不存在整数解  $L$  时,取满足不等式  $P(y=L/x=0) < P(y=L/x=1)$  的最小整数为判决门限;3)如果对任意  $L$  都不满足  $P(y=L/x=0) \leq P(y=L/x=1)$ ,取判决门限为码重  $Th=N_w R$ .

根据式(7)得到的判决门限  $Th$ ,用户发送数据比特“0”的比特错误概率为

$$P(\text{error}/x=0) = \sum_{i=N_w R}^{N_{su}-1} P[P(y=i/x=0) \leq P(y=i/x=1)/x=0] = \sum_{i=Th}^{N_{su}-1} \binom{N_{su}-1}{i} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^i \cdot \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-i} \quad (8)$$

同理,用户发送数据比特“1”的比特错误概率

$$P(\text{error}/x=1) = \sum_{i=0}^{Th-N_w R-1} \binom{N_{su}-1}{i} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^i \cdot \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-i} \quad (9)$$

根据式(8)和(9),MW OCDMA 系统的 BER 为

$$P_e = \frac{1}{2} [P(\text{error}/x=1) + P(\text{error}/x=0)] = \frac{1}{2} \sum_{i=Th}^{N_{su}-1} \binom{N_{su}-1}{i} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^i \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-i} + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{Th-1-N_w R} \binom{N_{su}-1}{i} \left(\frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^i \left(1 - \frac{N_w R^2}{2L_t}\right)^{N_{su}-1-i} \quad (10)$$

## 2 数值模拟

MPR 码字参量为  $N_w = 10, L_t = 500, R = 5, W = N_w R = 50$ ,互相关限为 1. 当并发用户数  $N_{su} = 100$  时,不同判决门限下的误码率如图 3. 由图 3 可见,MW OCDMA 系统在不同判决门限值下存在最小的误码率,误码率最小的判决门限值等于 53. 而此时,根据式(2)得到的判决门限值为 50,这也说明了文献[9]得出的判决门限值并不是最佳的. 根据

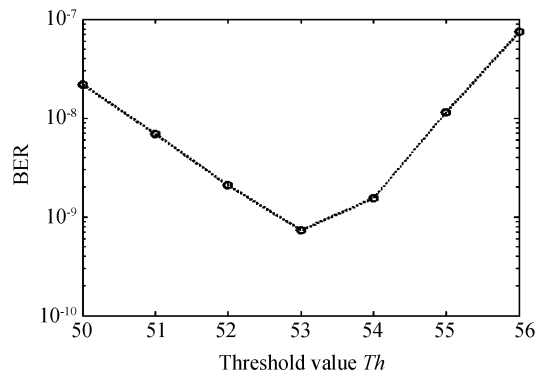


图 3  $N_{su}=100$  时不同判决门限下的误码率  
Fig. 3 BER performance of  $N_{su}=100$  under different judge threshold

最大似然准则,  $y=L=53$  是满足  $P(y=L/x=0) \leq P(y=L/x=1)$  的最小整数, 如图 4. 因此, 根据最大似然准则得到的最佳判决门限值等于 53, 这与图 3 的结果相一致.

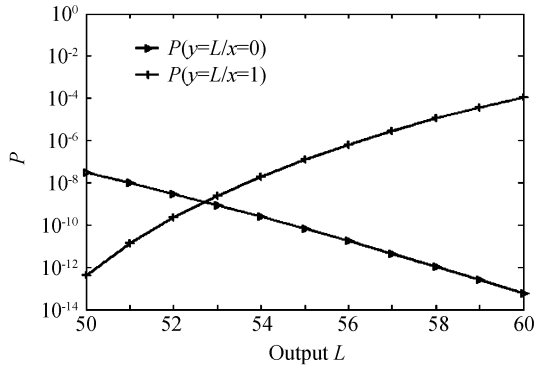


图 4  $N_{su}=100$  时不同输出时的先验概率  
Fig. 4 Prior-probability of different output at  $N_{su}=100$

最佳判决门限值  $Th$  与并发用户数  $N_{su}$  的关系如图 5. 根据式(2), 当  $N_{su} \leq 100$  时, 判决门限值  $\alpha$  为码重  $W$ . 而根据最大似然准则, 只有当  $N_{su} < 90$  时, 判决门限值  $Th$  为码重  $W$ . 同时, 当  $N_{su} \geq 90$  时, 最大似然准则得到的判决门限值  $Th$  比文献[9]得出的判决门限值  $\alpha$  要大.

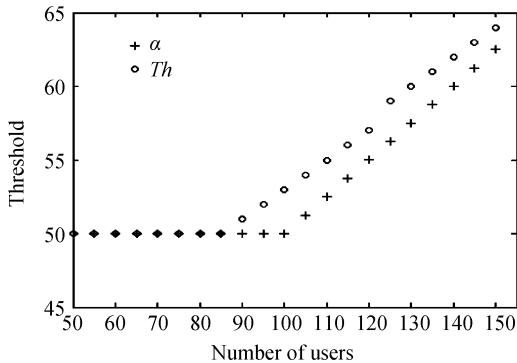


图 5 最佳判决门限与并发用户数的关系  
Fig. 5 Relationship between optimum judge threshold and simultaneous users

根据计算得到的判决门限值, 由式(10)可得到 MW OCDMA 系统的误码率与并发用户数的关系, 如图 6. 由图 6 可见, 当  $N_{su} \geq 90$  时, 相对于文献[9]的判决门限值  $\alpha$ , 采用最大似然准则得到的判决门限  $Th$  后, MW OCDMA 系统的误码率将明显降低. 例如, 当并发用户数为 100 时, BER 将由  $2.19 \times 10^{-8}$  降为  $7.3 \times 10^{-10}$ , 当并发用户数为 120 时, BER 将由  $2.15 \times 10^{-7}$  降为  $3.29 \times 10^{-8}$ . 也就是说, 在一定的系统误码率要求下, 采用本文提出的最大似然准则得到的判决门限, 可显著提高 MW OCDMA 系统容量.

