

文章编号: 0258-7025(2008)06-0879-05

# 基于二次全等跳频码的跳频光码分多址系统

丁美玲<sup>1</sup> 陈抗生<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中兴通讯股份有限公司上海研发中心, 上海 201203; <sup>2</sup> 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 从跳频光码分多址(FH-OCDMA)系统的扩频特征出发,推导出具有良好相关性能的扩频码所能达到的最大码容量,再利用二次全等理论为跳频光码分多址系统构造出一种具有最大码容量的扩频码——二次全等跳频码(QCHC),并给出了构造实例。在此基础上,运用光纤布拉格光栅序列作为编解码器设计了一种跳频光码分多址系统的实现方案,并对该系统的性能进行了详细的分析。结果表明,采用二次全等跳频码的跳频光码分多址系统具有设计简单、用户容量大和误码率低等方面的优点。

**关键词** 光通信;跳频光码分多址;二次全等跳频码;光纤布拉格光栅;双光硬限幅器

**中图分类号** TN 929.533 **文献标识码** A

## Novel Frequency-Hop Optical Code Division Multiple Access Based on Quadratic Congruence-Hop Codes

Ding Meiling<sup>1</sup> Chen Kangsheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai R&D Center, ZTE Corporation, Shanghai 201203, China

<sup>2</sup> Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** A novel frequency-hop (FH) scheme is proposed for optical code division multiple access (OCDMA) system. According to the characteristics of FH-OCDMA system, an upper bound on the code size is deduced and the quadratic congruence-hop codes (QCHC) which achieves this bound is presented, with examples given. On the basis of it, a novel scheme for FH-OCDMA system with fiber Bragg grating array based encoder/decoder and QCHC is designed. Furthermore, a detailed performance analysis of the system is given. The results reveal that such a new scheme for FH-OCDMA system is not only easy to plan, but also has a large number of simultaneous users and low bit error rate.

**Key words** optical communication; frequency-hop optical code division multiple access; quadratic congruence-hop codes; fiber Bragg grating; double optical hard-limiters

### 1 引言

光码分多址(OCDMA)系统具有接入方式简单、能够充分地利用石英光纤的可用带宽、可变速率或多速率传输以及安全性好等方面的优点,因而具有很强的技术优势和广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。该系统能够将一个窄带信号在传输前转换成宽带信号,并最终从宽带信号中还原出原始信息,这一特征可以利用扩频码来表示。而依照所采用扩频码的不同性质,可以将光码分多址系统划分为直接序列扩频(DS)、谱域编码(FE)和跳频(FH)等多种类型。其

中,跳频光码分多址(FH-OCDMA)系统中的扩频信号具有频率跳变的特征,其关键在于如何实现系统的编解码处理,以及如何构造出性能优良的扩频码<sup>[2]</sup>。如今,利用光纤布拉格光栅(FBG)序列可以方便地实现各种光码分多址系统的编解码过程<sup>[3,4]</sup>,但为跳频光码分多址系统而设计的几种扩频码却存在着明显的不足:文献<sup>[5]</sup>所述单重合序列(OCS)的码容量较小,且仅与可用频率片的数量相当;而光正交跳频码(OOHC)的码容量则与可用频率片的数量成正比,与码重成反比<sup>[6]</sup>,为了提高光正

收稿日期:2007-08-31; 收到修改稿日期:2007-11-20

基金项目:浙江省自然科学基金(698016)资助项目。

作者简介:丁美玲(1975—),男,江西人,二级主任工程师,博士,主要从事移动通信系统和光通信系统方面的研发工作。

E-mail:ding\_meiling@hotmail.com

交跳频码的码容量就必须增大可用频率片的数量或减小码重,前者将导致相应系统的编解码过程难以实现,后者将导致相应系统的功率效率和信噪比性能降低。

## 2 跳频光码分多址系统的扩频特征

由于相干光通信技术尚不成熟,利用具有良好相关性能的单极性 $\{0, 1\}$ 序列来构造光码分多址系统的扩频码就成为一种必然选择。一个性能优良的跳频光码分多址系统扩频码必须具有三个特点:1)良好的自相关和互相关性能,以保证系统具有较高的功率效率和较低的误码率(BER)。2)较大的码容量,以保证系统具有足够大的用户容量。3)可以方便地被引入到跳频光码分多址系统之中,以利于系统的实现。将具有上述三个特征的一组跳频光码分多址系统扩频码简记为:

