

# OCDMA 系统中变重光正交码的构造及误码率分析

周园园<sup>1</sup> 张媛<sup>1</sup> 乙万义<sup>1</sup> 李传起<sup>2</sup>

## 摘要

变重光正交码是基于不同用户带有不同的 QoS(Quality of Service)需求而提出的,由于它的码重不是固定值,使得其码字的容量较之常重光正交码有所增加.给出了变重光正交码的定义及其码字容量界,介绍了构造变重光正交码的一种方法,给出一些码字的构造结果,并对码重数不同的码字进行多址干扰误码率的仿真比较和理论分析.结果表明:在相同的码重数下,码重越大的误码率越小;而当码重数不同时,在相同的码重下,码重数大的误码率小.

## 关键词

光码分多址;变重光正交码;误码率

中图分类号 TN729

文献标志码 A

## 0 引言

### Introduction

OCDMA(Optical Codes Divide Multiple Access)是将 CDMA 技术与光纤通信技术相结合的一种新技术,能对用户的信号采用全光处理,克服了目前网络中的“电子瓶颈”效应<sup>[1]</sup>.OCDMA 因其具有保密性强、可随机接入、抗干扰、抗多径衰落等特点而成为光纤通信领域的研究热点.由于 OCDMA 技术对信号的处理是在光域中进行的,因此不存在负的物理量,对光信号的处理只能采用非负值的单极性码(0,1),这不同于电 CDMA 技术中采用的双极性码(-1,1),在电 CDMA 中采用的扩频码有很好的相关性,而在单极性码中的相关性并不能为零,只能达到伪正交<sup>[1-4]</sup>.

在 OCDMA 通信系统中,每个用户被分配唯一的、相关性能好的地址码来区分,为了减少其他用户的干扰,获得高的信噪比,并且使收发双发容易获得同步,则要求这些地址码具有良好的相关特性.OOC(Optical Orthogonal Code)是 OCDMA 系统中比较成熟的地址码之一,它具有较好的相关特性,但由于光正交码的码重是固定不变的,从而限制了码字容量,又考虑到 OCDMA 系统中不同用户所带有的 QoS(Quality of Service)需求不同,文献[5-6]在 OOC 的基础上提出了变重光正交码 VW-OOC(Variable-Weight Optical Orthogonal Codes),使得码字容量有较大增加,并能满足不同用户所带有的不同 QoS 需求.

## 1 变重光正交码的定义及其码字容量

### Definition and the bound on capacity of VW-OOC

#### 1.1 变重光正交码的定义及性质

一个变重光正交码  $C$  是一个等码长不等码重的二进制  $L$  元码组集,一般记为  $(L, W, A, \lambda_c, Q)$ ,其中  $L$  为码长,  $W$  为不同码重的集合,  $A$  为对应码重的自相限制的集合,  $Q$  为对应码重的码字数在总码集中所占的比例.变重光正交码满足如下 3 个性质<sup>[3]</sup>:

- 1) 码重为  $w_i$  的码字有  $q_i | C$  个,其中  $|C|$  为码字容量;
- 2) 对码重为  $w_i$  的任一码字  $X = (x_0, x_1, \dots, x_{L-1})$ , 有

$$\sum_{j=0}^{L-1} x_j x_{j \oplus \tau} \leq \lambda_a^i; \quad (1)$$

收稿日期 2010-03-01

资助项目 江苏省高校自然科学基金面上项目(BK2008437);南京信息工程大学科研基金(20080287)

## 作者简介

周园园,女,硕士生,主要研究方向为光通信 OCDMA 网络技术的地址码设计.

zhouyuanyuan 767@163.com

1 南京信息工程大学 数理学院,南京,210044

2 广西师范大学 电子工程学院,桂林,541012

3) 对任意两码字  $X = (x_0, x_1, \dots, x_{L-1})$  和  $Y = (y_0, y_1, \dots, y_{L-1})$ , 且  $X \neq Y$ , 有

$$\sum_{j=0}^{L-1} x_j y_{j \oplus \tau} \leq \lambda_c, \quad (2)$$

其中,  $0 < \tau < L$ , 下标  $\oplus$  表示模  $n$  加.

## 1.2 变重光正交码的码字容量

定义变重光正交码的容量为  $\Phi(L, W, A, \lambda_c, Q)$ , 分别给出其上界和下界的计算公式<sup>[5]</sup>.

