

# 论 OFDM-PON 与 WDM-PON

林如俭 宋英雄\* 张林

(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 论述正交频分复用无源光网(OFDM-PON)与波分复用无源光网(WDM-PON)的联系和区别,指出 WDM-PON 实际上是一种光接入网的物理层技术,它只有和别的媒质访问控制(MAC)技术结合起来才能完成数据通信系统和网络的功能。而 OFDM-PON 是工作于正交频分多址(OFDMA)MAC 技术的光接入网,它的光网络单元(ONU)虽然必须占据不同的光谱,但它不是 WDM-PON。从光差拍干扰(OBI)和 MAC 两方面阐明 OFDM-PON 的概念,以利于 OFDM-PON 技术的开发和相关标准的制订。

**关键词** 光通信; 无源光网; 时分多址无源光网; 波分复用无源光网; 正交频分多址无源光网; 光差拍干扰

**中图分类号** TN761 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.070601

## Discussion on OFDM-PON and WDM-PON

Lin Rujian Song Yingxiong Zhang Lin

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** Similarity and difference between orthogonal frequency division multiplexing passive optical network (OFDM-PON) and wavelength division multiplexing passive optical network (WDM-PON) are discussed, indicating that WDM-PON is actually a kind of physical layer technique which can perform the functions of data transmission system and network only by combining itself with some media access control (MAC) technique. In contrast, OFDM-PON is an optical access network working with the technique of orthogonal frequency division multiple accesses. Even its optical network units (ONUs) occupy different optical spectra, it is not a WDM-PON. Concept of OFDM-PON is clarified from two viewpoints: the optical beat interference (OBI) and MAC, to promote the development and standardization of OFDM-PON.

**Key words** optical communication; passive optical network; time division multiple access passive optical network; wavelength division multiplexing passive optical network; orthogonal frequency division multiplexing network; optical beat interference

**OCIS codes** 060.2330; 060.2360; 060.4250

## 1 引言

自从正交频分复用无源光网(OFDM-PON)的思路提出<sup>[1]</sup>后,引起了越来越多研究者的兴趣。近两年出现的一些论文中,隐含了错误的概念。因为 OFDM-PON 需要不同的光网络单元(ONU)占据互不重叠的光谱,即要求各个 ONU 发送的光波具有不同的波长,一些人就把波分复用无源光网(WDM-PON)与 OFDM-PON 混为一谈<sup>[2]</sup>。还有人认为,由于不同的 ONU 的发送光谱占据不同的信号边带,就可以使用同一个波长的上行光源<sup>[3]</sup>,这些都反映了人们对 OFDM-PON 还缺乏正确的认识。本文将澄清 OFDM-PON 与 WDM-PON 的概念,讨论它们的异同,特别要详细论述光差拍干扰(OBI)的问题和媒质访问控制(MAC)的问题。

## 2 WDM-PON 的优点和局限

在光纤接入网中,WDM-PON 是一个颇受人重视的新品种。图 1 所示是一个 WDM-PON 的原理框图,

收稿日期: 2011-03-07; 收到修改稿日期: 2011-03-14; 网络出版日期: 2011-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60877053)和上海市科技发展基金(08DZ150010F,10511500602)资助课题。

作者简介: 林如俭(1939—),男,教授,主要从事光纤通信系统和光接入网等方面的研究。E-mail: rujianlin@shu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: herosf@shu.edu.cn

它在一个物理上点到多点的无源光网(PON)结构中创建了光线路终端(OLT)与各个 ONU 间虚拟的(逻辑上的)点到点连接。

在 WDM-PON 的下行方向,一个置于远程节点(RN)中的无源阵列波导光栅(AWG)把波长通道从中心局(CO)中的 OLT 连接到用户侧的 ONU。利用 AWG 的循环特性从一个输入口来的多个光谱成分可以被引导到同一个输出口,这就允许波长通道的空间重用。OLT 的多波长光源发送不同波长的光波到不同的 ONU。在上行方向 OLT 利用一个 WDM 解复用器和一个光接收机阵列来接收上行光信号。每个 ONU 安装有一个光收发器,收发波长可以相同也可以不同,但是各个 ONU 的发送波长必须不同。不同的上行波长靠 AWG 汇聚。

