

文章编号: 0258-7025(2007)05-0667-04

一种新的二维光正交码及其性能分析

吉建华, 田晶晶, 莫浩然, 徐 铭

(深圳大学信息工程学院新技术研究中心, 广东 深圳 518060)

摘要 以光正交码(OOC)作为时间扩频序列,以单重合序列(OCS)作为波长跳频序列,构造了一种新的二维光正交码,即光正交码/单重合序列。与其他二维光正交码相比,光正交码/单重合序列的波长数并不局限于素数或素数幂,可以是任意整数,不仅构造灵活,而且可充分利用多波长光码分多址(MW OCDMA)系统的有效波长数。分析了光正交码/单重合序列码字的自相关和互相关性能,并得到了其互相关均值的具体表达式。最后,针对多波长光码分多址不同的系统参数,对不同参数的光正交码/单重合序列码字性能进行了分析和讨论:1) 给定单重合序列参数和光正交码的码重,增加码长将降低光码分多址系统误码率;2) 给定光正交码的参数和单重合序列的码长,增加波长数将降低光码分多址系统误码率。

关键词 光通信;光码分多址;光正交码;二维光正交码;单重合序列

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

A New Family of Two-Dimensional Optical Orthogonal Codes and Its Performance Analysis

Ji Jian-hua, Tian Jing-jing, Mo Hao-ran, Xu Ming

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

Abstract A new two-dimensional (2D) optical orthogonal code (OOC) constructed using OOC for time spreading and one-coincidence sequence (OCS) for wavelength hopping named OOC/OCS is presented. Compared with other 2D OOC, the number of wavelengths for OOC/OCS is not limited to a prime number or its power. OOC/OCS can be constructed flexibly, and also can use available wavelengths adequately. Auto-correlation and cross-correlation performances of OOC/OCS are analyzed, and the mean value of cross-correlation is also deduced. In the end, the performance of OOC/OCS with different parameters is analyzed and discussed, according to different parameters of multi-wavelength optical code division multiple access (MW OCDMA) system. Given OCS and code weight w , bit error ratio (BER) of OCDMA system is decreased when code length L is increased. Given OOC and code length N , BER of OCDMA system is decreased when the number of wavelengths is increased.

Key words optical communication; optical code division multiple access; optical orthogonal codes; two-dimensional optical orthogonal codes; one-coincidence sequence

1 引言

光码分多址(OCDMA)具有异步、宽带、安全和随机即时接入等特点,是未来高速局域网和接入网的最佳方案之一。目前,采用二维光正交码(OOC)的多波长光码分多址系统(MW OCDMA)已成为研究热点^[1~8]。在多波长光码分多址系统中,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,称为二维光正交码。二维光正交码一般是在一维光地址码的基础上,通过扩展波长信道而得到的,它可以用 $m \times n$ 矩阵表示,这里 m 表示矩阵的行数(对应有有效波长数), n 表示矩阵的列数(对应码长,即扩频系数)。根据时间扩频序列与波长跳频序列的不同,可以构成多种二维光正交码,主要有素数码(PC)/素数码^[1]、扩展二次同余码(EQC)/素数

收稿日期:2006-09-06;收到修改稿日期:2006-12-29

基金项目:深圳大学科研基金(200634)资助项目。

作者简介:吉建华(1970—),男,江苏人,副教授,主要从事光码分多址、扩频通信和信道编码的教学和科研工作。

E-mail:jjh@szu.edu.cn

码^[2]、素数码/光正交码^[3]、光正交码/素数码^[4]和单重合跳频码(OCFHC)/光正交码^[5]等。素数码/素数码和扩展二次同余码/素数码采用素数序列为波长跳频序列,即 m 必须为素数,而且 m 和 n 值不能独立选取。素数码 / 光正交码利用光正交码为波长跳频序列,波长数 m 必须为素数而且近似等于码长 n 。光正交码 / 素数码利用素数序列为波长跳频序列, m 不能是任意整数^[4]。单重合跳频码 / 光正交码采用单重合跳频码为波长跳频序列,波长数 m 必须为素数。因此,上述二维光正交码的波长数只能是素数或素数幂,而不能是任意整数,这样就不能充分利用多波长光码分多址系统的有效波长数。本文以光正交码作为时间扩频序列,以单重合序列(OCS)作为波长跳频序列,构造一种新的二维光正交码 / 单重合序列。构造光正交码 / 单重合序列的波长数 m 可以是任意整数,不仅构造灵活,而且可充分利用系统的有效波长数,增加了码字容量,改善了多波长光码分多址系统误码率。