当  $\lambda_a^i \geq \lambda_c, \lambda_a^i \in A$  时, 上限公式为

$$\Phi(L, W, A, \lambda_c, Q) \leq \frac{(L-1)(L-2)\cdots(L-\lambda_c)}{\prod_{i=1}^p q_i w_i (w_i - 1)(w_i - 2)\cdots(w_i - \lambda_c) / \lambda_a^i}; \quad (3)$$

下限公式为

$$\Phi(L, W, A, \lambda_c, Q) \geq \frac{\sum_{i=1}^p \left[ \binom{n}{w_i} - A \right]}{B}. \quad (4)$$

其中:

$$A = \sum_{\substack{\delta=1 \\ \delta|L}}^{\lceil L/2 \rceil} \sum_{N=0}^{w_i \delta / L} = \left[ \Delta(L - w_i \delta / L) \binom{\delta}{N} + \sum_{c=\lceil w_i \delta / L \rceil}^{w_i - \lambda_a^i + N - 1} \binom{c}{N} \binom{w_i - NL/\delta - 1}{c - N - 1} \binom{\delta}{N} \binom{L - NL/\delta}{c - N} \right] + \left| \{ \delta: 1 \leq \delta \leq \lceil L/2 \rceil, \delta | L \} \right| \sum_{c=0}^{w_i - \lambda_a^i} \binom{w_i - 1}{c - 1} \binom{L}{c},$$

$$\Delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0, \\ 0, & x \neq 0; \end{cases}$$

$$B = L \sum_{i=1}^p \sum_{j=\lambda_c+1}^{w_i} p_i \binom{L - w_i}{w_i - j} \binom{w_i}{j}.$$

取光正交码(200, 4, 1, 1), 它可以容纳的最大用户数是 16, 而等码长和相关限制的变重光正交码(200, {4, 3}, {2, 2}, 1, {1/2, 1/2})可容纳的最大用户数是 44, 几乎是前者的 3 倍. 由此可见, 变重光正交码所能提供的用户数远大于常重光正交码所能提供的用户数.

## 2 变重光正交码的构造方法

### Construction of VW-OOC

在 OCDMA 系统中, 总希望码字的相关限制尽可能地小, 所以在这里仅考虑当  $\lambda_a^i = \lambda_c = 1, i = 1, \dots, p$  时的变重光正交码. 变重光正交码的构造方法大多是基于常重光正交码的构造方法而提出

来的, 比如文献[7]利用 BIBD (balanced incomplete block design) 的思想构造了性能优良的常重光正交码( $L, w, 1, 1$ ); 而文献[5]在文献[7]的基础上利用 BIBD 的思想又构造出了变重光正交码( $L, \{w+1, w\}, \{1, 1\}, 1, \{t_0/(t_0+t_1), t_1/(t_0+t_1)\}$ ), 并给出一些构造结果. 但利用 BIBD 构造的变重光正交码只有两个不同的码重, 为了满足更多的 QoS 需求, 现介绍构造光正交码的另一种方法——基于简单差集的构造方法<sup>[8]</sup>.

### 2.1 构造原理

设集合  $D \equiv \{a_1, a_2, \dots, a_w\} \pmod L$ , 若有任意元素  $d \neq 0$  在  $D$  中恰有 1 个有序对  $(a_i, a_j)$  使得等式  $d \equiv (a_i - a_j)$  成立. 则称它为一个  $(L, w, 1)$  简单差集, 记为  $D(w, L)$ ,  $d$  称为  $D$  中元素的间隔.

若有  $w$  个整数, 则由这  $w$  个整数生成的简单差集中任意两元素之间最多有  $C_w^2$  个间隔数, 而最大的间隔数  $I_{\max} \geq w(w-1)/2$ .

已知  $|C| = \{|C_{w_1}|, |C_{w_2}|, \dots, |C_{w_p}|\}$  为变重光正交码的码字基数集,  $C_{w_i} = \{c_{l, w_i} | 1 \leq l \leq |C_{w_i}|\}$ ,  $1 \leq i \leq p$  为码重  $w_i$  的子码集, 设  $D_{x, w_i}$  是码重为  $w_i$  的码字  $x$  的任意两个脉冲位“1”的距离, 那么当

$$\bigcap_{x=1}^{|C_{w_i}|} D_{x, w_i} = \emptyset, \quad \bigcap_{i=1}^p \bigcup_{x=1}^{|C_{w_i}|} D_{x, w_i} = \emptyset$$

