

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.03.012

无线通信技术

一种新型二维光正交码的设计及性能分析

谭鹏飞,李传起,陆 叶,曾汝琦,乐 翔,彭 瑶

(广西师范大学 电子工程学院 光电子与光通信实验室,广西 桂林 541004)

摘要:在保证误码率较低的前提下,为了获得较大的码容量,现以扩展二次素数码作为扩时序列,以二次全等跳频码作为跳频序列,构造出了一种新的二维光正交码 ESPC/QCHC。分析了 ESPC/QCHC 的码字性能,得到了该码字的平均互相关表达式。对该码字的码字容量进行理论分析,并对其误码率进行了 MATLAB 仿真。结果表明,当码重(或码长)一定时,增加频率片数会降低误码率;同其他几种以素数码作为扩时序列构造出的二维光正交码相比,该码字有较低的误码率,较大的码容量。最后在 Optisystem7.0 中对 ESPC/QCHC 在光码分多址系统中的误码率进行仿真分析,验证了其具有较好的误码性能。

关键词:光码分多址系统;扩展二次素数码;二次全等跳频码;误码率

中图分类号:TN911

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2017)03-0045-03

A Novel Two-Dimensional Optical Orthogonal Code Design and Performance Analysis

TAN Peng-fei, LI Chuan-qi, LU Ye, ZENG Ru-qi, YUE Xiang, PENG Yao

(Lab of Optoelectronics and Optical Communications, College of Electronic Engineering,

Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Under the premise of low Bit Error Rate (BER), in order to obtain larger code capacity, a new two-dimensional Optical Orthogonal Code (OOC) named ESPC/QCHC is constructed with Extend Square Prime Code (ESPC) as time spreading sequence and Quadratic Congruence-Hop Code (QCHC) as wavelength hopping sequence. The cross-correlation mean value is deduced by analyzing the performance of ESPC/QCHC. The word capacity of the code is theoretically analyzed, and the BER of the code is simulated by MATLAB. The results show that lower BER can be achieved by increasing the number of frequencies when the same code weight (or code length) is given. This code has lower BER and larger code capacity when compared with other two dimensional OOC which constructed by the prime number as time spreading sequence. The simulation results in the Optical Code Division Multiple Access (OCDMA) system have shown that the BER performance ESPC/QCHC is better.

Key words: OCDMA system; ESPC; QCHC; bit error rate

0 引 言

光码分多址(Optical Code Division Multiple Access,OCDMA)技术因具有安全性高、带宽宽、抗干扰和综合服务等特点,是未来高速局域网和接入网的最佳方案之一^[1-3],根据时域和频域采用伪随机序列的不同可构造出多种时域/频域的二维光正交码(Optical Orthogonal Code,OOC)。目前,较为热门的研究是以单重合序列(One-Coincidence Sequence,OCS)^[4]作为跳频序列构造出的二维 OOC,如素数码(Prime Code,PC)/OCS^[3]、扩展素数码(Extend Prime Code,EPC)/OCS^[5]、修正二次素数码(Modified Square Prime Code,MSPC)/OCS^[2]、扩展二次素数码(Extend Square Prime Code,ES-PC)/OCS^[6]和一次重合跳频码(One-Coincidence Frequency Hopping Code,OCFHC)/OCS^[7]等,然而 OCS 的码容量不大,其值仅与使用的频率片数相

等,因此上述码字的码容量一般不会很大,并且频率片数较大的 OCS 也较难构造。本文以 ESPC 作为扩时序列,二次全等跳频码(Quadratic Congruence-Hop Code,QCHC)^[8]作为跳频序列构造出的 ESPC/QCHC 具有较大的码容量和较低的误码率(Bit Error Rate,BER),构造也较简单。

1 ESPC/QCHC 的构造

ESPC 的构造函数如下:

$$S_j(k) = j \otimes_{(2p-1)} k \otimes_{(2p-1)} (k \oplus_{(2p-1)} 1)/2, \\ j \in \{0, 1, 2, \dots, p-1\}, k = 0, 1, \dots, p-1, \quad (1)$$

$$C_j(i) = \begin{cases} 1, & i = S_j(k) + k \cdot (2p-1), \\ 0, & i \neq S_j(k) + k \cdot (2p-1), \end{cases} \\ i = 0, 1, \dots, p(2p-1)-1, \quad (2)$$