2 光正交码/单重合序列构造

一维光正交码用 $(L, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 表示, L 为码长(即扩频系数), ω 为码重(光脉冲的个数), λ_a 为自相关限, λ_c 为互相关限,对于 $(L, \omega, 1, 1)$ 光正交码,码字容量满足 $\Phi_{\text{OOC}} \leq \left[\frac{L-1}{\omega(\omega-1)} \right]$ 。二维光正交码用 $(m \times n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 表示, m 为有效波长数, n 为码长。

单重合序列^[9]是一种为无线跳频码分多址(CDMA)系统设计的跳频序列,特点是自相关限为 0,互相关限等于 1。根据文献[9]的构造方法,设 q 为一个奇整数,定义 $N = q - 2d - 1$ (q 为偶整数时,定义 $N = q - 2d - 2$),整数 d 为任意两个相邻切普(chip)波长的最小间隔,则可以构成 q 个长为 N 的单重合序列。

例如,多波长光码分多址系统有 15 个有效波长(用 0, 1, ..., 14 表示),即 $q = 15$,如果选择 $d = 2$,则构造 15 个码长为 10 的单重合序列码字^[9]: $H_k = \{3 \oplus k, 12 \oplus k, 4 \oplus k, 8 \oplus k, 13 \oplus k, 10 \oplus k, 1 \oplus k, 9 \oplus k, 5 \oplus k, 0 \oplus k\}$,其中 $k = 0, 1, \dots, 14$,“ \oplus ”表示模 15 的加法。选择 $d = 3$,则构造 15 个码长为 8 的单重合序列码字^[9]: $H_k = \{4 \oplus k, 10 \oplus k, 2 \oplus k, 7 \oplus k, 3 \oplus k, 12 \oplus k, 5 \oplus k, 0 \oplus k\}$,如表 1 所示。

以光正交码为时间扩频序列,以单重合序列为波长跳频序列,即构成二维光正交码,即光正交码/

表 1 $q=15$ 时单重合序列码字

Table 1 OCS codes for $q=15$

	$d = 2$	$d = 3$
H_0	3 12 4 8 13 10 1 9 5 0	4 10 2 7 3 12 5 0
H_1	4 13 5 9 14 11 2 10 6 1	5 11 3 8 4 13 6 1
H_2	5 14 6 10 0 12 3 11 7 2	6 12 4 9 5 14 7 2
H_3	6 0 7 11 1 13 4 12 8 3	7 13 5 10 6 0 8 3
H_4	7 1 8 12 2 14 5 13 9 4	8 14 6 11 7 1 9 4
H_5	8 2 9 13 3 0 6 14 10 5	9 0 7 12 8 2 10 5
H_6	9 3 10 14 4 1 7 0 11 6	10 1 8 13 9 3 11 6
H_7	10 4 11 0 5 2 8 1 12 7	11 2 9 14 10 4 12 7
H_8	11 5 12 1 6 3 9 2 13 8	12 3 10 0 11 5 13 8
H_9	12 6 13 2 7 4 10 3 14 9	13 4 11 1 12 6 14 9
H_{10}	13 7 14 3 8 5 11 4 0 10	14 5 12 2 13 7 0 10
H_{11}	14 8 0 4 9 6 12 5 1 11	0 6 13 3 14 8 1 11
H_{12}	0 9 1 5 10 7 13 6 2 12	1 7 14 4 0 9 2 12
H_{13}	1 10 2 6 11 8 14 7 3 13	2 8 0 5 1 10 3 13
H_{14}	2 11 3 7 12 9 0 8 4 14	3 9 1 6 2 11 4 14

表 2 光正交码为 $(7, 3, 1, 1)$ 和单重合序列为 $(15, 3, 8)$ 的光正交码/单重合序列码字

Table 2 OOC/OCS codes for OOC(7,3,1,1) and OCS(15,3,8)

