

密 级      公开  
学 号      20011152



**北京石油化工学院**  
BEIJING INSTITUTE OF PETROCHEMICAL TECHNOLOGY

## 毕 业 设 计 ( 论 文 )

# 一种基于光纤延时线的可调光 编码器的设计

院 ( 系 、 部 ) :      信息工程学院  
姓      名 :      鲍静益  
年      级 :      通 01-2 班  
专      业 :      通信工程  
指导教师 :      张宁  
教师职称 :      副教授

2005 年 6 月 14 日 · 北京

# 北京石油化工学院 毕业设计（论文）任务书

学院(系、部) 信息工程学院 专业 通信工程 班级 通01-2班  
学生姓名 鲍静益 指导教师/职称 张宁/副教授

## 1. 毕业设计（论文）题目

**一种基于光纤延时线的可调光编码器的设计**

2. 任务起止日期： 2005 年 2 月 21 日 至 2005 年 6 月 26 日

3. 毕业设计（论文）的主要内容与要求（含原始数据及应提交的成果）

鉴于目前的光编/解码器大都成本高、体积大、功耗大，本设计提出了一种新的可调光编/解码器的实现方案。这种新结构的可调光编/解码器与以前文献中提出的结构相比，大大减少了所用  $2 \times 2$  光开关数及光纤延时线的条数和长度，减小了硬件实现的复杂性，降低了成本和功耗，便于集成，具有广阔的应用前景。

本设计最后应给出编码器的程序，并进行仿真，以证明它的合理性。

#### 4. 主要参考文献

- [1] 张宝富等. 全光网络. 北京：人民邮电出版社，2002
- [2] 殷洪玺, 吴德明, 徐安士, 谢麟振, 杨淑雯. 适用于光码分多址通信系统的可调光编/解码器的一种新方案. 高技术通讯, 2000
- [3] 陈金华, 戴贞麒, 陈炳生. 用于 OCDMA 的光延迟线编/解码器. 光通信技术, 2002
- [4] 张宁, 于荣金. 基于 HOP 的可调光编码/解码器的研究. 光子学报, 2002
- [5] YinHongxi, YangShuwen, ZhangGuangzhao. Synchronous optical code and its all-optical tunable encoder/decoder for synchronous optical code-division multiple access communication system. Acta Photonica Sinica, 1999
- [6] 扬义先, 林须端. 编码密码学. 北京：人民邮电出版社，1992
- [7] 王光辉, 张明辉等编. MATLAB6. 1 最新应用详解. 北京：中国水利电力出版社，2000

## 5. 进度计划及指导安排

- ◆ 2.21-3.20 查阅资料，翻译和修改外文，上交外文翻译电子版，17 日汇报交流
- ◆ 3.21-4.3 查阅资料，撰写并上交开题报告电子版和打印版，24 日汇报交流
- ◆ 4.4-4.17 按照参考文献学习软件设计，14 日汇报交流
- ◆ 4.18-5.1 进行编码器的设计，并用软件进行仿真，28 日汇报交流
- ◆ 5.2-5.15 中期检查，检查仿真结果并分析，12 日汇报交流
- ◆ 5.16-5.29 对编码器的设计进行改进分析，26 日汇报交流
- ◆ 5.30-6.12 验收成果，学习论文编写规范，编写论文，9 日汇报交流
- ◆ 6.13-6.19 编写论文，审核并整理材料，18 日小组内预答辩
- ◆ 6.20-6.26 进一步规范材料，准备答辩

---

任务书审定日期 2005 年\_\_月\_\_日 系（教研室）主任（签字）\_\_\_\_\_

任务书批准日期 2005 年\_\_月\_\_日 教学院（系、部）院长（签字）\_\_\_\_\_

任务书下达日期 2005 年\_\_月\_\_日 指导教师（签字）\_\_\_\_\_

计划完成任务日期 2005 年\_\_月\_\_日 学生（签字）\_\_\_\_\_

## 摘 要

随着因特网的迅猛发展,通信传输容量剧烈膨胀,迫切地需要新的技术来增加传输链路的带宽。光码分复用(OCDMA)系统由于采用同一波长的扩频序列,频率资源利用率高,它与波分复用(WDMA)和 OTDMA 结合,可以大大增加系统容量。

本文根据光码分复用的时域编码原理,提出了一种基于光纤延时线的可调光编码器的实现方案,与文献中提出的多级  $2 \times 2$  光开关和光纤延时线的串联或串-并联结构来实现可调光编码器相比,这种方案减小了硬件实现的复杂性,降低了成本和功耗,便于集成。文中还研究了采用该编码器的稳定性问题;光纤延迟线可调光编码器的延迟误差将严重影响系统性能,本文提出了在光电检测后对信号进行低通滤波处理,或选用具有适当占空比的 RZ 脉冲作为信号脉冲,可避免或减少采用这种编码器时可能出现的甚窄脉冲。

**关键词:** 光码分复用, 光纤延迟线, 光编/解码器, 自相关, 互相关

## Abstract

With the rapid development of internet ,the communication capacity is sharply expanded, the new technology is required to enhance the bandwidth of the transmission link. OCDMA system employed spreading spectrum sequence on the same wavelength. Spectrum efficiency is high. In tandem with WDMA and OTDMA it can increase the capacity of system greatly.

Based on the principle of encoder of optical code division multiple-access (OCDMA) in time domain, a new tunable optical encoder structure based on optical delay line is proposed. In contrast to the previous structures reported in the literature, the series connection or the series/parallel connection structure which is comprised with more stages of  $2 \times 2$  optical switches or optical delay line, the new structure has greatly reduced the hard ware complexity, the cost and the power loss. It is easy to integrate. This paper also study the stability of this kind of encoder; delay error of the encoder based on optical fiber tunable delay lines will seriously influence the performance of the system. The paper proposes that when signal from the output end of decoder experience a processing of low-pass filtering after photoelectric detection, or the RZ pulse with appropriate duty coefficient as signal pulse, the very narrow pulse induced by the kind of encoder can be avoided or diminished.

**Key words** : OCDMA, Optical fiber delay line, Optical encoder/decoder, Auto-Correlation, Cross-Correlation

## 目 录

第一章 前言 .....	1
1.1 光通信史 .....	1
1.2 光码分多址 (OCDMA) 技术 .....	2
1.3 光码分复用的关键技术及进展 .....	6
第二章 编码原理的确定 .....	9
2.1 相关性 .....	9
2.2 单极码 .....	10
第三章 编码原理的实现 .....	17
3.1 扩频编解码 .....	17
3.2 扩时编解码 .....	20
3.3 扩空编解码 .....	24
第四章 设计方案 .....	28
4.1 基于光纤延时线的可调光延迟处理器 .....	28
4.2 可调光编码器设计 .....	29
4.3 改进的可调光编码器 .....	30
4.4 可调光解码器 .....	31
4.5 延迟线的长度选取 .....	32
4.6 光延迟线编/解码器稳定性讨论 .....	32
4.7 延迟误差讨论 .....	34
第五章 仿真结果 .....	35
5.1 光正交码的构造 .....	35
5.2 自相关与互相关 .....	35
5.3 编码器的实现 .....	36
第六章 结论 .....	38
参考文献 .....	39
致谢 .....	40
声明 .....	41

## 第一章 前言

### 1.1 光通信史

应该说人们认识到用光可以传递信息比用电传输信息要早的多，比如 3000 多年前我国就有了用光传递远距离信息的设施——烽火台（直接光通信）；但是直接光通信是如此的不可靠，以至于它在日常应用中根本无法接受。但在 20 世纪 60 年代早期发现的激光改变了这一情况，科学家和工程师对光通信的兴趣一下子活跃起来。

1966 年 7 月，英国标准电信研究所的英籍华人高锟（K. C. Kao）博士和 G. A. Hockham 就光纤传输的前景发表了具有重大历史意义的论文。论文分析了玻璃纤维损耗大的主要原因，大胆地预言，只要能设法降低玻璃纤维的杂质，就有可能使光纤的损耗降低到 20dB/km。这篇论文的发表掀起了低损耗光纤研究的热潮。1970 年，美国康宁玻璃公司（现康宁公司）的 Robert Maurer 等三人，首先研制出传输损耗低于 20dB/km 的光纤。这样低损耗的光纤，在当时是惊人的成功，使光纤通信有了实现的可能<sup>[1]</sup>。

光纤通信的另一重要技术是光通信的光源，普通的光不能用于大容量的通信。1960 年美国 T. H. Maiman 发明了红宝石激光器，使人们获得了性质与电磁波相同、而且频率和相位都稳定的光——激光。1970 年贝尔实验室的 I. Hayashi 等人研制出能在室温下连续工作的半导体激光器，尽管最初的激光器的寿命很短，但这种激光器已被认为可以作为光纤通信的光源。由于光纤和激光器的重大突破，使光纤通信有了实现的可能，因此 1970 年被认为是值得纪念的光纤传输元年<sup>[2]</sup>。

1970 年这两项关键技术的重大突破，使光纤通信开始从理想变成可能，立即引起了各国电信科技人员的重视，竞相进行研究和实验。1974 年美国贝尔实验室发明了低损耗光纤制作法（CVD 法，即汽相沉积法），使光纤损耗降低到 1dB/km；1977 年，贝尔实验室和日本电报电话公司几乎同时研制成功寿命达 100 万小时（实用中 10 年左右）的半导体激光器，从而有了真正实用的激光器。1977 年，世界上第一条光纤通信系统在美国芝加哥市投入商用，速率为 45Mb/s。

此后，光纤通信的发展极为迅速，系统已经多次更新换代。20 世纪 70 年代的第一代光纤通信系统主要是用多模光纤和短波长（850nm）波段，在该波段光纤损

耗的典型值为 2dB/km；80 年代以后，第二代光纤通信系统信号源采用新研制的 1310nm InGaAsP 激光器，光纤逐渐采用单模光纤，光纤的损耗减至 0.5dB/km；到 90 年代初，通信容量扩大了 50 倍，达到 2.5Gb/s；进入 90 年代以后，光纤的传输波长转向更长的 1550nm，该波段光纤损耗的典型值为 0.2dB/km，并且开始使用掺铒光纤放大器（EDFA）、波分复用（WDM）、色散管理、分布式喇曼放大等新技术，光纤通信的容量继续成倍增长；现在已经达到 Tb/s 量级，并在长途通信干线和城域网获得广泛应用。

我国从 70 年代初开始光纤通信的研究及应用，发展也非常迅速。1979 年 7 月建成第一个 8Mb/s、5.7km 室内实验系统，1982 年建成第一个 8Mb/s、13.2km 现场试验系统。在“八五”期间，建成了含 22 条光缆干线、总长达 33000 公里的“八横八纵”大容量光纤通信干线传输网。1999 年 1 月，我国第一条高传输速率的国家一级干线（济南——青岛）8×2.5Gb/s 波分复用系统建成<sup>[3]</sup>。2001 年国内光通信公司华为、中兴开发的 32×10Gb/s DWDM 通信系统分别中标云南、广西移动传输骨干网和重庆移动 SDH 干线、铁通京哈传输干线、武汉城域网等。高比特率、大容量的光纤通信系统正在将我国推向信息时代的浪潮里，对不断出现的新技术进行着跟踪性研究，成果屡屡。

## 1.2 光码分多址（OCDMA）技术

### 1.2.1 OCDMA 的概念

光码分复用技术早在二十世纪七十年代就已经被提出，一直处于光通信研究领域主流之外。然而，随着 Internet 的迅猛发展随着互联网的发展，全光网络已成为下一代互联网的核心网络，这更激发了人们对 OCDMA 通信技术研究兴趣。全光网高速率、宽带宽是人们所认识的，但现有的技术如何充分利用光纤的宽带宽资源并非易事。

有三种光纤传输技术可以大大增加传输链路的带宽：波分复用技术，短脉冲光时分复用(OTDM)技术和现在刚刚起步的码分复用技术。波分复用传输系统将光纤带宽分成很多光波带，每个光波带以电子速率(约 10Gbit/s)携带信息，四路和八路波分复用技术已经成熟并已投入商用，目前的研究热点集中在密集型波分复用（DWDM）以期大大提高传输容量，但还存在不少问题，如：制作高精度波长稳定的光源以及高选择性的滤波器或相干检测技术才能分辨每个波道。另外，在

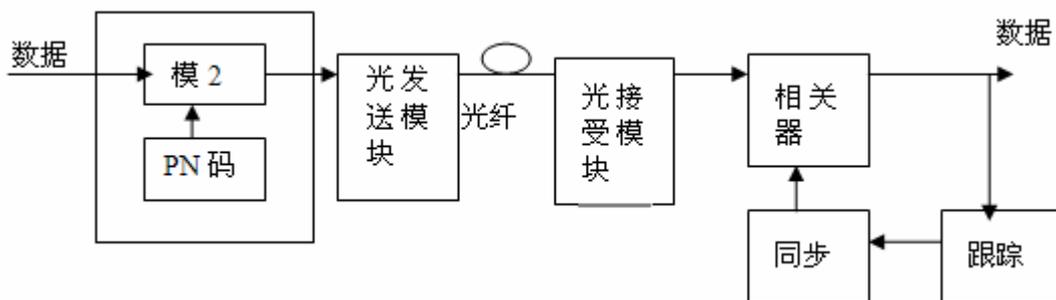
DWDM 系统中，由于多个波长同时存在，受光纤非线性特别是四波混频的影响比较大；对光放大器的带宽增益平坦和动态均衡、对滤波器和其他无源器件的带宽高稳定性、高可靠性和低插入损耗等，都提出很高的要求。以上因素的限制使得参与复用的波长数目没有人们希望的那么多，目前只能做到 128 个波长，因此人们将目标转移到光时分复用（OTDM）技术。