式中, $S_j(k)$ 表示位置算子, p 为素数,下标 $2p-1$ 表示模 $2p-1$ 运算; $C_j(i)$ 表示地址码码字。假如,在

收稿日期:2017-01-15

基金项目:广西科学研究与技术开发计划资助项目(桂科攻 1598007-12);广西师范大学青年基金资助项目(17A4)

作者简介:谭鹏飞(1993—),男,江西赣州人。硕士,主要从事光码分多址系统的研究。

通信作者:李传起,教授。E-mail: lcq@gxnu.edu.cn

Galois 域 GF(3)上构造扩时序列,取 $j = 1$,根据式 (1) 可求得 $S_j(k)$ 为 $\{0,1,3\}$,对应的码字 ESPC_1 为 $\{10000\ 01000\ 00010\}$ 。ESPC 的码字参数为 $(p(2p-1),p,1,1)$ 。

QCHC 是一种自相关限为 0、互相关限为 1 的扩频序列,其码容量达到了扩频码的最大码容量。按照文献[8]的构造方法可构造出 QCHC。先任取一个不为 2 的素数 N 和任意的 α,β 和 γ ,且有 $\alpha \in \{1,2,\cdots,N-1\},\beta,\gamma \in \{0,1,\cdots,N-1\}$,根据公式 $y_{\alpha,\beta,\gamma}(i)=[\alpha(i+\beta)^2+\gamma] \bmod (N)+i \cdot N+1$, $i=0,1,\cdots,N-1$,

当 α 取定一个值时,改变 β 和 γ 的取值就可构造出含 N 个频率片且满足自相关限为 1 的 N^2 个序列。同时定义 y_λ ,且满足

$$y_\lambda(i)=\lambda N+i+1, \quad \lambda \in \{0,1,\cdots,N-1\}, \\ i=0,1,\cdots,N-1, \tag{4}$$

通过改变 λ 的取值就可构造出含 N 个频率片且满足互相关限为 0 的 N 个序列。由文献[8]可知,由式 (3) 和式 (4) 构造出的 N^2+N 个序列两两之间会满足互相关为 1 的限制,将这 N^2+N 个序列通过素数跳频码的构造方法就可以构造出 $(N^2+N) \times$

表 1 ESPC/QCHC 与其他几种二维 OOC 码字性能对比

码字类型	自相关限	互相关限	码长	码重	码字容量
ESPC/QCHC	0	1	$p(2p-1)$	p	$pq(q-1)$
ESPC/OCS	0	1	$p(2p-1)$	p	pq
PC/OCS	0	1	p^2	p	$p(q-1)$
EPC/OCS	0	1	p^2	$(p+1)/2$	pq
MSPC/OCS	0	1	$p(2p-1)$	p	$p(q-1)$

从上表可知,这几种二维 OOC 的相关性限制一样,ESPC/QCHC 的码容量是 ESPC/OCS、EPC/OCS 这两种码字的 $q-1$ 倍,是 PC/OCS、MSPC/OCS 这两种码字的 q 倍。

假设 A 是 ESPC/QCHC 码集中的任意一码字,对 ESPC/QCHC 码字的平均互相关进行分析时可分为以下 3 种情况考虑:

(1) 与 A 有相同的扩时序列,不同的跳频序列。相同的 QCHC(但不同的循环移位)条件下, A 有 p 个频率片,每个频率片与符合这条件下的码字的相同频率片相碰 $(p-1)$ 次, A 的 p 个频率片共相碰 $p(p-1)$ 次。不同的 QCHC 的条件下, A 的 p 个频率片共相碰 $(N^2-2)p^2$ 次。所以在这种情况下共有 $p^2(N^2-1)-p$ 次相碰。

(2) 与 A 具有相同的跳频序列和不同的扩时序列。 A 的 p 个频率片会与符合这条件下的码字的相

$(N-1)=N^3-N$ 个满足自相关限为 0、互相关限为 1 的 QCHC。例如,当取 $\alpha=1,N=3$ 时,就可以得到 $\{1,5,8\},\{1,8,5\},\{2,6,9\},\{2,9,6\},\cdots,\{7,8,9\},\{7,9,8\}$ 等 24 个 QCHC 序列。