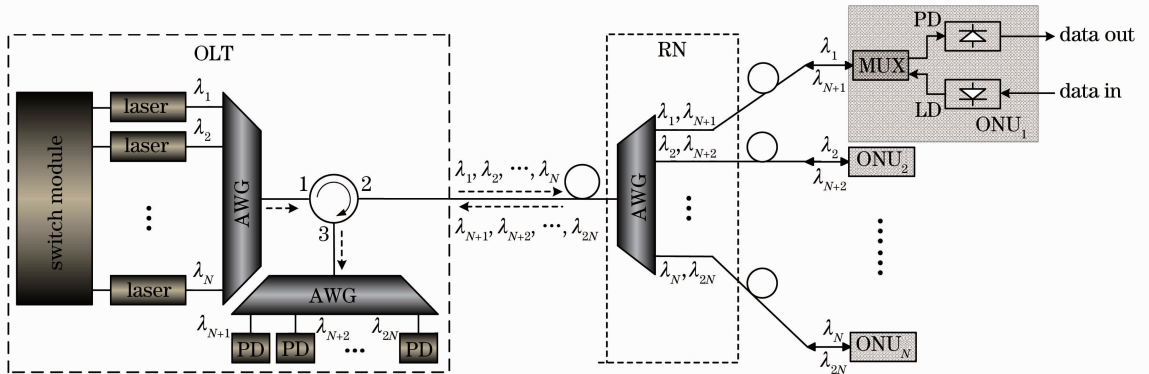


图 1 WDM-PON 的原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of WDM-PON

与时分复用无源光网(TDM-PON)比较,WDM-PON 具有以下优点:1) 更大的带宽。一个 ONU 带宽独享,即使每一波长上的码率不增加,网络的总带宽也是 TDM-PON 的若干倍。2) 协议透明性。波长通道对于数据格式和链路协议是透明的。一套 WDM-PON 能够承载任何通信协议,例如 WDM-EPON,WDM-GPON 都可以构造出来。3) 更多的业务。不同的波长通道可以运行在不同的速率,因而不同类型的业务可以为同一个网络所支持。不同的波长集合可以用来支持不同的独立的子 PON,它们可同时运行在同一个光纤构造之上;4) 更简单的运行。WDM-PON 中 OLT-ONU 的点对点逻辑连接使 ONU 和 OLT 的光收发器不需工作在 TDM-PON 中那样的突发模式,因此对激光器控制、光接收机设定和时钟数据恢复的要求都可以放松,故电路得以大大简化。5) 更强的安全性。WDM-PON 虚拟的点对点特性,使用户的信息安全在物理上得到保证。6) 灵活的可扩展性。由于 WDM 器件的插入损耗小于光分路器的插入损耗,一个 WDM-PON 能比一个 TDM-PON 支持更多的用户。依靠增添更多的 ITU-T 波长,越来越多的用户能够得到服务。7) 更好的网络维护。借助于波分复用光时域反射计(WDM-OTDR),WDM-PON 中光纤链路的故障能够容易被检查和发现。但在 TDM-PON 中,光分路器处的反射使光链路故障的定位无法用 OTDR 实现。

因为有上述一系列优点,不少人把 WDM-PON 看成是光纤接入网的最后归宿。但是,所有上述优点的实现取决于每个 ONU 有一个波长特定且彼此不同的光源,不但这种光源本身是昂贵的,而且运营商对在仓库中准备一系列特定波长的光源会感到无法忍受。因此开发和提供一种廉价的波长独立的光源就成了 WDM-PON 能够实用和推广的关键。

自从 Park 等<sup>[4]</sup>提出宽带光源频谱切割、注入锁定的 ONU 上行方案以来,鉴于这一类方案的光信噪比不高,速率难以运行到 Gb/s(例如文献[5]只做到 125 Mb/s 速率),许多努力已经放在了光波环回-重新调制的 ONU 上行方案,即取消 ONU 光源,而利用返回的 OLT 下行光波来携带上行数据。研究工作曾集中于对光波的调制方式,以防止返回的 OLT 光波上的下行数据对上行数据的干扰,例如采用 DPSK 下行/OOK 上行<sup>[6]</sup>、OOK 下行/DPSK 上行、IRZ 下行/OOK 上行,甚至 FSK 下行/OOK 上行<sup>[7]</sup>等等。图 2 所示是 OOK 下行/DPSK 上行的例子。

上述重调制方案都利用 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器来实现上行调制,但是遇到了 3 个问题:1) LiNbO<sub>3</sub> 调制器价格昂贵,甚至高于激光器,无法达到 ONU 价格低的目标;2) 有较大的插入损耗,限制了传输距离;3) 对输

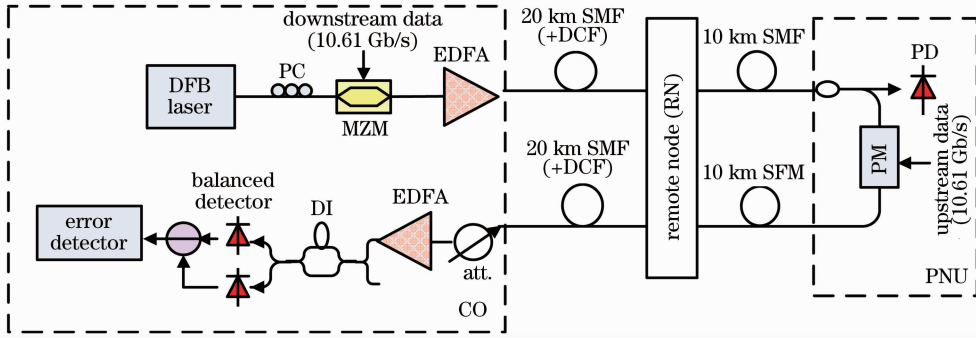


图 2 OOK 下行调制和 DPSK 上行重调制的 WDM-PON 光链路方案

Fig. 2 WDM-PON downlink by OOK modulation and uplink by DPSK re-modulation

入光波的偏振态敏感,需要采用偏振控制措施。这些都使便宜、稳定的 ONU 不能实现。有人提出采用电吸收调制器来代替  $\text{LiNbO}_3$  调制器,它对光波偏振态不敏感,但其更大的插入损耗对传输距离造成了更大的限制。人们最终认识到采用反射式半导体光放大器(RSOA)来充当 WDM-PON 中 ONU 的重调制器是最好的,因为它带宽较大,又对偏振不敏感,更可贵的是它具有 10~20 dB 的增益,对系统构造十分有利<sup>[8]</sup>。这就是近三年来关于 WDM-PON ONU 的研究几乎都集中在 RSOA 上的原因。但是 RSOA 的价格仍偏昂贵。