光时分复用（OTDM）通信是另一种复用技术，它是通过把时间划分为不同的时隙，每一时隙占用一个信道的复用方式。虽然它避开了在电域进行更高速率的复用所受的限制即电子瓶颈，但由于需采用光脉冲压缩、光脉冲时延、光均衡放大、光色散补偿、光时钟提取、光再生等技术，且它们的实现也并非易事。即使将 WDM 和 OTDM 结合起来发挥各自的优势，使总容量和总速率得到极大的提高，也不能达到光纤的可用带宽。因此人们寄希望将光码分复用、光时分复用和光波分复用这三种技术结合起来，如每一时限进行光码分复用，然后进行时隙复用，最后进行密集波分复用，这样总速率相对接近光纤的可用带宽。

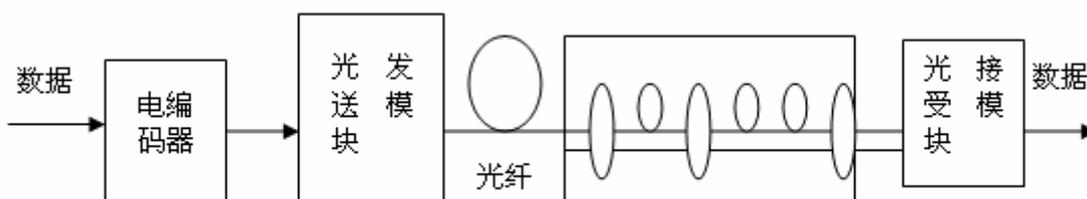
### 1.2.2 OCDMA 的分类

OCDMA 是一种扩频通信技术，不同用户的信号用互相正交的不同码序列来填充，这样经过填充的用户信号可调制在同一光载波上在光纤信道中传输，接收时只要用与发方相同的码序列进行相关接收，即可恢复原用户信息。由于各用户采用的是正交码，因此相关接收时不会构成干扰。这里的关键之处在于选择适合光纤信道的不同的扩频码序列对码元进行填充，形成不同的码分信道，即以不同的互相正交的码序列来区分用户，实现多址。

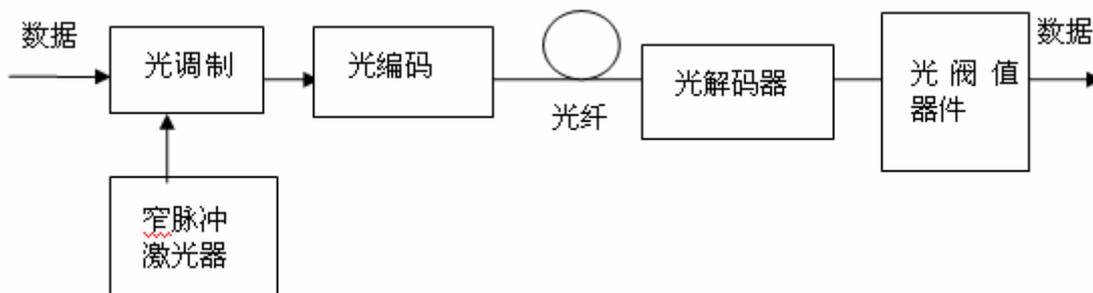
OCDMA 通信具体实现可以是各种各样的，它们的分类也没有统一的标准。可以根据其采用的是单极性正交码还是双极性正交码可分为单极性和双极性的 OCDMA 通信，根据光纤通信的接收机是直接检测还是相干检测分为非相干和相干 OCDMA 通信，根据编解码器是扩时、扩频还是扩空编码分为扩时、扩频、扩空 OCDMA 通信，根据编解码器是采用电信号处理还是采用光信号处理分为电处理的 OCDMA 通信、光电混合处理的 OCDMA 通信和全光 OCDMA 通信等。当然这些分类方法间是有联系的且还有其它的分类方式。这里根据是否采用双极性码和电信号处理来对 OCDMA 通信系统进行分类。这种分类方法对实际的系统设计和应用很方便，也符合 OCDMA 通信的产生和发展方向，而不拘泥于各种不同的具体实现方法的细节。其典型系统框图如图 1-1 所示。



(a) 传统的光纤 CDMA



(b) 光电混合编码光纤 CDMA



(c) 光纤 CDMA



(d) OCDMA

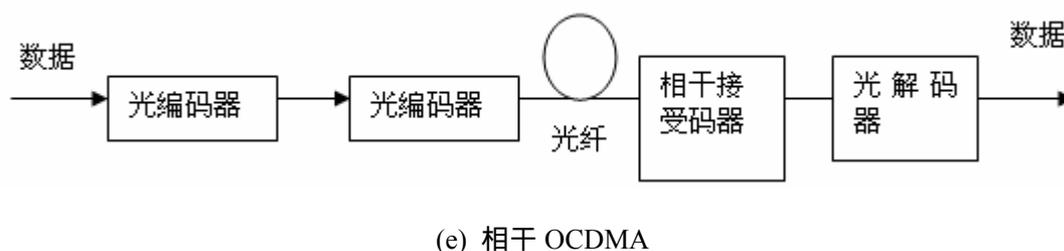


图 1-1 OCDMA 典型的系统框图

图 1-1(a)为传统 OCDMA 通信。将传统的移动通信、卫星通信等领域的成熟技术即电信号处理实现扩频编解码和强度调制直接检测即非相干光通信相结合,利用了各自的优点,这种技术上的成熟优势很快得到了广泛的应用,并有商用化产品问世。首先应用的领域是 HFC (混合光纤同轴电缆) 的接入系统, HFC 的技术特点是干线部分光纤化,配线端和引入线仍然保持原有的有线同轴电缆网。为了实现双向传输,用户必须经上行信道(用户端到电视前端)包括用户到光节点的同轴电缆上行信道和光节点到电视前端的光纤上行信道,传输用户信息至电视前端(如视频点播、交互式业务等),但由于上行信道的典型的频谱安排在  $5 \sim 42\text{MHz}$ ,这一频段最容易受到各种噪声如脉冲噪声(电视机开关、发动机启动等引起)、窄带噪声、反射噪声、内部热声等的影响,所以为了克服这些信道噪声选用了同步码分多址技术 S-CDMA 来抗噪声干扰。所谓同步是指所有的用户向电视前端发送数据是同步的即数据比特同步,这样经过 CDMA 扩频后各个对应的码片也是同步的即切普(chip)同步。采用 S-CDMA 技术虽然失去了所有用户向电视前端发送数据的随机异步特性,换来的是用户间干扰的减小,从而进一步提高了系统的抗误码特性。传统的 OCDMA 通常采用双极性扩频码序列和电信号处理技术,根据数据的发送是否同步可分为同步 S-CDMA 和异步 A-OCDMA(通常都指异步所以一般称 CDMA,易于处理突发信息传送)。图 1-1(a)中光发模块完成双单变换和电光转换功能,光收模块完成相反的功能。

图 1-1(b)光电混合编解码 OCDMA 通信充分发挥了电信号处理技术和光信号处理技术的各自优势,也是一种实用化的方案。电编码技术采用电信号处理技术虽然速率上低了一些,但电信号处理的灵活性、可靠性、稳定性是光编码技术不可比拟的,电编码技术可实现很灵活的变址功能、同时降低了对光器件的要求,对于局域网的应用是很重要的。光解码方案采用典型的光纤延迟线作为相关器完成相关解

码，相对电解码方案一是速率高、二是无须复杂的同步捕获与跟踪技术，因而光解码器相对系统的其他部分有较强的独立性可单独优化设计。图 1-1(b)中光发模块完成电光转换功能，光收模块完成光电转换功能。

图 1-1(c)OCDMA 通信采用光纤延迟线信号处理技术来进行编解码，因此比光电混合式 OCDMA 通信的速率进一步提高了，这也是较实用的一种方案。为了进一步提高性能，编解码器可以采用相干编解码技术，光发模块将电脉冲序列通过直接强度调制或外调制技术变成光脉冲序列，送光编码器进行编码。OCDMA 通信还可采用双极性扩频码序列，因而能实现地址码之间的完全正交，不像单极性码序列的伪正交，使得系统的传输性能好、信噪比高、传输容量大、可容纳很大的用户群。

图 1-1(d)和图 1-1(e)分别为全光 CDMA 通信和相干光 CDMA 通信，均采用了全光编码器，有扩时、扩频、扩空编解码方案。它们的系统容量、用户速率都很高，是理想的通信方式，但技术还处于实验研究阶段，离应用还有一段时间，尤其是相干光 CDMA 通信<sup>[3]</sup>。

## 1.3 光码分复用的关键技术及进展

### 1.3.1 OCDMA 扩频码的研究

对于 OCDMA 通信，扩频码的选择非常重要。扩频码类型，长度和速率直接影响到编码的实现难度、变址能力、系统的抗干扰能力、系统的容量等，因此为了提高 OCDMA 系统的性能就必须选择合适的扩频码。由于光纤通信有强度调制直接检测和相干检测即所谓的正系统和正负系统之分，因此 OCDMA 采用的扩频码必须适应光纤通信的特点，正系统采用的扩频码称之为单极性的扩频码。正负系统采用的扩频码称之为双极性扩频码。双极性的扩频码可以直接采用传统的电 OCDMA 所使用过的扩频码。

最早是 80 年代中期国外有人想利用光纤的巨大带宽，在光纤线路上来实现码分多址通信，当时提出采用双极性 gold 码作为地址码对用户数据进行电的 CDMA 编码后变成光信号用光纤来传输，尽管此后又有人在光纤双极性 CDMA 实现方面做了一些工作。但是，因为采用这种电编码和电解码的方法，电子“瓶颈”效应问题未解决，只能实现中、低速通信，不能充分利用光纤的巨大带宽资源，所以不是真正的光码分多址。后来有人提出直接采用光信号处理、进行光编/解码。但时至今日，光通信中采用的调制技术还主要是强度调制，因此当时提出的光码分复用编/

解码采用的是不同于移动通信码分复用的强度编/解码，这时的光码分多址系统是正系统，处理的是单极码，这样一来在移动通信中广泛采用的性能优良的双极码如 m 序列，gold 序列，walsh 序列无法用于光码分复用中，还需要寻找性能优良的单极码。这时有人提出了构造较容易的素数序列码，围绕着素数序列码有不少人做了大量的研究工作。素数码具有较好的互相关特性，但其自相关中的旁瓣很大很多，使得它在异步 OCDMA 系统中无法应用。以后人们对用作扩频码的单极码进行了大量的研究。

80 年代末有人提出了光正交码 (OOC)，因为光码的最小相关限制是 1 而不是 0，所以实际上准确地应称为光准正交码。与素数序列码相比，光正交码具有良好的相关特性，码的容量也相对较大，更适合光的码分复用通信系统采用。但是迄今为止，关于光正交码码分复用技术的研究，国外仅集中在对码重较小的等重对称光正交码的容量和构造方法的研究，及对 OCDMA 系统的性能分析。

无论是素数码，还是光正交码，在一维编码的情况下，相同长度码序列在 OCDMA 网络中的容量都无法与双极码相比。为了解决这一问题，目前国内外有很多二维编/解码的报道<sup>[4]</sup>。即在时域和频域上同时编码，从而使系统容量大大提高。

与采用非相干光源的 OCDMA 技术相比，相干光 OCDMA 技术对器件要求高、实现技术难度较大。但相干 OCDMA 采用的是性能优良的双极码，在相同长度码序列的情况下，采用双极码<sup>[4]</sup>的 OCDMA 系统容量大大高于一维单极码；且无论是一维非相干 OCDMA 还是二维非相干 OCDMA，在编/解码过程中常常存在频谱成份丢失的问题。因此相干 OCDMA 技术在全光组网上将存在优势。光纤光栅制造技术的成熟推动了利用光纤光栅作为光码分复用编/解码技术的实现。近年来对基于光纤光栅的相位编/解码的研究亦受到重视。

### 1.3.2 OCDMA 编/解码方式

所谓编解码，简单地就是指用户信息与地址码之间调制、解调的过程。由于 OCDMA 系统的性能乃至应用都主要决定于系统采用的编解码方式，所以正确地实现编/解码是 OCDMA 系统的关键技术之一。在 OCDMA 系统中，主要的编解码方式有三种：扩频（时域）OCDMA 编解码、扩时（频域）OCDMA 编解码、扩空 OCDMA 编解码。

#### (1) 时域编/解码器

OCDMA 时域分割编码，即对信号在时域上按照地址码分割为一组码片，光延迟线编/解码器<sup>[5,6,7,8,9,10,11]</sup>是一种适合于 OOC 码的典型的时域光编码器，其结构如图 1-2 所示。