$$N(L, q, W, \lambda_a, \lambda_c), \quad (1)$$

式中 $N$ 为本组扩频码的个数, $L$ 和 $q$ 分别为码长和可用频率片的数量, $W$ 为扩频码的码重, $\lambda_a, \lambda_c$ 分别表示自相关和互相关常数。因此,可定义扩频码的码函数为

$$C_n(s, f_k) \in \{0, 1\}, \quad n \in \{0, 1, \dots, N-1\}, \\ s \in \{0, 1, \dots, L-1\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, q\}, \quad (2)$$

其中 $s$ 和 $f_k$ 分别为时域和频域的变量, $L$ 和 $q$ 均为大于1的自然数。再定义扩频码的相关函数为

$$R_{n,m}(s) = \sum_{k=1}^q \sum_{i=0}^{L-1} C_n(i, f_k) C_m[(i+s) \bmod L, f_k], \\ n, m \in \{0, 1, \dots, N-1\}, \quad (3)$$

且有

$$R_{n,m}(s) \begin{cases} = W, & n = m, \quad \text{且 } s = 0 \\ \leq \lambda_a, & n = m, \quad \text{且 } s \neq 0. \\ \leq \lambda_c, & n \neq m \end{cases} \quad (4)$$

为了研究和处理的方便,要求 $\sum_{k=1}^q C_n(s, f_k) = 1, \forall s \in \{0, 1, \dots, L-1\}$ 以及 $\sum_{s=0}^{L-1} C_n(s, f_k) \leq 1, \forall f_k \in \{f_1, f_1, \dots, f_q\}$ 均成立,也就是在一个码长范围内,每一时间片处只有一个频率片的取值为“1”,并且每个频率片最多只有一次取值为“1”,此时 $\lambda_a = 0$ ,扩频码的码重也就等于扩频码的码长。由于要考虑到整个系统对误码率的要求,通常都将互相关常数 $\lambda_c$ 设置为1。

假定 $N_k$ 为一组扩频码 $N(L, q, L, 0, 1)$ 中频率片 $f_k$ 出现的次数,那么该组扩频码中全部频率片出

现的总次数可以表示为 $N \cdot L = \sum_{k=1}^q N_k$ 。由于扩频码中取值为“1”的相邻码片 $k, j$ 之间的差值不能为0,因而 $N_k$ 就是满足不等式 $|k-j| > 0$ 的所有 $j$ 的个数,即 $N_k \leq q-1$ 。所以扩频码的最大码容量满足

$$N \leq \frac{q^2 - q}{L}, \quad (5)$$

当 $N$ 取上限时,该扩频码即为优化扩频码。显然,只有在某些特定的情况下,优化扩频码才有可能得到,而大部分的扩频码都是非优化的,例如单重合序列和光正交跳频码。另一方面,同步跳频光码分多址系统的最大码容量为 $N \leq q^2 - q$ ,证明过程从略。

## 3 二次全等跳频码的构造

利用二次全等理论构造素数跳频码的过程,选定一个不等于2的素数 $p$ ,然后在伽罗华域 $GF(q)$ 上构造一组素数序列 $C_i = (C_i(0), C_i(1), \dots, C_i(j), \dots, C_i(p-1))$ ,其中 $C_i(j) = (i \times j) \bmod (p) + 1, i \in \{1, 2, \dots, p-1\}, j \in \{0, 1, \dots, p-1\}$ 。则 $C_i$ 就可以作为跳频光码分多址系统的扩频码使用,称其为素数跳频码。素数跳频码 $N(L, q, W, \lambda_a, \lambda_c)$ 中 $N = p-1, q = p = L, \lambda_a = 0, \lambda_c = 1$ 。表明利用一个含有 $p$ 个元素的集合就可以构造出 $p-1$ 个码长为 $p$ 的优化扩频码。

