

# 频域跳频/时间扩频混合光 CDMA 编码 及其编解码器结构

万生鹏, 胡 渝

(电子科技大学应用所一室, 四川成都 610054)

**摘 要:** 本文提出了一种新的频域跳频、时间扩频混合光 CDMA 编码方案, 并提出了其编、解码器结构。这种新的编码方案利用  $(L, M, 1)$ -光正交码(OOC)为频域跳频模式, 以素数码(Prime Code)为时间扩频模式, 我们称之为 Prime/OOC 码。该码具有良好的自相关、互相关性能和大的容量, 更为重要的是, 该混合码的编、解码器可以通过多布喇格光纤光栅来实现。相对于时间扩频码分多址系统的编、解码器, 这种编、解码器更简单, 容易变址和集成。

**关键词:** 频域跳频时间扩频混合光 CDMA; OOC; 素数码; Prime/OOC 码; 多布喇格光纤光栅

**中图分类号:** TN929.1; TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)07-0954-04

## Hybrid Optical CDMA Coding of Frequency Hopping/ Time Spreading and the Structure of Its Coder and Decoder

WAN Sheng-peng, HU Yu

(Institute of Applied Physics, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** This paper proposes a new hybrid optical CDMA coding scheme of frequency hopping/ time spreading together with the structure of its coder and decoder. This new coding scheme uses  $(L, M, 1)$ -OOC as frequency hopping pattern, prime code as time spreading pattern, and we call it as Prime/OOC code. This new coding scheme has good performance in autocorrelation, crosscorrelation and code's capacity. More important, the coder and decoder of the hybrid code can be implemented by multiple-bragg grating fiber. Compared with coder and decoder of time spread CDMA system, the coder and decoder are simpler, easier in selecting address and in integration.

**Key words:** hybrid optical CDMA of frequency hopping/ time spreading; OOC; prime code; prime/OOC code; multiple-bragg fiber grating

### 1 引言

近几年来,光 CDMA 因其具有抗干扰性、用户随机接入及保密性好等特性日愈受到人们的重视。在非相干光 CDMA 中,因为对光的强度直接调制,因此无线电 CDMA 中研究较成熟的双极性码不能直接应用于非相干光 CDMA 中,而只有单极性码可以直接应用。目前,研究较成熟的单极性码有光正交码(OOC-optical orthogonal code)、素数码(Prime code)、修正素数码及  $2^n$  码等。但是这些单极性码都存在各自的缺点,光正交码具有良好的相关性能,但容量有限。对于  $(L, M, 1)$ -OOC,其容量<sup>[1]</sup>  $(L, M, 1) \leq \frac{L-1}{(M-1)}$ ,因此,为了获得一定的码容量,码长一般很长。素数码的容量虽然比光正交码要大,但其相关性能不如光正交码。为了进一步提高单极性码的容量,人们提出了时间、频率混合的光 CDMA 编码方案<sup>[2]</sup>。但文献<sup>[2]</sup>中所提出的码的容量仍然不够多,并且不能达到快速

光跳频选址的目的。文献<sup>[3]</sup>中提出的跳频码可应用于光跳频 CDMA 中,达到快速选址的目的,但是它没有利用时间特性,码容量极为有限,容量等于波长数。

本文利用  $(L, M, 1)$ -OOC 作频域跳频模式,用素数码作时间扩频模式,提出了一种新的频率、时间混合光 CDMA 编码方案,我们称这种码为 Prime/OOC 码,这种码具有良好的自相关、互相关特性及较大的码容量。并且这种码可用连续可调的多布喇格光纤光栅来实现,从而可达到快速选址的目的。与时间直扩光 CDMA 的编、解码器相比,这种编、解码器更简单,变址更容易。本文将对这种光编、解码器进行描述。