图 1-2 光纤延迟线编码器示意图

光纤延迟线编码器是由并行的几束不同长度的光纤和一个  $1 \times N$  分束器及  $N \times 1$  合束器构成的，作用是将输入的一个短光脉冲分成几份，根据地址码进行不同的延时，在输出端得到由这些不同延迟的短光脉冲合成的脉冲序列。在接收端，解码器结构与编码器完全一样。其功能是把输入信号与解码器包含的标志序列作相关运算，进行相关识别，直接探测，通过阈值判断，从而在混有众多用户信号的接收信号中识别并检出某用户的数据。

## (2) 频域编/解码器

频域编/解码是对信号在频域上分割编码实现编/解码的一种方法。由于这种编码使得信号在时域扩展，所以通常称这种 OCDMA 系统为扩时 OCDMA 通信系统。

在频域编/解码中，可采用相位编/解码，地址码为具有 +1 和 -1 的双极码，所以地址码序列可选用伪随机 (PN) 序列，采用相位调制编/解码时多址干扰小，但实现较复杂；也可采用强度调制编/解码，这时地址码只能采用具有 0、1 的单极码，采用强度调制实现编/解码的方法多址干扰大，但实现比较方便。

## 第二章 编码原理的确定

对于 OCDMA 通信扩频码的选择非常重要，扩频码类型，长度和速率直接影响到编码的实现难度、变址能力、系统的抗干扰能力、系统的容量等，因此为了提高 OCDMA 系统的性能就必须选择合适的扩频码。在可能用于 OCDMA 系统的众多码字中，任何一种码字都必须适用于相应的编解码方式。

由于光纤通信有强度调制直接检测和相干检测即所谓的正系统和正负系统之分，因此 OCDMA 采用的扩频码必须适应光纤通信的特点，正系统采用的扩频码称之为单极性的扩频码。正负系统采用的扩频码称之为双极性扩频码。由于强度调制的 OCDMA（非相干系统）的地址码序列只能采用单极码，因此探索性能优良的单极码是 OCDMA 的一个重要研究方向。人们提出了许多具有准正交特性的单极码，研究较多的有素数序列码<sup>[1,9]</sup>，光正交码<sup>[12,13]</sup>等。双极性的扩频码可以直接采用传统的电 CDMA 所使用过的扩频码。本节首先给出衡量地址码好坏的标准：相关性的定义，然后分别介绍用于 OCDMA 中的两类地址码：单极码和双极码。

### 2.1 相关性

OCDMA 系统在本质上同电领域的 CDMA 系统是一样的：需要为每个用户选择不同的高速扩频地址码，用以传输相对低速的用户信息。在分析设计扩展序列时最主要考虑的是与地址序列码密切相关的两个特性：自相关特性与互相关特性<sup>[1,2]</sup>。前者使每个序列能容易地从它本身时间偏移不为零的不同偏移序列中区分开来；后者能使每个序列容易地从其他用户的地址序列码中区分出来。

在 OCDMA 系统中，我们一般都采用周期信号和序列码元基本波形  $P_{T_c}$ ，信号可表示为

$$x(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n P_{T_c}(t - nT_c) \quad (2-1)$$

$$y(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n P_{T_c}(t - nT_c) \quad (2-2)$$

式中  $T_c$  为单位矩形脉冲的宽度（在本文的讨论当中都做这种假设），通常把它

称为切普。如果对任何  $t$  都存在  $x(t) = x(t+T)$  和  $y(t) = y(t+T)$ ，那么序列  $(x_n)$  和  $(y_n)$  是周期为  $F = T/T_c$  的周期序列。对于周期序列  $(x_n)$  和  $(y_n)$ ，其相关函数定义如下：

(1) 自相关函数为：对于任何长度为  $N$  ( $N = T/T_c$ ) 的周期序列  $(x_n)$ ，平移  $\tau$ 。若  $\tau = lT_c$ ，则：

$$Z_{x,x}^{(l)} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n x_{n+l} \quad (2-3)$$

若  $\tau \in [0, T]$  时，则：

$$Z_{x,x}^{(\tau)} = Z_{x,x}^{(l)} + \left(\frac{\tau}{T} - l\right)[Z_{x,x}^{(l+1)} - Z_{x,x}^{(l)}] \quad (2-4)$$

(2) 自相关函数为：对于任何长度为  $N$  ( $N = T/T_c$ ) 的周期序列  $(x_n)$  和  $(y_n)$ ，两序列相对平移  $\tau$ 。若  $\tau = lT_c$ ，则：

$$Z_{x,y}^{(l)} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n y_{n+l} \quad (2-5)$$

若  $\tau \in [0, T]$  时，则：

$$Z_{x,y}^{(\tau)} = Z_{x,y}^{(l)} + \left(\frac{\tau}{T} - l\right)[Z_{x,y}^{(l+1)} - Z_{x,y}^{(l)}] \quad (2-6)$$

由于解码时在解码器中产生的地址码不一定与信息数据比特中的地址码在时间上同步，所以相关检测自相关函数存在旁瓣。要求自相关函数的主峰越大越好，旁瓣则应该尽量小，理想情况为 0；互相关值对应着检测中存在的多址干扰，这是由于码字结构本身造成，通常很难去除（但在光谱幅度编解码中可采用发送补码，通过平衡检测去除多址干扰）。在码字的构造中应使其尽量小，理想情况亦为零。

## 2.2 单极码

在单极码中研究得较早较多的是素数码、光正交码等，以下阐述这些码字的构造。

(1) 素数码

素数序列实际上应称为衍生素数序列。这种序列的伽罗华域  $GF(P)$  由长度为  $P$  的原始素数序列衍生而成。

素数码的构造从伽罗华域  $GF(P)$  开始,其中  $P$  为素数。首先由  $S_{i,j} = i \cdot j \pmod{P}$  构造一个素数序列  $S_i = (S_{i,0}, S_{i,1}, \dots, S_{i,j}, \dots, S_{i,P-1})$ , 这里  $i, j \in GF(P)$ 。接着将每个素数序列  $S_i$  映射到一个二进制序列  $C_i = (C_{i,0}, C_{i,1}, \dots, C_{i,k}, \dots, C_{i,F-1})$ , 其中  $F = P^2$  为码长。映射的规则是当  $k = S_{i,j} + jP$  时  $C_{i,k} = 1$ 。否则  $C_{i,k} = 0$ 。因此可以产生  $P$  个码字, 每个码字的码重为  $P$  (码字中 1 的个数), 码长为  $P^2$ , 且互相关值不大于 2。表 2-1 给出了  $P=7$  时构成的素数序列, 表 2-2 给出了一个  $P=7$  时构成的素数码的实例。

表 2-1  $P = 7$  时构成的素数序列

	j=0	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6
序列 $S_0$	0	0	0	0	0	0	0
序列 $S_1$	0	1	2	3	4	5	6
序列 $S_2$	0	2	4	6	1	3	5
序列 $S_3$	0	3	6	2	5	1	4
序列 $S_4$	0	4	1	5	2	6	3
序列 $S_5$	0	5	3	1	6	4	2
序列 $S_6$	0	6	5	4	3	2	1

素数码的构造相对光正交码的构造简单, 并且由于每个素数码可被分为  $P$  个等长的子序列, 每个子序列仅包含一个光脉冲, 因此其编码器实现起来简单且编码速度快。

表 2-2 P = 7 构成的素数码

	j=0	j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6
序列 $C_0$	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
序列 $C_1$	1000000	0100000	0010000	0001000	0000100	0000010	0000001
序列 $C_2$	1000000	00100000	0000100	0000001	0100000	0001000	0000010
序列 $C_3$	1000000	0001000	0000001	0010000	0000010	0100000	0000100
序列 $C_4$	1000000	0000010	0100000	0000010	0010000	0000001	0001000
序列 $C_5$	1000000	0000010	0001000	0100000	0000001	0000100	0010000
序列 $C_6$	1000000	0000001	0000010	0000100	0001000	0010000	0100000

## (2) 光正交码 (OOC) 及其构造

目前,典型的光通信系统和光信号处理器的系统模型是所谓的正系统。对于正系统的码分多址而言,它无法使干扰的地址码序列与所需信号的地址码序列相关得零,这与电领域中的扩频通信不同,在电 CDMA 中可以利用+1/-1 电压信号,使在地址码构造时可以通过正负电压相加抵消这一特性实现相关得零,实现完全正交,因此在很大程度上限制了光 CDMA 系统的性能及其容量。虽然光信号也可以借助相位、偏振等实现与正负电压相应的信号,但在目前,利用高度相干激光器及其相干光检测尚相当有困难。因此现在最直接的光 CDMA 系统还是属于非相干强度调制直接检测系统,在光 CDMA 中尚不能实现完全正交,只能利用光的“有”与“无”来表示二进制中的“0”和“1”,这样两个不同扩展序列之间的相关最小为 1。同样,同一扩展序列在不同相移时的自相关最小也至少为 1。虽然光 CDMA 中只能实现最小为 1 的准正交,仍将取得最小相关值的码称为正交码。

光正交码 (OOC) 是光 OCDMA 系统最直接的光正交码型,对它的研究开始于 OCDMA 设想刚提出之时,也是研究探索其它适用于 OCDMA 系统码型的基础。光正交码的命名包含两层意思,“光”表示非负性,“正交”表示其弱的互相关性,它是具有良好的自互相关性的一组 (0, 1) 序列。无论怎么,光 CDMA 系统在本

质上同电领域的 CDMA 系统是一样的：需要为每个用户选择不同的高速扩频地址码，用以传输相对低速的用户信息。在分析设计扩展序列时最主要考虑的是与地址序列码密切相关的两个特性：自相关特性与互相关特性。前者使每个序列能容易地从它本身时间偏移不为零的不同偏移序列中区分开来：后者能使每个序列容易地从其他用户的地址序列码中区分出来。相互正交的光正交码应该满足以下两个条件：

(1) 自相关条件：对任何长度为  $N$ ，码重为  $W$  的周期性序列  $x = (x_n)$ ，对于平移  $l$ ：

$$|Z_{x,x}^{(l)}| = \sum_{n=0}^{N-1} x_n x_{n+l} = \begin{cases} W(l=0) \\ \leq \lambda_a (1 \leq l \leq N-1) \end{cases} \quad (2-7)$$

(2) 互相关条件：对任何长度为  $N$ ，序列重量为  $W$  的一对周期性序列  $x = (x_n)$  和  $y = (y_n)$ ：

$$|Z_{x,y}^{(l)}| = \sum_{n=0}^{N-1} x_n y_{n+l} \leq \lambda_c (0 \leq l \leq N-1) \quad (2-8)$$

$\lambda_a$ 、 $\lambda_c$  均为零时就是严格的正交码（如电 CDMA 就能做到这一点）。然而，如上所述，由于光纤通信系统就是正系统、因此它们的最小值只能取到 1。因此  $\lambda_a = \lambda_c = 1$  的地址码序列就是光正交码，显然它是可用于非相干 OCDMA 通信系统的最佳地址码，任何其他类型的扩频序列的自相关与互相关特性均不如此，然而如果将跳频技术结合进来时，在码字和器件满足一定条件下，可以在理论上实现相关为零。而且，分析及实验结果都表明在不满足上述最佳相关条件时，系统的性能依旧能满足实际通信需要。这给地址码的设计带来了很大的选择余地，可以采用其它许多不同类型的码型，以适用于不同的应用环境。 $\lambda_c$  越小，不需要的信号带来的干扰所导致的误码率就越小，系统性能也就越好，但同时码长  $N$  给定时它所能提供的码字数目也就相应越小，即能容纳的用户数会比较少。因此在设计时选择互相关  $\lambda_c$  时很重要，需要均衡考虑。光正交码是在将扩频技术思想引入到光纤通信系统中以后，由于光纤通信系统与电子通信系统的本质特性区别所产生的概念。

假定两个周期信号  $x(t)$  和  $y(t)$  可以写为：

$$x(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n p_{T_c}(t - nT_c) \quad (2-9)$$

和

$$y(t) = \frac{1}{T_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n p_{T_c}(t - nT_c) \quad (2-10)$$

其中  $p_{T_c}(t - nT_c)$  是周期为  $T_c$  的单位方波脉冲。对于任何  $t$  都有  $x(t) = x(t+T)$  ( $T$  为信号脉冲周期), 则  $x_n$  和  $y_n$  就是周期为  $F = T/T_c$  的周期性地址序列, 要求  $x_n$  和  $y_n$  满足正交条件 (2-7) 和 (2-8)。式中的  $N$ 、 $\lambda_a$  和  $\lambda_c$  均为常数。在且  $\lambda_a$  和  $\lambda_c$  都取得最小时系统就是“严格的”正交系统。

在满足式 (2-7) 和 (2-8) 的扩频序列设计时, 以  $(N, W, \lambda_a, \lambda_c)$  来表示, 其中  $N$  表示序列长度 (即扩展比)  $W$  为码重,  $\lambda_a$  和  $\lambda_c$  分别为自相关与互相关, 在  $\lambda_a = \lambda_c = 1$  时就简单地表示为  $(N, W, \lambda)$ 。在光纤通信系统中只能以光的有无来表示二进制信息, 显然该扩频序列是由一系列的“0”和“1”组成, 而  $W$  就是其中 1 的个数。