所有这些都是 WDM-PON 尚未成熟到能大规模应用的重要因素。比起 TDM-PON,如 EPON、GPON、10G-EPON、xG-PON 的成熟度和每线成本,WDM-PON 有很大的差距。

WDM-PON 不能大规模应用的另一个基本原因,是纯粹的 WDM-PON 实际上只是一种物理层技术,而数据通信网络的重要组成部分是数据链路层,用于连接控制和带宽调度,这种控制和调度对于光接入网更是必需的功能。在点到多点 PON 的上行方向,多址接入的 MAC 迄今主要采用的是时分多址(TDMA)方式,如果 WDM-PON 要发挥作用,就要与 EPON 或 GPON 结合,变成混合 WDM/TDM-PON,如 WDM-EPON、WDM-GPON 等,接入控制和带宽调度都在电域,而不在光域进行。能不能实行波分多址(WDMA)呢?国际上研究多年而尚不成熟的光交换技术,涉及可调谐激光器、可调谐光接收机、可重构光插分复用器(ROADM)、光开关、光交叉连接器(OXC)、波长选择开关(WSS)、波长变换器(WC)等先进光器件及其控制软件,若被用来实现 WDMA 机制,对于高速多波长光城域网的各个大容量光交换节点之间的业务汇聚、流量调度与疏导及链路保护切换是必要的。但在下一代光接入网中,每一波长将载送 10Gb/s 或更高速率的数据流,而该数据流往往是各种业务的数据流的聚合,故波长切换只能调度大容量的数据流,而不能实现个别业务流的单独调度和对个别终端用户的带宽分配。若要通过波长切换来实现小粒度的业务调度和带宽分配,只能让一个波长上的数据量大大减少,这会造成波长通道的大大浪费。因此,WDMA 不适于光接入网。不含 MAC 子层的纯粹的 WDM-PON 在光接入网中难有用武之地。

### 3 光 OFDM-PON 概念和优点

数据网络中多点到一点的接入控制机制,除 TDMA、WDMA、CDMA 方式外,尚有频分多址(FDMA)方式。但过去的频分多路,各频道只有一个载波,且彼此相隔较远,以防止邻频干扰。数字通信兴起后,各种原始基带信号(如电话、图像、电视等)都通过信源编码变成串行二进制数字流,再进行传输和交换。基带数字通信的速率不断提升,从 20 世纪 60 年代的 Mb/s 飞速发展到 80 年代的 Gb/s 和新世纪初的 Tb/s。在载波数字通信中,一个频道只用一个载波。串行时分体制的发展在进入 Gb/s 速率等级后,数字集成电路开始遇到工艺和功耗的限制,从超高速码流中分出和插入业务数据越来越难,相应地光接入网中的突发光包驱动和带宽调度也越来越难。于是人们逐步认识到多载波并行传输的必要性。

OFDM 属于多载波调制体制,已经发展 40 多年。主要的里程碑有:1966 年 OFDM 作为一种多载波数据传输的专利在美国出现;1969 年提出用离散傅里叶变换实现 OFDM;1980 年提出用循环前缀(CP)来对付符号间干扰。自此 OFDM 进入它的成熟期,1985 年被用于无线移动通信;1987 年被用于无线数字视频和音频广播;1990 年被用于电话铜线非对称数字用户环路(ADSL);1995 年被用于无线局域网(WLAN);2001

年被用于光无线系统(近红外,室内);2004年被用于电力线通信系统(HomePlug);2005年被用于同轴电缆家庭网络(MoCA)。最后,2005年被引入光纤通信领域<sup>[9]</sup>。

在 OFDM 系统中,数据在许多子频道内平行发送。把信道划分为许多频道,在每一频道内安排一个子载波或多个子载波(子频道)。子载波具有 sinc 函数状频谱,彼此在  $n/T_s$  点上无干扰( $1/T_s$  为数据符号速率),如图 3 所示。被传送的数据符号调制在子载波上。

为了获得最密集的(频谱效率最高的)频分复用,取子载波之间彼此正交,即取子载波频率为数据符号速率( $1/T_s$ )的整数倍。正交的时域表达式为

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \sin\left(2\pi \frac{k}{T_s} t\right) \sin\left(2\pi \frac{l}{T_s} t\right) dt = 0, \quad k \neq l \quad (1)$$

频率最低的 3 个子载波频率分别为  $f_1 = 1/T_s, f_2 = 2/T_s, f_3 = 3/T_s$ , 如图 4 所示。

每个子载波携带数据信息是通过数据对子载波的调制来实现的。调制方式有相位键控(MPSK)和正交振幅键控(M<sup>2</sup>QAM)。N 个已调的正交子载波之和即为 OFDM 信号,表达式为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{X}_k \exp\left(j2\pi \frac{k}{T_s} t\right), \quad (2)$$