时满足变重光正交码的相关限制式(1)、(2). 由于此时的相关限制都是 1, 由码字容量界(3)知

$$|C| \leq \frac{(L-1)}{\sum_{i=1}^p q_i w_i (w_i - 1)}, \quad (5)$$

则有

$$L \geq \sum_{i=1}^p q_i w_i (w_i - 1) |C| + 1. \quad (6)$$

### 2.2 构造过程

根据上述构造原理, 给定码重集  $W$  和码字基数集  $|C|$  便可以构造出变重光正交码, 构造过程如下:

1) 选择特定的一组元素作为某一码字的相邻“1”的间隔集称为一阶差集, 记为

$$D_{x, w_i}^1 = \{d_{1, x}, d_{2, x}, \dots, d_{w_i-1, x}\}, \quad i = 1, \dots, p, x = 1, \dots, |C_{w_i}|$$

并且  $r \neq j, x \neq y$  时  $d_{r, x} \neq d_{j, y}$ . 那么二阶差集表示为  $D_{x, w_i}^2 = \{d_{r, x} + d_{r+1, x}\}$ , 依次可得  $w_i - 1$  阶差集

$$D_{x, w_i}^{w_i-1} = \{d_{1, x} + d_{2, x} + \dots + d_{w_i-1, x}\}.$$

2) 构造码字  $c_{x,w_i} = \{0, a_{1,x}, \dots, a_{w_i-1,x}\}$ , 其中,  $a_{1,x} = d_{1,x}, a_{2,x} = d_{1,x} + d_{2,x}, \dots, a_{w_i-1,x} = d_{1,x} + \dots + d_{w_i-1,x}$ , 在这里假定每一个码字的第一个脉冲位置是 1, 那么最大的脉冲位是

$$a_{\max} \geq \sum_{i=1}^p \frac{w_i(w_i - 1)}{2} q_i |C|. \quad (7)$$

3) 由式(6)可得所构造码字的码长满足

$$L \geq 2a_{\max} + 1. \quad (8)$$

4) 以上可构出相关限制为 1 的变重光正交码  $(L, \{w_1, w_2, \dots, w_p\}, 1, \{q_1, q_2, \dots, q_p\})$ .

通过上述方法可以构造出一个变重光正交码  $(145, \{4, 3, 2\}, 1, \{5/15, 5/15, 5/15\})$ , 如表 1 所示. 这样的变重光正交码可以支持 15 个用户, 每 5 个用户的码重分别是 4、3、2.

表 1 基于严格差集构造的变重光正交码

$(145, \{4, 3, 2\}, 1, \{5/15, 5/15, 5/15\})$

Table 1 Construction of VW-OOC  $(145, \{4, 3, 2\}, 1, \{5/15, 5/15, 5/15\})$  based on distinct set

码字		
$w_1 = 4$	$w_2 = 3$	$w_3 = 2$
{0, 1, 7, 21}	{0, 25, 59}	{0, 42}
{0, 2, 10, 26}	{0, 27, 62}	{0, 43}
{0, 3, 12, 31}	{0, 29, 67}	{0, 44}
{0, 4, 15, 37}	{0, 30, 69}	{0, 45}
{0, 5, 18, 41}	{0, 32, 72}	{0, 46}

### 3 变重光正交码的误码率分析

Analysis of bit error rate probability for VW-OOC

在 OCDMA 系统中进行误码性能分析时, 通常只考虑多用户带来的干扰, 即忽略热噪声、量子噪声、光接收机的噪声等对系统性能的影响, 这时整个系统的性能主要取决于所选用的地址码的性能. 这就使对系统误码性能的分析转化为地址码的码长、码重、用户数与系统误码率之间的关系<sup>[9]</sup>.

