

第一章 绪论

第1节 宽带通信网的发展趋势——全光通信网

自20世纪90年代以来,全球的信息产业获得了前所未有的迅猛发展,以计算机、电子及微电子技术为基础,以网络通信、光纤通信、移动通信为代表的通信技术极大地改变和丰富了人们的生活。现代通信的发展趋势也正由数字化、智能化、小型化进一步向宽带化、综合化、网络化发展。随着社会经济的发展,人们对信息的需求急剧增加,信息量呈指数增长,仅Internet用户需要传送的信息比特速率每年就增加2~3倍^[9]。通信业务需求的迅速增长对包括传输、交换、接入在内的整个通信网络提出了越来越高的要求。

光纤具有信息传输容量大、中继距离长、不受电磁干扰、保密性好和使用轻便等诸多优点,从而使光纤通信成为支撑通信业务量增长最重要的技术。预计未来十年中,光纤传输系统的速率还会有很大的提高。在这种超高速传输的网络中,如果网络节点仍以电信号的处理速度进行交换,就会受到所谓“电子瓶颈”^[3]的限制,节点将变得庞大而复杂,超高速传输所带来的经济性将被昂贵的光/电和电/光转换费用所抵消。为了解决这一问题,人们提出了全光网(All Optical Network)的概念。

所谓的全光网,原理上讲就是网中直到端用户节点之间的信号通道仍然保持着光的形式,即端到端的完全的光路,中间没有电转换的介入。这样,全光网内光信号的流动就没有光电转换的障碍,信息传递过程中无需面对电子器件处理信息速率难以提高的困难。全光通信网能比传统的电信网提供更为巨大的通信容量,具备以往通信网和现行光通信系统所不具备的许多优点^[2]。

- (1)对传输码率、数据格式及调制方式均具有透明性,可以提供多种协议业务,可不受限制地提供端-端业务;
- (2)加入新的网络节点时,不影响原有网络结构和设备,降低了网络成本,具有良好的网络可扩展性;
- (3)可根据通信业务量的需求,动态地改变网络结构,充分利用网络资源,具有灵活的网络可重组性;
- (4)全光网络结构简单,端到端采用透明光通路连接,沿途没有变换与存储,网中许多光器件都是无源的,可靠性高、可维护性好。

全光通信网是通信网发展的目标。在理想的全光网中,信号的交换、选路、传输和恢复等所有功能都以光的形式进行。但从当前的情况来看,全光网并非是整个网络的全部光学化,而是指光信息流在传输和交换过程中以光的形式存在,用电的方式实现某些控制部分。从光电子元件的现状和发展趋势来看,力图在现阶段实现整个网络的全光化是不现实、也是不必要的。

全光通信网的实现将分两个阶段^[38]。

(1)全光传送网

在节点-节点光纤传输系统中,整条线路中间不需要作任何光/电和电/光的转换。这样的长距离传输完全靠光波沿光纤传播,称为发端与收端节点-节点全光传输。整个光纤通信网任一用户节点可以设法做到与任一其它用户节点实现全光传输,这样

就组成全光传送网。

(2)全光网

在完成上述节点间全程光传送网后，有不少的信号处理、储存、交换，以及多路复用／分接、进网／出网等功能都由电子技术转变成光子技术完成，整个通信网将由光实现传输以外的许多重要功能，完成端到端的光传输、交换和处理等，这就形成了全光网发展的第二阶段，将是更完整的全光网。

全光通信包括全光通信技术与全光网络技术^[1]，全光通信技术包括光的放大、光的复用／解复用、光的调制／解调、光交换、光滤波等，全光网络技术包括全光网络结构和光器件技术，如网络拓扑结构、网络协议、网络节点、光的上／下路、光互联、光路由、全光网络管理等。实现透明的、具有高度生存性的全光通信网是未来宽带通信网的发展趋势和目标^[1]。

第 2 节 光码分多址是实现全光网的重要技术之一

目前大多数宽带网的底层是单波长点到点光纤链路，有两种光纤传输技术可以大大增加传输链路的带宽：波分复用技术和短脉冲光时分复用(OTDM)技术^[6]。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；光时分复用系统将光纤带宽分成几个较宽的波带，以很高的速率(>100Gbit/s)传送信息，然后，将这些脉冲流进行光的分接处理，使之下降到较低速率以便交换和分配给用户。由于波分复用技术远比光时分复用技术成熟，所以，波分复用系统在现阶段的骨干通信网中获得了最为广泛的应用，同时也显示了巨大的发展前景。

现今,基于 WDM 和波长路由选择的全光网是学术界和产业界研究与发展的重点与热点。世界上许多发达国家投入大量的人力、物力和财力开发和建设光 WDM 实验网，我国的一些研究机构也开展了 WDM 光传送网的实验研究工作。与此同时，能够实现全光网的另一不容忽视的重要技术——光码分多址(Optical Code Division Multiple Access, OCDMA)技术，经过十几年的研究，也已取得了重大发展。OCDMA 对不同的用户分配不同的、具有良好相关特性的地址码，在发送端，根据地址码对信息进行扩频调制，在接收端，则用相同的地址码进行相关解调，从而实现多址通信；这样使信息从信源就变成了光信号，直到目的地才变成电信号，真正做到光子进、光子出。由于 WDM 光传送网对应每个波长需要一个性能要求很高的激光器，构成光分插复用器(OADM)和光交叉连接(OXC)等对网元器件的要求较高且造价昂贵，从而使 WDM 光传送网实现成本很高，并且 WDM 光传送网仅解决了传送网的电子瓶颈，并未解决信息从信源到信宿之间的所有瓶颈。而以 OCDMA 构筑全光网，可采用宽带光源、且无精确控制波长，对传输光纤无特殊要求，所需系统器件少，减少网络成本，可简化网络管理，增强网络的可靠性。光码分多址是实现全光网的重要技术之一，具有广阔的应用前景。

光码分多址(OCDMA)在骨干网中又称为光码分复用(OCDFM)，二者并无本质的区别，主要是应用场合的不同而已。在骨干网中称为光码分复用(OCDFM)，它主要面向较大的通信节点；而在接入网和局域网中称为光码分多址(OCDMA)，它直接面向用户或接入网节点。本文对二者不做严格区别。

光码分多址技术集传输与交换于一体，无需复杂的路由控制和网络管理，对各种不同类型的信息是透明的、开放的，无需全网同步，用户可实时地以异步方式接入、传输和交换，尤其它所具有的低时延、低抖动、高带宽等显著优点，非常适合

于实时话音和视频等多媒体信息的接入和交换。所以光码分多址技术在未来全光网，尤其是高速接入网和宽带局域网中，有着良好的应用前景，对该方面的诸多问题进行研究也具有重要而迫切的实际意义。

第 3 节 光码分多址技术的特点、历史与现状

1.3.1 光码分多址技术的特点

(1)通过直接光编码、光解码实现光信道复用和光信号交换，使数据的传输速率可达 $Tb/s^{[2]}$ 的量级；

(2)对于数百个用户以下的中、小规模网络，可采用异步 OCDMA 技术，此时用户之间是异步的，无需全网同步，可实现灵活地组网方式，用户可随时访问网络，无需预约等待和排队缓冲，业务时延非常小；对于用户容量非常大的网络，可采用同步 OCDMA 技术，虽然也需要网络同步和访问预约，但因是直接采用光信号处理，也可实现超高速数据传输；