根据上述结论,依照如下步骤构造出一种新的跳频光码分多址系统扩频码。选定一个不等于2的素数 $p$ 和任意的 $\alpha, \delta$ 和 $\beta$ ,且有 $\alpha \in \{1, 2, \dots, p-1\}, \delta, \beta \in \{0, 1, \dots, p-1\}$ ,接着在伽罗华域 $GF(q)$ 上构造一个有 $p$ 个元素的素数序列 $y_{\alpha, \delta, \beta}$ ,后者满足<sup>[7]</sup>

$$y_{\alpha, \delta, \beta}(i) = [\alpha(i + \delta)^2 + \beta] \bmod [p] + i \cdot p + 1, \quad (6)$$

其中 $i \in \{0, 1, \dots, p-1\}$ 。当改变 $\alpha, \delta$ 和 $\beta$ 的取值之后,就可构造出 $(p-1) \times p \times p$ ,即 $p^3 - p^2$ 个长度为 $p$ 的素数序列。但根据文献[8]只有 $\alpha$ 相同的序列才能满足互相关值为1的条件。也就是说,可以将这些序列分为 $p-1$ 组,每组各含有两两间互相关值为1的 $p^2$ 个序列。与此同时,若定义

$$y_\gamma(i) = \gamma \cdot p + i + 1, \quad (7)$$

其中 $\gamma \in \{0, 1, \dots, p-1\}, i \in \{0, 1, \dots, p-1\}$ 。可以通过改变 $\gamma$ 的取值得到 $p$ 个互相关值为0的素数序列,相当于在图1中的一组频点。而通过(6)式构造的序列在图1的任意一组频点中仅含有一个频点,因此这些序列与通过(7)式构造的任意序列之间

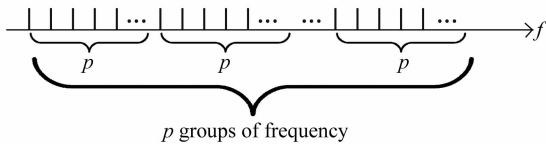


图 1 二次全等跳频码的构造方式

Fig. 1 Constructing method of QCHC

满足互相关值为 1 的条件。如果将所有的  $p^2 + p$  个序列理解为频率片的集合,那么这些集合间的互相关值就小于等于 1。而每一包含  $p$  个元素的频率片集合都可以通过素数跳频码的构造方法而构造出  $p - 1$  个扩频码,因此,二次全等跳频码(QCHC)的个数就可多达  $(p^2 + p)(p - 1) = p^3 - p$  个。此时  $N = p^3 - p, q = p^2, L = p$ , 将这些参数代入(5)式可知,该扩频码是优化的。

例如,当  $\alpha = 1, p = 3$  时,所有的素数序列为  $\{1, 5, 8\}, \{2, 6, 9\}, \{3, 4, 7\}, \{2, 5, 7\}, \{3, 6, 8\}, \{1, 4, 9\}, \{2, 4, 8\}, \{3, 5, 9\}, \{1, 6, 7\}, \{1, 2, 3\}, \{4, 5, 6\}$  和  $\{7, 8, 9\}$ , 相应的二次全等跳频码的构造结果如表 1 所示。

表 1  $p = 3$  时,二次全等跳频码的构造结果

Table 1 QCHC for  $p = 3$

No.	Code	No.	Code	No.	Code	No.	Code
1	1 5 8	7	2 5 7	13	2 4 8	19	1 2 3
2	1 8 5	8	2 7 5	14	2 8 4	20	1 3 2
3	2 6 9	9	3 6 8	15	3 5 9	21	4 5 6
4	2 9 6	10	3 8 6	16	3 9 5	22	4 6 5
5	3 4 7	11	1 4 9	17	1 6 7	23	7 8 9
6	3 7 4	12	1 9 4	18	1 7 6	24	7 9 8

在同步跳频光码分多址系统中,可以采用由二次全等跳频码经过适当的位移而构造的同步二次全等跳频码,其码容量为  $p(p^3 - p) = p^4 - p^2$ , 即为同步扩频码的最大码容量。可见,同步二次全等跳频码也是一种优化的同步扩频码。