假设在变重光正交码的 OCDMA 系统中有  $K$  个用户同时传输, 接收机的判决门限 (Threshold, 记其量值为  $T_h$ ),  $T_h = w_i$ . 由于不同用户的 QoS 需求不同, 所以被分配的地址码的码重也不同, 考虑到每个用户发送“0”, “1”比特的概率相同, 那么码重为  $w_i$  的一个用户的干扰来自与其等码重和不等码重的双重干扰, 其误码率为<sup>[6]</sup>

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{K-1} \binom{K_i - 1}{m_i} p_i^{m_i} (1 - p_i)^{K_i - 1 - m_i} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p \binom{K_j}{m_j} p_j^{m_j} (1 - p_j)^{K_j - m_j}. \quad (9)$$

其中  $m_i$  为码重为  $w_i$  的干扰数,  $K = \{K_i \mid 1 \leq i \leq p\}$ ,

$K_i$  为码重为  $w_i$  的用户数,  $p_i = \frac{w_i}{2L}, p_j = \frac{w_j}{2L}, i \neq j,$

$1 \leq i, j \leq p.$

当只考虑同码重  $w_i$  的用户之间的干扰, 而此时  $K_j = 0, p_j = 0$ , 那么单个码重的误码率可表示为

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{K-1} \binom{K-1}{m} p^m (1-p)^{K-1-m}, \quad (10)$$

此时  $p = \frac{w^2}{2L}.$

基于上述条件及误码率公式(10), 分析不同码重数下的多用户干扰的误码率. 假定此时的  $K_1 = 60$ , 图 1 给出了码重数为 2 的变重光正交码  $(2501, \{6, 5\}, \{1, 1\}, 1, \{50/100, 50/100\})$  和码重数为 3 的变重光正交码  $(3101, \{6, 5, 4\}, \{1, 1, 1\}, 1, \{50/150, 50/150, 50/150\})$  的多址干扰的误码率仿真比较. 从图 1 中可以看出, 在相同的码重数下, 码重越大的误码率越小; 而当码重数不同时, 在相同的码重下, 码重数大的误码率小. 对于上述的两个码字, 每一码重下对应的用户数相同, 而码重数大的所能容纳的最大用户总数要多, 并且误码性能要好. 总之, 在传输相同的用户数量时, 码重个数多的, 码字的性能较好.

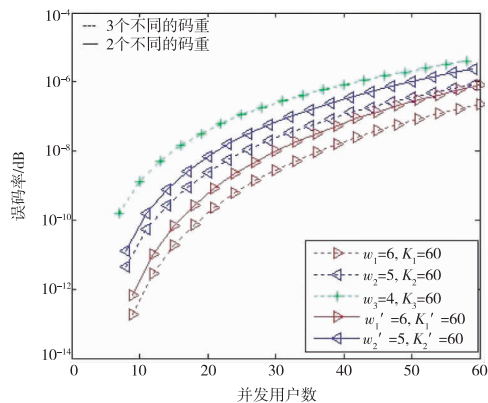


图 1 同一码重下两个不同码重数的变重光正交码多址干扰的误码率

Fig. 1 Bit error rate versus number of active users for VW-OOC of different number of code weights under the same code weight

而若考虑带有不同码重的用户之间的干扰时,比较 2 个不同码重和 3 个不同码重的地址码的误码率性能. 假定  $K_1 = 50, K_2 = 50, K_3 = 50$ , 由误码率公式(9)分析不同码重数下的多用户干扰误码率. 图 2 给出了码重数为 2 和 3 的变重光正交码分别为  $(2501, \{6, 5\}, \{1, 1\}, 1, 50/100, 50/100)$  和  $(3101, \{6, 5, 4\}, \{1, 1, 1\}, 1, \{50/150, 50/150, 50/150\})$  的多址干扰的误码率仿真比较图. 从图 2 可以看出, 3 个码重数的地址码的多址干扰误码率比 2 个码重数的地址码的多址干扰误码率要小, 码字容量大, 由此看出 3 个码重数地址码比 2 个码重的地址码性能好. 但 3 个码重数的码长比较大, 从而降低了码字的传输速率. 比较图 1 和图 2, 可以看出并发用户少的情况下, 码字的多址干扰误码率相对要小些.

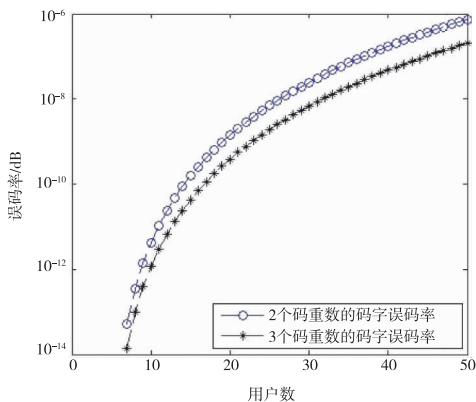


图 2 考虑带有不同码重的变重光正交码  
多址干扰误码率

Fig. 2 Bit error rate versus number of active users for  
VW-OOC of different code number