将每个 QCHC 序列分别循环右移 N 次,可得到 N 个跳频序列,如将 $\{1,5,8\}$ 右移 3 次,可得到 $\{1,5,8\},\{5,8,1\},\{8,1,5\}$ 这 3 个跳频序列,因此 N^3-N 个 QCHC 可构造出 $N^2(N^2-1)$ 个跳频序列。以 ESPC_1 作为扩时序列, $\{1,5,8\}$ 作为跳频序列,构造出的一个码字可用 ω 集表示为 $\{(1,0),(5,6),(8,13)\}$,其他码字可类似表示出。

2 ESPC/QCHC 码字性能分析

由于 QCHC 的自、互相关限分别为 0 和 1,ESPC 的相关性限制都为 1,类似 ESPC/OCS 码字性能的分析,ESPC/QCHC 的自、互相关限分别为 0 和 1。因此本文构造出的 ESPC/QCHC 的参数为 $(q \times p(2p-1),p,0,1)$,其中, $q=N^2$ 为频率片数,码容量为 $pq(q-1)$ 。ESPC/QCHC 与其他几种二维 OOC 的码字性能对比,如表 1 所示。

同频率片发生 $(p-1)p$ 次相碰。

(3) 与 A 的跳频序列和扩时序列都不同。类似 (1) 的分析方法,在这种情况下共有 $p(p-1)^2+p^2(p-1)(N^2-2)$ 次相碰。

综上所述,相碰的总次数为 $X=p^2(N^2-1)-p+p(p-1)+p(p-1)^2+p^2(p-1)(N^2-2)$ 。假如用户发送“0”和“1”数据比特的概率是相等的,则 ESPC/QCHC 的平均互相关为

$$\mu=\frac{X}{2p(2p-1)[p(N^3-N)N-1]}=\frac{pq+(p-1)^2+p(p-1)(q-2)-2}{2(2p-1)[pq(q-1)-1]} \tag{5}$$

若 OCDMA 系统中有 K 个并发用户,判决门限取 ESPC/QCHC 的码重,则基于此码字的 OCDMA 系统误码率为

$$BER=\frac{1}{2}\sum_{i=p}^{K-1}\binom{K-1}{i}\mu^i(1-\mu)^{K-1-i} \tag{6}$$

3 ESPC/QCHC 误码率仿真分析

图 1 所示为 ESPC/QCHC 与其他几种二维 OOC 的误码率仿真图,这几种码字的参数均设为 $p=3,q=9$ 。仿真结果表明:ESPC/QCHC 的误码率比 ESPC/OCS 的略高,但比其他几种码字的误码率低半个至一个数量级。

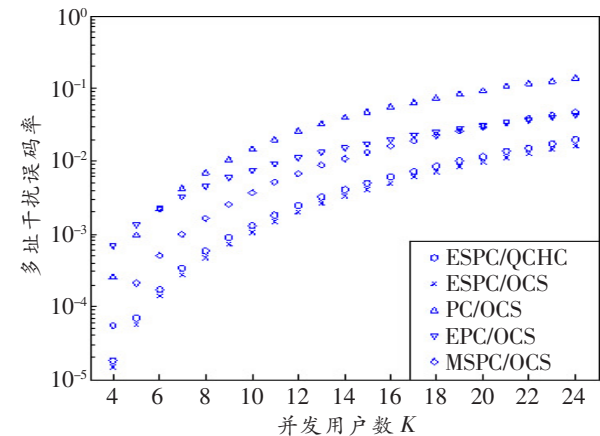


图 1 ESPC/QCHC 与其他几种二维 OOC 的误码率

图 2 所示为 ESPC/QCHC 的码重 $p=3,q$ 分别为 9、25 和 49 时的误码率仿真图。仿真结果表明:ESPC/QCHC 的码重(或码长)一定时,随着频率片数的增加,误码率会降低。