式中  $\mathbf{X}_k$  是调制矢量(一般表示在星座图中),它的模代表第  $k$  个子载波的振幅,它的幅角代表该子载波的相位。这是基带 OFDM 信号。

当通过射频调制或光调制对基带 OFDM 信号进行频谱搬移后,就得到射频或光 OFDM 信号:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{X}_k \exp\left[j2\pi\left(f_c + \frac{k}{T_s}\right)t\right] \quad (3)$$

式中  $f_c$  为射频载波或光载波频率。很显然只要  $f_c$  等于数据符号速率( $1/T_s$ )的整数倍,则频谱搬移不造成 OFDM 信号正交性的破坏。形成光 OFDM 信号的过程可以是基带 OFDM 信号直接调制光波,也可以是先由基带 OFDM 信号调制中频载波,然后再由中频 OFDM 信号调制光波。光波的频率很高,要控制一个光源的中心频率等于数据符号速率( $1/T_s$ )的整数倍是非常困难的。现在光 OFDM 信号的解调是先把它下变频到基带,然后进行电 OFDM 信号的解调,这样,光源的中心频率是否等于数据符号速率( $1/T_s$ )的整数倍就不重要了。但是全光 OFDM 技术是一个重要的发展方向,在全光 OFDM 系统中,从光 OFDM 信号直接解调出基带数据(通过光学傅里叶变换),这时光波的中心频率就必须等于数据符号速率( $1/T_s$ )的整数倍,否则难免会频道干扰。

基于离散傅里叶变换的 OFDM 信号的发送和接收机制,用数字信号处理(DSP)芯片来实现,如图 5 所示。在发送端,串行数据先被变成并行数据,然后并行数据被映射成  $N$  个调制矢量,再进行  $N$  点快速傅里叶逆变换(IFFT)。变换后添加 CP,最后作并串变换和数模转换(DAC),产生连续的 OFDM 信号向信道发送。在接收端,先对接收信号作模数转换(ADC)和串并变换,产生时间样值序列,在去除 CP 后再作  $N$  点快速傅里叶变换(FFT)。对变换所得的矢量序列作适当的数字信号处理,包括信道均衡、前向纠错等,再进行解调,映射产生并行数据,最后用并串变换还原成串行数据。

OFDM 技术具有一系列优点:1) 频谱有效性。子载波簇集而相互不串扰,对每个子载波施行多电平高效调制,可以获得很高的 bit/Hz 值,使系统的通信容量很大,并可根据业务的不同和流量的需求灵活调节。由于并行子信道的速率并不高,因此可以用相对低速的集成电路实现非常高的系统速率。2) OFDM 系统由独立的子频道组成,容易均衡。3) OFDM 系统有强大的抗窄带干扰能力。在干扰发生的子频道可以降低调

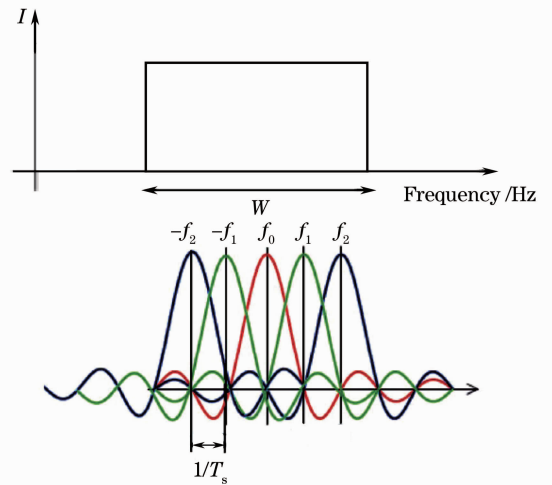


图 3 OFDM 系统的子频道

Fig. 3 Sub-channels of OFDM system

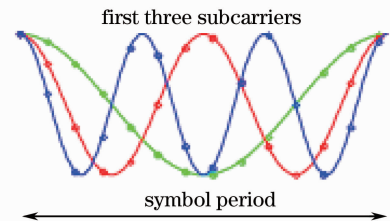


图 4 频率最低的三个子载波的波形

Fig. 4 Waveforms of lowest three sub-carriers

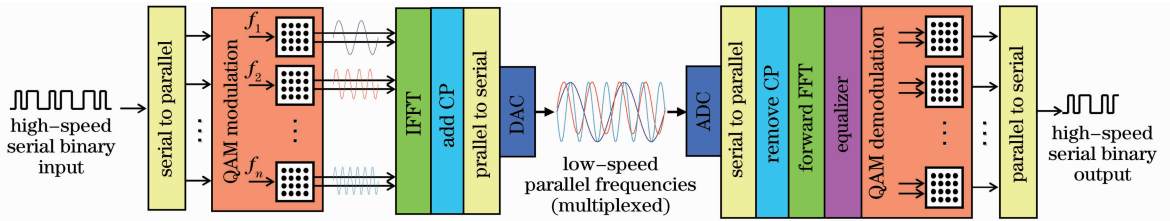


图5 离散傅里叶变换实现 OFDM 发送与接收

Fig. 5 OFDM transmission and reception implemented by discrete Fourier transformation