CH_0	CH_1	...	CH_{14}
$\lambda_4 \lambda_{10} 0 \lambda_2 0 0 0$	$\lambda_5 \lambda_{11} 0 \lambda_3 0 0 0$	...	$\lambda_3 \lambda_9 0 \lambda_1 0 0 0$
$\lambda_{10} \lambda_2 0 \lambda_7 0 0 0$	$\lambda_{11} \lambda_5 0 \lambda_8 0 0 0$	...	$\lambda_9 \lambda_1 0 \lambda_6 0 0 0$
$\lambda_2 \lambda_7 0 \lambda_3 0 0 0$	$\lambda_3 \lambda_8 0 \lambda_4 0 0 0$	...	$\lambda_1 \lambda_6 0 \lambda_2 0 0 0$
$\lambda_7 \lambda_3 0 \lambda_{12} 0 0 0$	$\lambda_8 \lambda_4 0 \lambda_{13} 0 0 0$	...	$\lambda_6 \lambda_2 0 \lambda_{11} 0 0 0$
$\lambda_3 \lambda_{12} 0 \lambda_5 0 0 0$	$\lambda_4 \lambda_{13} 0 \lambda_6 0 0 0$	...	$\lambda_2 \lambda_{11} 0 \lambda_4 0 0 0$
$\lambda_{12} \lambda_5 0 \lambda_0 0 0 0$	$\lambda_{13} \lambda_6 0 \lambda_1 0 0 0$	...	$\lambda_{11} \lambda_4 0 \lambda_{14} 0 0 0$
$\lambda_5 \lambda_0 0 \lambda_4 0 0 0$	$\lambda_6 \lambda_1 0 \lambda_5 0 0 0$	...	$\lambda_4 \lambda_{14} 0 \lambda_3 0 0 0$
$\lambda_0 \lambda_4 0 \lambda_{10} 0 0 0$	$\lambda_1 \lambda_5 0 \lambda_{11} 0 0 0$	...	$\lambda_{14} \lambda_3 0 \lambda_9 0 0 0$

单重合序列。由于单重合序列的码重为 N ,因此光正交码的码重 ω 不能超过 N 。例如,光正交码为 $(7, 3, 1, 1)$,一个码字为 $C: 1101000$ 。单重合序列参数为 $q = 15, d = 3, N = 8$ (表 1),则二维光正交码 / 单重合序列码字如表 2 所示。此时,由于单重合序列的码长 $N = 8$,可以将每个单重合序列码字 $H_k (k = 0, 1, \dots, 14)$ 分别循环右移 8 次,即每个单重合序列码字可构成 8 个波长跳频序列,分别对应 8 个光正交码 / 单重合序列码字,所以总共构成 120 个光正交码 / 单重合序列码字。当单重合序列参数为 $q = 15, d = 2, N = 10$,则每个单重合序列码字可以构成 10 个波长跳频序列(分别循环右移 10 次),因此每个单重合序列码字可构成 10 个光正交码 / 单重合序列码字,

总共构成 150 个光正交码 / 单重合序列码字。一般来讲,对于给定的 $(L, \omega, 1, 1)$ 光正交码和 (q, d, N) 单重合序列,这里 $\omega \leq N$,则光正交码 / 单重合序列码字容量为 $q \times N \times \Phi_{\text{OOC}}$ 。

3 光正交码/单重合序列性能分析

由于单重合序列的自相关限为 0 (同一个码字中的相同波长最多出现一次),因此光正交码/单重合序列的自相关限也为 0。对于互相关限,应考虑以下几种情况:1) 相同的时间扩频序列/不同的波长跳频序列,由于光正交码的自相关限为 1,并且单重合序列的互相关限为 1,因此光正交码/单重合序列互相关限为 1;2) 不同的时间扩频序列/相同的波长跳频序列,由于光正交码的互相关限为 1,因此光正交码/单重合序列互相关限为 1;3) 不同的时间扩频序列/不同的波长跳频序列,同样,由于光正交码的互相关限为 1,因此光正交码/单重合序列互相关限为 1。因此,光正交码/单重合序列的码字参数为 $(q \times L, \omega, 0, 1)$,码字容量为 $q \times N \times \Phi_{\text{OOC}}$ 。