(3)增加用户数使业务质量下降和网络阻塞^[3]的效应比 TDM 和 WDM 系统有所改善；同时保密性好、抗干扰能力强；

(4)对光源性能的稳定性、谱线宽度等要求比 WDM 大大降低，如用 LED 亦可，而且由于 OCDMA 系统中谱资源利用率高，还可与 WDM 结合进一步增加系统的容量。OCDMA 网络可采用价格便宜、技术上成熟的 G.652 光纤或 G.653 光纤

1.3.2 光码分多址技术的发展历史与研究现状

国外自 80 年代中期，就有人开始研究光码分多址技术，单在 IEEE 上发表的相关论文就有百余篇^[23]，内容大体分为相干 OCDMA 和非相干 OCDMA。从同步的角度，非相干 OCDMA 又可分为同步 OCDMA 和异步 OCDMA；从编码的角度，非相干 OCDMA 又可分为时间域编码 OCDMA、频域编码 OCDMA 和相位编码 OCDMA。研究较深入而且认为较接近实用（实现相对简单）的是时域编码的 OCDMA。特别是对于采用素数码和光正交码的 OCDMA，从光码的理论、光码的构造方法、码字容量、光编/解码方法，到实验系统、系统的性能分析等均做了较为深入的研究。但由于时域编码采用的是光的单极性码，码字之间的相关特性不太理想，使码字容量（反映用户数）和扩频长度（反映数据速率）之间存在相互制约的矛盾关系，致使时域编码的非相干 OCDMA 没能尽快实用化。

在美国召开的 OFC'99 上，有多篇关于非相干 OCDMA 采用频域编码和相位编码实验系统及相干 OCDMA 实验系统的研究报告。有代表性的有：日本邮电部通信研究实验室采用谱双极编/解码进行的非相干 OCDMA 的实验系统，单路速率达 $1.24 Gbit/s$ ，可传输 $40 Km$ ，采用的光编/解码器是将光抽头延迟线、相移器和光耦合器集成在一块芯片上实现的单片集成光编/解码器^[23]；日本的 NTT 公司采用阵列波导光栅编/解码器进行的相干 OCDMA 实验系统，单路速率达 $10 Gbit/s$ ，可传输 $40 Km$ ^[23]。

尤其令人振奋的是：1998 年在美国亚特兰大的 Supercom'98 Trade 上，美国的商业技术公司展示了一种采用光相位双极编码的非相干 OCDMA 系统样机。该系统能在单根光纤中传输 128 路 OC-12 SONET ($622 Mbit/s$)，总速率达 $120 Gbit/s$ ^[23]。会上宣布成立一个专门开发生产这种 OCDMA 系统的公司：CodeStream Technologies Corporation。美国商业技术公司提出的光双极相位编码技术已申请了专利，可编程

光相位编码器目前正在研究之中。

虽然 OCDMA 技术离大规模的商业应用还有一段距离，但大量的研究成果已预示着其良好的发展前景，光码分多址技术必将在未来的全光网中占据一席之地。

就国内的情况而言，目前对于 OCDMA 的研究还刚刚起步，但发展迅速，取得了丰硕的研究成果。

1.3.3 实现全光码分多址的关键技术

实现全光码分多址通信的关键是：

- (1) 容量大、相关特性优良的地址码的构造；
- (2) 光编／解码器、尤其是可调光编／解码器的设计与实现；
- (3) 全光码分多址中去除多址干扰的方法；
- (4) OCDMA 网的拓扑结构、通信协议及网络管理等问题的研究；
- (5) 如何与其它光通信技术进行融合的问题。

第 4 节 本论文的主要工作

本文的主要创新工作在于：

(1) 根据多媒体通信及 OCDMA 的特点，提出了适合于多媒体通信的 OCDMA 局域网的设计方案。该网设计简单、管理方便，高带宽、低时延、低抖动，能进行有效的冲突检测，可实现用户的实时异步接入和全双工操作，对数据格式不做要求，因而是透明的、高效的。

(2) 提出了两种 OCDMA 局域网的互连设计方案：基于星型耦合器的互连方案和基于 OXC 与 OADM 的互连方案。它们都可实现多媒体信息在不同网络用户之间的全光传输与交换。

(3) 分析了以光正交码作为地址码时的异步 OCDMA 系统的性能。研究表明，由于光正交码的非完全正交性，使用户间的多址干扰较为明显，造成用户数、数据速率和误码率之间相互制约的矛盾关系，不利于网络性能的综合提高。

(4) 分析了实时语音信号在 OCDMA 网传输、交换时的性能。针对 PCM 数字语音信号的特点，采用了奇偶校验、误码舍弃、前向补偿的差错控制方法。Matlab 仿真实验表明，通过该方法可在 OCDMA 误码率不变的情况下，明显改善语音通信质量。

(5) 提出了 IP over OCDMA 的网络设计方案。通过该方案，可简捷高效地实现 IP 分组在信源和信宿节点间的全光传输与交换，可满足语音、视频等多媒体通信高带宽、低时延、低抖动的要求。

(6) 完成了基于 DSP 芯片的实时语音接入 OCDMA 的系统设计。它既可与光纤延迟线编／解码器构成完整的实时语音 OCDMA 实验系统，又可利用 DSP 的可编程特性仿真 OCDMA 的多址干扰。

第二章 光码分多址的原理与实现

第 1 节 光码分多址的基本原理

OCDMA与无线通信中采用的电CDMA有一些共同之处，即它们都用具有良好相关特性的多个地址码，对多路信号进行扩频调制和解调，从而实现信道的多路复用与交换。但OCDMA中对信号的处理是在光域进行的，这决定了它与电CDMA在实现原理与方法上都有较大的区别。

在OCDMA系统中，每个用户都有一个地址码，各用户之间的地址码具有良好的相关性。在发送端，用户通过根据各自地址码构成的OCDMA编码器对信号进行扩频调制，经多路复用后通过一根光纤发送出去；在接收端，光信号进入多个OCDMA解码器，分别进行相应的相关判决及处理，最后恢复各自的原始信号。图2-1给出了OCDMA的一般性原理框图。

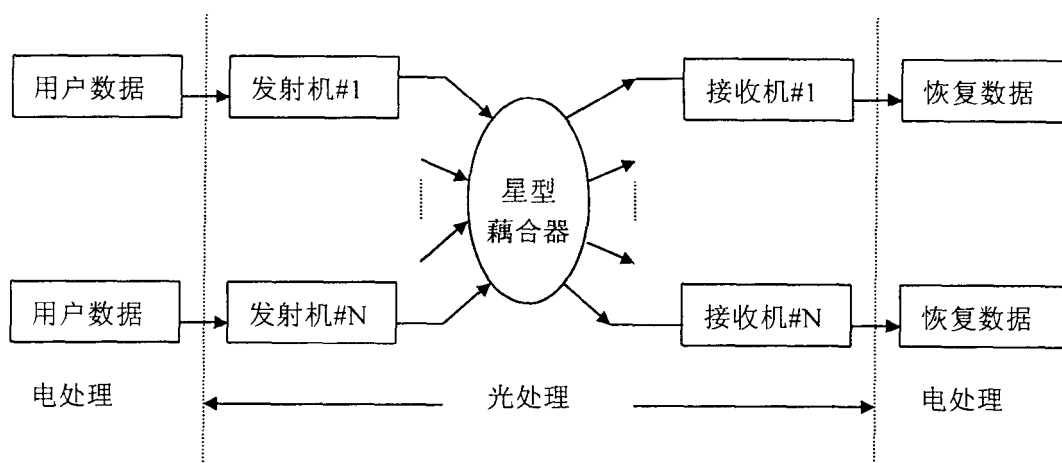


图 2.1 典型 OCDMA 系统

对于 OCDMA 系统而言，地址码的设计是至关重要的，它关系到信道的利用效率和系统性能，相关性能好的地址码可减少用户间的干扰，降低误码率；同时地址码的结构还影响到编码器和解码器的复杂程度，好的地址码应该是易于实现的。目前研究的光学码有光正交码以及它的变种、素数序列码及其变种、空间结构光学码、结合跳频的光学码等^[1]。