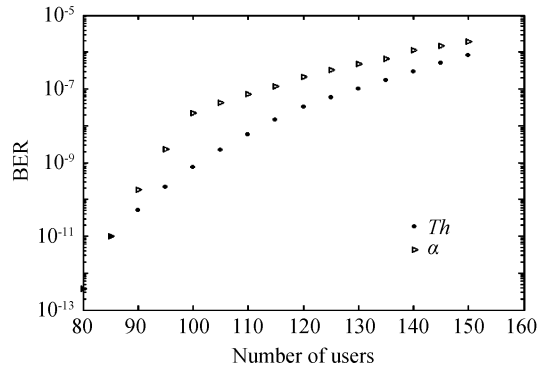


图 6 MW OCDMA 系统的误码率与并发用户数的关系  
Fig. 6 Relationship between BER of MW OCDMA and simultaneous users

### 3 结论

本文从最小错误概率的最大似然准则出发, 通过实时检测信道的光信号能量, 估计信道的并发用户数, 得到了 MW OCDMA 系统的最佳判决门限值. 当并发用户数超过一定值后, 最佳判决门限值将随并发用户数量变化, 从而相应地改变接收机的判决门限值. 分析结果表明, 相对于其他文献提出的判决门限准则, 采用最大似然准则得到的最佳判决门限值, MW OCDMA 系统的误码率将进一步降低, 也就是说, 在一定的误码率要求下, 增加了 MW OCDMA 的系统容量.

#### 参考文献

- [1] TANCEVSKI L, ANDONOVIC I. Wavelength hopping/time spreading code division multiple access systems[J]. *Electronic Letters*, 1994, **30**(17):1398-1400.
- [2] YANG G C, KWONG W C. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for fiber-optic networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, **45**(11):1426-1433.
- [3] FATHALLAH H, LESLIE A R, SOPHIE L. Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(3):397-405.
- [4] ZHANG Chong-fu, QIU Kun, AN Xiao-qiang. Investigation on realization of optical CDMA using division-frequency channel and bipolar codes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3):329-332.  
张崇富, 邱昆, 安晓强. 基于频分信道双极性光码分多址实现研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(3):329-332.
- [5] FU Xiao-mei, YU Jin-long, WANG Wen-rui, et al. Reductions of multiple access interference and beat noise in optical CDMA communication with Bragg grating arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):1476-1479.  
付晓梅, 于晋龙, 王文睿, 等. 降低频谱编码光码分多址系统干扰的实验研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12):1476-1479.

- [6] JI Jian-hua, XU Ming, YANG Shu-wen, *et al.* Performance analysis of normalized throughput in a hybrid WDMA-OCDMA system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 566-568.  
吉建华,徐铭,杨淑雯,等.一种混合 WDMA-OCDMA 系统归一化吞吐量性能研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 566-568.
- [7] SHIVALEELA E S, SELVARAJAN A, SRINIVAS T. Two-dimensional optical orthogonal codes for fiber-optic CDMA networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(2): 647-654.
- [8] FOULI K, RUSCH L A. Equalization advantages of OFFH-CDMA over WDM in EDFAs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(2): 507-509.
- [9] NG E K H, SARGENT E H. Optimum threshold detection in real-time scalable high-speed multi-wavelength optical code-division multiple-access LANs [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, **50**(5): 778-784.

## Research on Receiver's Optimum Threshold in Multi-Wavelength OCDMA Based on Maximum Likelihood Principle

JI Jian-hua, XU Ming, YANG Shu-wen

(Advanced Technology Research Center of Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Received date: 2005-12-08

**Abstract:** Optimum threshold in multi-wavelength optical CDMA (MW OCDMA) was researched according to maximum likelihood principle. The number of simultaneous users on channel was estimated at receiver by detecting energy of optical signal. Relationship between optimum threshold and number of simultaneous users on channel and code parameters was achieved. When MW OCDMA system had large number of simultaneous users on channel, optimum threshold value would vary with the number of simultaneous users, and the receiver would adjust the optimum threshold accordingly. Relationship between simultaneous users and bit error rate (BER) of MW OCDMA system was achieved according to the optimum threshold value. Theoretical analysis and analogy simulation show that BER of MW OCDMA system will degrade greatly while employing the proposed optimum threshold value by maximum likelihood principle.

**Key words:** Optical communication; Multi-wavelength optical code-division multiple-access (MW OCDMA); Bit error rate; Judge threshold value; Maximum likelihood principle



**JI Jian-hua** received the B. S. degree at Southeast University in 1991, and received the Ph. D. degree at Shanghai Jiaotong University in 2003. Now, he works at Advanced Technology Research Centre of Shenzhen University. His research interests include OCDMA and WDM networks.