制星座图等级,而把较多的数据位安排到别的子频道传送,甚至可以关闭干扰严重的子频道。4) CP 消除符号间干扰,故 OFDM 系统有抗信道色散的能力。5) DSP 信号处理技术给信道估计、均衡、载波恢复、前向纠错和星座图解调提供了强大的功能。

最近 3 年 OFDM 技术已经应用于干线光纤通信系统,包括超长距离光纤通信干线和超大容量光纤通信干线<sup>[10]</sup>。光 OFDM 技术的另一种应用就是下一代光接入网,包括 OFDM-PON 和光纤与无线的融合 (OFDM-RoF)<sup>[11]</sup>。

现有的 TDM-PON(包括 EPON、GPON、10G-xPON 等)随着速率的进一步提高,上行突发发送接收技术和针对不同业务的带宽调度和成帧技术越来越难。而 WDM-PON 的问题是缺少适合各种业务的波长粒度以下的子带宽调度技术。利用 OFDM 子载波群正交的特性可以发展基于正交频分多址 (OFDMA) 媒质访问规约的 OFDM-PON。它可以灵活地提供各种各样的业务,而实现成本较低。2007 年 9 月 NEC 公司首先提出了基于 OFDMA 原理的 10G-PON 结构<sup>[1]</sup>,如图 6 所示。它靠离散傅里叶变换对实现正交子载波的同时传输,使在上行方向多个 ONU 同时与一个 OLT 通信而互不相扰,透明地支持各种各样的应用(例如,通过两个不同的子载波组分别给 ONU 1 和 ONU 2 提供 TDM 电话,同时通过第三个子载波组和进一步的时分方式给 ONU 1 和 ONU 3 提供 IP 数据,并在这些应用之间动态地分配带宽)。自此,OFDM-PON 的概念吸引了越来越多研究者的兴趣。到 2009 年 OFDM-PON 的传输速率已达到 108 Gb/s<sup>[13]</sup>。

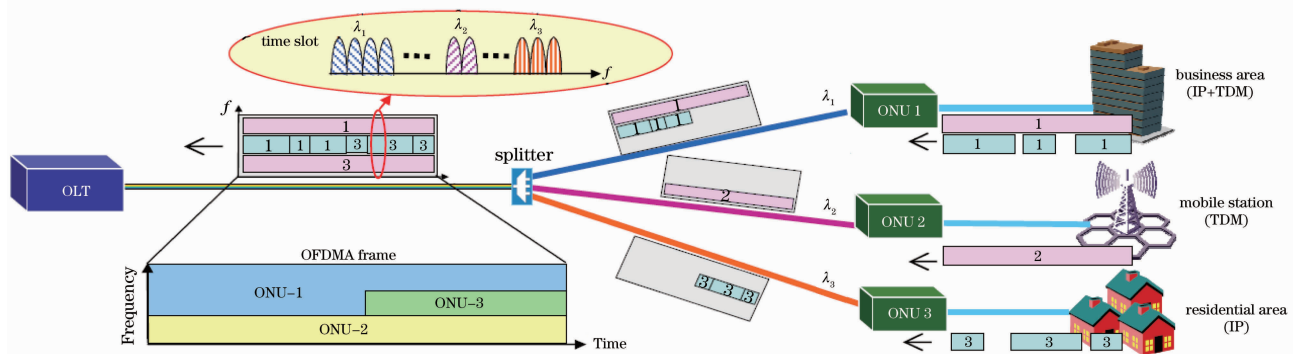


图6 OFDM-PON 设想

Fig. 6 Concept of OFDM-PON

#### 4 OFDM-PON 的结构必须基于不同的 ONU 发送波长

OFDM-PON 的原理结构可用图 7 表示。它由一个 OLT 和若干个 ONU 及其间的光分配网 (ODN) 组成。OFDM-PON 按频分多址原理工作。系统的总带宽被划分为若干个不同的频道,每个 ONU 占用一个频道,一个频道包含一个或多个子载波。一个 ONU 的子载波之间是正交的,不同 ONU 的子载波之间也是正交的。ONU 间的带宽分配靠安排子载波数和每一子载波上的调制格式来完成。每一 ONU 的带宽可进一步运用 FDM 或 TDM 制式在不同应用间进行分配。

在上行方向,多点到一点的传输使 OLT 光接收机的灵敏度受到多种限制。多个 ONU 连续发送的光波到达 OLT 的光探测器,将不但使光电转换散弹噪声大于单个光波产生的散弹噪声,而且上行光波间的差拍还可能导致 OBI。这里特别要指出,为了回避 OBI,各个 ONU 应工作于不同的上行波长,更严格地讲,是各

