

# 光纤码分多址通信技术\*

安晓强\*\* 邱 昆 张崇富

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】介绍了光纤码分多址通信的基本原理及系统结构,并对该系统中的地址码进行了技术分析。多用户接入干扰是光纤码分多址系统中的一种主要噪声源,对减小多用户接入干扰的有关研究进行了论述,给出了两种典型的减小多用户接入干扰的接收机结构。最后指出了光纤码分多址系统趋于实用化需要解决的关键技术问题。

关键词 光码分多址; 多用户接入干扰; 光正交码; 多维码

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

## Main Techniques of Fiber Optic Code Division Multiple Access Communication

An Xiaoqiang Qiu Kun Zhang Chongfu

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** The progress, fundamental principles and system structures of fiber optical code-division multiple-access(OCDMA) are introduced. Spreading sequences used in fiber OCDMA are investigated, also we summarize the schemes used to reduce multiple access interference, and several new receiver structures are given. Finally, some main techniques are proposed.

**Key words** fiber-OCDMA; MAI; optical orthogonal code; multi-dimension code

随着信息社会的到来,人们对各种电信业务的需求量日益增大。单模光纤在1.55  $\mu\text{m}$ 窗口的巨大带宽(25 THz)和低损耗特性,及DWDM技术在干线光传输网中的成功应用<sup>[1]</sup>,对建立高速、宽带、大容量的光传输系统成为现实,实验已证实单根光纤可支持几个Tbit/s的传输容量。但是,在光传输网络的终端,有限的传统器件调制速率,限制了对光纤巨大带宽的利用,于是出现了光学多路复接技术<sup>[2]</sup>,主要有波分多接入(WDMA)、光时分多接入(OTDMA)和光码分多接入(OCDMA)。

码分多址(CDMA)技术是一种扩频通信技术,该技术具有极佳的保密性能,最先大量应用于军事通信领域,近十几年又被广泛应用于卫星通信和移动通信,并在移动通信应用中已逐步商用化。20世纪80年代, Salehi等人首先提出将CDMA技术应用到光领域<sup>[3,4]</sup>,形成了光码分多址技术研究的开创性工作。目前, OCDMA技术已成为国内外在光通信领域研究中的一个热点。

OCDMA技术是将码分多址通信和光纤通信相结合的一种新型通信方式,该方式结合了两种通信技术的特点,具有很强的技术优势和广阔的应用前景。另外有良好相关特性的扩频序列标识用户,同步(或异步)地将许多接入用户复用到相同的频带和时隙上,实现多个用户共享同一光纤信道和提高系统的容量,是一种全新的光频率资源利用思路。同WDMA与OTDMA相比, OCDMA技术具有以下新特点: 1) 不需网际范围同步,网络设计灵活,误码率仅与接入用户的总数有关,是一种软限制; 2) 可实现异步通信,支持变比

2002年12月23日收稿

\* 国家863计划项目,编号:2001AA122071

\*\* 男 30岁 博士生 主要从事光纤通信、光码分多址通信方面的研究

特率传输和突发性业务,允许用户无延时随机接入;3) 每个用户充分利用了整个系统的时域和频域,增加新用户容易(不需改变网络结构,只需给该用户分配一个地址码);4) 易于实现真正透明的全光网络,信道的统计复用增益高;5) 有较好的抗干扰和保密特性。

## 1 光纤码分多址系统

OCDMA技术是在电CDMA技术基础上演变出来的,并将码分多址技术应用于光纤信道,对用户信号采用全光处理手段,克服传统网络中的“瓶颈”效应。它以扩频通信为基础,将低速率的基带用户信号转换成高速率的光脉冲序列,在宽带光纤信道中传输,光纤码分多址系统的原理如图1所示。