### 2 Prime/OOC 码的构造

#### 2.1 素数码的构造<sup>[4]</sup>

素数码的构造如下:设有素数  $p$ ,有

$$s_{i,j} = \lceil i \cdot j \rceil \quad (1)$$

其中  $\Gamma$  表示对  $p$  取模,  $i, j \in (0, 1, \dots, p-1)$ , 从上面我们可以构造出素数码  $C_i, C_i = (c_{i,0}, c_{i,1}, \dots, c_{i,m}, \dots, c_{i,(p^2-1)})$ , 其中

$$c_{i,m} = \begin{cases} 1, & \text{for } m = s_{i,j} + jp, j = 0, 1, \dots, p-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

由此我们可得到  $p=5$  的素数码如表 1, 也即我们所要用到的时间扩频模式。

表 1 由  $p=5$  的素数码构造的时间扩频模式

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $C_0$ | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 |
| $C_1$ | 10000 | 01000 | 00100 | 00010 | 00001 |
| $C_2$ | 10000 | 00100 | 00001 | 01000 | 00010 |
| $C_3$ | 10000 | 00010 | 01000 | 00001 | 00100 |
| $C_4$ | 10000 | 00001 | 00010 | 00100 | 01000 |

### 2.2 $(L, \dots, 1)$ -OOC 的构造<sup>[5]</sup>

$(L, \dots, 1)$ -OOC 表示码长为  $L$ , 码重为  $\dots$ , 其自相关旁瓣、互相关值小于等于 1 的光正交码。我们在此应用 Wilson 提出的构造方法来构造将要用到的 OOC, 并用它来作为光频域跳频模式。

Wilson 方法: 令  $c = 2t + 1, c = m(\dots - 1), L = m(\dots - 1) + 1, L$  是素数,  $\dots, t$  是整数。令  $\dots$  是  $L$  的本原根。用  $T_i$  表示集合:

$$T_i = \{i + j\alpha^k \mid 0 \leq j \leq k-1\} \quad (3)$$

其中,  $0 \leq i \leq c-1, i$  是集合  $T_i$  的下标。用  $i_e$  表示包含  $\dots - 1$  的集合的下标, 其中  $1 \leq e \leq t$ , 上面所有的算术运算都是对  $L$  取模。如果对所有的  $e, i_e$  在对  $t$  取模下互不相同, 则  $T_0, T_1, \dots, T_{(m-1)}$  构成  $m - (L, \dots, 1)$ -OOC。

利用上面的规则, 我们可以构造出两个  $(41, 5, 1)$ -OOC, 分别为:  $(1, 10, 16, 18, 37), (2, 20, 32, 33, 36)$ 。因此, 我们可以得到表 2 中的光频域跳频模式。其中  $\ominus$  表示模 41 加。

表 2  $2 - (41, 5, 1)$ -OOC 所构造的光频域跳频模式(共 82 个)

|       |                                   |   |
|-------|-----------------------------------|---|
| $H_0$ | $H_{0j}, i \in (0, 1, \dots, 40)$ | $1 \ominus, 10 \ominus, 16 \ominus, 18 \ominus, 37 \ominus$ |
| $H_1$ | $H_{1j}, i \in (0, 1, \dots, 40)$ | $2 \ominus, 20 \ominus, 32 \ominus, 33 \ominus, 36 \ominus$ |

### 2.3 Prime/OOC 码的构造

Prime/OOC 码的构造是在每个时间扩频模式中 1 的位置上, 依次用每个光频域跳频模式中的波长替换, 即波长排列顺序由频域跳频模式决定, 但波长在时间轴上的位置由时间扩频模式中的 1 决定。因此, 由上面的时间扩频模式和频域跳频模式, 我们可以得到表 3 中的 Prime/OOC 码。其中  $i \in (0, 1, \dots, 40), i=0$  的码构成了 Prime/OOC 码的码发生器。