## 4 结论

### Conclusion

基于不同用户带有不同的 QoS 需求而提出的变重光正交码由于它的码重不是固定值, 使得其码字容量较之常重光正交码有所增加. 本文从变重光正交码的定义及其码字容量界出发, 比较了变重光正交码与常重光正交码的码容量, 继而介绍了用严格差集构造变重光正交码的过程, 并给出码字的构造结果. 这种方法可以满足 OCDMA 系统的不同需求而构造出相应的码字, 但当用户数达到一定程度时

需借助计算机来完成构造. 最后对不同码重数的变重光正交码进行多址干扰误码率的仿真比较和理论分析, 给出了码重数为 2 和 3 的变重光正交码的误码率的仿真图, 分别考虑了相同码重下并发用户的多址干扰误码率和不同码重的用户之间的多址干扰误码率. 结果表明: 在相同的码重数下, 码重越大的误码率越小; 而当码重数不同时, 在相同的码重下, 码重数大的误码率小; 码重数大的地址码的多址干扰误码率比码重数小的地址码的多址干扰误码率要小, 码字容量大. 由此看出 3 个码重数地址码比 2 个码重的地址码性能好, 但 3 个码重数的码长比较大, 从而降低了码字的传输速率. 而并发用户少的情况下, 码字的多址干扰误码率相对较小.

## 参考文献

### References

- [1] Chung F R K, Salehi J A, Wei V K. Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1989, 37(5): 595-604
- [2] 梁宇辉. OCDMA 系统中光正交码的研究 [D]. 成都: 电子科技大学光学工程学院, 2006  
LIANG Yuhui. Research of OOC in OCDMA system [D]. Chengdu: College of Optical Engineering in University of Electronic Science and Technology of China, 2006
- [3] 李传起, 李晓滨. 光纤通信 OCDMA 系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2008  
LI Chuanqi, LI Xiaobin. Fiber communications OCDMA system [M]. Beijing: Science Press, 2008
- [4] 李晓滨, 宋建中. 最佳  $(F, K, 1)$  光正交码的构造算法研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(5): 417-420  
LI Xiaobin, SONG Jianzhong. Discussion on an algorithm of construction of optical  $(F, K, 1)$  optical orthogonal codes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 417-420
- [5] Yang G C. Variable-weight optical orthogonal codes for CDMA network with multiple performance requirements [J]. IEEE Transactions on Communication, 1996, 44(1): 47-55
- [6] Djordjevic I B, Vasic B. Design of multiweight unipolar codes for multimedia optical CDMA applications based on pair wise balanced designs [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(9): 1850-1856
- [7] Yang G C, Fuja T E. Optical orthogonal codes with unequal auto- and cross-correlation constraints [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(1): 96-106
- [8] Nasaruddin, Tetsuo T. Design of strict variable-weight optical orthogonal codes for differentiated quality of service in optical CDMA networks [J]. Computer Networks, 2008, 52(10): 2077-2086
- [9] 张宝富, 万谦. 光码分多址 (OCDMA) 系统误码性能研究 [J]. 通信学报, 2003, 24(5): 79-84  
ZHANG Baofu, WAN Qian. The study of the bit error performance of the multiple-users FO-OCDMA communication system [J]. Journal of China Institute of Communications, 2003, 24(5): 79-84

## Structure and BER analysis of variable-weight optical orthogonal codes for OCDMA systems

ZHOU Yuanyuan<sup>1</sup> ZHANG Yuan<sup>1</sup> YI Wanyi<sup>1</sup> LI Chuanqi<sup>2</sup>

1 School of Mathematics and Physics,Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing 210044

2 College of Electronic Engineering,Guangxi Normal University,Guilin 541012

**Abstract** Variable-weight optical orthogonal codes(VW-OOC) are put forward to provide differentiated quality of service(QoS) for different users. Due to its non-fixed code weight, the VW-OOC is larger in capacity than constant OOC. In this paper, the definition and the bound on capacity of VW-OOC are given. The method of designing VW-OOC is presented, and the structure results of the proposed codes are given. In the end, the bit error rate(BER) of multi-user interference for different number of code weight is compared through emulation and theoretical analysis. Results show that the BER of larger code weight is smaller while the number of code weight is the same, and the BER of larger number of code weight is smaller while the code weight is the same.

**Key words** OCDMA; variable-weight optical orthogonal codes; bit error rate