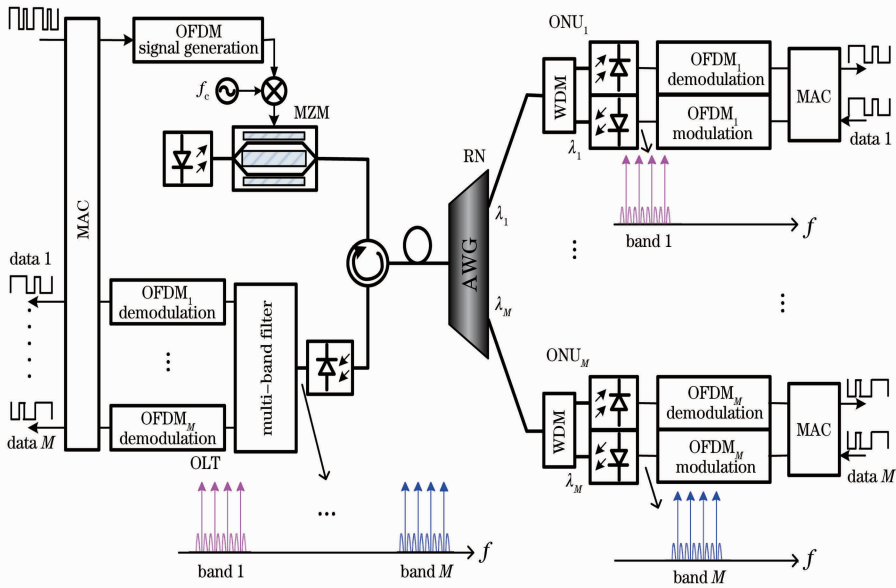


图 7 OFDM-PON 的原理框图

Fig. 7 Principle block diagram of OFDM-PON

个 ONU 发送光谱必须相互错开。有人认为,每个 ONU 的激光频率可以相同也可以不同<sup>[12]</sup>,这一观点值得商榷。现在有一种中心化光源的 OFDM-PON 方案,在 OLT 发送一个上行波长的光波,供多个 ONU 共享和返回,来载送各自的上行数据。这些 ONU 在作上行调制时都必须采用载波抑制的光调制方式,即把原来的上行波长谱线抑制掉,而只发送各自频率位置不同的上行数据光谱。在 OLT 光接收端不必采用波分复用器(如 AWG)来区分波长通道,这是 OFDM-PON 与 WDM-PON 不同之处。OFDM-PON 是靠子载波的频道不同来区分 ONU 的。

两束或两束以上的光波入射到 OLT 光接收机的光探测器上会产生频率差拍。当它们的中心波长相同或接近时,差拍产物为直流或低频成分,会形成对调制信号的干扰。设两束光波产生的光电流为

$$i_p(t) = R[P_1(t) + P_2(t) + 2\sqrt{P_1(t)P_2(t)}\cos[2\pi\delta\nu t + \phi_1(t) - \phi_2(t)]], \quad (5)$$

式中  $P_1(t)$  和  $P_2(t)$  分别是两束光波的瞬时功率,光电流  $RP_1(t)$  和  $RP_2(t)$  中包含着调制信息; $\delta\nu$  是两束光波的频差; $\phi_1(t) - \phi_2(t)$  是两束光波的随机相位之差,其功率谱是两束光波频谱的卷积。

单纵模激光器具有洛伦兹光谱<sup>[14]</sup>。设其中心频率为  $\nu_0$ ,线宽为  $\Delta\nu_{\text{FWHM}}$ (半峰全宽),则洛伦兹光谱的归一化形式  $g(\nu)$  可表示为

$$g(\nu) = \frac{\Delta\nu_{\text{FWHM}}}{2\pi[(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_{\text{FWHM}}/2)^2]}. \quad (6)$$

两个频差为  $\delta\nu$  的光谱卷积的结果  $g_{\text{int}}(f)$  的归一化形式为

$$g_{\text{int}}(f) = \frac{\Delta\nu_{\text{FWHM}}}{\pi[(f - \delta\nu)^2 + (\Delta\nu_{\text{FWHM}})^2]}. \quad (7)$$

如图 8 所示,它仍然是洛伦兹光谱,中心频率在  $\delta\nu$ ,线宽比原光源的加倍。当  $\delta\nu=0$  或很小时,差拍光波的频谱可能与这些光波所携带的调制信号的频谱重叠。图 8 中分别显示了 2,3,4 束光波干涉的情况,当更多束光波相干涉时,OBI 谱将会更宽,必然与调制信号的频谱重叠,造成信道的载噪比下降。只有当  $\delta\nu$  远高于调制信号的最高频率时,差拍干扰才可以忽略。

设  $\delta\nu$  足够高,落进调制信号所在子频道的 OBI 功率近于  $4R^2 P_{01} P_{02} g_{\text{int}}(0) B_i$ 。因此由两束光波 OBI 决定的子频道载噪比为

$$f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}(M=2, \delta\nu) = \frac{(Rm_i L_i P_{0i})^2}{8R^2 L_1 P_{01} L_2 P_{02}} \frac{\pi\Delta\nu_{\text{FWHM}}}{B_i} \left[1 + \left(\frac{\delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FWHM}}}\right)^2\right], \quad (8)$$

式中  $P_{0i}$  是第  $i$  个 ONU 的发送平均光功率; $m_i$  是第  $i$  个 ONU 光发送机的光调制度; $L_i$  是连接第  $i$  个 ONU