OCDMA 的编码机制总体上可分为相干编码和非相干编码，这体现了编解码过程中信号变换的本质，因而决定了系统所采用的地址码的类型，并最终决定系统的性能。

迄今为止，所有实用化的光纤系统都采用非相干的强度调制-直接检测（IM/DD）方式^[6]，该方式简单成熟，性能优良，占据了光纤通信的主导地位；而相干光通信技术，就象传统的无线电和微波通信一样，用调制光载波的频率或相位发送信息，

使用零差或外差技术检测发送来的信号，因为光载波在这种方式中扮演重要角色，所以它被称为相干通信技术，该技术在现阶段还显得不太成熟。所以，非相干 OCDMA 一度成为研究的重点，这就是所谓的正系统——只利用光信号的强度信息，用光信号的有和无来表示二进制的“1”和“0”。由于只由“1”、“0”构成的地址码无法实现彼此的完全正交，所以非相干系统的地址码之间是伪正交的；比如光正交码（OOC）和素数码，自相关有一峰值、互相关不为零。因为互相关值不为零，解码器在解码时，其它用户就会对其产生干扰，当突发用户集中时，就有较高的误码率，这就是多址干扰。在非相干处理系统中，消除或减小多址干扰是非常重要的一个问题。

非相干 OCDMA 通常是在时间域利用单极性的光正交码实现，而相干 OCDMA 通常利用双极码、在频域实现，下面将分别予以介绍。

第 2 节 光码分多址的时域编／解码

3.2.1 光正交码

光正交码^[1]是 OCDMA 中研究较多的一类地址码，从码字原理、码字构造、码字性能到实验系统的实现，都已有系统而深入的研究。

编码系统的选择可以看成是一个包含（0，1）序列的编码问题，并且已建立了严格的理论。在成对互相关过程中，重叠脉冲不超过一个的编码序列已经被推导出来，并且其结构也已相当清楚，这就是光正交码（OOC'S）。一个 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 光正交码 C 就是一组长度为 n ，码重（即码字中 1 的数目）为 ω 的 0、1 序列所组成的集合，并且每个码字 $(x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ 的循环还是一个码字，而它的循环自相关函数和任意一个相异码字 $(y_0, y_1, \dots, y_{n-1})$ 之间的循环互相关函数^[1]分别满足：

$$\sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot x_{i \oplus \tau} = \begin{cases} \omega & \tau = 0 \\ \leq \lambda_a & 1 \leq \tau \leq n-1 \end{cases}$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} x_i \cdot y_{i \oplus \tau} \leq \lambda_c \quad 0 \leq \tau \leq n-1$$

(2-1)

这里的“ $\oplus$ ”是模 n 加。在一个 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 光正交码 C 中，码字的个数（即 $|C|$ ）称为此码的容量。 $|C|_{\max} = \Phi(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ ，即容量的最大可能值。当 $\lambda_a = \lambda_c = \lambda$ 时，将 $(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 简记为 (n, ω, λ) ， $\Phi(n, \omega, \lambda_a, \lambda_c)$ 简记为 $\Phi(n, \omega, \lambda)$ 。如果 (n, ω, λ) 光正交码 C 的容量 $|C|$ 满足 $|C| = \Phi(n, \omega, \lambda)$ ，称为优化光正交码；如果

$$|C| = \frac{(n-1)(n-2)\dots(n-\lambda)}{\omega(\omega-1)\dots(\omega-\lambda)}, \quad (2-2)$$

称 C 为最佳光正交码 如果 $|C|$ 与 $\Phi(n, \omega, \lambda)$ 很接近, 就称 C 为准优化光正交码^[1]。

构造满足上述定义的光正交码, 目前国内^[1]和国外^[44]的文献中已提出了一些方法, 可参考这些方法进行构造, 然后将构造出的光正交码的码字分配给用户作为用户的地址码。光正交地址码的产生, 可采用一短光脉冲激励一组并行的具有各种不同长度的光纤, 经不同的延时后输出, 再用耦合器合成而得到。如图 2-2 所示。

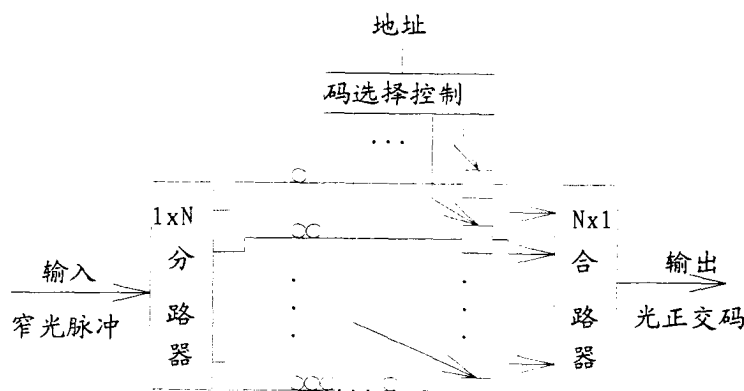


图 2-2 光正交码产生器

光正交码的构造已有多种实现方法, 如直接构造法、差分阵列构造法、递归构造法、代数构造法^[1]等。

在一个 $(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 光正交码 C 中, 码字的个数 (即 $|C|$) 称为此码的容量。容量的最大可能值用 $\Phi(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 来表示, 即 $|C|_{\max} = \Phi(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 。当各个码字的重量相等且 $\lambda_a = \lambda_c = \lambda$ 时, 将 $(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 光正交码称为等重对称 $(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ 光正交码, 简记为 (n, w, λ) , 最大可能容量简记为 $\Phi(n, w, \lambda)$ 。由等重码得到的 (n, w, λ) 光正交码 C 的容量 $|C|$ 的上界为^[44]。

$$\Phi(n, w, \lambda) \leq \left\lfloor \frac{1}{w} \left\lfloor \frac{(n-1)}{(w-1)} \left\lfloor \frac{(n-2)}{(w-2)} \left[\dots \left\lfloor \frac{(n-\lambda)}{(w-\lambda)} \right\rfloor \dots \right] \right\rfloor \right\rfloor \right\rfloor \right\rfloor \quad (2-3)$$