### 4 光纤布拉格光栅编解码器的设计

对于采用星型网络结构的跳频光码分多址系统,一个性能优良的编解码器应该具有如下一些特点:1) 可依照不同的扩频码进行方便的设计。2) 可集成化,以满足各种工作环境的需要。3) 价格低廉,以实现大规模的运用。4) 可以保证跳频光码分多址系统具有较高的功率效率。5) 可编址能力,以便系统中的任意用户之间都可以进行交互通信。光纤布拉格光栅编解码器可以很好地满足上述要求,因而被广泛地用于实现光码分多址系统的编解码过

程。可以为采用  $24(3, 9, 3, 0, 1)$  系列二次全等跳频码的跳频光码分多址系统设计出相应的光纤布拉格光栅编解码器,例如内嵌二次全等跳频码  $\{3, 8, 6\}$  与  $\{2, 8, 4\}$  的编码器和对应的解码器可分别依照图 2 (a), (b) 所示的结构进行设计<sup>[9, 10]</sup>。其中  $L_c$  与发送端和接收端所约定的数据传输速率有关,光纤布拉格光栅的布拉格波长为  $\lambda_i = 1543.6 + 1.6i \text{ nm} (i \in \{1, 2, \dots, 9\})$ , 反射谱宽为  $0.4 \text{ nm}$ , 最大反射率接近于  $100\%$ , 同时编码器输入脉冲的频谱覆盖了所有光纤布拉格光栅的反射谱,以提高系统的功率效率。

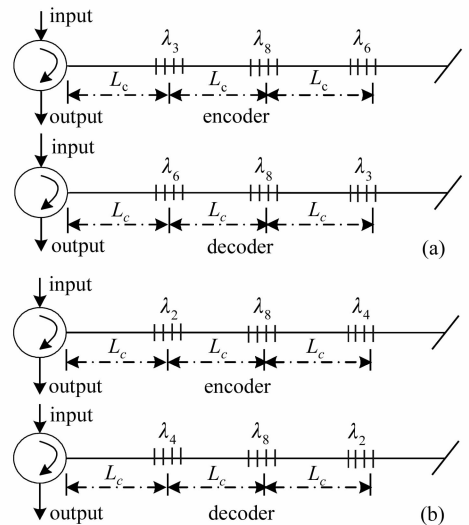


图 2 光纤布拉格光栅编解码器的结构示意图。(a) 内嵌二次全等跳频码  $\{3, 8, 6\}$ ; (b) 内嵌二次全等跳频码  $\{2, 8, 4\}$

Fig. 2 Schematic diagram of encoder and decoder based on FBGs. (a) embodied with QCHC  $\{3, 8, 6\}$ ; (b) embodied with QCHC  $\{2, 8, 4\}$

## 5 性能分析

### 5.1 用户容量

跳频光码分多址系统的用户容量与扩频码的码长、扩频码的码重以及扩频码的相关性能均息息相关。对于采用  $N(p, p^2, p, 0, 1)$  系列二次全等跳频码的跳频光码分多址系统,其用户容量为  $p^3 - p$  ( $p$  为素数);而对于采用  $N(p, p^2, p, x, 1)$  系列同步二次全等跳频码的同步跳频光码分多址系统,其用户容量则更高可达  $p^4 - p^2$ 。图 3 的结果显示,在可用频率片数相等的情况下,采用二次全等跳频码的跳频光码分多址系统将比采用单重合序列的跳频光码分多址系统<sup>[5]</sup> 具有更大的用户容量;与此同时,采用二次全等跳频码的跳频光码分多址系统与采用光正

交跳频码的跳频光码分多址系统<sup>[6]</sup>具有相当的用户容量,即使光正交跳频码的码重仅为 5;而对于同步跳频光码分多址系统而言,采用同步二次全等跳频码将使系统获得更大的用户容量。