表 3 Prime/OOC 码

|             |  |
|-------------|--|
| $H_{0,C_0}$ | $1 \ominus, 0000 \quad 10 \ominus, 0000 \quad 16 \ominus, 0000 \quad 18 \ominus, 0000 \quad 37 \ominus, 0000$  |
| $H_{0,C_1}$ | $1 \ominus, 00000 \quad 10 \ominus, 00000 \quad 16 \ominus, 00000 \quad 18 \ominus, 00000 \quad 37 \ominus, 0$ |
| $H_{0,C_2}$ | $1 \ominus, 000000 \quad 10 \ominus, 000000 \quad 16 \ominus, 0 \quad 18 \ominus, 000000 \quad 37 \ominus, 0$  |
| $H_{0,C_3}$ | $1 \ominus, 0000000 \quad 10 \ominus, 00 \quad 16 \ominus, 0000000 \quad 18 \ominus, 00 \quad 37 \ominus, 00$  |
| $H_{0,C_4}$ | $1 \ominus, 00000000 \quad 10 \ominus, 000 \quad 16 \ominus, 000 \quad 18 \ominus, 000 \quad 37 \ominus, 000$  |
| $H_{1,C_0}$ | $2 \ominus, 0000 \quad 20 \ominus, 0000 \quad 32 \ominus, 0000 \quad 33 \ominus, 0000 \quad 36 \ominus, 0000$  |
| $H_{1,C_1}$ | $2 \ominus, 00000 \quad 20 \ominus, 00000 \quad 32 \ominus, 00000 \quad 33 \ominus, 00000 \quad 36 \ominus, 0$ |
| $H_{1,C_2}$ | $2 \ominus, 000000 \quad 20 \ominus, 000000 \quad 32 \ominus, 0 \quad 33 \ominus, 000000 \quad 36 \ominus, 0$  |
| $H_{1,C_3}$ | $2 \ominus, 0000000 \quad 20 \ominus, 00 \quad 32 \ominus, 0000000 \quad 33 \ominus, 00 \quad 36 \ominus, 00$  |
| $H_{1,C_4}$ | $2 \ominus, 00000000 \quad 20 \ominus, 000 \quad 32 \ominus, 000 \quad 33 \ominus, 000 \quad 36 \ominus, 000$  |

## 3 Prime/OOC 码的性能分析

假设 Prime/OOC 码是由码重为  $p$  的素数码和  $m - (L, \dots, 1)$ -OOC(其中  $p = \dots$ ) 生成的。

### 3.1 Prime/OOC 码的容量

Prime/OOC 码的容量为:  $m \times p \times L$ 。

证明 分别用  $m$  个 OOCs 的波长依次替换  $p$  个素数码中的 1, 则可以得到  $m \times p$  个码发生器, 一个码发生器可以产生  $L$  个 Prime/OOC 码, 因此共可以得到  $m \times p \times L$  个 Prime/OOC 码。

### 3.2 Prime/OOC 码的自相关性

Prime/OOC 码的自相关最大值为  $p$  也即  $\dots$ , 自相关旁瓣为 0。

证明 因为 Prime/OOC 码的码重等于  $\dots$ , 所以其自相关最大值(即主峰)为  $\dots$ 。旁瓣则可以证明如下: 我们不妨假设在经过  $i$  次移位后波长  $m$  和  $n$  相同, 即  $m = n, i \in (0, 1, \dots, p-1)$ 。不妨假设它们在码发生器中所对应波长的下标为  $m$  和  $n$ , 则有  $m = m \ominus i, n = n \ominus i, \ominus$  表示模  $L$  加。因此如果  $m = n$ , 则必有  $m = n$ 。而我们知道,  $m$  和  $n$  是 OOC 中的 1 在时间位置上的坐标, 它们不可能相等。所以在一个码中不可能有相同的波长, 因此自相关旁瓣必然为零。

### 3.3 Prime/OOC 码的互相关性

Prime/OOC 码的互相关值小于等于 1。其证明可以分为四种情况。

3.3.1 两个码是由一个码发生器产生的 对于这种情况下的任意两个码, 不妨假设其中一个码是在其码发生器  $\ominus m$  后得到的, 而另一个则是其码发生器  $\ominus n$  后所得到的, 其中  $\ominus$  表示模  $L$  加。根据我们构造 Prime/OOC 码的方法, 我们知道, 码发生器中码的波长的下标其实是 OOC 中的 1 在时间位置上的坐标。因此, 其中一个码中波长的下标可以看作是 OOC 在经过移位  $m$  后 1 在时间轴上的新坐标, 而另一个的下标则可以看作是 OOC 经过移位  $n$  后 1 在时间轴上的新坐标。因为  $(L, \dots, 1)$ -OOC 的自相关旁瓣值小于等于 1, 因此, OOC 在经过移位  $m$  后和在经过移位  $n$  后, 不可能有两对 1 同时某两个时间位置上重合, 否则 OOC 的自相关旁瓣就大于 1, 也就是说不可能有两对波长同时相等, 因此其互相关值小于等于 1。