3.2.2 光纤延迟线编/解码器

在时间域中, 非相干OCDMA通常使用光正交码作为系统的扩频序列码, 其编解码可以方便地在光领域里实现。光延迟线编解码器是一种适合于OOCs码的光编解码器, 其结构如图 2-3 所示。超短光脉冲通过并行光纤延迟线产生相应的地址码序列, 并行光纤延迟线的时延被调节为脉冲之间的间隔, 以便合成所需要的地址码序列; 光解码器起匹配相关器的作用, 它将来自特定发送机的数据恢复, 其结构与光编码器类似, 所不同的是时延被调节到与所期望的序列相匹配。光的延迟一般使用集成

光波导和光纤两种方法^[3]，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。

光纤延迟线编码器是由并行的几束不同长度的光纤和两个 $1 \times w$ 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，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。当系统采用开关键控时，在“0”的期间不发光，在信息有“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22，码重 w 为3， a 为 C 中的一个码字， a 的码子区组表示成 $\{2, 4, 18\}$ ，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2，4和18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。假设 T_b 为一个比特的时间，则光脉冲的脉宽应小于或等于 T_b/n ，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拣出某用户的数据，从而实现了光正交码的产生和解码。

光正交码光纤延迟线编解码器可以看成是一个有限冲击响应数字滤波器(FIR DF)

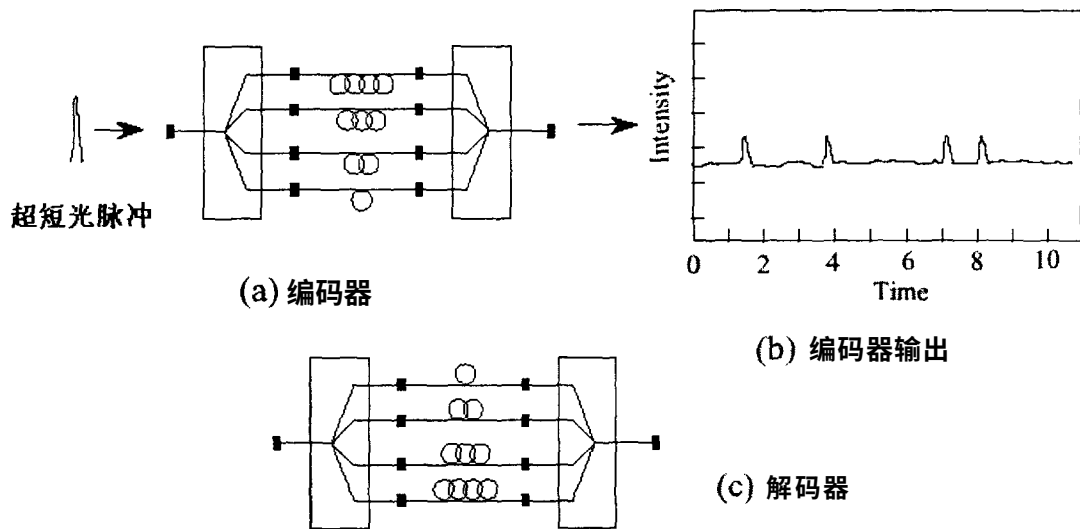


图 2-3 光延迟线编/解码器

^[3]，对于码字取组表示为 $(c_0, c_1, \dots, c_i, \dots, c_{w-1})$ 的光正交码，其光纤延迟线编/解码器的单位冲激响应为：

$$S(t) = \sum_{n=0}^{w-1} a_n \delta(t - c_n \tau) \quad (2-4)$$

τ 为光 CDMA 系统的码片(chip)时间宽度， $\delta(x)$ 是狄拉克函数， a_n 为光耦合器各支路的分光比，这里 $a_n = 1/w$ （无源无耗）， w 为光正交码的码重。对于编码器，

$(d_0, d_1, \dots, d_{w-1}) = (c_0, c_1, \dots, c_{w-1})$ 为光正交码的码字区组；对于解码器，

$(d_0, d_1, \dots, d_{w-1}) = (n-1-c_0, n-1-c_1, \dots, n-1-c_{w-1})$ 为光正交码的互补序列，这里， n 为光正交码的码长。

第 3 节 光码分多址的频域编/解码

光栅-掩膜板频域编/解码器是 OCDMA 频域编解码器中较有代表性的一种，它的结构如图 2-4 所示。其中，光栅 1 和第一个透镜使信号脉冲的频谱分布在编码板（掩膜板——空间滤波器）上，掩膜滤波放置在两透镜之间的焦平面上，通过它可以提取信号的一级谱，对其进行编码，即对信号的频谱进行位相调制，第二个透镜和光栅 2 把经过位相调制的频谱成分重新组合成输出脉冲信号。此信号相对于入射脉冲的频谱得到了展宽。光栅和透镜使光源发出的光（具有一定带宽）在谱面上展开，从而使投射到谱面上的光斑直径扩大，便于解码。此装置的对称性可以消除色散，光栅的零级谱是无色散的，高级谱的谱密度太小，可选择用一级谱。通过计算主极大的半角宽度及角色散，在最有效的光斑范围内选取滤波器的像素。

滤波器可采用 $(0, \pi)$ 位相编码，选择具有良好自相关与互相关特性的码字，如 M 序列等。解码时采用相同的装置，只是解码板的码字与编码板的互为复共轭，便可得到自相关脉冲，通过阈值元件可检测出信号。如果信号不相匹配，则得到的信号仍是一片噪声，判决后没有输出。

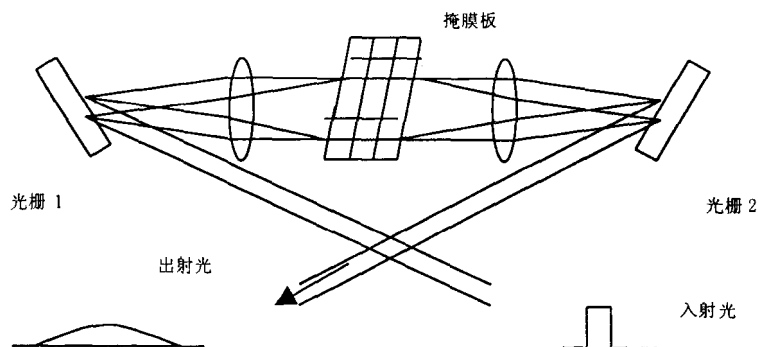


图 2-4 光谱编解码原理示意图

OCDMA 频域编/解码器还有其它几种形式^[2]，虽然在实现方法上有所不同，但它们的基本原理都是相似的：即通过光频谱携带扩频调制信息，从而达到多址通信的效果。由于光的频谱成份（如相位），有正负之分，所以 OCDMA 的地址码可采用具有 +1 和 -1 的双极码，这样在电扩频通信中较为成熟的 Gold 序列和 m 序列都可作为 OCDMA 的地址码。由于双极码可实现码字之间的完全正交，所以它的性能（如用户容量，多址干扰等）远优于非相干的单极性 OCDMA。另一方面，由于相干光通信对器件的精密性要求较高，实现复杂，在现阶段还没有突破性的进展，所以采用频域编/解码的相干 OCDMA 还显得不太成熟。但毫无疑问，基于双极性码的相干 OCDMA 所具有的优良性能是单极性 OCDMA 无法达到的，双极性 OCDMA 是光码分多址走向实用化的关键。

OCDMA 频域编/解码器的实现方法,除了上述的光栅掩膜板技术之外,还有以下几种技术可资利用^[2]: (1) 马赫-曾德尔干涉仪链; (2) 光纤光栅-环行器; (3) 阵列波导光栅。

