

文章编号: 1002-2082(2005)01-0016-04

# 一种二维光CDMA地址码的构造及实现方法

谭庆贵, 周秀丽, 胡渝, 万生鹏

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 对光正交码(OOC)的特性和二维地址码的构造方法进行研究, 介绍了一种用于OCDMA系统的二维时间/频率组合码的构造方法, 分析该地址码的自相关和互相关特性, 以及该地址码的实现方法。分析结果表明, 由单极性码OOC构造而成的二维时间/频率组合码OOC/OOC不仅具有良好的自相关和互相关特性, 而且可以通过采用光纤布拉格光栅编解码器和阵列波导光栅编解码器实现快速、灵活编码。

**关键词:** 光CDMA; 光正交码; 二维组合码; 光纤布拉格光栅; 阵列波导光栅

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

## Construction of Two-Dimensional OCDMA Address Code and Its Encoder/Decoder

TAN Qing-gui, ZHOU Xiu-li, HU Yu, WAN Sheng-peng

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The different categories of CDMA address codes and corresponding characteristics are introduced. The method of constructing a two-dimensional combined address code of time spreading/frequency hopping is given, and the characteristics of constructed address code are analyzed. In the end, the realization method of this address code is illustrated. This new code has good performances in autocorrelation, cross-correlation and capacity, and can be easily implemented by FBG and AWG. The decoder and encoder of two dimensional code are easier in selecting address and integration than those of one dimensional code.

**Keywords:** OCDMA; optical orthogonal code; two dimensional address code; fiber Bragg grating; array wave-guide grating

### 引言

光CDMA技术由于具有保密性好、抗干扰能力强、不需要全网同步、适于突发通信、能提高系统容量等特点, 在光通信中具有广阔的应用前景, 已引起了人们的广泛关注。目前光通信系统基本上都采用强度调制/直接探测, 但在无线电中应用成熟的双极性码都不能直接应用, 只有单极性码才能直接应用于光CDMA系统中。目前研究成熟的单极性码主要有光正交码(OOC)、素数码(Prime code)等地址码。由于单极性码具有容量小、易于产生码间干扰等缺点, 因此本文提出一种性能优良、容量大、易于实现的新的构造地址码方法。

### 1 二维地址码OOC/OOC的构造方法

#### 1.1 OOC码

光正交码OOC(optical orthogonal code)是一种性能优良的单极性码, 如果用 $L$ 表示码长, 用 $W$ 表示码重, 分别用 $\lambda_c$ 和 $\lambda_s$ 表示光正交码的自相关峰值和互相关峰值, 那么光正交码可以表示为 $(L, W, \lambda_c, \lambda_s)$ -OOC。当 $\lambda_c = \lambda_s = 1$ 时, 光正交码又可以表示为 $(L, W, 1)$ -OOC。对于地址码 $(L, W, 1)$ -OOC, 其容量 $\Phi$ 满足下面关系式<sup>[2]</sup>:

$$\Phi(L, W, 1) \leq \frac{L-1}{W(W-1)} \quad (1)$$

收稿日期: 2003-12-12 修回日期: 2004-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60272006)

作者简介: 谭庆贵(1975-), 男, 山东临沂人, 电子科技大学博士研究生, 主要从事空间光通信和光CDMA技术的研究。

从(1)式可以看到,光正交码的码容量与码长和码重有直接的关系。要想增加码容量,一种方法是在不增加编码器复杂性的前提下,采用码重较小的码字;另一种方法是采用增大码长来增加码容量。这两种增加码容量的方法都有自己的局限性,使得光正交码的码容量一般很小。为了增加系统的码容量,需要一种新的构造性能更好、码容量更大的地址码。

如果将单极性码进行合理组合,可以得到时域扩频/频域跳频二维组合码。这种二维组合码不仅能大大提高系统的码容量,而且具有很好的性能,可以降低在复杂性、码长和处理速度等方面的探测要求。在文献[1]中,采用单极性码OOC和素数码(Prime Code)构造了用于光CDMA通信系统的时域扩频/频域跳频二维组合码Prime/OOC。如果假设Prime/OOC是由码重为 $p$ 的素数码和 $m-(L, \omega, 1)$ -OOC构成(其中 $p=\omega, p$ 为素数码的素数, $\omega$ 为码重),可以证明,Prime/OOC码的容量为 $m \times p \times L$ ,自相关最大值为 $p$ (即 $\omega$ ),自相关旁瓣为0,互相关值小于等于1。由此可见,Prime/OOC的性能优于素数码和光正交码,具有良好的自相关性和互相关性。