构造光正交码<sup>[16]</sup>的算法很多, 有直接构造法, 递归构造法, 射影构造法, 组合区组设计法等, 现将直接构造法简述如下:

◆  $(v, 2, 1)$  光正交码的直接构造。

直接验证便可知  $\{(0, 1), (0, 2), \dots, (0, v-1), \text{mod } v\}$  便构成了一个  $(v, 2, 1)$  最佳光正交码。

◆  $(v, 3, 1)$  光正交码的直接构造。

A1: 准优化  $(v, 3, 1)$  光正交码的构造。

设  $v = 6l + x, 1 \leq x \leq l$  我们可以构造出一个含有  $l-1$  个码字的  $(v, 3, 1)$  的光正交码, 它的码字个数只比优化光正交码的码字个数少一个。当  $l$  为奇数时, 此码由以下的三元数组构成:

$$\{0, l+i, 2l+1-i\} \quad (1 \leq i \leq \frac{l-1}{2}) \quad \text{和} \quad \{0, 2l+i, 3l-i\} \quad (1 \leq i \leq \frac{l-1}{2})$$

当  $l$  为偶数时, 此码由以下的三元数组构成:

$$\{0, l+i, 2l-i\} \quad (1 \leq i \leq \frac{l}{2}-1) \quad \text{和} \quad \{0, 2l+i, 3l+1-i\} \quad (1 \leq i \leq \frac{l}{2}-1)$$

为证明此构造法的正确性, 只需证明小于  $\frac{v}{2}$  的差值都不会重复就行了。假设  $l$  为偶数, 那么第一组中的三元数组产生出所有小于  $l$  的偶数差值并且从  $l+1$  到  $2l-1$  的所有差值除  $(\frac{3}{2}l)$  外刚好被产生一次。第二组中的三元数组产生所有小于  $l$  的奇数差值并且从  $2l+1$  到  $3l$  的差值刚好被产生一次。因此这些三元数组就形成了一

个  $(v, 3, 1)$  光正交码。当  $l$  是奇数时，可同理证明。

A2：优化和最佳  $(v, 3, 1)$  光正交码的构造。

对前面的构造法作一些改进，便可以对几乎所有的  $v$  构造出  $(v, 3, 1)$  优化光正交码，因此我们也构造出了许多  $(v, 3, 1)$  最佳光正交码。

设  $v = 6l + v', 1 \leq v' \leq 6$ 。下面根据  $l \bmod 4$  的不同取值分四种情况来介绍构造方法。

情况一： $l \equiv 0 \pmod{4}$ 。

设  $l = 4u \geq 8$ 。以下  $l$  个三元数组就构成一个优化  $(v, 3, 1)$  光正交码：

$$\begin{aligned} & \{0, 4u + i, 8u - i\} \quad (1 \leq i \leq 2u - 1) ; \{0, 8u - 1 + i, 12u - i\} \quad (1 \leq i \leq u) ; \\ & \{0, 9u + 1 + i, 12u - i\} \quad (1 \leq i \leq u - 2) ; \text{和} \{0, 6u, 10u\} ; \{0, 9u, 9u + 1\} ; \\ & \{0, 10u + 1, 12u\} ; \end{aligned}$$

为了证明此构造法的正确性，注意到第一组产生出所有小于  $4u$  的偶数差值以及除  $6u$  外从  $4u + 1$  到  $8u - 1$  的所有差值。第二组产生出从  $2u + 1$  到  $4u - 1$  的所有奇数差值以及所有从  $8u$  到  $9u - 1$  和从  $11u$  到  $12u - 1$  的所有差值。第三组产生从  $3u$  到  $2u - 1$  的奇数差值以及所有从  $9u + 2$  到  $10u - 1$  和从  $10u + 2$  到  $11u - 1$  的差值。剩下的差值由最后三个三元数组产生。显然没有重复的差值，因此这些三元数组形成了一个优化  $(v, 3, 1)$  ( $v = 6l = v'$ ) 光正交码。

情况二： $l \equiv 2 \pmod{4}$ 。

设  $l = 4u + 2 \geq 6$ 。那么当  $v \neq 2 \pmod{6}$  时以下的三元数组就构成一个优化  $(v, 3, 1)$  光正交码：

$$\begin{aligned} & \{0, l + i, 2l - i\} \quad (1 \leq i \leq \frac{l}{2} - 1) ; \{0, 2l - 1 + i, 3l - i\} \quad (1 \leq i \leq u) ; \\ & \{0, 2l + 1 + u, 3l - u - i\} \quad (1 \leq i \leq u - 1) ; \text{和} \{0, \frac{3}{2}l, \frac{5}{2}l\} ; \{0, 2l + u, 2l + u + 1\} ; \\ & \{0, \frac{5}{2}l + 1, 3l + 1\}。 \end{aligned}$$

证明过程也与情况一相似。注意到当  $v = 6l + 2$  时，此方法不能构造出  $(v, 3, 1)$  光正交码。因为在最后一个三元数组用到  $0$  和  $3l + 1$ 。

情况三： $l \equiv 1 \pmod{4}$ 。

设  $l = 4u + 1 \geq 9$ 。那么如下的三元数组就构成一个优化  $(v, 3, 1)$  正交码：

$$\begin{aligned} & \{0, l + i, 2l + 1 - i\} \quad (1 \leq i \leq 2u) ; \{0, 2l + i, 3l - i\} \quad (1 \leq i \leq u - 2) ; \\ & \{0, 2l + u + 2 + i, 3l - u - i\} \quad (1 \leq i \leq u - 2) ; \{0, l + 2u + 1, 2l + 2u + 1\} ; \end{aligned}$$

$$\{0, 2l+u+1, 2l+u+2\} ; \{0, 2l+2u+2, 3l\}。$$

证明过程也与情况一相似。注意到此时构造法对一切  $v = 6l + v', l \geq 9$  都有效，甚至包括  $v' = 2$ 。

情况四： $l \equiv 3(\text{mod } 4)$ 。

设  $l = 4u + 3 \geq 7$ 。那么当  $v \not\equiv 2(\text{mod } 6)$  时如下的三元数组就形成一个优化  $(v, 3, 1)$  光正交码：

$$\begin{aligned} & \{0, l+i, 2l+1-i\} \quad (1 \leq i \leq 2u+1) ; \quad \{0, 2l+i, 3l-i\} \quad (1 \leq i \leq u+1) ; \\ & \{0, 2l+u+3+i, 3l-u-1-i\} \quad (1 \leq i \leq u-2) ; \quad \{0, l+2u+2, 2l+2u+2\} ; \\ & \{0, 2l+u+2, 3l+3\} ; \quad \{0, 2l+2u+3, 3l+1\}。 \end{aligned}$$

构造法的正确性也可以仿情况一证明。注意到此构造法对除了  $v \equiv 2(\text{mod } 6)$  以外的所有  $v$  值都有效。而当  $v \equiv 2(\text{mod } 6)$  时整数  $3l+1$  在最后一个三元集中出现，所以此时构造法有效。

对  $l = 1, 2, 3, 4, 5$  可以很集中地用手算出相应地  $(v, 3, 1)$  光正交码。

### 第三章 编码原理的实现

由于 OCDMA 系统的性能乃至应用都主要决定于系统采用的编解码方式。因此，正如扩频通信中的扩频、解扩器一样，编解码器在 OCDMA 系统和 CDMA 全光网中占有极其重要的地位。本章将分三个部分来具体分析，三种方式的 OCDMA 编解码器的原理。

#### 3.1 扩频编解码

OCDMA 通信与无线 CDMA 通信一样，它们本质上都是一种码分多址通信方式，都是利用地址码调制、扩展频谱的机理来实现多址通信。因此，无线 CDMA 中扩频通信所特有的一些信号特征在 OCDMA 通信中也同样具有。

对一个如图 3-1 所示的扩频 OCDMA 系统来讲，其各点信号传输的时域图和频域图分别如图 3-2、图 3-3 所示。图中各点波形以光强度调制系统为例，即整个 OCDMA 系统采用“1”发光，“0”不发光模式。

OCDMA 系统发端通过地址码调制从而扩展原始信号的频谱来实现码分多址，而接收端通过相关解码来识别待接收的用户信息。从频域上讲，原始信号在编码后，频谱展宽了，展宽倍数为地址码的长度。因此称为扩频 OCDMA。相应地，从时域上来看，原始信号被编码后，时域波形被相应地址码调制，时域波形在编码前后发生了变化，从编码的角度说，又称为被地址码时域编码。所以扩频 OCDMA 又称作时域编码的 OCDMA。

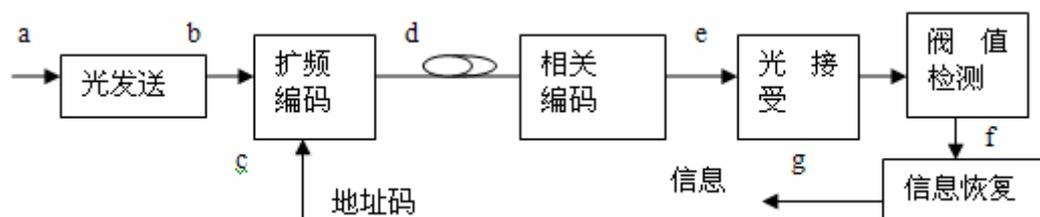


图 3-1 扩频 OCDMA 系统框图

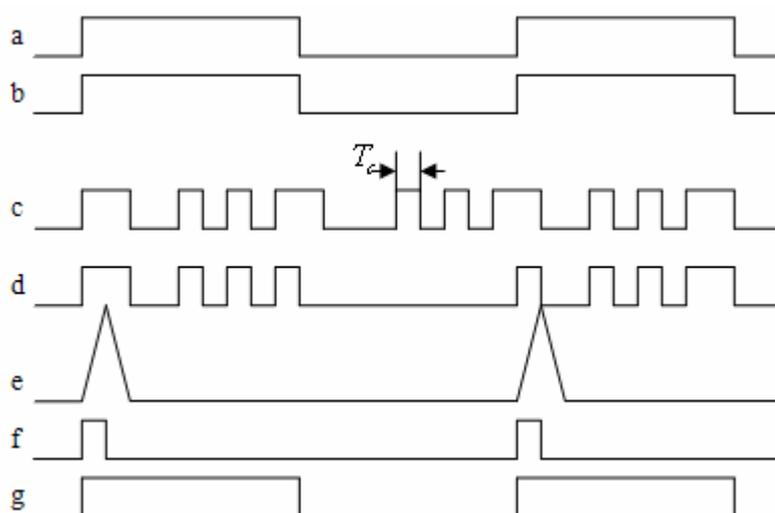


图 3-2 各点传输信号的时域图

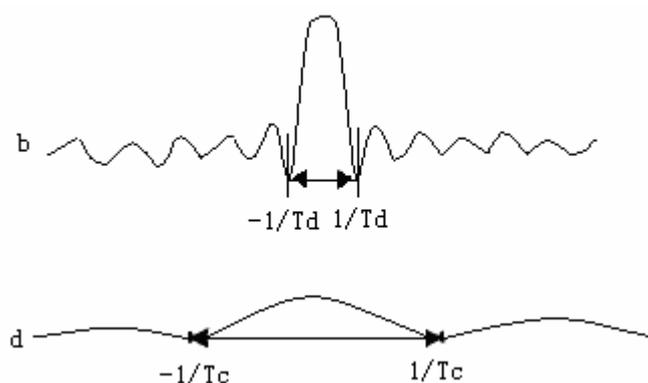
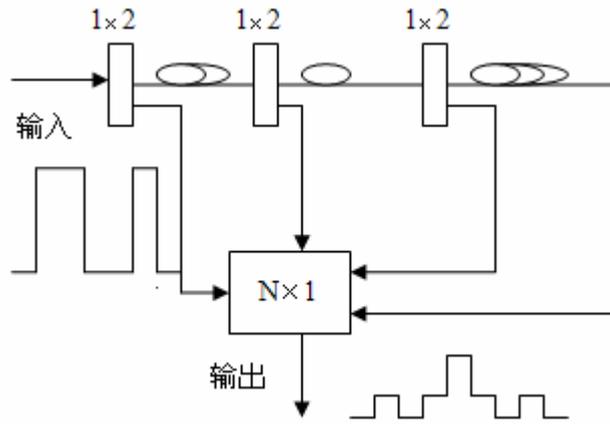


图 3-3 扩频码前后信号的频谱图

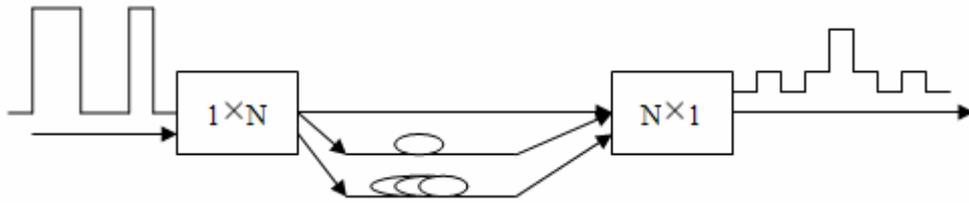
#### ◆ 扩频编/解码的实现

扩频 OCDMA 编解码方式主要有两类：一类是相干方式，另一类是非相干方式。对于非相干光处理意味着对光强的测量，即强度调制，这种方法虽然实现容易，但自相关和互相关特性差和容量小的缺点。利用相干光进行编解码可实现对信号相位的调制，从而解决了非相干调制中存在的相关特性差的问题。在相干和非相干编解码方式中，非相干编解码方式研究相对成熟，相干编解码方式目前也取得了较大进展。相干扩频 OCDMA 编解码方式的实现主要有延迟线和集成波导两种形式。在码率不高(如小于 10Gb/s, 脉冲宽度为 50ps, 延迟光纤长度大于 1cm)时, 使用光纤作为光延迟器；在高码速时, 使用集成光波导更佳。对非相干扩频 OCDMA 编解码，