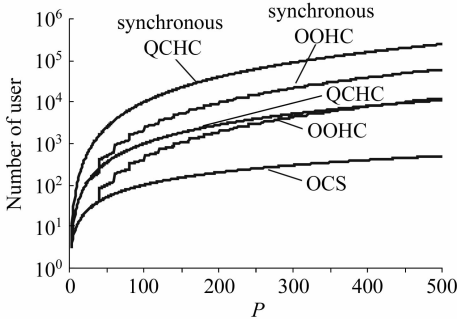


图 3 用户容量与可用频率片数的关系

Fig. 3 Number of users versus  $P$

### 5.2 误码率

考察一个多用户干扰受限的跳频光码分多址系统,假定其采用的扩频码为  $N(p, p^2, p, 0, 1)$  系列二次全等跳频码,系统的并发用户数为  $N$ ,接收端的判决门限为  $Th$ 。并认为,当发送端送出“0”信号而接收端判决为“1”信号时,系统才发生解码错误,而且光纤布拉格光栅具有良好的反射性能。为了计算上的方便,定义  $D$  为大于或等于  $Th$  的最小整数。如果解码器两端不安装光硬限幅器<sup>[8]</sup>,那么,某个用户对特定用户产生干扰的概率可归结为

$$\begin{cases} a_1 = 0.5 \\ a_2 = 1/2p, \\ a_3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

而对特定用户产生干扰的概率为  $a_1, a_2$  和  $a_3$  的用户数分别是  $p-2, p^3-p^2$  和  $(p-1)^2$ 。若这些干扰之和大于或等于  $D$ ,解码器就会发生解码错误,因此,系统的误码率可表示为

$$\begin{aligned} \text{BER} = & \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{p-2} \sum_{\substack{j \leq p^3-p^2, N-i-1 \\ j=D-i, j \geq N-i-(p-1)^2-1}} \times \\ & \frac{\binom{p-2}{i} \binom{p^3-p^2}{j} \binom{(p-1)^2}{N-i-j-1}}{\binom{p^3-p-1}{N-1}} \times \\ & \sum_{k=0}^i \left[ \binom{i}{k} a_1^k (1-a_1)^{i-k} \sum_{m=D-k}^j \binom{j}{m} a_2^m (1-a_2)^{j-m} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $N$  为并发用户数,且有  $D+1 \leq N \leq p^3-p$ 。此时,跳频光码分多址系统的误码率与并发用户数的关系曲线如图 4 中虚线所示。

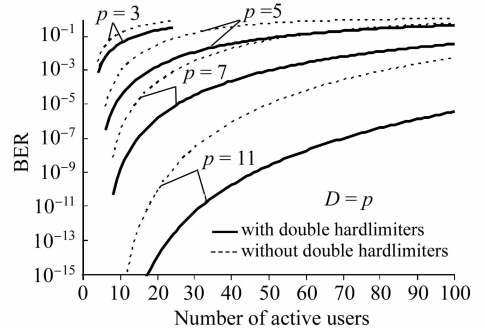


图 4 采用双光硬限幅器前后,误码率与并发用户数的关系对比

Fig. 4 BER comparisons of systems with and without double hardlimiters

还可以通过在编解码器前后安装双光硬限幅器的方法来抑制跳频光码分多址系统的多用户干扰,从而减小系统的误码率。此时,对于某个特定的频率片,其他用户的干扰之和将被弱化到单一码元干扰的水平。显然,只有当其他用户在大于或等于  $D$  个频率片上对特定用户产生干扰之后,解码器才会发生解码错误。依照二次全等跳频码的设计思想,任意一个频率片在所有码字中总计出现  $p^2-1$  次,如果  $p$  足够大,那么,在特定频率片上某个用户对特定用户产生干扰的概率可被认为是

$$\beta = \frac{p^2-2}{p^3-p-1} \times \frac{1}{2p} = \frac{p^2-2}{2p^4-2p^2-2p}, \quad (10)$$