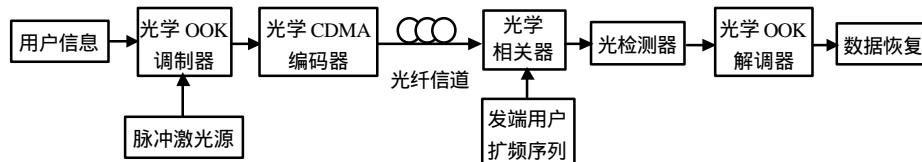


图1 光纤码分多址系统的基本原理

在发送端,用户低速信息比特流通过ON/OFF Keying(OOK)方式控制激光源,信息比特为“1”时,发射一个光脉冲,为“ON”状态,信息比特为“0”时,光源不发射光脉冲,为“OFF”状态,经光学CDMA编码器后,产生载有用户信息特征的扩频序列,即信息比特“1”对应于一个光脉冲序列,信息比特“0”对应于一个全零序列。携带用户信息特征的光脉冲序列经光纤信道传输到达接收端,与发端用户的扩频序列进行相关运算,经相关器输出一个自相关峰,通过光检测器及OOK解调器,恢复出发端用户的信息比特。

在光纤码分多址系统中,光学编/解码器的作用非常重要,它根据用户的扩频序列产生与之对应的高速光脉冲序列。目前,OCDMA系统中的编解码器可利用光纤延迟线、衍射光栅、阵列波导以及光纤布拉格光栅(FBG)等实现。光纤通信网络有多种拓扑结构,如环行、总线形、星形等,在光纤码分多址系统中,常采用无源星形结构,星形耦合器是网络的中心,每个用户通过光学编解码器分别与星形耦合器的两个端口相连,用户发送的信息数据经无源星形耦合器,均匀地分配给每一个接收端,是一个广播式选择性网络结构, $N \times N$ 无源星形结构OCDMA网络系统如图2所示。

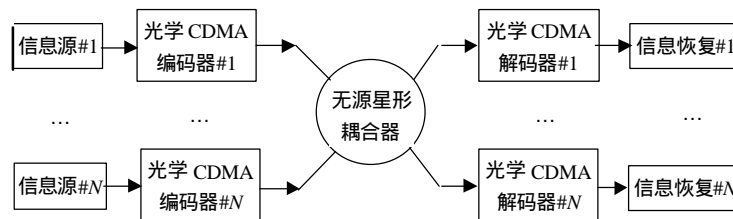


图2  $N \times N$ 无源星形结构OCDMA网络系统

## 2 扩频序列及特性

光纤码分多址技术的主要目标是从存在其他用户干扰的信号中提取期望用户的信号,扩频序列是实现这一目标的唯一手段,因此,使用于OCDMA系统的扩频序列应满足以下条件:1) 零移位自相关应尽可能大,以保证接收信号强度远大于噪声信号强度;2) 非零移位自相关应尽可能小,允许用户工作于异步方式;3) 互相关必须很小,对接收到的信号中使其他用户的干扰很小。

在RF-CDMA系统中,可直接探测电磁场相位,扩频序列为包含(-1,+1)值的双极性序列。在非相干OCDMA系统中,探测器直接响应光信号的能量,扩频序列为包含(0,+1)值的单极性序列。常用的单极性扩频序列主要有:光正交码(OOC)、素数码、改进素数码及多维码等<sup>[5-7]</sup>。

光正交码是最佳一维(时域)扩频序列,具有最低非零移位自相关和互相关,两者都为1,常用于异步OCDMA系统。缺点是码的数目比较少,即接入系统的用户数较少。当接入用户数一定时,码长随码重增加

迅速。光正交码的特性常用四元组  $F(L, k, I_a, I_c)$  表示, 当  $I_a=I_c=I$  时, 记为三元组  $F(L, k, I)$ , 其中,  $F$  为码的数目、 $L$  为码长、 $k$  为码重,  $I_a$  为非零移位自相关,  $I_c$  为互相关。设  $X=\{x_0, x_1, \dots, x_{L-1}\}$  和  $Y=\{y_0, y_1, \dots, y_{L-1}\}$  为光正交码的两个码字, 自相关与互相关可表示为

$$\sum_{t=0}^{L-1} x_t x_{t+s} \bmod L \begin{cases} = k & s=0 \\ I_a & 1 \leq s \leq L-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{t=0}^{L-1} x_t y_{t+s} \bmod L \begin{cases} I_c & s=0 \\ 0 & 1 \leq s \leq L-1 \end{cases} \quad (2)$$

光正交码的码数目直接影响 OCDMA 系统的用户总数, 码数目  $F(L, k, I)$  的上界 (Johnson 界) 表示为<sup>[8]</sup>:

$$F(L, k, I) \leq \left\lfloor \frac{(L-1)(L-2)\cdots(L-I)}{k(k-1)\cdots(k-I)} \right\rfloor \quad (3)$$