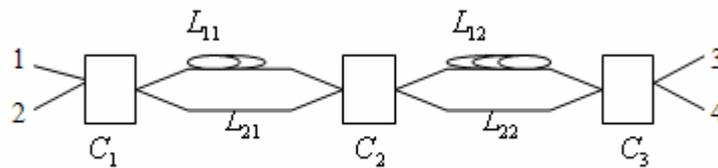
则主要采用延迟线来实现<sup>[7,9,12]</sup>。有三种结构的延迟线可实现扩频 OCDMA 编解码，即：抽头型、并联结构和梯状结构，如图 3-4 所示。



(a) 抽头型光纤延迟线编解码器



(b) 并联型光纤延迟线编解码器



(c) 梯状光纤延迟线编解码器

图 3-4 三种结构光纤延迟线编解码器

下文将以抽头光纤延迟线编解码为例，来说明扩频 OCDMA 的编解码实现，其结构如图 3-5 所示。

抽头型光纤延迟线编/解码器<sup>[13,14]</sup>是由并行的几束不同长度的光纤和两个  $1 \times N$  星型耦合器构成的，作用是将输入的一个短光脉冲分成几份，输入光纤延迟线， $N$  根光纤延迟线按照等间隔长度差排列，脉冲在两相邻两个延迟线的延迟为  $3\tau$ ，进行不同的延时，延时控制器根据地址码控制光纤延迟线的开关。这样，在输出端就可得到根据地址码确定的一组时域脉冲序列。

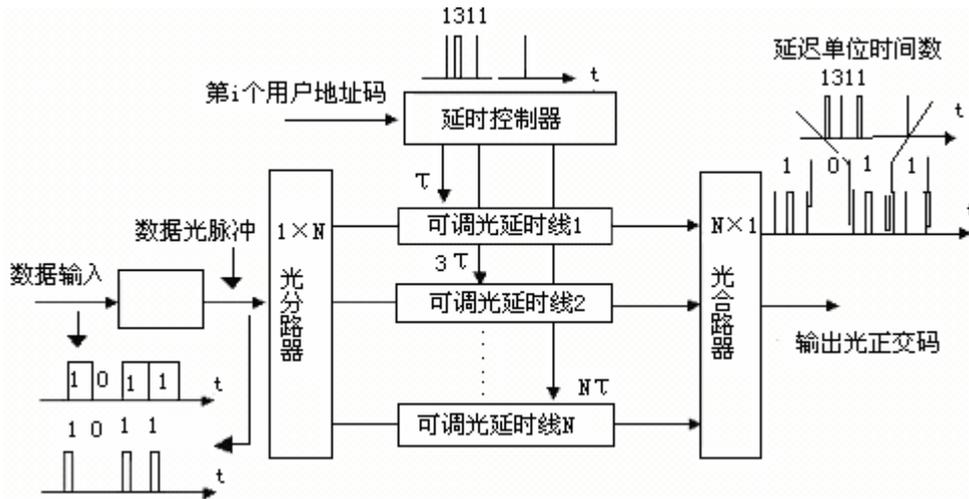


图 3-5 抽头光纤延迟线编解码器的结构

举一个具体例子：当系统采用开关键控时，在“0”的期间不发光，在信息为“1”的期间发出一个足够短的光脉冲。假设一个光正交码  $C$  的码长  $N$  为 25，码重  $W$  为 3， $a$  为  $C$  中的一个码字， $a$  的码字区组表示成  $\{1, 3, 11\}$ ，当用户信息的“1”出现时，编码器将输入的单位短光脉冲一分为三，分别延时 1, 3 和 11 个单位时间，与所设计的光正交码相对应，从而得到用户的标志序列。在接收端，解码器结构与编码器完全一样，其功能是把输入信号与解码器包含的标志序列作相关运算，进行相关识别，直接探测，通过阈值判断，从而在混有众多用户信号的接收信号中识别并检出某用户的数据，从而实现了光正交码的产生和解码。

### 3.2 扩时编解码

扩时 OCDMA 编解码是一种扩展时间的编解码方式<sup>[7,8]</sup>。与扩频 OCDMA 中的扩展频谱与时间编码两种说法一致类似，扩时 OCDMA 也即频谱编码的 OCDMA。其基本原理是用地址码对一个信号的频谱进行编码，这样在时域上即表现为该信号

的时域扩展，而在接收端再用相应的匹配滤波器进行相关解码后，用阈值检测器区别匹配与不匹配的解码信号，从而识别出待解码信号，实现正确解码。

扩时 OCDMA 系统框图如图 3-6 所示。这种方式利用了超短技术、傅立叶频谱变换及光栅等技术。对应于系统框图中编码器前后即 a、b 点的信号在频域、时域的波形图分别如图 3-7、图 3-8 所示，其中  $N_0 = W / \Omega$  利用傅立叶频谱变换是扩时 OCDMA 的一个显著特点。傅立叶频谱：即光时域信号经傅立叶变换后而得到的频域谱，例如可以用透镜的傅氏变换作用得到一个光信号的傅氏频谱。正是由于光学的傅立叶交换技术的引入才能够使时域的光信号变换到频域进行处理，因此才有了对输入光信号的频谱进行编码、解码的可能，即扩时 OCDMA 编解码方式。

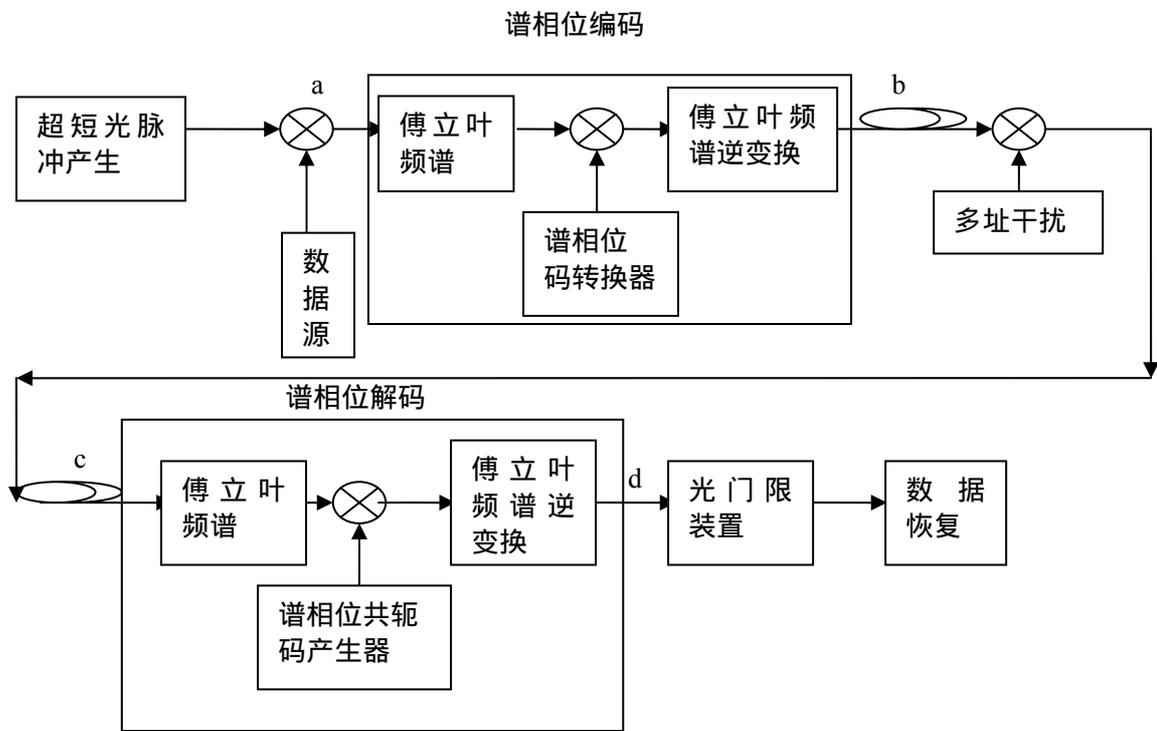


图 3-6 扩时 OCDMA 系统框图

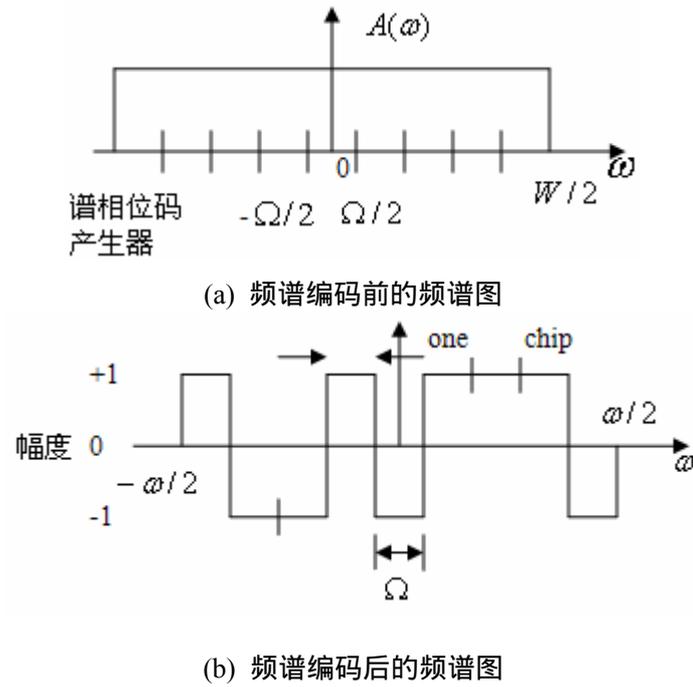


图 3-7 频域编码前后的频谱图

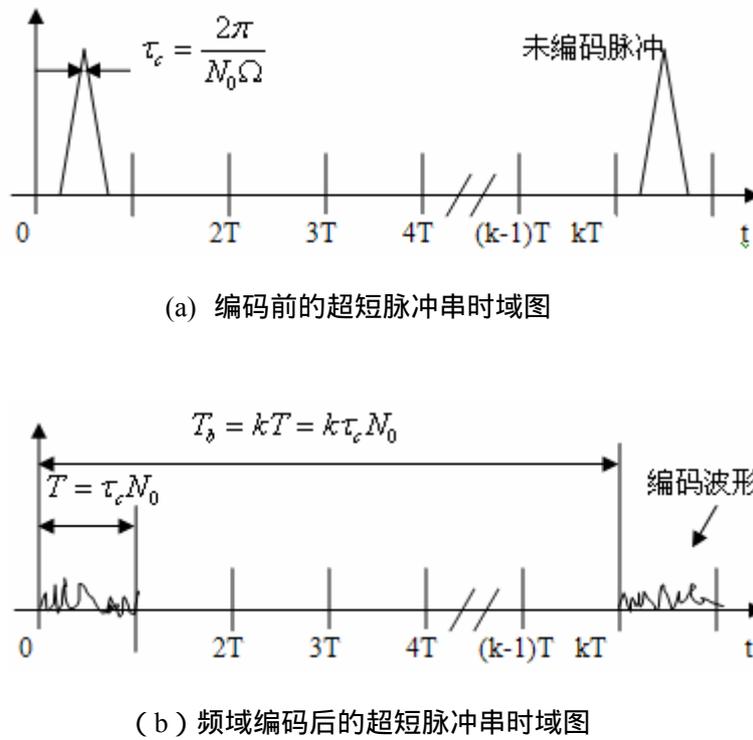


图 3-8 频域编码前后的脉冲频谱图

◆ 扩时编/解码的实现

在频域编码中，假设超短脉冲的基带谱为

$$A(f) = \begin{cases} \frac{\sqrt{P_0}}{W} & -\frac{W}{2} \leq f \leq \frac{W}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3-1)$$

其中  $P_0$  为超短脉冲峰值功率， $W$  为超短脉冲光谱带宽，在时域脉冲形状  $a(t)$  为  $\text{sinc}$  函数型，可表示为：

$$a(t) = F^{-1}[A(f)] = \sqrt{P_0} \text{sinc}(\pi Wt) \quad (3-2)$$

其中  $F^{-1}$  代表傅立叶逆变换， $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ ，若给每一个发射机分配一个码序列  $\{C_i\}$  作为地址码。频域编码脉冲可表示为：

$$C_k(t) = \text{sinc}(\pi\Omega t) \frac{\sqrt{P_0}}{N} \sum_{i=0}^{N-1} C_i^k \exp\{j2\pi m\Omega t\} \quad (3-3)$$

解码器自相关输出的电场表达式可表示为：

$$C_{kk}(t) = \text{sinc}(\pi\Omega t) \frac{\sqrt{P_0}}{N} \sum_{i=0}^{N-1} C_i^k C_i^k \exp\{j2\pi m\Omega t\} \quad (3-4)$$