第 4 节 本章小节

本章着重阐述了光码分多址技术的基本原理,全面介绍了光码分多址在时域和频域的编/解码原理及其实现方法。

光码分多址的本质仍是一种扩频通信技术,它处理的是光信号,这一特殊性决定了光码分多址与传统的电码分多址在原理、实现、构造及其性能等方面都有较大的差别。

时域 OCDMA 的编/解码可通过光纤延迟线编/解码器实现,其结构简单,成本较低。这是一种非相干的编/解码方法,由于其采用的是单极性的地址码(通常是光正交码),所以用户间的多址干扰较大,误码率较高,扩频效率较低,用户容量相对较少,离实用化尚有一段距离。

频域 OCDMA 的编/解码可通过光栅、掩膜板、马赫-曾德尔干涉仪等光学器件完成,其结构复杂,对器件的要求较高,可采用相干或非相干的方式实现,现阶段还显得不太成熟。由于在频域内,可采用具有优良相干特性的双极性码(如 Gold 码或 m 序列),它可实现地址码之间的完全正交,所以其性能相对于单极性的时域 OCDMA 有非常大的改善,是 OCDMA 技术走向实用化的方向和关键。

第三章 面向多媒体通信的 OCDMA 局域网设计

第 1 节 多媒体通信的特点

多媒体是交互式的信息传播媒体,例如声音、图像、文字、数据等,它通常是以数字信号的形式进行存储和传输。信息处理的综合性和集成性、信息控制的交互性和双向性以及信息显示的同步性和即时性是媒体的主要特点^[5]。多媒体系统最基本的特征是对各种独立媒体的综合处理能力,而完成综合处理的关键是各种媒体信息的数字化显示,以及各种不同媒体和不同数据之间的同步,这涉及到数字压缩技术和媒体同步技术。

在多媒体信息中,音频和视频是最重要和关键的信息媒体,实时性和连续性是二者最显著的特点,比特率、传输延迟、延迟变化、差错率是其最重要的 4 项性能指标。

传统的电信网主要是针对话音通信而设计的,模拟的话音信息经过抽样、量化和 PCM 编码后,变为 64Kbit/s 的数字信号进行复用、传输和交换。它以面向连接的电路交换为特征,每个用户可在通信前建立一条实际的物理链路,从而可以保证较好的服务质量(QoS)。随着网络技术的快速发展,基于 Internet 的 IP Phone 已获得广泛应用,它将模拟语音信号通过 ITU-T 的 G.729 建议——共轨代数码激励线性预测(CS-ACELP)算法^[7]压缩成 8Kb/s 的数字语音,再进行 IP 封装,打包后进行传输与交换。由于 IP 是非面向连接的,所以它无法保证服务质量,为了保证实时业务在 IP 网中很好运行,还需要使用实时传送协议(RTP 协议)和实时传送控制协议(RTCP),为了给实时业务或其他特定业务提供足够宽的通道,还要用到资源预留协议(RSVP)。所以 IP Phone 虽然可以更好地利用网络资源,但其网络管理及控制是相当复杂的,且服务质量也不是非常理想。话音信息虽然在通信网络中占用的带宽相对较少,但它对实时性的要求却非常高。由于话音流是实时的,如果经历了太多的时间延迟,则无法识别。话音网中的时间延迟,其产生的原因是多方面的,其中,传播延迟和处理延迟是两类不可避免的时间延迟,传播延迟是信息通过网络介质传送时产生的,处理延迟(有时也叫串行化延迟)则是处理话音信息的设备产生的。话音通信中可接收的时间延迟应该小于 350ms^[7]。虽然话音通信允许一定的时间延迟,但其对延迟变化(也即抖动)却非常敏感,当时间延迟的变化过大时,话音通信的质量非常恶劣,无法保证正常交流。另外,话音通信允许一定的差错率,也即当信号的误比特率在一定范围内时,不会造成通信效果的迅速恶化。

就视频信息而言,庞大的数据量是其区别于话音信息的主要特点,所以必须经过数据压缩才能传输,即便如此,其数据量也是非常可观的。如非常经典且广泛采用的 MPEG-2 视频压缩标准,其所需的最小数据速率也是 3Mbit/s,所以为能传输实时的视频信息,必需具有较高的带宽。同样,视频信息允许一定的差错率和时间延迟,这可通过一定的算法进行修正或补偿,但其对时延变化非常敏感,当时延变化较大时,帧与帧之间发生错乱,图像是无法识别的。

数据信息对传输速率、时间延迟和延迟抖动没有特殊要求,但对差错率的要求相对于话音和视频信息有很大的不同,它要求基本无差错的传输与交换。

现在还没有一个完整而统一的网络平台,能同时满足话音、视频和数据通信的要求。就信息的交换方式来说,话音主要是基于 PSTN 的电路交换,数据主要是基

于 TCP/IP 协议的 IP 包交换，而有线电视则采用相对独立的方式利用 HFC 对电视信号进行分配和传输。就接入方式来说，话音主要以铜线接入为主；有线电视主要采用同轴电缆以及 HFC 等方式；数据则主要采用铜线或专线的接入方式。并且三种信息媒体赖以传输的骨干网平台也不尽相同。网络间的相互融合与统一已是现今网络发展的大趋势，而同时从接入、交换和传输三方面实现网络的宽带化是现在及今后正待解决的问题。网络的全光化则是解决这个问题的主要技术手段。

从 OCDMA 所具有的特点来看，它在全光接入网和局域网中是具有较多优势的。它以全光的形式统一地完成信号的接入、传输与交换，具有非常高的带宽，它所具有的低时延、低抖动的固有特性非常适合于话音和视频等多媒体信息的通信。以 OCDMA 来构筑面向多媒体通信的高速局域网，具有良好的发展前景。

第 2 节 全光 OCDMA 局域网设计

现代通信网都是一个分布式、开放式的系统，也即它是由很多个不同层次的子网组成。根据网络的范围和大小，本章将全网分为四个层次：广域网、城域网、局域网和用户。本节讨论和研究的范围限于城域网和局域网。

3.2.1 网络的拓扑结构设计

由于多媒体通信具有突发性、实时性和交互性的特点，所以 OCDMA 局域网应是一个分布式、全双工操作的宽带网，对音频、视频以及数据等信息都应开放的、透明的，且能满足比特率、传输延迟、延迟变化和差错率等性能指标的要求。

在 OCDMA 局域网络内，某一个用户发出的信息，网络内的全体用户都在接收，只有与发送端地址码相匹配的接收机才能根据相关判决值准确接收到信息。但在 OCDMA 接收机端，如果用户 i 和用户 j ($i \neq j$) 接收到的峰值功率不等，那将会造成相关判决的误判，从而使误比特率增加。为提高接收端的有效性和准确性，应确保每个用户 OCDMA 接收机的输入峰值功率相等。因为星形拓扑结构能保证每个接收机的输入功率相等，所以在 OCDMA 接入网或局域网中，采用星型拓扑结构是 OCDMA 网的理想选择。

由于在多媒体通信中，用户之间的通信通常具有交互式的特点，所以网内任何两个用户之间的链接都应全双工的，即任何用户在发送信息的同时，也应能接收信息。图 3-1 给出了星型全双工 OCDMA 网的拓扑结构示意图。