式中 当  $k^2 > LI$  时,  $F(L, k, I) = 1$ , 当  $k(k-1) > (L-1)I$  时,  $F(L, k, I) = 0$ 。以  $F(5000, 8, 1)$  为例, 仅能容纳 90 个用户, 可见, OCDMA 系统中的光正交码通常是非常稀疏的。

和光学正交码相比, 素数码的相关性较差, 码数目大, 编解码器易于实现, 常用于同步 OCDMA 系统。设  $p$  为素数, 整数集合  $\{0, 1, \dots, p-1\}$  构成有限域  $GF(p)$ , 生成  $p$  个素数序列  $S_x=\{s_{x,0}, s_{x,1}, \dots, s_{x,(p-1)}\}$ , 其中  $s_{x,j}=xj \pmod p$ ,  $x, j \in GF(p)$ 。每个素数序列  $S_x$  对应于一个二元  $(0, 1)$  序列  $C_x=\{c_{x,0}, c_{x,1}, \dots, c_{x,i}, \dots, c_{x,(p-1)}\}$ , 当  $i=s_{x,j}+jp$  时,  $c_{x,i}=1$ , 否则为 0。这样就构成码长为  $p^2$ , 码重为  $p$  的素数码, 非零移位自相关  $I_a$  接近  $p-1$ , 互相关  $I_c = 2$ , 码数目为  $p$ 。改进素数码是由素数码及其时移版本构成, 码数目由  $p$  增加到  $p^2$ 。同一码序列的  $p$  个不同时移序列属于相同的组, 在同一组中的两个序列码的互相关为 “0”, 不属于同一组的两个码序列的互相关为 “1”。

多维码是将一维码由原来的时域扩展到波长域和空域, 使扩频序列的构造利用更多的自由度, 改善了其相关性, 增加了序列的数目。常用的二维码有空域/时域码和波长域/时域码, 其构造以素数码和 Reed-Solomon 码为基础。三维码是将一维扩频序列同时扩展到空间、波长和时域, 相关性得到进一步改善, 多维码的非零移位自相关和互相关分别为 0 和 1。多维码的构造方案主要有三种: 1) 采用混合 WDMA/CDMA 方案构造二维波长域/时域码; 2) 每个码在时域和空域同时编码来构造二维空域/时域码; 3) 采用 “多波长” CDMA 方案构造三维码, 该方案是一个快速跳频系统, 跳频发生在二维空域/时域码的每个脉冲上。将二维空域/时域码应用到每一个可用波长, 也可构造三维码。

混合 WDMA/CDMA 方案是将一维码用于不同的光波长, 提高码的利用率。二维空域/时域码常用一个矩阵表示, 矩阵的行表示空域, 列表示时域, 为保证码序列的相关性, 每行只有一个光脉冲, 其特性可用四元组  $(S \times T, S, 0, 1)$  表示,  $S, T$  分别为空间信道数和时间码片数。三维码可用一个三维矩阵表示, 矩阵的行表示波长域 (波长数为  $W$ ), 列表示时域 (时间码片数为  $T$ ), 每个  $W \times T$  矩阵表示一个空间信道或一个波长/时间平面。每个空间信道有一个或多个光脉冲, 当为一个光脉冲时, 其特性可用四元组  $(S \times W \times T, S, 0, 1)$  表示, 当为多个光脉冲 (每个空间信道  $W$  个光脉冲) 时, 其特性用四元组  $(S \times W \times T, SW, 0, 1)$  表示。二维空域/时域码和三维码的矩阵表示实例如图 3 所示, 它们的移位自相关、互相关分别为 0 和 1, 二维码矩阵的第  $j$  行、第  $k$  列的元素为 1, 表示在第  $j$  个空间信道内的第  $k$  个时间码片处存在一个光脉冲, 此处  $1 \leq j \leq 4, 1 \leq k \leq 8$ 。三维码矩阵由三个  $3 \times 3$  矩阵排成一行构成, 每个  $3 \times 3$  矩阵表示一个空间信道, 三维码矩阵中第  $i$  个矩阵的第  $j$  行、第  $k$  列的元素为 1, 表示在第  $i$  个空间信道内的第  $j$  个波长上的第  $k$  个时间码片处存在一个光脉冲, 此处  $1 \leq i, j, k \leq 3$ 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

