

文章编号: 1002-2082(2005)02-0015-03

OCDMA 系统中 2-D 码和 3-D 码

周秀丽, 谭庆贵, 胡 渝

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要: 光码分多址(OCDMA)技术主要应用在接入网中。设计大容量的地址码是该技术实用化的前提。本文在构造 2-D 素数码的基础上提出了一种用于 OCDMA 系统的空域/频域/时域 3-D 地址码。这种码基于素数序列运算。理论分析和数学计算结果表明, 3-D 码比 2-D 码的容量更大, 系统带宽效率更高, 误码率(BER)更低, 表现出的性能更好。

关键词: 光码分多址; 3-D 地址码; 2-D 地址码; 误码率

中图分类号: TN914.53

文献标识码: B

2-D and 3-D Codes in OCDMA System

ZHOU Xiu-li, TAN Qing-gui, HU Yu

(College of physical electronics, University of Electronic Science & Technology, Chengdu 610054, China)

Abstract: The technology of OCDMA has many advantages in access network. The design of great capability address codes is the precondition to practicability of this technique. In this paper, on the basis of constructing the 2-D prime code, we put forward a kind of space/frequency/time 3-D code for OCDMA system. It's based on prime sequence arithmetic. The results of the theory analysis and mathematic computation show that, comparing with the 2-D code, this 3-D code has larger capacity, lower BER, higher bandwidth efficiency and better performance.

Keywords: OCDMA; 3-D code; 2-D code; BER

引言

光码分多址(OCDMA, Optical Code Multiple Access)系统作为一种扩频通信系统能够提供灵活的异步多址接入方式, 不需快速光电转换效能就能提供突发、连续和异步通信。光码分多址的优点: (1) 抗背景噪声的能力强; (2) 无需全网同步就能良好地支持异步通信和突发业务。目前研究 OCDMA 的主要问题之一在于设计一套编码, 以具有良好的系统性能, 为 OCDMA 系统的实用化创造条件。并且希望设计的光地址码, 在满足相关性条件下, 码序列多, 系统容量大。

1 OCDMA 系统中的 1-D、2-D 和 3-D 码

1.1 1-D 和 2-D 码

一维(1-D) OCDMA 系统中, 每个用户的地址码是在时域上扩展的 $\{0, 1\}$ 二值序列, 这些地址码必须具有良好的自相关和互相关特性。光正交码(OOC)是用于 1-D OCDMA 系统的一种典型地址码。OOC 在一维地址码中具有最小的自相关和互相关值(两者都为 1), 被看作是非相干光处理中相关值最小的地址码, 但其码字个数较少, 产生码字的算法复杂, 具有一定的局限性。因此, 提出了二维(2-D)码。在 2-D 码中, 光脉冲在时域和空域扩展, 或者在波长和时域扩展, 通过使用另一维(空间或波长), 2-D OCDMA 系统比 1-D OCDMA 系统性能得到较大提高^[1~6]。

收稿日期: 2004-04-06; 修回日期: 2004-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(6027006)

作者简介: 周秀丽(1971-), 女, 成都电子科技大学讲师, 光学专业博士研究生, 主要从事光通信技术的研究工作。

1.2 2-D 到 3-D 码

二维光正交码可表示成 $N(m \times n, \lambda_a, \lambda_c)$, 是一个 $m \times n$ 矩阵(矩阵的元素是二进制 $\{0, 1\}$ 序列), 其码重为 W 。二维光正交码满足如下自、互相关特性^[2~6]。

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} X_{i,j} X_{i,j \oplus \tau} = W (\tau = 0) \\ \leq \lambda_a (1 \leq \tau \leq n - 1) \\ \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} X_{i,j} X_{i \oplus \tau, j} \leq \lambda_c (0 \leq \tau \leq n - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 和 $Y_{ij} \in (0, 1)$; W 为自相关峰值, 等于码重; \oplus 表示模 n ; λ_a 和 λ_c 分别为自相关限和互相关限。时/空(T/S, time/space)二维光正交码可以通过改进一维素数序列构造, 码字 X_i 可按如下方式构成 ($P_i(j)$ 为码字发生器):

$$\begin{cases} p_0(j) = 0, & j = 0, 1, 2, 3, \dots, m-1 \\ p_i(j) = (p_{(i-1)+j} \bmod m), & 1 \leq i \leq m-1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, p_0, p_1, \dots, p_{m-1} 分别表示每行 $0, 1, 2, \dots, m-1$ 中“1”的位置; $m = T_b/T_c$ (T_b 为 bit 宽度, T_c 为 chip 宽度); j 是码字发生器。码字的容量由如下定理给出: 若 m 是一个素数且 $m = w$, $\lambda_a = 0$, $\lambda_c = 1$, 则 T/S 二维光正交码码字的个数与 m 相等。根据上面的分析给出 $m = w = 5$ 的二维时域/空域光正交码:

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |

三维(3-D)光正交码可用三维矩阵来表示, 其元素取值 $(0, 1)$, 分别由空间信道, 波长数(频率数), 时间片(chip)数构成。每个元素代表三维空间一个点, 该点要么有一个光脉冲占据, 要么没有; 光脉冲位于某通道, 使某波长在某时隙出现。三维光正交码可用 $N(l \times m \times n)$ 表示, 是一个元素取值为 $(0, 1)$ 的 $l \times m \times n$ 矩阵, 码重为 W , 满足如下自、互相关条件^[7]:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{n-1} X_{i,j,k} X_{i,j,k \oplus \tau} = W (\tau = 0) \\ \leq \lambda_a (1 \leq \tau \leq n - 1) \\ \left. \sum_{i=0}^{l-1} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{k=0}^{n-1} X_{i,j,k} X_{i \oplus \tau, j, k} \right\} \begin{matrix} W \\ \lambda_c \end{matrix} (0 \leq \tau \leq N - 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $X_{l,j,k} Y_{i,j,k}$ 是三维码字; W 是自相关峰值, 等于码重; \oplus 代表模为 n ; λ_a 和 λ_c 为自相关、互相关限。三维光正交码的构成和码容量都可由二维光正交码进行推导。

1.3 3-D 地址码的构造

通过应用 2-D 素数码算法对空间信道分配 W 个波长, 可为空间信道每个分布脉冲产生 W 个不同的码字^[7], 如码字 $(3 \times 3 \times 3, 0, 1)$ 。用素数码算法构造时, 如果波长数大于或等于空间信道数即 $W \geq S$, 由于 2-D 素数码构造算法的正交性, 在波长域的每个循环移位也产生另一个和其他码字正交的码字。通过在波长域移位, 每个码字可以产生另 2 个码字。因此, 在 $(3 \times 3 \times 3, 0, 1)$ 3-D 素数码中便有 27 个码字。于是有: 如果 $W \geq S$, 把 $(S \times T, S, 0, 1)$ 码扩展到 $(S \times W \times T, S, 0, 1)$ 码便可以产生 $W^2 T$ 个码字; 如果 $W < S$, 波长域的循环移位和其他码字一致, 因此在 $(S \times W \times T, S, 0, 1)$ 3-D 码中有 WT 个码字。

假定在一个码字中保持所有脉冲数等于通过扩展 2-D 码构造 3-D 码的 2-D 码数目, 那么, 每个空间信道下 3-D 码便有一个脉冲, 即每个波长/时间片单个脉冲(SPP, single pulse per chip)。以下分析都基于此原则。

2 2-D 和 3-D 码性能比较

对由素数序列构造的 2-D 码及每片单脉冲 3-D 码(SPP)来说, 考虑码的容量、多用户环境下的误码率及带宽效率, 对两种码进行比较。由码的构造可知, 因采用了另一维, 所以 3-D 码较 2-D 码序列数显著增加。以下基于其他性能对 3-D 码和 2-D 码进行分析。

2.1 多用户环境下的误码率

在分析 OCDMA 系统的误码率时, 忽略了光电探测的热噪声和散弹噪声, 只考虑来自其他用户的干扰。分析多用户环境下系统的性能, 需要概率 p , (p 是在时域检测中从一个不希望的发送端得到一光脉冲的概率)。在时域检测中得到两个不同码字的互相关为 1。对于 2-D 素数码, 互相关概率可确定为 $p = (1/2T) \times S$ 。在空域/波长/时域 3-D 码中, 一个空间信道的脉冲 1 从一个不期望发送引起时域检测的噪声应该等同于同波长的脉冲从期望的

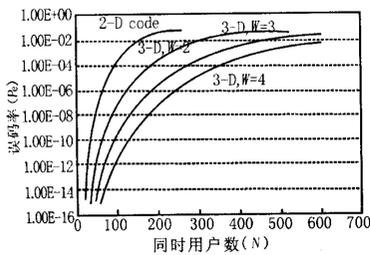
发送端发出,其值为 $p = (1/2T) \times (1/W) \times S$ 。