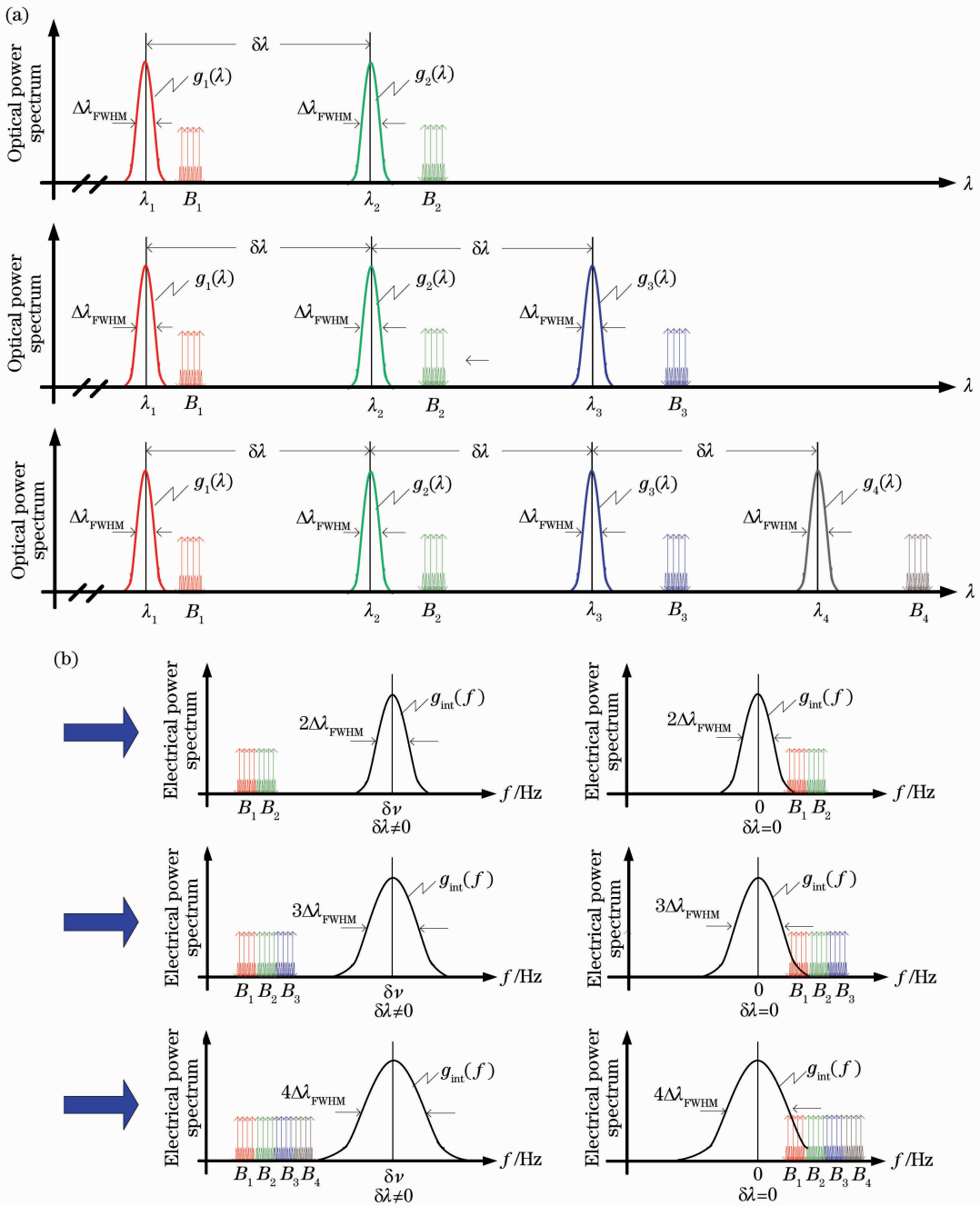


图8 OBI的频谱形成。(a)发送光谱；(b)接收频谱

Fig. 8 OBI spectra formation. (a) Transmitted spectra; (b) received spectra

的光纤线路损耗;  $B_i$  是 OLT 的第  $i$  个子频道的带宽;  $R$  是 OLT 光探测器的响应度。显然,  $\delta\nu$  越小, 这个载噪比越低, 即 OBI 的影响越显著。

图 9 显示了  $f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}$  ( $M=2, \delta\nu$ ) 对光源线宽和波长间隔的依赖性。考虑有  $M$  束上行光波作用于 OLT 的光探测器。两束光波的组合数为  $M \times (M-1)/2$ , 即 OBI 由  $M \times (M-1)/2$  项组成, 但起主要作用的是波长相邻两束光波的 OBI。由于两束光波的组合数为  $M-1$ , 所以由  $M$  束光波 OBI 决定的子频道载噪比为

$$f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}(M, \delta\nu) = \frac{(Rm_i L_i P_{0i})^2}{8(M-1)R^2 L_1 P_{01} L_2 P_{02}} \frac{\pi \Delta\nu_{\text{FWHM}}}{B_i} \left[ 1 + \left( \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FWHM}}} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