图 3  $(4 \times 8, 4, 0, 1)$  空/时域码和  $(3 \times 3 \times 3, 3, 0, 1)$  三维码的矩阵表示实例

总之, 和一维码相比, 多维码的构造利用了更多的自由度 (波长域和空间域), 码的数目增加, 相关特性得到改善, 是扩频序列研究的一个方向, 但是, 其本质上还是单极性码, 互相关不为零。因此, 在非相干光纤码分多址系统中使用双极性码的研究, 成为以后扩频序列研究的新方向。

### 3 多用户干扰(MAI)问题

由于扩频序列的互相关不为0,使共享同一信道的不同用户间存在干扰,称为多用户接入干扰(MAI),它是光纤码分多址系统的一个主要噪声源。MAI的存在严重地影响了系统的误码率(BER)性能,为满足一定BER要求,使得接入用户总数非常有限,因此,光纤码分多址系统是一个干扰受限系统。目前国内外在减小MAI方面的研究较多,归纳起来主要有两方面,即在发送端采用特殊的编码减小MAI<sup>[9]</sup>,再在接收端采用特殊的接收机结构减小MAI<sup>[10, 11]</sup>。减小MAI的常用方法有以下几种:1) 在接收端使用一个光学硬限幅器(光学非线性元件),限幅器放置在光学相关器前,当考虑探测器的冲击噪声和暗电流噪声时,该方法稍使误码率恶化;2) 在接收端使用两个光学硬限幅器,新增加的限幅器放在光学相关器之后,当用户数不太大时,此方法很有效;3) 在接收端使用自适应光学硬限幅器,估计一个比特周期内接收到的光能量,调整光学硬限幅器的阈值;4) 在接收端使用电光开关和双光硬限幅器,接收到的光功率和信道干扰较大时,此法很有效;5) 采用码片级接收机结构,其性能远远优于传统的相关接收机,误码率性能接近于最佳接收机。该接收机的复杂性仅依赖于系统的接入用户数,和最佳接收机相比,比较实用;6) 采用错误控制编码来减小系统的BER。两种典型的用于减小MAI的接收机如图4、图5所示。

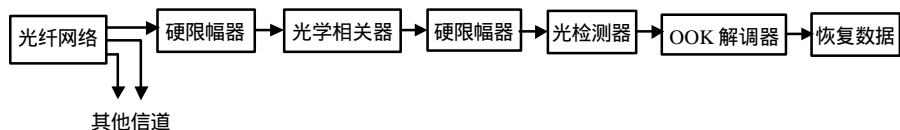


图4 使用两个光学硬限幅器的接收机

图4中第二个限幅器进一步减小第一个限幅器未除掉的干扰,这些干扰主要是期望用户发送0时的MAI。当接入用户数不太多时,该接收机非常有效。

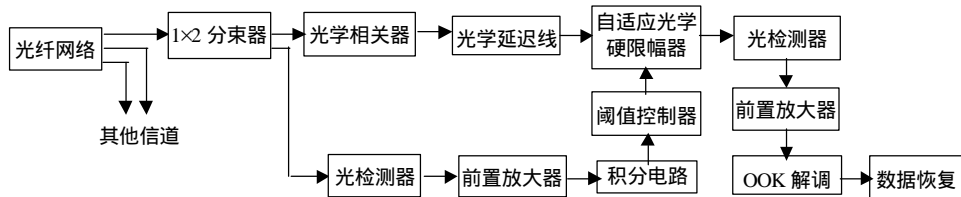


图5 使用自适应光学硬限幅器的接收机

图5中接收信号经1x2分束器分成两路,第一支路中的光延迟线引入一个固定延迟,以等待第二支路的阈值控制信号。第二支路的积分电路计算一个比特周期内接收信号的大小,估计发送比特“1”的用户数,阈值控制器动态设置限幅器的阈值。当接收到的光功率和信道干扰较大时,此法很有效,同时,此接收机可以改善系统的错误概率下限性能。