假定  $F(i, k)$  可理解为  $i$  个被编号的球放入  $k$  个被编号篮子,并且每个篮子都有球的方法数。当  $i < k$  时,  $F(i, k) = 0$ 。而在  $i \geq k$  的情况下,  $F(i, k)$  可由递推公式给出<sup>[9]</sup>

$$F(i, k) = k^i - \sum_{j=1}^{k-1} \binom{k}{j} F(i, j), \quad (11)$$

此时,根据排列组合的方法,系统的误码率可表示为

$$\begin{aligned} \text{BER} = & \frac{1}{2} \sum_{i=D}^{N-1} \times \\ & \left\{ \binom{N-1}{i} (\beta)^i (1-\beta)^{N-i-1} \sum_{k=D}^p \binom{p}{k} F(i, k) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $p+1 \leq N \leq p^3-p$  ( $p$  为素数)。假定系统满足  $D=p$  的条件,可以采用系统的误码率和并发用户数的关系图来反映双光硬限幅器对系统误码率的影响,如图 4 中实线所示。由图示可知,在跳频光码分多址系统中运用双光硬限幅器装置,可以在不降低通信质量的前提下,提高系统的并发用户数;或者在并发用户数相同的情况下,提高系统的通信质量。

对于上述的跳频光码分多址系统,还可以根据

文献[11]将误码率推导结果表示为

$$\text{BER} \leq \frac{1}{2} \binom{p}{D} \prod_{m=0}^{D-1} [1 - q^{(N-1-m)}], \quad (13)$$

其中  $q = 1 - \beta$ 。该分析结果和(12)式的分析结果很好地吻合。

## 6 结 论

跳频光码分多址技术的引入在很大程度上缓解了光码分多址技术在用户容量小和误码率高等方面的缺陷,为光码分多址技术的广泛运用提供了保障。以二次全等理论为基础,提出了二次全等跳频码的构造方法,给出了构造过程和构造实例。分析表明,该扩频码不仅具有良好的相关性能、最大的码容量,而且还能够通过光纤布拉格光栅编解码器方便地被引入到跳频光码分多址系统之中。相应的系统则具有设计简单、用户容量大和误码率低等方面的优点。

### 参 考 文 献

- 1 A. J. Mendez, R. M. Gagliardi, H. X. C. Feng *et al.*. Strategies for realizing optical CDMA for dense, high-speed, long span, optical network applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(12):1685~1696
- 2 Ji Jianhua, Xu Ming, Yang Shuwen *et al.*. Experiment on 2.5 Gbit/s symbol overlapping optical fast frequency-hopping code division multiple access system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):779~782  
吉建华,徐 铭,杨淑雯等. 2.5 Gbit/s 码位重叠快跳频光码分多址实验系统[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):779~782
- 3 Chao-Chin Yang. Optical CDMA passive optical network using prime code with interference elimination [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(7):516~518
- 4 H. Fathallah, L. A. Rusch, S. LaRochelle. Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(3):397~405
- 5 L. Bin. One-coincidence sequences with specified distance between adjacent symbols for frequency-hopping multiple access [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, **45**(4):408~410
- 6 M. Srinivasan, G. Geetha, M. Meenakshi. Comparison of prime code, extended prime code and quadratic congruence code using a normalized throughput metric [C]. *Proc. 6th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2004, **2**:168~171
- 7 Z. Kostic, E. L. Titlebaum. The design and performance analysis for several new classes of codes for optical synchronous CDMA and for arbitrary-medium time-hopping synchronous CDMA communication systems [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1994, **42**(8):2608~2617
- 8 K. Wakafuji, T. Ohtsuki. Performance analysis of multibits/sequence-period optical CDMA receiver with double optical hardlimiters [C]. *Proc. GLOBECOM*, 2004, **2**:1030~1034
- 9 Ding Meiling, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng. The hybrid direct sequence/frequency hopping optical CDMA system with FBGs based encoder/decoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7):842~846  
丁美玲,章献民,陈抗生. 基于光纤布拉格光栅编解码器的直接序列扩频跳频光码分多址系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7):842~846
- 10 Xiaohui Fang, Shichen Li, Hebin Tian *et al.*. Stepped chirped fiber Bragg grating encoder/decoder for spectral OCDMA [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6):317~319
- 11 S.-S. Miu, Y.-H. Won. Upper-bounds on bit error rate of OCDMA systems using the time spreading /wavelength hopping codes [C]. *Proc. IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting. 13th Annual Meeting*, 2000, **2**:814~815