解码器互相关输出的电场表达式可表示为：

$$C_{kv}(t) = \text{sinc}(\pi\Omega t) \frac{\sqrt{P_0}}{N} \sum_{i=0}^{N-1} C_i^k C_i^v \exp\{j2\pi m\Omega t\} \quad k \neq v \quad (3-5)$$

利用体光栅-掩模板的 OCDMA 频域编/解码是频域编/解码的典型方法<sup>[1]</sup>，如图 3-9 所示。其中光编码器由一对共焦面的凸透镜和一对放置在其焦平面上的衍射光栅以及其共焦面上的相位掩模板组成。光解码器具有与光编码器相类似的结构。

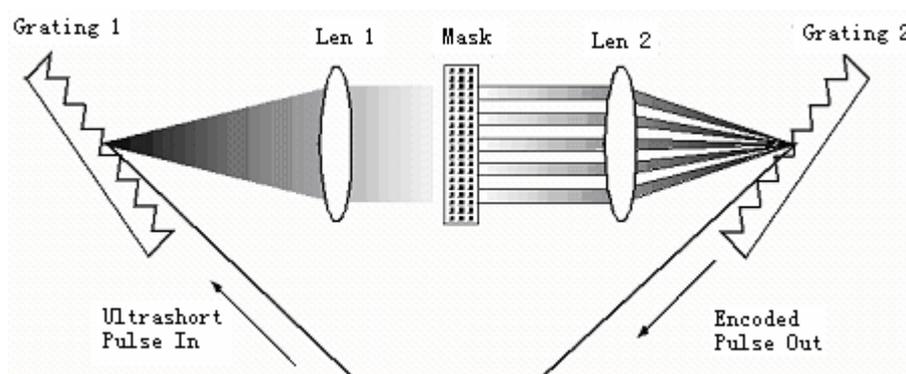


图 3-9 基于体光栅 - 掩模板的 OCDMA 频域编/解码器示意图

在发送端，从光源发射的超短光脉冲首先经数据调制后，变成一个代表一位信息的超短脉冲。然后这个超短脉冲被送到光编码器，第一个光栅把入射超短脉冲的光谱成分在空间分散开（即把频谱成分分开），然后经球面透镜傅立叶交换后入射到相位掩模板上。当光谱分量分隔到最大间隔时，也就是在共焦面上时，由相位掩模板在不同的频谱成分中引入伪随机相位序列（也即地址码）进行频谱编码。编码后的各光谱分量通过第二个凸透镜的傅立叶反变换作用，然后由第二个行射光栅合成一个光束后发送。在 OCDMA 网络中，每一个发送机都有自己的相位掩模板，经它编码的光脉冲发送给在同一条光路上的其他所有用户。

接收机由一个光解码器和一个门限判决器组成。如前所述，光解码器的相位掩模板与编码器的相位掩模板不同，它们是共轭匹配的，而解码器的其它部分都与编码器是一样的。根据匹配滤波器理论，如果解码器与编码器的相位掩模板是共轭匹配的，那么这个发送端的频谱相位码将被解除，原来的相关超短脉冲得到恢复，解码器输出端会出现一个高强度尖锐的自相关峰；如果接收端和发送端的相位掩模板不是共轭匹配的，那么发送端的频谱相位码就不能被解除，相反却会被重新编码，在解码器的输出端将出现一个低强度的伪噪声信号。这样，适当地对门限进行设置就可以正确识别解码信号及用户信息，拒绝不正确解码的低强度伪噪声信号。

### 3.3 扩空编解码

扩空 OCDMA<sup>[1,9]</sup>原理：简单地说，全息编码主要是通过光信号乘以一个二维

的地址码而得到。这个二维码字其码元素为  $(0, 1)$  或  $(-1, 1)$ ，具有良好的自互相关特性，典型的码字如  $m$  序列。从空间的概念上说，这个二维码序列又可表示为二维空间码图像，如图 3-10 所示的两个码字典典型的正交码图像。其中空白和阴影(对应于透明与不透明)分别称为像素，也即空间光调制器中的像素概念，其数量多少由码长决定。如果码元素为  $(0, 1)$ ，则“0”表示不透光的像素点，“1”表示透光的像素点，反之亦然：如果码元素为  $(-1, 1)$ ，则“-1”和“1”分别代表像素具备“0”或“ $\pi$ ”的相位偏移。可见，全息编码是典型的空间编码。从这个意义上讲，全息 OCDMA 又可叫做扩展空间 OCDMA。

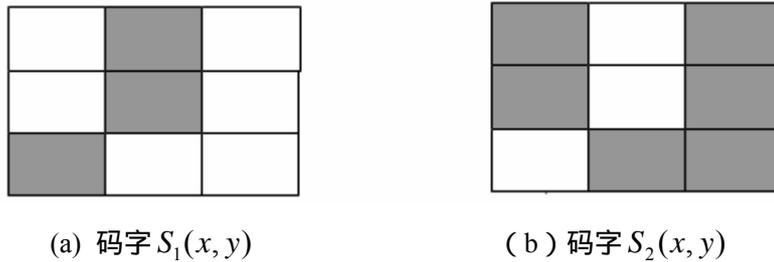


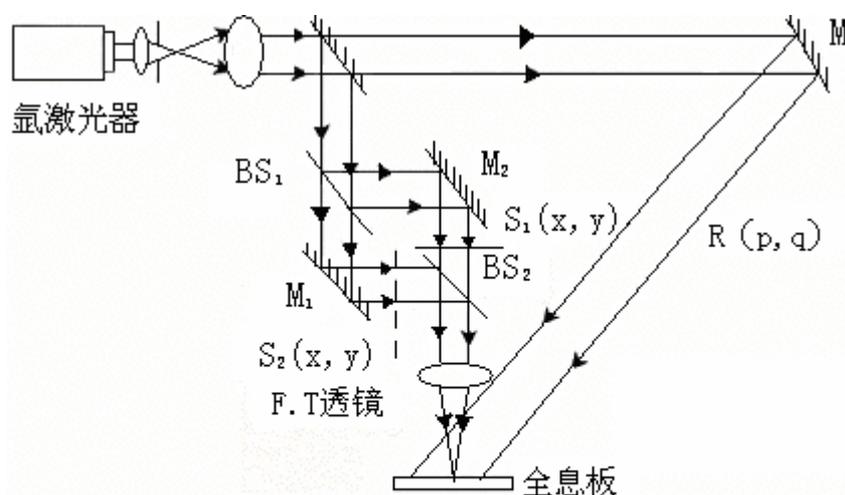
图 3-10 典型的二维码图像

解码原理：全息 CDMA 的解码是通过一个匹配滤波器来完成的。如图 3-11 所示， $BS_1$ 和 $BS_2$ 、 $M_1$ 和 $M_2$ 组成马赫策恩德干涉仪，它与 F.T 透镜一起决定二维正交码的复共轭傅立叶变换。全息板位于 F.T 透镜的焦平面上，参考光束  $R(p, q)$  与 F.T 透镜的输出在全息板上相干。令  $S_1(p, q)$  表示二维空间码  $S_1(x, y)$  经 F.T 变换后在 F.T 后焦平面上的输出。在全息板上可得到参考光束  $R(p, q)$  与信号光束的叠加。全息板上的功率强度可表示为：

$$\begin{aligned}
 H(p, q) &= |R(p, q) + S_1(p, q)|^2 \\
 &= |R(p, q)|^2 + |S_1(p, q)|^2 + R^*(p, q)S_1(p, q) + R(p, q)S_1^*(p, q)
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

其中  $p, q$  为空间频率。式(3-6)中的第四项为我们需要的匹配滤波函数  $S_1^*(p, q)$  与一个线性相位因子  $R(p, q)$  的乘积， $R(p, q) = |R(p, q)|e^{j\Phi(p, q)}$ ，在这里  $|R(p, q)|$  是一个常数， $\Phi(p, q)$  代表输入光和参考光之间的相位，它是线性的。由此可以看出，具有这样特性的滤波器就可以取出码字  $S_1(x, y)$ 。同样的方法可以构造  $S_2(x, y)$  的匹

配滤波器。



BS=Beam Splitter(分束镜)  
M = Mirror (反光镜)  
F.T=Fourier Transformer(傅氏变换)

图 3-11 全息解码原理

编解码原理：如图 3-12 所示，它是一个具有两个码字编码和一个码字接收的全息 CDMA 系统。波长为 514.5nm 的氦激光输出的光，经第一个分束镜分成两路。每一路光被不同的空间正交码  $S_1(x, y)$  和  $S_2(x, y)$  调制。记录码字  $S_1(x, y)$  的全息板放置在第一个 F.T 透镜的后焦平面上，完成对接收信号的匹配相关解码。第二个 F.T 透镜则完成解码信号的反傅立叶变换，并记录在 CCD 胶片上。当只有码字（用户） $S_1(x, y)$  时，全息板（全息匹配滤波器）的输出为相关信号  $S_1S_1^*$ ；当只有码字（用户） $S_2(x, y)$  时，信号被  $S_2(x, y)$  编码，经傅立叶透镜后，全息板的输出信号为  $S_2S_1^*$ ；当码字  $S_1(x, y)$  和码字  $S_2(x, y)$  同时存在时，即  $S_2(x, y)$  作干扰，则全息板的输出信号为  $S_1S_1^* + S_2S_1^*$ 。通过适当地设置门限装置，从  $S_1S_1^*$ 、 $S_2S_1^*$ 、 $S_1S_1^* + S_2S_1^*$  及中可识别出  $S_1(x, y)$ ，完成对有用信息的正确解码。

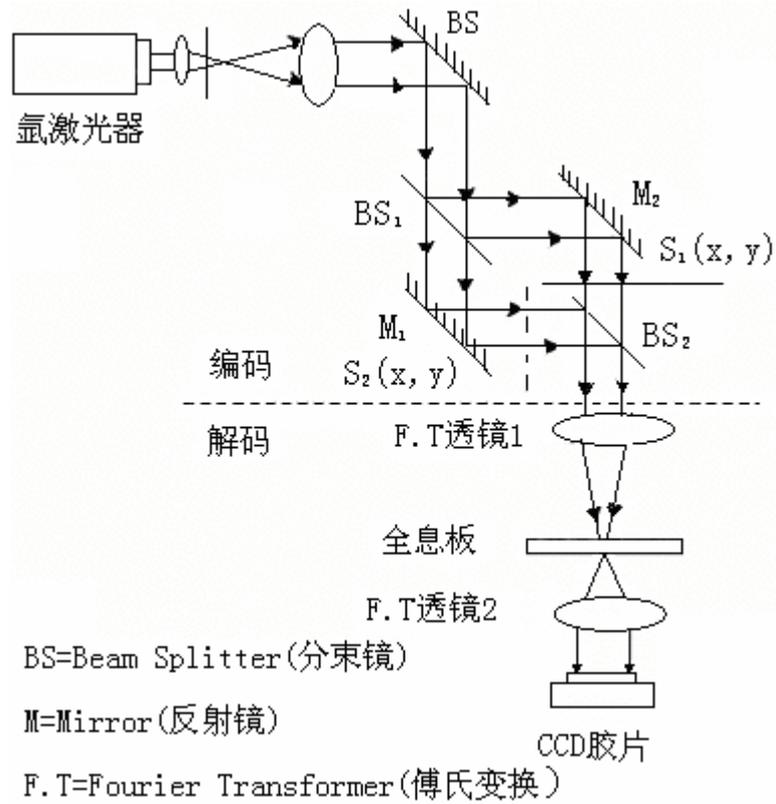


图 3-12 全息解码原理

## 第四章 设计方案

在 OCDMA 网络中，当一个用户在不同时间与不同用户进行通信时，要对发给不同用户的数据进行不同的光编码；当一个用户要接收来自不同用户的信息时，则要进行不同的光编码，以便监听信道上传来的不同用户的信息。因此，开发和设计有效的可调光编码/解码器是实现 OCDMA 通信的关键。

### 4.1 基于光纤延时线的可调光延迟处理器

光纤延时线是组成可调光延迟处理器的核心部件，它是通过改变光纤延时线的长度来实现对光脉冲不同延时时间的要求，例如实现  $0\tau, 1\tau, 2\tau, \dots, (n-1)\tau$  的延时， $n$  为码长。再通过延时控制器的控制，完成对不同码字的编码。

$2 \times 2$  光开关具有两个工作状态，当控制信号  $a^j = 0$  时  $2 \times 2$  光开被置于交叉状态；当  $a^j = 1$  时， $2 \times 2$  光开关被置于直通状态。对于实现光脉冲最大延时时间为  $2^{m-1} \tau$  的延时，共需要  $m$  级光开关。图 4-1 是可调光脉冲延时处理器的结构框图。当  $m = 5$  时的延迟控制器的控制逻辑如表 4-1 所示。