下面具体分析光正交码/单重合序列的互相关均值。具体的方法是,让任意一个码字 A 时间平移 L 次(码长),统计该码字与其余 $(q \times N \times \Phi_{\text{OOC}} - 1)$ 个码字在水平和垂直位置都相同(即在时间和波长上都重合)的“1”的个数(碰撞数),然后计算互相关均值。分以下几种情况:

1) 与码字 A 具有相同的时间扩频序列,但跳频序列不相同

共有 $q \times N$ 个不同波长跳频序列,对应的不同码字数为 $q \times N - 1$ 个。分两种情况:(1) 相同的单重合序列(不同的循环移位),共 $N - 1$ 个,共有 $\omega(\omega - 1)$ 次碰撞。(2) 不同的单重合序列,考虑到单重合序列的循环特性,共有 $(N - 1)\omega^2$ 次碰撞。所以,在这种情况下,共有 $N\omega^2 - \omega$ 个碰撞。

2) 与码字 A 具有不同的时间扩频序列,但跳频序列相同

共有 $\Phi_{\text{OOC}} - 1$ 个不同的码字,所以共 $(\Phi_{\text{OOC}} - 1)\omega$ 个碰撞。

3) 与码字 A 具有不同的时间扩频序列,而且跳频序列不同

共有 $(\Phi_{\text{OOC}} - 1)(q \times N - 1)$ 个不同的码字,与 1) 的分析类似,共 $(\Phi_{\text{OOC}} - 1)(N\omega^2 - \omega)$ 个碰撞。

因此,任意一个码字水平移 L 次,与其余 $q \times N \times \Phi_{\text{OOC}} - 1$ 个码字发生碰撞的总次数为

$$Y = (N\omega^2 - \omega) + (\Phi_{\text{OOC}} - 1)\omega + (\Phi_{\text{OOC}} - 1)(N\omega^2 - \omega) = \Phi_{\text{OOC}}N\omega^2 - \omega. \quad (1)$$

考虑到用户等概率地发送数据比特“0”和“1”,光正交码/单重合序列的互相关均值为

$$\mu = \frac{1}{2} \times \frac{Y}{(\Phi_{\text{OOC}}qN - 1) \times L} = \frac{\Phi_{\text{OOC}}N\omega^2 - \omega}{2L \times (\Phi_{\text{OOC}}qN - 1)}. \quad (2)$$

假定多波长光码分多址系统中有 K 个并发用户数,则采用光正交码 / 单重合序列的多波长光码分多址系统的误比特率为

$$P_e(K) = \frac{1}{2} \sum_{i=w}^{K-1} \binom{K-1}{i} (\mu)^i (1-\mu)^{K-1-i}. \quad (3)$$

这里只考虑用户多址干扰的影响,判决门限取光正交码/单重合序列的码重 ω 。下面针对多波长光码分多址不同的系统参数,对不同码字参数的光正交码/单重合序列进行讨论:

1) 给定单重合序列 (q, d, N) ,给定光正交码的码重 ω ,增加光正交码码长 L 。根据(2)式,光正交码/单重合序列码字的互相关均值降低,因此,在相同并发用户数的情况下,多波长光码分多址系统的误码率(BER)也降低。例如,单重合序列为 $(15, 3, 8)$,光正交码分别为 $(7, 3, 1, 1)$ 和 $(11, 3, 1, 1)$,这两种情况下光正交码/单重合序列码字容量都为 120。多波长光码分多址系统的误码率与并发用户数的关系如图 1 所示,光正交码的码长越长,多波长光码分多址系统的误码率越低。