为使网中的任何用户间都能通信，应采用可调 OCDMA 的网络结构。在一个 OCDMA 网络中，对于所有的用户必须采用一组完全不同的、具有良好相关特性的码字作为地址码，在每个接收机端，用一个匹配的光解码器来对信号进行解码。可有两种用户之间的地址约定，一种是光编码器可调，解码器固定，称为固定接收机约定，另一种是光编码器固定不变、解码器可调，称为固定发射机约定。对于固定接收机情况，分配给用户 i 一个固定的地址码 C_i ($i = 1, 2, \dots, N$)，如果数据 j 有一个数据分组要发送给用户 k ，在分组中的每一个数据比特在送至信道之前，由可调 OCDMA 编码器用码字 C_k 进行编码，然后用户 k 的接收机用一个唯一的光解码器恢复出由 C_k 所携带的所有数据比特，固定接收机的 OCDMA 方案对于交互式计算机

业务，如数据、文本和图象等的分组传送是非常有用的；固定发射机约定 OCDMA，它适合于广播式通信，对于这种情况，分配给第 i 个发射机码字 $C_i (i=1,2,\dots,N)$ ，在每个发射机采用一个固定的 OCDMA 编码器，用户 j 的接收机采用可调 OCDMA 解码器侦听用户 k ，将可调解码器调整至与 C_k 匹配，把用户 k 采用 C_k 编码的信息恢复出来。

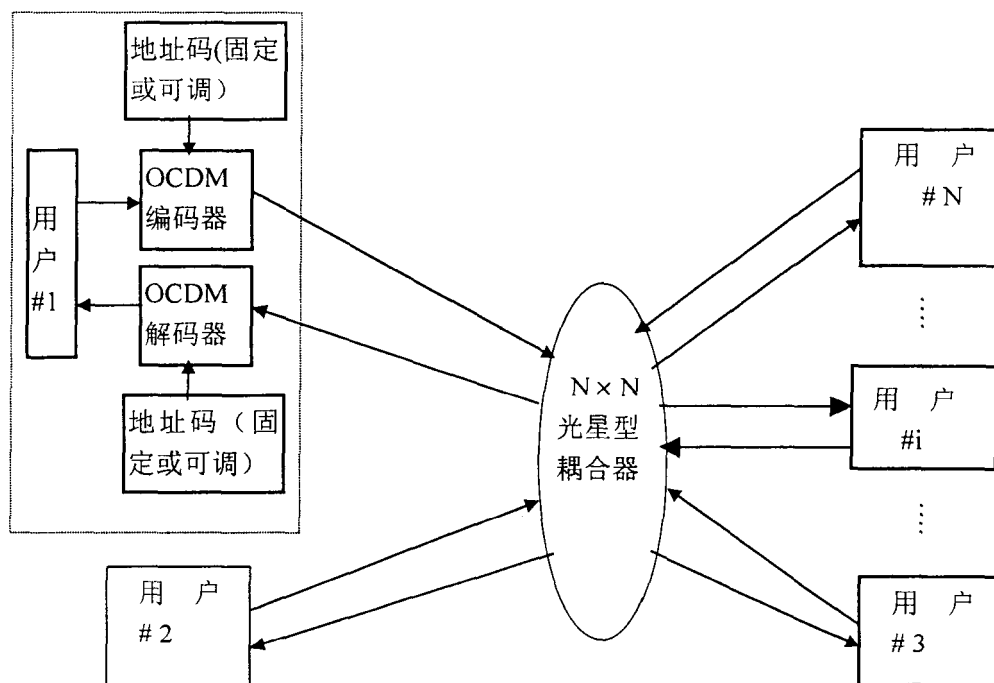


图 3-1 星型 OCDMA 局域网结构示意图

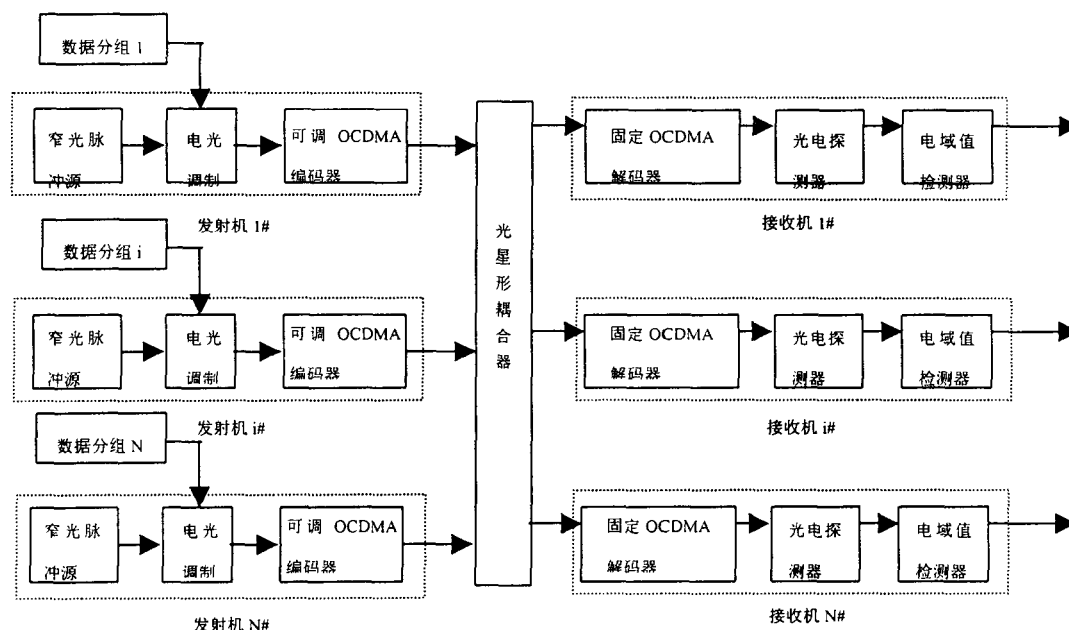


图 3-2 星形 OCDMA 局域网实现原理图

图 3-2 给出了以光正交码作为地址码，解码器固定、编码器可调的 OCDMA 网结构示意图。在开始传送分组前，将要传送到用户 j 的第 i 个用户的数据信号调制来自光源的速率为 $1/T$ 的超短光时钟脉冲串， T 是数据比特周期，如果用户 i 的数据比特是 1，它的电光开关将处于“开”状态，将一个光时钟脉冲送入发射机全光 CDMA 编码器，产生所需的地址码，反之，则没有光脉冲输入至 OCDMA 编码器，也就没有光脉冲发射出去。来自所有激活发射机的异步数据分组通过光无源星形耦合器同时分配到 N 个接收机，在每个接收机，用一个固定的光编码器，在存在多址干扰的情况下（由于其它用户同时传输编码信息），从中提取出所需的数据分组。如果存在阈值检测器，一旦解码器的输出超过阈值电平，则判为数据比特“1”，否则判为“0”。

采用不同的码字以及不同的编码方法，其最大同时用户数是不同的。对于采用光正交码 $(n, w, 1)$ ，其码长为 n ，码重为 w 的光纤延迟线编/解码器，其最大同时用户数 $N_{\max}^{[1]}$ 为：

$$N_{\max} = [(n-1)/w(w-1)] \quad (3-1)$$

即光正交码 $(n, w, 1)$ 最多有 $(n-1)/w(w-1)$ 个不同的码组。

对于一列长为 N 的 M 序列的同时用户数为 N ，而在光栅掩模扩时频域编解码中， N 受到光源带宽和空间分辨率的限制。最大用户数由下式给定^[2]。

$$N_{\max} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{\pi}{(\ln 2)^{1/2}} \frac{\omega}{d \cos(\theta_d)} \quad (3-2)$$