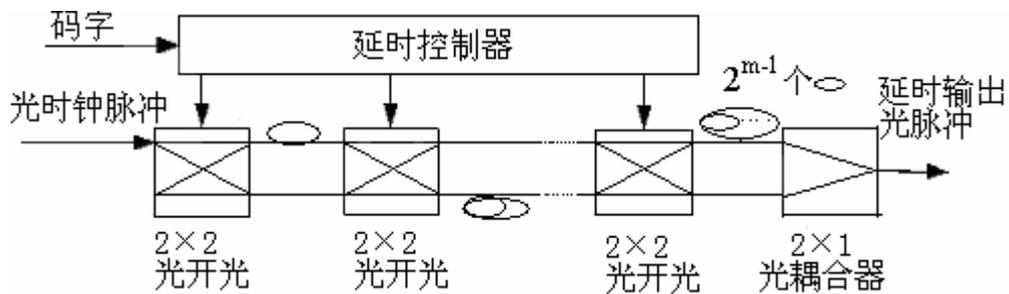


图 4-1 可调光延时处理器结构框图

表 4-1 可调光延时处理器的延时控制逻辑表(m=5)

延时( 倍)	a1	a2	a3	a4	a5	延时( 倍)	a1	a2	a3	a4	a5
0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	17	1	1	0	0	1
2	0	1	1	0	0	18	0	1	1	0	1
3	1	0	1	0	0	19	1	0	1	0	1
4	0	0	1	1	0	20	0	0	1	1	1
5	1	1	1	1	0	21	1	1	1	1	1
6	0	1	0	1	0	22	0	1	1	0	1
7	1	0	0	1	0	23	1	0	0	1	1
8	0	0	0	1	1	24	0	0	0	1	0
9	1	1	0	1	1	25	1	1	0	1	0
10	0	1	1	1	1	26	0	1	1	1	0
11	1	0	1	1	1	27	1	0	1	1	0
12	0	1	1	1	1	28	0	0	1	0	0
13	1	0	1	1	1	29	1	1	1	0	0
14	0	1	0	0	1	30	0	1	0	0	0
15	1	0	0	0	1	31	1	0	0	0	0

## 4.2 可调光编码器设计

对于一组码长为  $n$ ，码重为  $\omega$  (即一个码字中所包含“1”的个数)的光正交码，其可调光正交码编码器可由  $1 \times \omega$  光分路器，延时控制器， $\omega \times 1$  光合路器构成，其中分路器可将输入宽度为  $\tau$  ( $\tau$  为码片宽度)，周期  $n \tau$  的光时钟脉冲分路  $\omega$  路；如图 4-2 所示。

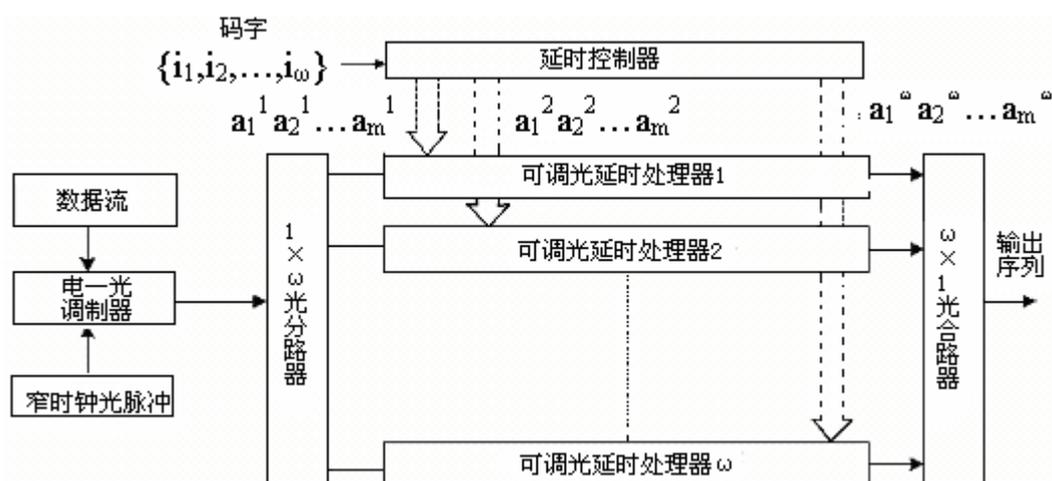


图 4-2 可调光编码器结构示意图

电-光调制器完成如下功能：当网络单元传输的数据为“1”时，窄时钟脉冲被送进编码器，输出一个有  $\{i_1 \cdots i_w\}$  决定的光脉冲序列  $C_i$ ；当数据为“0”时，无窄光脉冲送入编码器，编码器输出全为0。

### 4.3 改进的可调光编码器

前面所讲的可调光编码器采用多级  $2 \times 2$  光开关和延时不等的可调光延迟处理器的串联或者是串 - 并联结构，所需要的  $2 \times 2$  光开关和可调光延迟处理器的数量很大，因此构成的光编码器的成本高，体积大，功耗大。本节介绍的光编码器是对上述光编码器的进一步的改进，以达到成本和功耗低，便于集成的目的。

假定仍然实现一个长度为  $n$ ，码重为  $\omega$  的光正交码，则其可调光正交码编码器由  $1 \times \omega$  光分路器， $\omega \times 1$  光合路器， $\omega$  个  $2 \times 2$  光开关和延时为  $\tau$  的光纤延时线以及延迟控制器构成，如图 4-3 所示。

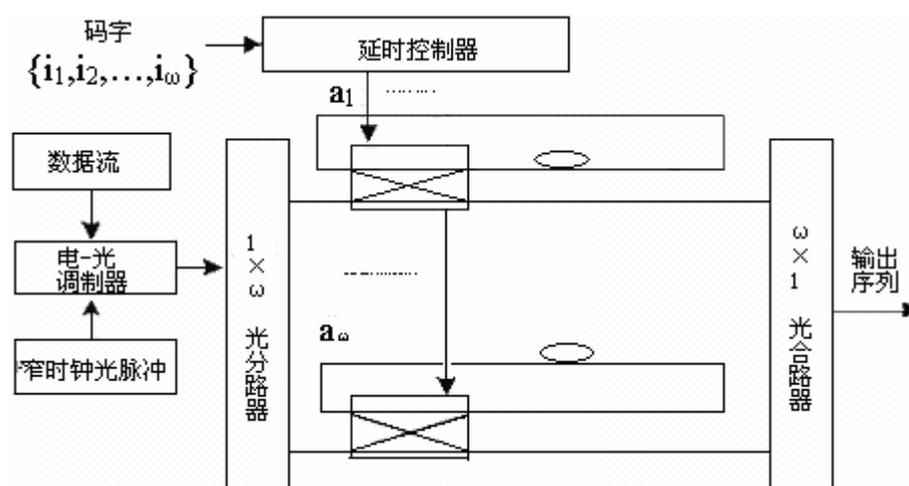


图 4-3 改进的可调光编码器结构示意图

当控制器的信号  $a^j = 0$  时， $2 \times 2$  光开关被至于交叉状态；当  $a^j = 1$  时， $2 \times 2$  光开关被置于直通状态。通过延迟控制器的延迟控制信号  $a^j$  ( $j = 1, 2, \dots, \omega$ )，对  $\omega$  个  $2 \times 2$  光开关状态的控制，实现不同码字间的编码要求。例如要实现  $5\tau$  的延迟，先让  $a^j = 0$ ，使  $2 \times 2$  光开关被置于交叉状态，让光脉冲进入光纤延时线，然后让  $a^j = 1$ ，使  $2 \times 2$  光开关置于直通状态，光脉冲在光纤延时线中延迟了  $5\tau$  后再让控制信号  $a^j = 0$ ，让光脉冲才从光纤延时线中出来，即实现了  $5\tau$  的延迟。 $\omega \times 1$  光合路器

将  $\omega$  个光脉冲合路，形成了一个光正交码波形，即实现了光正交编码。

例如我们给出一组码长  $N=32$ ，码重为  $\omega=4$  的光正交码字  $C_A=\{1,10,13,28\}$ ， $C_B=\{1,5,12,31\}$ ，其延时控制器的输出控制电压波形  $a_1a_2a_3a_4$ ，如图 4-4。

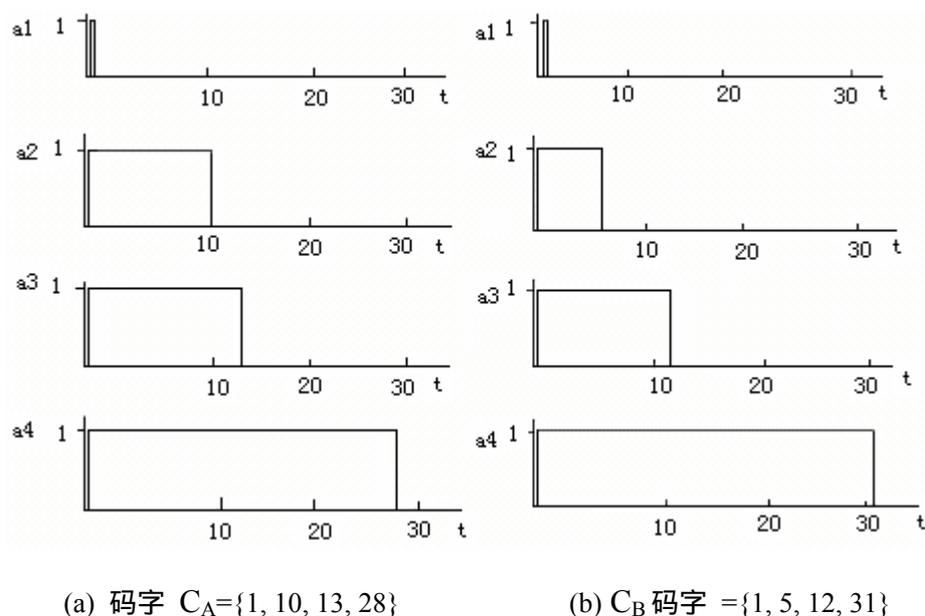


图 4-4 控制电压波形

这种依据延时控制器来实现不同的码字的编码和解码，可以大大减少  $2 \times 2$  光开关数以及光纤延时线的数目，减少硬件实现的复杂性，降低网络中大量使用的编码器件的成本。

#### 4.4 可调光解码器

可调光解码器的结构与编码器完全相同，只是为了保证输出脉冲序列  $C_i'$  是输入序列  $C_i$  的时间逆序列，延时控制器的输入应变成  $\{n-1-i_1, n-1-i_2, \dots, n-1-i_m\}$ ，这里  $n$  为码长，然后使解码器按要求进行相关运算。如果输入脉冲的序列与解码器所对应的  $C_i$  相匹配，输出为一个自相关函数；不匹配时，输出为两个码字的互相关函数。最后经光电传输和门限值判决，即可将数据恢复。

#### 4.5 延迟线的长度选取

光延迟线的长度由 OCDM 系统的传输速率、系统选用的地址码的码长及具体的地址码共同决定，下面以单模系统为例介绍延迟线的长度选取。单模系统的传输只考虑 HE<sub>11</sub> 模。

设光纤的折射率  $n_1 = 1.5$ ，真空中的光速为  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/sec}$ ，光纤芯直径为  $2a \mu\text{m}$ ，引用弱导条件下的折射率差  $\Delta = 0.003$ 。光纤中的传输群速度为：

$$V_g = \frac{-2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \left[ \frac{d\beta(\lambda)}{d\lambda} \right]^{-1} \quad (4-1)$$

假定系统的传输速率为  $R_b$ ，选用的地址码长为  $N$ ，则有：

码片宽度：

$$T_c = \frac{1}{nR_b} \quad (4-2)$$

光延迟线长度：

$$\text{len}_j = i_j \cdot T_c \cdot v_g \quad j = 1, 2, \dots, w \quad (4-3)$$

$n_1$  为光纤纤芯折射率， $i_j$  为第  $j$  个码片在地址码字中所对应的位置。当然，从工艺考虑，为使光纤长度易于处理，也可在所有延迟线长度的基础上同时加上一个固定的长度，这样并不影响编解码的效果。解码时光纤延迟线长度为：

$$\text{len}_j = (N - 1 - i_j) \cdot T_c \cdot v_g \quad (4-4)$$

#### 4.6 光延迟线编/解码器稳定性讨论

温度、应力、应变等的变化将使光纤延迟线产生相移，严重影响系统性能，因此有必要细致讨论这些变化对系统性能的影响。对一长度为  $L$  的光纤，当温度变化  $\Delta T$  ( )，其相移为：

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n L \Delta T}{\lambda} \left[ \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right] \quad (4-5)$$

其中  $n$  为纤芯折射率系数,  $\lambda$  为光波波长。当光纤受机械应力的作用, 光纤长度(应变效应)、直径(泊松效应)和纤芯的折射率系数(光压效应)均存在偏差(stress-opticaleffect), 这些均会产生相移。当光纤仅受切向应力的影响, 由切向应力  $P$  的影响所产生的相移为:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n L \Delta T}{\lambda} \left\{ \frac{\Delta\sigma}{E} + \frac{n^2}{2E} [P_{11}(1-\sigma) + (1-3\sigma)P_{12}] \right\} \quad (4-6)$$

当仅存在轴向应力时, 由轴向应力  $P_z$  产生的相移为:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n L \Delta T}{\lambda} \left\{ \frac{1}{E} + \frac{n^2}{2E} [P_{11}(1-\delta) + (1-3\delta)P_{12}] \right\} \quad (4-7)$$