## 1.2 二维OOC/OOC码的构造方法

根据文献[1]提出的构造时域扩频/频域跳频二维组合码的方法,如果分别属于时域和频域的OOC的码重相等,则可以用这两种不同码系的OOC构造二维时间扩频/频域跳频组合码OOC/OOC。

设分别属于时域和频域两种不同码系的地址码OOC A和B分别表示为 $(L_A, W, 1)$ -OOC及 $(L_B, W, 1)$ -OOC,其中 $L_A$ 和 $L_B$ 为码长, $W$ 为码重,自相关值和互相关值均为1,并设A、B两种地址码的容量分别为 $\Phi_A$ 及 $\Phi_B$ ,那么

A的地址码序列可以表示为

$$A: \{A_i: i \in [0, \Phi_A - 1]\} \quad (2)$$

B的地址码序列可以表示为

$$B: \{B_j: j \in [0, \Phi_B - 1]\} \quad (3)$$

其中,  $A_i = \{a_{i,0}, a_{i,1}, \dots, a_{i,m}, \dots, a_{i,w-1}\}$ ;  $B_j = \{b_{j,0}, b_{j,1}, \dots, b_{j,n}, \dots, b_{j,w-1}\}$ 。

对于地址码A,其码序列采用纵向模和的方式可得到以下频域跳频模式:

$$\{\lambda_{a_{i,0} \oplus k}, \lambda_{a_{i,1} \oplus k}, \dots, \lambda_{a_{i,w-1} \oplus k}\}$$

其中,  $i \in [0, \Phi_A - 1]$ ;  $k \in [0, L_A - 1]$ ;  $\oplus$ 表示模 $L_A$ 加。

对于地址码B,其码序列采用纵向模积的方法可得到以下时域扩频模式:

$$\{l \otimes b_{0,0}, l \otimes b_{0,1}, \dots, l \otimes b_{0,w-1}\}$$

其中,  $l \in [0, L_B - 1]$ ;  $\otimes$ 表示 $L_B$ 积。

如果用波长的下标表示波长值,波长小括号里的值表示波长在时间轴上的位置,则可得到地址码:

$$C_1 = \{\lambda_{a_{i,0} \oplus k}(l \otimes b_{0,0}), \lambda_{a_{i,1} \oplus k}(l \otimes b_{0,1}), \dots, \lambda_{a_{i,w-1} \oplus k}(l \otimes b_{0,w-1})\}$$

其中  $i \in [0, \Phi_A - 1]$ ;  $k \in [0, L_A - 1]$ ;  $l \in [0, L_B - 1]$ 。

如果只考虑单向移位,还可以得到地址码:

$$C_2 = \{\lambda_{1 \oplus h}(b_{j,0}), \dots, \lambda_{1 \oplus h}(b_{j,w-1})\}$$

其中,  $h \in [0, L_A - 1]$ ;  $j \in [0, \Phi_B - 1]$ 。

从地址码 $C_1$ 和 $C_2$ 可以得到 $\Phi_A L_A (L_B - 1)$ 个二维地址码。

## 2 OOC/OOC码的性能分析

构造光CDMA地址码时,要求地址码具有尽可能大的自相关峰值和尽可能小的自相关旁瓣,以及尽可能小的互相关值。大的自相关峰值和小的自相关旁瓣是为了保证信号功率足够大,以增强有用信号和无用信号的对比度。小的互相关值是为了保证多址干扰尽可能小。下面分析二维时间/频率组合码OOC/OOC的自相关性和互相关性。

### 2.1 自相关

对于地址码 $C_1$ ,设任意 $m \neq m'$ ,根据 $(L, W, 1)$ -OOC的性质,若 $a_{i,m}, a_{i,m'} \in [0, L_A - 1]$ ,则有 $a_{i,m} \neq a_{i,m'}$ ,因此,对于任意 $k \in [0, L_A - 1]$ ,必有 $a_{i,m} \oplus k \neq a_{i,m'} \oplus k$ ,即在同一地址码中无相同波长存在,故自相关旁瓣为0。

对于地址码 $C_2$ ,由于 $B_j$ 的自相关旁瓣小于等于1,所以 $C_2$ 的自相关旁瓣小于等于1。

### 2.2 互相关

对于 $C_1$ 的任意2个码,下面分两种情况给予说明。

第1种情况为2个码属于相同跳频模式。

对于任意 $n \neq n'$ ,有 $b_{0,n} \neq b_{0,n'}$ ,即 $b_{0,n} - b_{0,n'} \neq 0$ ;