其中， Δ 是带宽（波长单位）， ω 是输入光束模场半径， d 是光栅周期， θ_d 是衍射角。

3.2.2 碰撞检测

对于高速宽带局域网，介质访问协议的选择是很关键的，对于超高速应用，应避免复杂的访问控制/处理和数据缓冲。就 OCDMA 网络来说，无须复杂的路由寻址，其传输和交换合二为一，所以在通信过程中的时间延迟和时延抖动都是较小的，可满足多媒体通信低时延、低抖动的要求。

但在上述的网络结构中，如果不加控制，则用户间的通信会出现碰撞。例如：当用户 #1 向用户 #2 发送信息时，会将信息按照用户 #2 的地址码进行扩频调制发送出去，用户 #2 则利用相应的地址码进行解调以恢复信息。但如果此时，用户 #3、用户 #4... 也同时向用户 #2 发送信息，则用户 #2 通过相关判决得到的恢复信息会出现混乱和错误判决，以致无法分辨恢复的信息到底是哪个用户发送的，因此在这种情况下通信也是无效的。

所以必须建立一个有效的碰撞检测机制，确保某一用户在同一时刻只接收网内唯一用户的发送信息，这样便能确保通信的有效性和准确性。为防止多个用户同时向一个用户发送信息，从而造成通信混乱，本文提出了以下的碰撞检测机制：假设用户 A 想向用户 B 发送信息，则在通信前，先向用户 B 发送一请求发送的信令，用户 B 在收到该请求信令后，根据自己当时的情况作出决定；若当时处于空闲状态，

也即没有其它用户向用户 B 发送消息，则用户 B 通过自己的发射机向用户 A 回送一允许发送信令；若忙，则不发送该消息。用户 A 在收到用户 B 的允许发送信令后，开始发送信息；在将全部信息发送完成后，用户 A 向用户 B 发送一发送完成的信令，这样可避免用户 B 因用户 A 的发送间隔而产生不必要的等待；当用户 B 接收到用户 A 发送完成的信令后，与用户 A 的通信宣告结束，用户 B 恢复到空闲状态，此时就可接收其它用户的发送请求了。

由于 OCDMA 网内各用户的通信是全双工的，所以上述机制是可行的，它无须复杂的控制，只需简单的用户间的请求和应答，就可避免通信的碰撞，因而是行之有效的。

3.2.3 多媒体信息的处理

多媒体信息包括话音、视频、文字以及图片等，实时的话音和视频信息经过抽样、量化和编码变为数字信息，之后经过 DSP（数字信号处理）系统进行相应的压缩和其它处理。就 OCDMA 来说，它对各种信息媒体是透明的、开放的，也即它所面临的只是数字信号的“1”或“0”，而不用关心传输的到底是话音、视频或文本信息。一个用户在同一时刻，需要传输的信息可能同时包括话音、视频和数据信息，所以在进入 OCDMA 发射机之前，将各种信息按照一定的数据格式以电的形式，通过 DSP 系统进行复接和处理是必要的。各种数字信号在进行数字复接及相关处理后，变为一路时分复用信号；为防止复用信号中出现过多的连 0 信息，造成接收端定时和判决的困难，对复用信号按照一定的算法进行扰码处理是必要的；复用信号在进行扰码处理后进入 OCDMA 可调光编码器进行扩频调制，然后进入 NxN 星型耦合器；拥有不同地址码的光调制信号通过 NxN 星型耦合器进行复用，它的每一输出信号都含有输入端的多路光调制信号。在接收端则进行相应的逆处理，便可恢复原来的音频、视频以及数据信息。图 3-3 给出了典型的多媒体信息接入 OCDMA 网的原理框图。

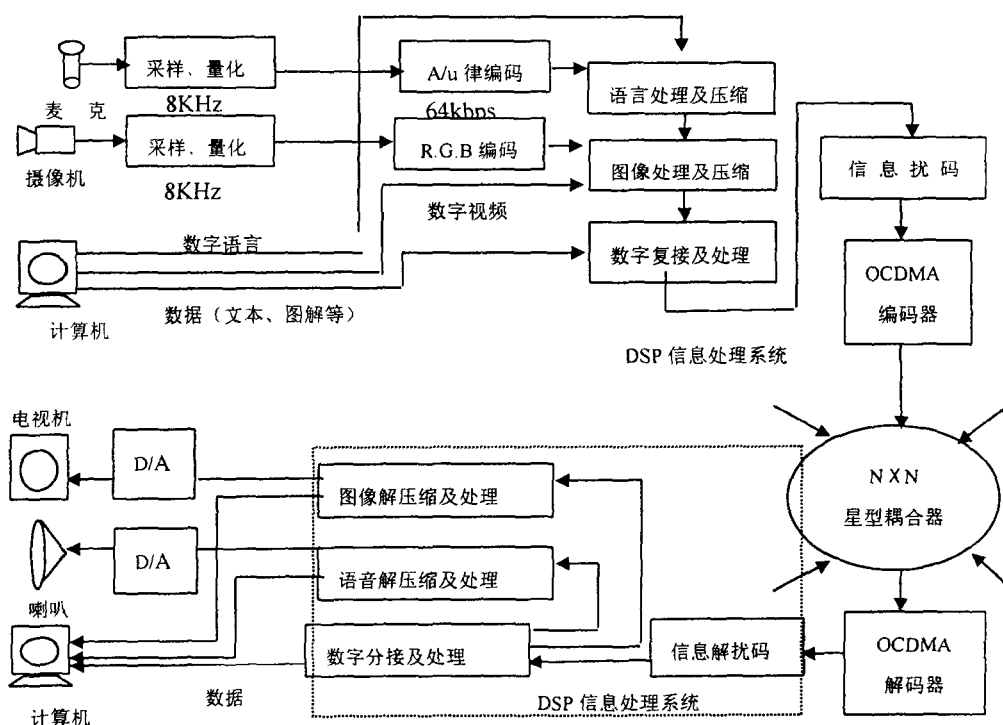


图 3-3

在图 3-3 中，如何对各种信息进行复接是一个较为重要的问题。时分复用是现代通信中广泛采用的方式，它实现简单，是一种较好的方法。在现代通信中，64K 是一个广泛采用的基准速率，它与传统的、经过 8KHz 抽样、8bit 量化的数字语音信号的速率是一致的，因此将各路信号以 64K 为基准进行复接是行之有效的。本文提出的具体建议如下：根据用户通信所需的最大速率确定单个用户的系统带宽；将总带宽的前 16K 作为公用信令信道，由它标识和确定各种信息媒体在时分复用帧格式中的位置，同时加入网络管理与控制信息；将剩余的带宽以 64K 为单位进行分割，每路信号可单独占用其中的一个或多个 64K 信道，这可根据各种信息传输所需的带宽决定。对于语音和数据信息来说，各占一路 64K 信道就够了，对于信息量庞大的视频信息则需占用多路。图 3-4 给出了时分复用帧格式的示意图，其中语音和数据分别占用第一路和第二路信道，而视频信息则占用了其余的信道。