其中,  $E$  为杨氏模量,  $\delta$  为泊松系数,  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  分别为压光系数。相移与时间延迟作用等效:

$$t_d = \frac{\lambda}{(2\pi c)} \cdot \Delta\Phi \quad (4-8)$$

其中光速为  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。由温度偏差、切向应力、轴向应力所产生的相移等效于时间延迟:

$$t_{dt} = 3.675 \times 10^{-2} L \Delta T \left( \frac{\text{ps}}{^\circ\text{C} \cdot \text{m}} \right) \quad (4-9)$$

$$t_{dp1} = 1.602 \times 10^{-8} P L \left( \frac{\text{ps}}{\text{mPa}} \right) \quad (4-10)$$

$$t_{dp2} = 2.022 \times 10^{-8} P_z L \left( \frac{\text{ps}}{\text{mPa}} \right) \quad (4-11)$$

通常情况下, 在自由状态下光纤的切向和轴向应力产生的相移与有温度变化引起的相移非常小, 以至可以忽略。因此通常仅考虑温度偏移对光纤延迟线编解/码器的影响。

## 4.7 延迟误差讨论

光延迟线编/解码器<sup>[9]</sup>通过不同长度的光纤延迟线产生特定的光正交码序列和互相关操作。因此，光延迟线能否产生预期的时延是其能否实现正确的编/解码的关键。由于诸如制造工艺、周围温度变化等因素的影响。光延迟线中总存在延迟误差。有必要讨论光延迟线中延迟误差对编/解码器性能的影响。我们假设 chip 脉冲是方波，讨论具有 NRZ 格式的脉冲序列。如果系统所选的 chip 脉冲为 NRZ 脉冲，当编解码器延迟线中存在较大的延迟误差时，在相应编码器的输出端存在幅度远大于 1，脉冲宽度远小于 chip 脉宽  $\tau$  的甚窄脉冲(假设自相关  $\lambda_a$  和互相关  $\lambda_c$  限制均为 1)，由延迟误差产生的甚窄脉冲很容易使系统产生误判。考虑其宽度远小于  $\tau$ ，也就是说，这种甚窄脉冲的频率远高于 chip 脉宽，就可以让从解码器输出端出来的信号通过光电检测后，在允许的频率范围内进行一个低通滤波处理，过滤掉由光延迟误差产生的具有高频的甚窄脉冲。当甚窄脉冲的脉宽远小于  $\tau$  时，这种方法非常有效。为了避免以上所讨论的甚窄脉冲的出现，必须给定一个适当的 chip 脉冲占空比以提高编/解码器对延迟误差的容限。例如：选用占空比为 80% 的 RZchip 脉冲，编/解码器对延迟误差的容限为  $\pm 0.1 \tau$ 。也就是说，当光纤延迟线的延迟误差为  $\pm 0.1 \tau$ ，解码器(或编码器)的输出端不存在甚窄脉冲。然而，使用太窄的脉冲作为信号脉冲意味着更高的光电接收噪声如 APD 噪声、暗电流噪声、热噪声等，这又是系统所不希望的，因此必须选择适当的占空比。

## 第五章 仿真结果

### 5.1 光正交码的构造

如果输入码长  $v = 32$ ，即扩频码选用光正交码  $(32, 3, 1)$ ，通过编程，可求得  $[1, 7, 11]$ 、 $[1, 12, 15]$ 、 $[1, 8, 10]$ （模 32）。在实验<sup>[16,17]</sup>的两个发送装置中采用的是其中的第一、第二个码字。为了验证编程结果，可以用计算机计算并绘制出这两个码字的自相关、互相关特性图。

### 5.2 自相关与互相关

在相关程序中输入  $a : [1\ 7\ 11]$ ， $b : [1\ 7\ 11]$ ，作光正交码  $[1\ 7\ 11]$  的自相关，如图 5-1 所示：

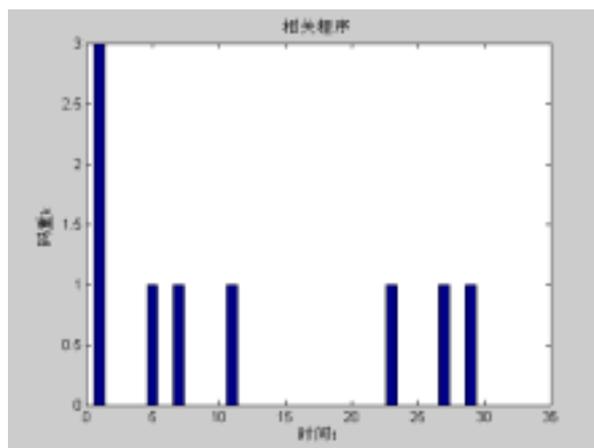


图 5-1 光正交码  $[1\ 7\ 11]$  的自相关图

在相关程序中输入  $a : [1\ 12\ 15]$ ， $b : [1\ 7\ 11]$ ，作光正交码  $[1\ 12\ 15]$  和  $[1\ 7\ 11]$  的互相关，如图 5-2 所示：

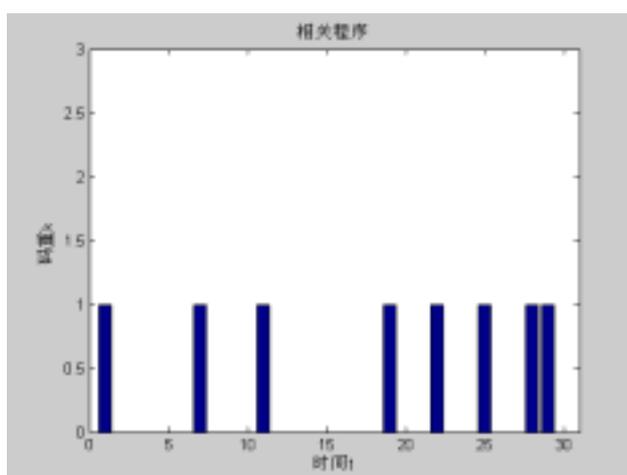


图 5-2 光正交码[1 7 11]和[1 12 15]的互相关图

### 5.3 编码器的实现

在编码器程序中输入光正交码[1 7 11]，输出序列如图 5-3 所示：

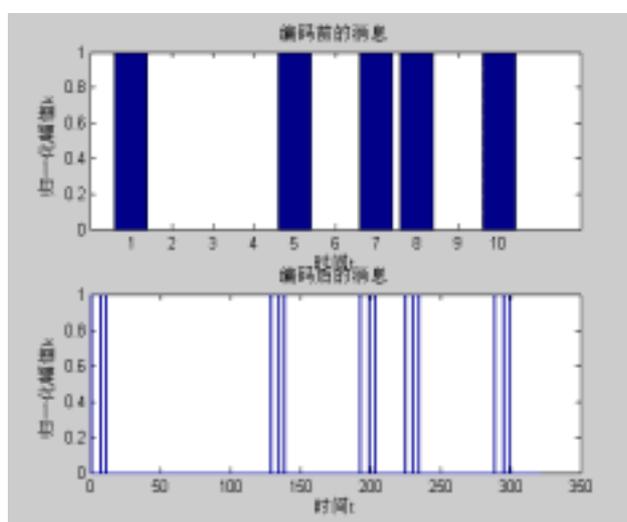


图 5-3 光正交码[1 7 11]通过编码器后的输出图

在编码器程序中输入光正交码[1 12 15]，输出序列如图 5-4 所示：

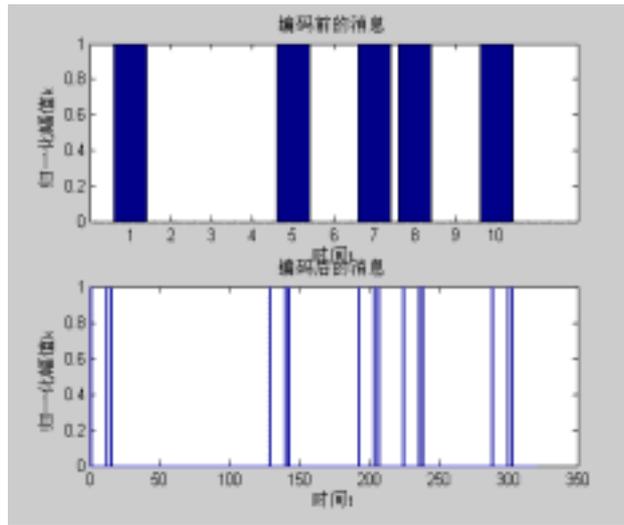


图 5-4 光正交码[1 12 15]通过编码器后的输出图

## 第六章 结 论

作者经过大量的文献检索，通过对光码分多址通信网的基础理论的深入研究，并结合自己的课题进行理论分析和仿真实验，现将论文的主要研究内容和结论归纳总结如下：

(1) 光码分多址技术具有抗干扰能力强、保密性好、实现多址连接灵活方便、可直接进行光编码和光解码，克服了通信设备“电子瓶颈”效应，充分发挥了光纤信道带宽的潜力。

(2) 光延迟线编/解码器是一种适合于 OOC 码的典型的时域光编码器。

(3) 码型设计是码分多址系统的关键技术之一，而光码分多址系统是单极性系统，它要求单极性码序列有良好的自相关和互相关性，光正交码与素数码相比较，光正交码具有更好的相关特性，虽然其构造算法略微复杂，但通过光延时处理器来构造的可调光编码/解码器，可以避免硬件实现的复杂性，故选择光正交码作为光码分多址系统的地址码为佳。

(4) 采用光纤延时线编解码器时，在输出端容易产生甚窄脉冲，严重影响系统性能。为了解决这一问题，本文提出利用采用在光电检测后进行低通滤波处理，或选用具有适当占空比的 RZ 脉冲作为信号脉冲，可避免或减少这种甚窄脉冲。

## 参 考 文 献

- [1] 原荣.光纤通信.北京:电子工业出版社,2002:1-10
- [2] 张宝富等.全光网络.北京:人民邮电出版社.2002:92-125
- [3] 赵梓森.全国第8次光纤通信暨第9届集成光学学术会议论文集.武汉:1996
- [4] 邵钟浩,马骏,张国强.光码分多址接入技术中单、多维编解码器的实现.光通信研究.2001.6:7-11
- [5] 周浩强,刘国驹,马君显.一种改进的可调光正交码编/解码器.半导体光电.2000.21(5):342-345
- [6] 沈成彬,范戈.光码分多址技术及其编解码器的研究.光通信技术.2002.4:299-303
- [7] 刘国驹,周浩强,蔡茂国,崔哲顺等.光纤延迟线编解码器的设计.光通信研究,2000.1:60-62
- [8] 殷洪玺,吴德明,徐安士,谢麟振,杨淑雯.适用于光码分多址通信系统的可调光编/解码器的一种新方案.高技术通讯.2000.1:40-42
- [9] 陈金华,戴贞麒,陈炳生.用于 OCDMA 的光延迟线编/解码器.光通信技术.2002.26(2):34-37
- [10] 董海峰,杨淑雯. OCDMA 通信系统编/解码器技术.光纤与光缆及其应用技术.2003.5:10-14
- [11] 张海滨,黄培中,宋文涛.实现光码分多址系统的关键技术.光通信技术.1999.23(4):257-260
- [12] 张宁,于荣金.基于 HOP 的可调光编码/解码器的研究.光子学报.2002.6(13):765-768
- [13] 殷洪玺,张光昭,杨淑雯.适用于光码分复用通信的可调光正交码编/解码器的研究.通信学报,1998.19(3):85-90
- [14] YinHongxi, YangShuwen, ZhangGuangzhao. Synchronous optical code and its all-optical tunable encoder/decoder for synchronous optical code-division multiple access communication system. Acta Photonica Sinica,1999.28(7):607~612
- [15] 扬义先,林须端.编码密码学.北京:人民邮电出版社.1992:235-249
- [16] 王光辉,张明辉等编.MATLAB6.1 最新应用详解.北京:中国水利电力出版社
- [17] 刘敏,魏玲.matlab 通信仿真与运用.北京:国防工业出版社

## 致 谢

在本次的毕业设计中，张宁老师作为我的指导老师，非常认真的对我的毕业设计进行指导。在毕业设计的过程中，会经常遇到一些阻力和困难，张宁老师总能及时给我提出宝贵的建议，使我真正学习到了知识，在专业方面的运用能力不断的加强，尤其是解决实际问题的能力得到了很大的提高，让设计能够按照预定的计划完成。张宁老师以其渊博的知识，对学业精益求精的态度，对学生孜孜不倦的教诲，深深让我折服。在此致以诚挚的感谢。在整个毕业设计的过程中，系里的老师给我们提供了机房，让我们能安心地做毕业设计，而且还耐心帮助有问题的同学解决困难。感谢这些无私奉献的老师们！

感谢帮助过我的各位同学们，没有大家的帮助，很难使我克服一个又一个的难题。因为我们是在一个大环境中学习的，我们团结合作，一起攻破遇到的难题。在此对同学们表示衷心的感谢！

感谢我的父母在我论文的完成过程中给予的生活上的关心和精神上的支持。父母的支持和期望，一直是我多年来前进的动力。

最后，祝所有帮助过我的老师以及同学，一生平安。

## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文（毕业设计说明书），是本人在导师指导下，独立进行研究（设计）工作的总结。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_日 期：\_\_\_\_\_