对于任意  $l, l' \in [0, L_B - 1]$ , 有  $l \otimes (b_{0,n'} - b_{0,n}) \neq l' \otimes (b_{0,n'} - b_{0,n})$ , 即  $l \otimes b_{0,n'} - l \otimes b_{0,n} \neq l' \otimes b_{0,n'} - l' \otimes b_{0,n}$ 。所以互相关值小于等于 1。

第 2 种情况为 2 个码属于不相同跳频模式。

A 的自相关旁瓣小于等于 1, 所以  $a_{i,m} \oplus k - a_{i,m} \oplus k \neq a_{i',m} \oplus k - a_{i',m} \oplus k'$ ,  $k$  可以等于  $k'$ , 即  $a_{i,m} \oplus k = a_{i',m} \oplus k'$  及  $a_{i,m} \oplus k = a_{i',m} \oplus k'$  不可能同时存在, 亦即互相关小于等于 1。

对于属于  $C_2$  的任意 2 个码, 因为波长不同, 所以其互相关等于 0。

根据  $(L, W, 1)$ -OOC 的相关特性, 分别属于  $C_1, C_2$  的任何 2 个码之间最多只有一个波长相同, 因此互相关小于等于 1。

### 3 二维 OOC/OOC 码的实现方法

在光 CDMA 系统中, 地址码由编解码器来实现。编解码器是光 CDMA 通信系统的核心器件, 直接影响系统的性能。如何根据提出的地址码理论设计变址灵活、易于集成的编解码器是光 CDMA 技术的关键。目前用于光 CDMA 系统的编解码器主要有光纤延迟线、光纤布拉格光栅 (FBG) 和阵列波导光栅 (AWG)。光纤延迟线编解码器具有结构简单、易于实现等优点, 但它只能用于时域单极性系统。目前研究最多的编解码器是光纤布拉格光栅和阵列波导光栅。光纤布拉格光栅和阵列波导光栅不仅可以用于实现频域地址码的编解码, 而且可以用于实现时域扩频/频域跳频二维地址码。

#### 3.1 光纤布拉格光栅

光纤布拉格光栅 (FBG) 是在一根光纤上用紫外光照射的方法刻上周期不同的光栅, 使不同波长的反射光脉冲在时间上分开, 从而达到编码的目的。文献 [1] 中构造的时域扩频/频域跳频码二维组合码 Prime/OOC 就是由光纤布拉格光栅实现的。其原理是通过压电晶体来调节光纤布拉格光栅的中心波长, 从而实现快速跳频选址。由于本文构造的 OOC/OOC 码也是时域扩频/频域跳频码, 所以可以通过光纤布拉格光栅实现二维地址码 OOC/OOC 的编解码功能。

用于 OOC/OOC 码编解码的光纤布拉格光栅具有相同的结构, 但是其光入射方向相反, 因此经过编码器后在时间上分开的光脉冲在经过解码器

后在时间上重新叠加在一起。如果  $\lambda_B$  表示光纤布拉格光栅某处反射的中心波长,  $\Delta$  表示光栅周期,  $n_{eff}$  表示平均折射率系数, 则可以得到下面的关系式:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Delta \quad (4)$$

从 (4) 式可以看出, 通过改变光栅的周期可以改变光纤布拉格波长。如果采用温度、压力等方法改变光纤布拉格光栅的周期, 则可以实现变频的目的。通过改变相邻两光栅之间的距离可以实现不同的延迟, 从而实现时域编码的目的。压电陶瓷控制的 FBG 编解码器的结构示意图如图 1 所示。它采用压电陶瓷控制技术, 使连续可调 FBG 编解码器实现 OOC/OOC 码灵活、快速编解码的功能 [3]。

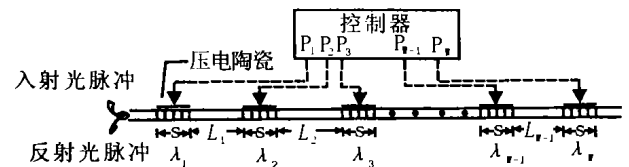


图 1 光纤布拉格光栅编解码器

Fig. 1 FBG encoder and decoder

#### 3.2 阵列波导光栅

光纤布拉格光栅虽然可以实现 OOC/OOC 快速、灵活选址的目的, 但是它也存在许多缺点, 如果想在很大的范围内, 通过控制温度或压力来独立调整每一个波长或精确的改变时间延迟是很困难的, 而且光纤布拉格光栅的切趾器需要非常苛刻的条件。因此, 人们提出将阵列波导光栅 AWG 用于光 CDMA 系统实现编解码功能 [4~5]。