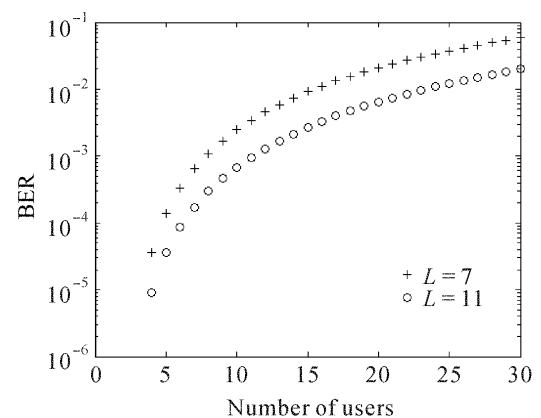


图 1 不同码长时多波长光码分多址误码率与并发用户数的关系

Fig. 1 BER versus number of simultaneous users of MW OCDMA system

2) 给定光正交码为 $(L, \omega, 1, 1)$,给定单重合序列的码长 N ,增加波长数 q 。此时,光正交码/单重合

序列的码字容量增加。根据(2)式,光正交码/单重合序列码字的互相关均值降低,因此多波长光码分多址系统的误码率也降低。例如,光正交码为(7,3,1,1),单重合序列分别为(15,3,8)和(19,5,8),这两种情况下光正交码/单重合序列码字容量分别为120和152。多波长光码分多址系统的误码率与并发用户数的关系如图2所示,有效波长越多,误码率越低。

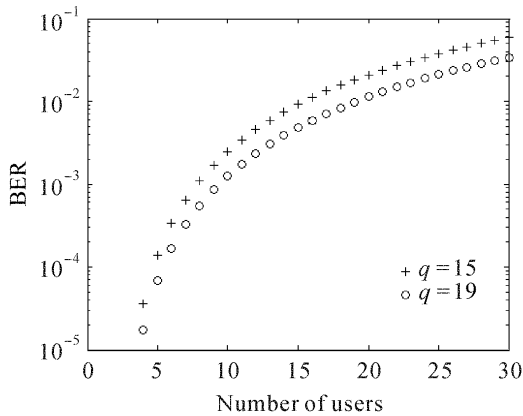


图2 不同波长数时多波长光码分多址误码率与并发用户数的关系

Fig. 2 BER versus number of simultaneous users of MW OCDMA system

3) 给定光正交码为 $(L, w, 1, 1)$,给定波长数 q ,选择不同 N 的单重合序列,此时,只改变光正交码/单重合序列的码字容量,而根据(2)式,码字的互相关均值基本保持不变,即多波长光码分多址系统的误码率性能基本相同。

4 结 论

由以上分析可知,光正交码/单重合序列的自相关限为0,互相关限为1。当光正交码/单重合序列

码字其他参数相同时,码长越长误码率越低,或者有效波长越多误码率越低。因此,根据系统的不同参数和要求,可灵活设计不同参数的光正交码/单重合序列码字。但需要说明的是,在某些参数下,不能按文献[9]的方法构造单重合序列,此时可以用其他方法^[4,5]构造。

参 考 文 献

- 1 L. Tančevski, I. Andonovic. Wavelength hopping/time spreading code division multiple access systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(17):1388~1390
- 2 L. Tančevski, I. Andonovic. Hybrid wavelength hopping/time spreading schemes for use in massive optical networks with increased security [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(12):2636~2647
- 3 S. P. Wan, Y. Hu. Two-dimensional optical CDMA differential system with Prime/OOC codes [J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1373~1375
- 4 Wing C. Kwong, Guu-chang Yang, Varghese Baby *et al.*. Multiple-wavelength optical orthogonal codes under prime-sequence permutations for optical CDMA [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2005, **53**(1):117~123
- 5 Sun Shurong, Hongxi Yin, Ziyu Wang *et al.*. A new family of 2-D optical orthogonal codes and analysis of its performance in optical CDMA access networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4):1646~1653
- 6 Chengbin Sheng, Chen Wu, Jinhui Yu *et al.*. A novel symbol overlapping FFH-OCDMA system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2):78~81
- 7 Yang Shuwen, Pu Tao, Xu Ming *et al.*. Research of algebraic congruent codes used in two-dimensional code division multiaddress system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):225~229
杨淑雯,蒲涛,徐铭等.用于二维光址多分址系统的代数同余码研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):225~229
- 8 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的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
- 9 Li Bin. One-coincidence sequence with specified distance between adjacent symbols for frequency-hopping multiple access [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, **45**(4):408~410