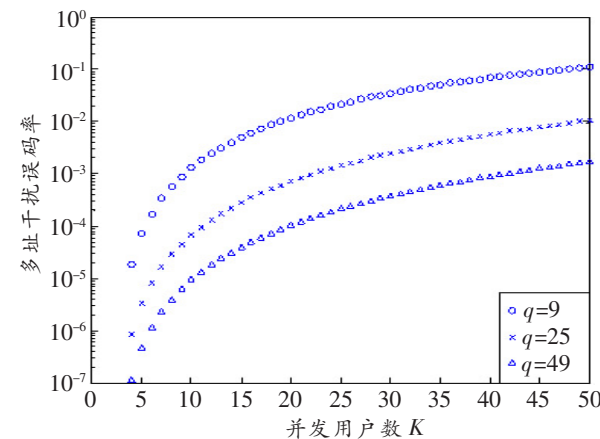


图 2 ESPC/QCHC 的误码率与频率片数的关系

采用 Optisystem7.0 软件进行双用户异步 OCDMA 系统仿真,信号速率为 10 Gbit/s,传输距离为 10 km,光纤的损耗系数为 0.2 dB/km,用户 1 和用户 2 分别以 $\{(1,0),(5,6),(8,13)\}$ 和 $\{(1,0),(8,6),(5,13)\}$ 作为地址码,使用级联布拉格光纤光栅作为光谱域编解码器,选用的中心波长都为 1 546、1 550 和 1 553 nm;使用光纤延时器作为时域编解码器,单位时间片间隔为 0.1 ns,在两用户的编码信号进入光纤耦合器前加入延时实现异步传输。图 3 和

图 4 分别为用户 1 和用户 2 在系统中的仿真眼图,可以看到两眼图都较为清晰,表明误码率较低,由此可知该码字在系统中有较为优良的性能。使用该码字作为地址码的 OCDMA 系统可用于接入网。

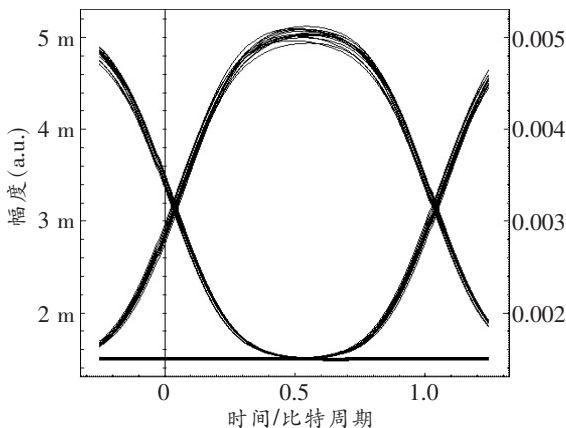


图 3 用户 1 在系统中的仿真眼图

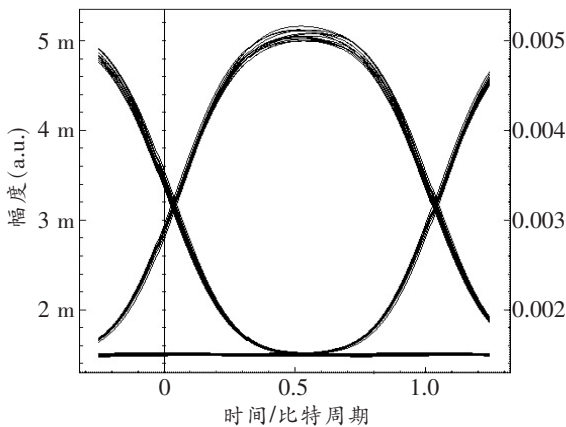


图 4 用户 2 在系统中的仿真眼图

4 结束语

本文构造了一种新的二维 OOC ESPC/QCHC,通过在码字容量和误码性能方面的理论分析和仿真比较可知,在相同条件下,与其他几种二维光 OOC 相比,ESPC/QCHC 有较大的码容量和较低的误码率,并且 ESPC/QCHC 的误码率会随频率片数的增加而降低;由该码字在 OCDMA 系统中的仿真眼图可知,该码字具有优良的性能。

参考文献:

[1] Beyranvand H, Nezamalhosseni S A, Salehi J A, et al. Performance Analysis of Equal-Energy Two-Level OCDMA System Using Generalized Optical Orthogonal Codes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1573—1584.