阵列波导光栅 AWG 的相邻波导长度之差为一常数, 具有色散特性, 可以实现波长复用功能, 在波分复用 (WDM) 和密集波分复用 (DWDM) 中有重要的应用。

图 2 给出了  $N \times N$  阵列波导光栅的结构示意图。从图 2 中可以看出, 阵列波导光栅基本结构主要由输入/输出波导、阵列波导、以及连接它们的平面波导组成。将阵列波导光栅的  $N$  个输出端口和特定镜像光纤延迟线相连接, 可以设计用于时间扩频/频率跳频二维组合码编解码的解码器 [6], 如图 3 所示。光纤延迟线的长度和每个光纤延迟线通道中反射镜的反射功能由时间扩频/频率跳频二维组合码决定。在发射端, 激光器输出的宽带光脉冲信号由输入波导的特定输入端口送入阵列波导光栅, 阵

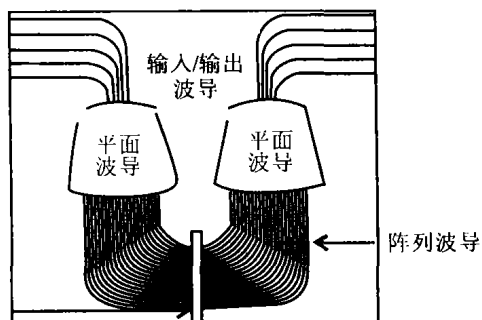


图2 阵列波导光栅结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AWG structure

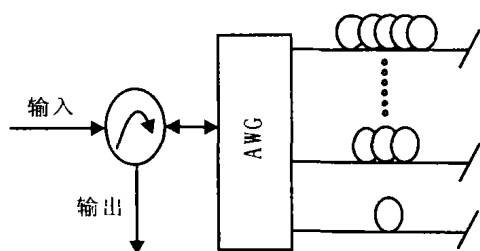


图3 阵列波导光栅编解码器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of AWG encoder/decoder structure

阵列波导光栅将其分为  $N$  路窄带脉冲信号,并将  $N$  路窄带脉冲信号送入与 AWG 的  $N$  个输出端口相连的光纤延迟线,从而实现频域编码。每一路窄带光脉冲信号在光纤延迟线中传输一定距离后被反射镜反馈回阵列波导光栅,利用阵列波导光栅的波长选路作用重新汇聚到同一输出端口,最后通过一个环路器输出,输出信号为在时域和频域分别编码的光脉冲序列。在接收端,解码器对接收到的光脉冲序列进行反运算,得到有用的光脉冲信号。

## 5 结论

在光 CDMA 通信系统中,地址码的容量、性能

直接决定通信系统的性能,地址码的实现方法直接影响着光 CDMA 技术的发展与应用。本文提出了采用光正交码 OOC 构造二维时域扩频/频域跳频二维组合码 OOC/OOC 的方法,给出实现地址码的编解码方案。构造的地址码不仅具有良好的性能,在码容量、自相关和互相关等方面都优于单极性码,而且易于由光纤布拉格光栅和阵列波导光栅两种编解码器实现。

## 参考文献:

- [1] 万生鹏,胡渝. 频域跳频/时间扩频混合光 CDMA 编码及其编解码器结构[J]. 电子学报,2001,29(7):954-957.
- [2] F R K Chung, J A Salehi, V K Wei. Optical orthogonal code design, analysis, and applications[J]. IEEE Trans Inform Theory,1989,35(5):595-604.
- [3] Xu Wang, Kam Tai Chan. A sequentially self-seeded Fabry-Perot laser for two-dimensional encoding/decoding of optical pulses [J]. IEEE Quantum Electronics,2003,39(1):83-90.
- [4] Sangin Kim. Cyclic optical encoders/decoders for compact optical CDMA networks[J]. IEEE, Photonics Technology Letters,2000,12(4):428-430.
- [5] Yu K, et al. Novel wavelength-time spreading optical CDMA system using arrayed-waveguide grating [A]. Optical Fiber Communication Conference[C], 2000,4:71-73.
- [6] Kyoungsik Yu, Jongyoon Shin, Namkyoo Park. Wavelength-time spreading optical CDMA system using wavelength multiplexers and mirrored fiber delay lines[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(9):1278-1280.