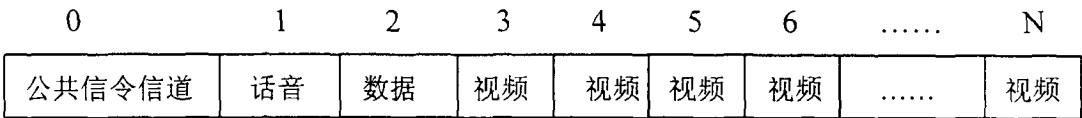


图 3-4 时分复用帧格式

在上述帧格式中，公共信令信道的速率为 16K，其余信道都是 64K。

3.2.4 接入方式

根据信息接入方式的不同，OCDMA 网络可分为异步 OCDMA 网络和同步 OCDMA 网络。

异步 OCDMA 网络，用户可随机接入网络，在对端用户允许的情况下，接入时延非常小。全网无需同步，网络的管理也相对容易。在异步方式下，接收端是通过对自相关峰值进行判决来恢复数据的，或者说在接收端所需的同步信息是由自相关函数峰值来获得的，因此异步 OCDMA 网络结构简单、灵活，设备成本低。但是，对用户光地址码的自相关和互相关特性要求苛刻。对异步 OCDMA 系统，同时被用在通信系统中的签名序列（码字）应具有好的自相关和互相关特性；它要求自相关函数具有高的自相关峰、低的旁瓣和低的互相关值，这种对光地址码的自相关和互相关特性的严格要求，限制了网络的容量即用户数，而且要求自相关峰值大于任意时刻网络中激活用户多址干扰的迭加，否则将会出现错误的相关判决，使误码率增加，因此异步 OCDMA 通信只适合于用户数不太多（同时用户数）而且网络的峰值速率不太大（误码率的要求）的中、小规模网络。当网络规模较大时可考虑采用同步 OCDMA 网络。

同步 OCDMA 网络，以要求网络同步为代价，使网络可容纳的用户数和能同时通信的用户数大大增加。在同步 OCDMA 网络中，所有的用户的网络接入被同步，接收机是依据同步信号在自相关峰出现的时刻进行判决，虽然在许多时刻码字之间的互相关值较大，但只要在判决时刻多址干扰的迭加不超过自相关峰值即不会造成判决错误，使接收机能正确的识别自相关峰，所以对于同步 OCDMA 网络，只要求用户的光地址码之间的互相关函数的值在自相关峰出现的时刻最小化即可，这样对互相关限制的放松，使码的容量大大增加，使网络具有较高的吞吐量。同步光地址码的构造有许多种，如采用射影几何的知识构造同步光码、采用欧氏几何的知识构造同步光码^[1]等。图 3-5 给出了同步 OCDMA 网的结构示意图。

所以，网络是采用同步或异步方式应根据具体的应用场合而确定。对于用户数

在几百个以下的中小规模网络，可采用异步方式接入；对于用户数较多的大规模网络，可采用同步方式接入。

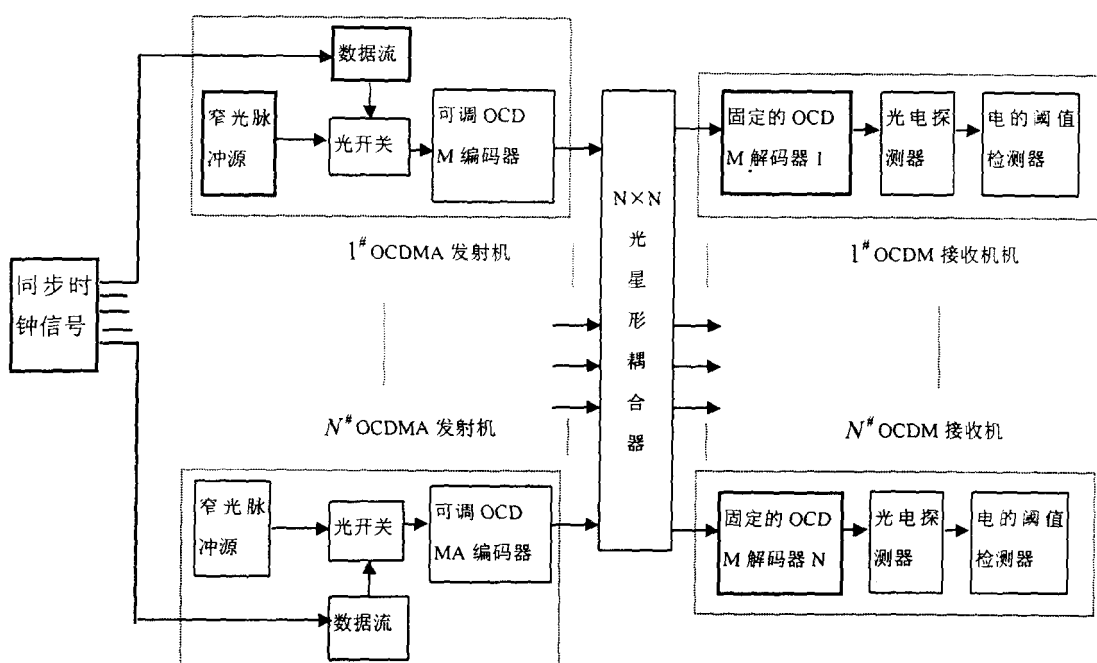


图 3-5 同步 OCDMA 网的结构示意图

3.2.5 接入速率

多址干扰是影响 OCDMA 网络性能的重要因素，当用户的接入速率不同时，多址干扰对各用户的影响是不同的。

假设在 OCDMA 网络中采用光正交码 (n, w, λ) 作为用户地址码，采用键控方式用地址码对数据进行扩频调制，即当数据为“1”时，发送地址码；当数据为“0”时，发送全“0”。对于光正交码 $(n, w, 1)$ ，其码长为 n ，码重为 w ，最大容量为 $\Phi(n, w, 1)$ [1] 为：

$$\Phi(n, w, 1) = [(n-1)/w(w-1)] \quad (3-3)$$

即光正交码 $(n, w, 1)$ 最多有 $[(n-1)/w(w-1)]$ 个不同的码组。

在理想情况下（即只考虑多址干扰），当各个用户的以相同的接入速率完成 OCDMA 扩频调制时，在各个用户的码组中，在同一位置同时出现“1”的概率为：

$$p = w^2/2n \quad [18] \quad (3-4)$$

在同一位置出现“0”的概率为 $q = 1 - p$ 。设有 N 个用户同时发送数据，对于一个地址码为 X 的用户 A ，在一般情况下，在 X 出现“1”的位置，其它 $N-1$ 个用户也有可能出现“1”；当 X 在 OCDMA 解码器端的相关判决值小于设定的阈值 T ($1 < T < W$) 时，输出应为“0”，但由于多址干扰的存在，其它 $N-1$ 个用户干扰的叠加可能使 X 的相关判决值大于阈值 T ，从而使解码器的输出为“1”，造成误码。此时的概率，也即在各个用户的接入速率相同且不考虑其它干扰因素的情况下，系统的误码率为 [18]：

$$P(I) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} C_{N-1}^i p^i q^{N-i-1}, \quad I=1, 2, \dots, N-1 \quad (3-5)$$