### 4 存在的关键技术问题

光纤码分多址技术至今已有二十多年,近几年得到了迅速发展,并成为目前国内外在光通信领域中研究的一个新课题,同时也出现了许多新的系统方案和光编/解码器结构,为取得技术上突破并使系统趋于实用化,需要解决以下关键技术问题:

#### 1) 寻找性能优良的地址码

在电码分多址系统中,主要是考虑扩频码的安全性和保密性,然后才是正交性,而在光纤码分多址系统中,地址码的正交性和能提供的码数目的大小成为衡量码性能好坏的主要因素。目前提出的某些光正交码,其正交性比较差且可提供的码数目非常有限。从地址码的极性来考虑,双极性码具有比单极性码更好的相关特性,且可提供更多数目的码序列,因此,可以考虑在光纤码分多址系统中使用双极性码,来克服单极性码的缺点,从而改善系统性能。

#### 2) 减小多用户接入干扰的方法

在光纤码分多址系统中,由于地址码的伪正交性,必定导致用户之间的互相干扰,即多用户接入干扰(MAI),MAI的存在将严重影响系统性能。目前出现了多种消除MAI的方法,都有一定的局限性,尤其是用光学硬限幅器来减小MAI的一些方法比较消极,浪费了系统中的信号能量,一种更为有效的方法是使用多用户检测技术,可充分利用所有用户的信号能量,尽量降低错误概率,尽可能准确地恢复出用户的原始数据。

### 3) 光器件技术

由于光纤码分多址技术主要用于高速网络,光脉冲的宽度往往只有皮秒量级,这对系统的光器件(超短光脉冲激光器、高速光检测器等)有比较高要求。从目前的半导体激光技术来看,可以得到飞( $10^{-15}$ )秒量级的超短光脉冲,但是作为光通信领域所选用的半导体激光器,在实现超短光脉冲方面的技术远远落后,如果能产生亚皮秒量级的超短光脉冲,且激光源能稳定工作,那么实现Tbit/s以上的超高速的局域网将成为可能,光器件技术的发展是关系光纤码分多址技术能否在未来通信网中占据一席之地的重要因素。

## 5 讨 论

光纤码分多址技术是将码分多址通信技术和光纤通信技术相结合的一种新型通信方式,结合两种通信方式的技术特点,具有很强的技术优势和广阔的应用前景,尽管该技术走向实用化还存在一些需要解决的关键技术问题,但由于光纤码分多址技术所带来的众多优点,特别是它具有极佳的保密性能和抗干扰性能,及在军事和商务领域得到广泛应用。随着光纤通信网的不断发展,全光通信网的最终实现,光纤码分多址技术在未来的宽带光接入网中具有广泛的实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 张宏斌. 波分复用光纤通信技术[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(4): 337-341
- [2] Wei Huang. Coherent optical CDMA(OCDMA) system used for high-capacity optical fiber network-system description, OTDMA comparison, and OCDMA/WDMA networking[J]. J. Lightwave Technol., 2000, 18(6):765-778
- [3] Jawad A S. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-part : fundamental principles[J]. IEEE Trans. Commun., 1989, 37(8): 824-833
- [4] Jawad A S. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks-part : systems performance analysis[J]. IEEE Trans. Commun., 1989, 37(8): 824-833
- [5] FANR K C. Optical orthogonal codes: design, analysis, and applications[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1989, 35(5): 595-603
- [6] Shivaleela E S. Design of a new family of two-dimensional codes for fiber-optic CDMA networks[J]. J. Lightwave Technol., 1998, 16(4): 501-507
- [7] Sangin K. A new family of space/wavelength/time spread three-dimensional optical code for OCDMA networks[J]. J. Lightwave Technol., 2000, 18(4): 502-511
- [8] Ryoh F. Optical orthogonal codes: their bounds and new optimal constructions[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1989, 46(5): 2 396-2 406
- [9] Wu J H. Synchronous fiber-optic code division multiple access networks with error control coding[J]. Electron. Lett., 1992, 28(11): 2 118-2 120
- [10] Tomoaki O. Performance analysis of direct detection optical asynchronous CDMA systems with double optical hard-limiters[J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(3): 452-457
- [11] Lin Che Li. A synchronous fiber-optic CDMA system using adaptive optical hardlimiter[J]. J. Lightwave Technol., 1998, 16(8): 1 393-1 403