一旦给定了以上的概率 p 值,系统误码率由下式确定:

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{i=Th}^{N-1} \binom{N-1}{i} p^i (1-p)^{N-1-i} \quad (4)$$

式中, Th 是检测的阈值; N 是同时用户数;因子 $1/2$ 表明预期发送端端有无比特数据的等概率性传输“0”时的概率。

取一定的 S 和 T ,由(4)式中不同波长数和同时用户数可计算出误码率。在计算中,假定理想阈值等于码重(对于 2-D 素数码和 3-D SPP 码, $Th = S$),基于该条件计算得到图 1 所示的结果。



$S=16, T=127, w=2, 3, 4$

$S=16, T=127, w=2, 3, 4$

图 1 3-D SPP 和 2-D OCDMA 系统中误码率和同时用户数的关系

Fig. 1 BER versus number of simultaneous users in 3-D SPP and 2-D OCDMA systems

由图可知,3-D OCDMA 系统和 2-D OCDMA 系统相比较,同用户数情况下,3-D 码的误码率低于 2-D 码;相同误码率下,3-D 码容纳的同时用户数多于 2-D 码,即误码率性能提高了;在相同波长数下,随着空间信道数的增加,3-D 码误码率越来越小;相同空间信道数下,随着波长数的增加,3-D 码误码率也越来越小。性能的提高主要源于 3-D 码互相关值的减小,此时 3-D 码的互相关值是 2-D 码互相关的 $1/W$ 。

2.2 码的带宽效率

用 S 个空间信道, W 个波长, T 时间片(码长)为 3-D SPP 码构造 $WT(S > W)$ 或 $W^2T(S < W)$ 个正交码字;为 2-D 素数码构造 T 个正交码字。对固定码长 T ,显然 3-D 码序列数比 2-D 素数码大,这个特征在系统带宽效率方面很重要。在一个采用一给定调制带宽 B_{source} 光源的 OCDMA 系统中,每用户带宽 B_{source} 和码长成反比,即 $B_{user} = B_{source}/T$ 。在基于 2-D 码的系统中,每个用户带宽应该和总用户数有

关。然而,对于 3-D 码来说,码容量为 $WT(S > W)$ 或 $W^2T(S \leq W)$,不需减小每个用户带宽就可使码容量增加。换言之,若使基于 2-D 素数码系统的性能达到同总用户数的 3-D 码系统,需缩减 2-D 系统每用户带宽。

考虑同时用户数情况下的带宽效率。一最小码长在一定 BER 下要支持一定的同时用户数,最小码长不仅受(4)式给出的误码率限定,其最大用户数也与码长有关。图 2 表示了 BER 一定时计算出来的码长和同时用户数的关系。

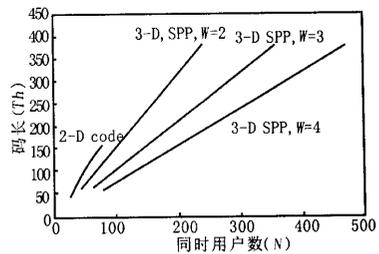


图 2 BER=1E-09 时码长和同时用户数的关系

Fig. 2 Code length versus number of simultaneous users when BER=1E-09

由图 2 可见,为了提供同样的同时用户数,3-D 码比 2-D 素数码需要的码长更短,这意味着用 3-D 码能提供更大的每用户带宽。图中 3-D 码素数码尺寸减小约为 2-D 素数码的 $1/W$ 。这表明每用户带宽按因子 W 增加,可见 3-D 码可以使带宽效率得到提高。

3 结论

通过扩展 2-D 素数码,提出了空间/波长/时间域扩频 3-D 光正交码。分析了每波长/时间片单脉冲的 3-D 码性能,并和 2-D 码进行比较,对误码率性能和同时用户之间及一定码长下带宽效率间进行了计算分析。结果表明:3-D 码与 2-D 素数码相比,容量更大,带宽效率更高,误码率较低,表现出的性能更佳。这为光码分多址技术的实用化提供了理论基础,增加了 OCDMA 系统的可行性。

参考文献:

- [1] F R K Chung, J A Salehi, V K Wei. Optical orthogonal code design, analysis, and applications [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1989, 35: 595-604.