3.3.2 两个码的码发生器、频域跳频模式都不同, 而且是由不同的 OOC 所产生的 假设一个码中的两个任意波长为  $m \ominus j$  和  $n \ominus j$ , 而  $m$  和  $n$  分别为它们在该码相应的码发生器中的波长, 同样设另一个码的两个任意波长为  $m \ominus i$  和  $n \ominus i$ ,  $m$  和  $n$  分别为它们在该码所对应的码发生器中的波长。所以  $m$  和  $n$  对应于一个正交码中两个 1 在时间轴上的位置,  $m \ominus j$  和  $n \ominus j$  则表示该正交码在时间轴上移位  $j$  个码片之后两个 1 在时间轴上的新位置, 同样  $m \ominus i$  和  $n \ominus i$  则表示另一个正交码在时间轴上移动  $i$  个码片之后两个 1 在时间轴上的新位置, 因为  $(L, \dots, 1)$ -OOC 的互相关值小于等于 1, 所以不可能同时有  $m \ominus j = m \ominus i$  和  $n \ominus j = n \ominus i$  成立, 也即不可能有  $m \ominus j = m \ominus i$  和  $n \ominus j = n \ominus i$  同时成立, 因为我们假定

这两对波长的任意性,所以这两个码之间的互相关值小于等于 1. 上面的  $\odot$ 代表模  $L$  加.

3.3.3 两个码的码发生器、频域跳频模式都不同,但是是由相同的 OOC 所产生的. 这种情况下的证明和 (i) 中相似,也是利用  $(L, p, 1)$ -OOC 的自相关特性来证明.

3.3.4 两个码的码发生器不同,但有相同的频域跳频模式. 我们不妨假设在两个码之间有两对波长在时间位置上重合,也即互相关为 2, 并设其中一个码的这两个波长在时间轴上的坐标分别为  $M$  和  $N$ , 另外一个码中对应的两个波长在时间轴上的坐标分别为  $M'$  和  $N'$ , 不妨设  $M > N, M' > N'$ , 同时,我们可以发现,具有相同频域跳频模式的两个码其波长排列顺序是相同的, 所以有 (这点与素数码不同):

$$M - N = M' - N' \quad (4)$$

而波长在时间轴上的坐标是由素数码中 1 的位置来决定的, 所以有  $M = s_{im} + mp, N = s_{in} + np, M' = s_{i'm} + m'p$  及  $N' = s_{i'n} + n'p$ , 其中  $s_{i,m} = \lceil i \cdot m \rceil, s_{i',m} = \lceil i' \cdot m \rceil, s_{i,n} = \lceil i \cdot n \rceil, s_{i',n} = \lceil i' \cdot n \rceil, \lceil \cdot \rceil$  表示模  $p$  加, 代入式(4)可得:

$$\lceil (m - n) i \rceil - \lceil (m - n) i' \rceil = (m - n - m' + n') p \quad (5)$$

不妨令  $m - n - (m' - n') = k$ , 由  $M > N$  和  $M' > N'$  分别可知  $m > n$  和  $m' > n'$ , 并且  $m, n, m'$  及  $n'$  都属于  $(0, 1, \dots, p - 1)$ , 所以有  $0 < m - n < p$  及  $0 < m' - n' < p$  且为整数, 所以  $1 - p < k < p - 1$  且为整数, 另外  $\lceil (m - n) i \rceil$  及  $\lceil (m - n) i' \rceil$  均属于  $(0, 1, \dots, p - 1)$ , 所以  $1 - p \leq \lceil (m - n) i \rceil - \lceil (m - n) i' \rceil \leq p - 1$ . 因此  $k$  只有等于 0 才能使式(5)成立, 所以有:

$$m - n = m' - n' \quad (6a)$$

$$\lceil (m - n) i \rceil = \lceil (m - n) i' \rceil \quad (6b)$$

因为  $(m - n), (m' - n')$   $(1, 2, \dots, p - 1)$  及  $i, i'$   $(0, 1, \dots, p - 1)$  所以由式(6)必可推出

$$i = i' \quad (7)$$

根据素数码的构造方法, 可以发现  $i$  和  $i'$  表示特定的素数码, 表示特定的时间扩频模式. 再根据 Prime/OOC 码的构造方法, 我们可以发现, 对于有相同的跳频模式但码发生器不同的两个码, 必有  $i = i'$ , 所以假设不成立, 即这两个码之间的互相关值小于等于 1.

综上所述四种情况, 可知 Prime/OOC 码的互相关值小于等于 1.

不妨将本文提出的 Prime/OOC 码和文献[2]中所提出的混合编码方案作一比较. 假设均采用  $p$  素数码, Prime/OOC 码的光跳频模式采用  $(L, p, 1)$ -OOC, 则文献[2]中给出的混合编码方案的码容量为  $p(p - 1)$ , 所需的波长数为  $p$ , 而本文中提出的 Prime/OOC 码的容量为  $m p L$ , 所需的波长数为  $L$ , 码长都为  $p^2$ . 当  $p = 5, m = 2, L = 41$  时, 文献[2]中所提出的混合编码的码容量为 20, 所用的波长数为 5; 而 Prime/OOC 码的码容量为 410, 所用的波长数为 41. 另外, 如果采用 WDMA 和 CDMA 相结合的方案, 即采用 41 个波长, 在每个波长上再采用以  $2 - (41, 5, 1)$ -OOC 作地址码的 CDMA 方案 (也可以在每个波长上复用素数码, 但素数码相关性能不如 OOC), 共可以容纳 82 个用户. 而且不止用户数的差异, 采用

WDMA + CDMA 的方案时, 在每个波长上的用户地址码之间的相关性能由 OOC 的性质所决定, 而从我们构造的实例来看, Prime/OOC 码的相关性能要优于 OOC 的相关性能, 比如 Prime/OOC 码的自相关旁瓣等于 0, 而 OOC 的自相关旁瓣并不为 0. 更为重要的是, 本文提出的编码方案所需的编、解码器可以用多布喇格光纤光栅来实现, 这种编、解码器结构简单、容易集成、变址容易, 是实现全光通信的理想方案.

### 4 Prime/OOC 码的编、解码器

文献[6]中指出了多布喇格光纤光栅可应用于光 CDMA 系统. 本文设计的 Prime/OOC 则可以通过多布喇格光栅来实现, 并可通过压电晶体来调准多布喇格光栅的中心波长, 从而实现快速跳频选址. 下面是实现构造实例中的 Prime/OOC 码的多布喇格光纤光栅结构.

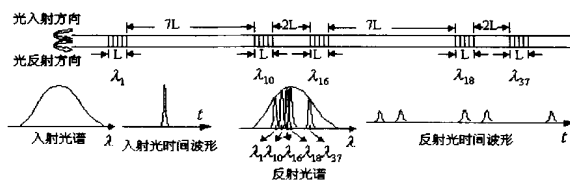


图 1 Prime/OOC 码的编码器 (对应于  $H_{00} C_3$ )

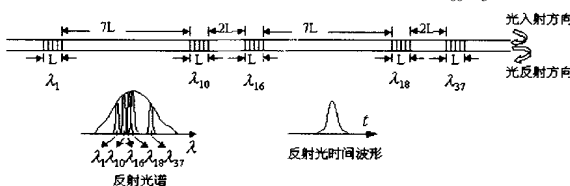


图 2 Prime/OOC 码的解码器 (对应于  $H_{00} C_3$ )

从图 1 和图 2 可以发现, Prime/OOC 码的编码器和解码器具有相同的结构, 只是它们的光入射方向相反, 这样使得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. 上面两个图中的波长值分别表示该处光栅的布喇格波长, 布喇格波长与光栅的周期和平均折射率系数有关.

$$B = 2 n_{eff} \quad (8)$$

其中  $B$  是布喇格波长也即光纤光栅在该处反射的中心波长,  $L$  是光栅周期,  $n_{eff}$  是平均折射率系数. 图 1 和图 2 中的光编、解码器是对应于码  $H_{00} C_3$  的, 但是如果通过外界因素 (比如用温度、压力等) 而改变布喇格光栅的周期, 从而改变布喇格波长, 这样就可以得到  $H_{0i} C_3$ . 因此通过连续改变布喇格的中心波长, 用一个多布喇格光纤光栅就可以实现由码发生器  $H_{00} C_3$  所生成的所有 Prime/OOC 码, 对于我们给出的实例, 用 10 根可调多布喇格光纤光栅就可以得到所有的码字. 而这是文献[2]中提出的编码方案所不能达到的, 也不是用于实现时间直扩光 CDMA 码的串行、并行或者梯型结构的编、解码器所能比的. 但是必须注意的是, 必须保证光纤光栅的调谐范围以足于得到所有的波长, 否则使用一根多布喇格光纤光栅无法得到由一个码发生器所生成的所有码. 比如在图 1 和图 2 中, 假设光纤光栅的 FWHM (半值全宽) 为 0.2nm, 因此要得

到由码发生器  $H_{00} C_3$  所生成的所有码字,光纤光栅的调谐范围必须大于等于 8.2nm,而如果光纤光栅的 FWHM 为 0.4nm,则要求光纤光栅的调谐范围必须大于等于 16.4nm.

## 5 结论

本文以素数码作为时间扩频模式、以码重等于素数码码重的 OOC 作为频域跳频模式,构造了 Prime/OOC 码,其码长等于素数码的码长,码重等于 OOC 的码重.相比素数码和 OOC,其码的容量大大增大,同时其自相关性和互相关性能也有明显提高.更为重要的是这种码的编、解码器可以用多布喇格光纤光栅来实现,与时间直扩光 CDMA 的编、解码器相比,大大降低了编、解码器的复杂度,同时,采用可调谐的多布喇格光纤光栅可以实现快速选址的目的,提高了系统的灵活性.

## 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, May, 35: 595 - 604.
- [ 2 ] L Tancevski, I Andonovic, M Tur, et al. Hybrid wavelength hopping/ time spreading code division multiple access systems [J]. IEEE Proc-Optoelectron., 1996, June, 143(3): 161 - 166.
- [ 3 ] L Bin. One-coincidence sequences with specified distance between adjacent symbols of frequency-hopping multiple access [J]. IEEE Trans. Commun., 1997, April, 45(4): 408 - 410.
- [ 4 ] P R Prucnal, M A Santoro, T R Fan. Spread spectrum fiber-optic local area network using optical processing [J]. J. Lightwave Technol., 1986, May, LT-4(5): 547 - 554.
- [ 5 ] H Chung, P V Kumar. Optical orthogonal codes-new bounds and an optimal construction [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1990, June, 36(4): 866 - 873.
- [ 6 ] L R Chen, S D Benjamin, P W E Simith. Ultrashort pulse propagation in multiple-grating fiber structures [J]. Optics Letters, 1997, March, 22(6): 402 - 404.

## 作者简介:

万生鹏 男, 1971 年 3 月生于江西南昌, 毕业于南昌大学物理系, 现在电子科技大学攻读博士学位, 所从事的主要研究方向为光通信及光 CDMA 等.



胡渝 男, 1939 年 7 月出生于四川重庆, 博士生导师, 教授, 1992 年享受政府津贴. 长期从事光通信, 空间光束控制, 激光稳频等. 主持主研课题 40 多项, 出版专著三部, 撰写论文 50 余篇. 在空间光通信, 微弱信号检测上有较高的造诣. 获国家科技进步奖二项, 省部级科技进步奖 6 项. 中国电子学会高级会员, IEEE, SPIE 会员等.