上述公式适用于各个 ONU 光源波长等距的情况。当使用标称波长相同的同一种光源时, 假设各个光源的实际波长围绕该标称值按高斯概率分布, 则由  $M$  束光波 OBI 决定的子频道载噪比为

$$f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\delta\nu}} \frac{(Rm_i L_i P_{0i})^2}{8(M-1)R^2 L_1 P_{01} L_2 P_{02}} \frac{\pi \Delta\nu_{\text{FWHM}}}{B_i} \left[ 1 + \left( \frac{\delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FWHM}}} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{(\delta\nu)^2}{2\sigma_{\delta\nu}^2} \right] d(\delta\nu), \quad (10)$$

式中  $\sigma_{\delta\nu}$  是独立光源中心频率分布的方差。

以上分析表明,为了消除 OBI 对 OFDM-PON 误码性能的影响,各个 ONU 发送光波的中心波长必须错开,波长相邻光源的频差必须足够大,至少要大于所发送信号的最高频率。

设计一个 OFDMA-PON 的上行通道;ONU 数  $M=2\sim 64$ ;一个频道的带宽  $B=625$  MHz,一个频道内的子载波数  $N=64$ ;光调制度  $m=0.1$ ;光链路损耗  $L=20$  dB;发送光功率  $P_0=16$  dBm;光探测器响应度  $R=0.7$  A/W;光源线宽  $\Delta\nu_{\text{FWHM}}=1.6$  MHz;光源频率间隔  $\delta\nu=12.5$  GHz。计算结果为

$$f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}(M=2, \delta\nu) =$$

$$10 \lg \frac{(0.7 \times 0.1 \times 0.01 \times 40 \times 10^{-3})^2}{8 \times (0.7)^2 \times (0.01 \times 40 \times 10^{-3})^2} \frac{\pi \times 1.6}{625/64} \left[ 1 + \left( \frac{12.5 \times 10^3}{1.6} \right)^2 \right] = 45.9 \text{ (dB)},$$

$$f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}(M=64, \delta\nu) =$$

$$10 \lg \frac{(0.7 \times 0.1 \times 0.01 \times 40 \times 10^{-3})^2}{8(64-1) \times (0.7)^2 \times (0.01 \times 40 \times 10^{-3})^2} \frac{\pi \times 1.6}{625/64} \left[ 1 + \left( \frac{12.5 \times 10^3}{1.6} \right)^2 \right] = 27.9 \text{ (dB)}.$$

计算显示,若采用普通分布反馈(DFB)激光器,线宽  $\Delta\nu_{\text{FWHM}}=1.6$  MHz,取光源频率间隔  $\delta\nu=12.5$  GHz,在两个 ONU 时,  $f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}$  尚可达 45.9 dB。但 ONU 增多到 64 个,  $f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}$  就只有 27.9 dB 了。如果 ONU 光源频率差小于 12.5 GHz,则  $f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}$  还要降低。看来,缩小 ONU 光源的线宽是非常必要的。

## 5 OFDM-PON 的业务和带宽调度

采用 OFDM-PON 的主要目的有 2 个:1) 利用密集的子载波来并行传输大容量的信息;2) 利用 OFDMA 方式来实现灵活的业务调度和颗粒度很小的动态带宽分配。在 PON 中,ONU 接入或业务调度可以发生在:时间维—TDM-PON;波长维—WDM-PON;频率维—OFDM-PON;电平(幅度/相位)维—OFDM-PON。业务调度的目的是完成不同 ONU 和不同业务之间的动态带宽分配,并满足服务水平协议(SLA)要求的服务质量(QoS)指标(例如延迟、延迟抖动、最大容许带宽、最小保证带宽、丢包率等)。

在已经成熟的 TDM-PON,如 EPON 和 GPON 中,业务和带宽的调度都是利用时隙在各个 ONU 间的分派,并由 OLT 执行。以 EPON 为例,ONU 通过 Report 帧向 OLT 报告它的不同优先级队列中暂存的、要求传送的数据量(字节数),OLT 则通过 Gate 帧向 ONU 授权,通知它的各个队列在何时开始发送数据及发送多长的时间。这种业务和带宽的调度要求各个 ONU 光发送机和 OLT 光接收机工作于突发模式,这在线路速率很高(大于 10 Gb/s)时是较难实行的。由于 TDMA 技术已经成熟,只要传输据速率不太高,这种调度在 OFDM-PON 的子频道中仍然可以利用。

OFDM-PON 的主要特色是要实行 OFDMA 的 MAC 过程。将制订一种新的 MAC 协议和相应的数据报格式及新的物理层协议。将把频带不同的频道当作透明管道,一个管道包含一个或多个正交的子载波,即一个管道的粗细可以调变,不同粗细的管道被 OLT 安排给不同的 ONU 或不同的业务;每一管道中的子载波上的数据调制格式又可以调变,如信息量要求高时采用 128~1024QAM,信息量要求低时用 PSK、QPSK 和 8~64QAM。管道的粗细(激活的子载波数)和子载波上调制格式的调变根据信道质量情况和业务要求自适应地进行,由 OLT 指挥,ONU 配合行动。这是一层发生在射频的自适应频率控制功能,可以参考靠无线通信协议(如 IEEE802.11 WLAN)和同轴电缆数据通信协议(如 MoCA)来设计和实现自适应 OFDM 体

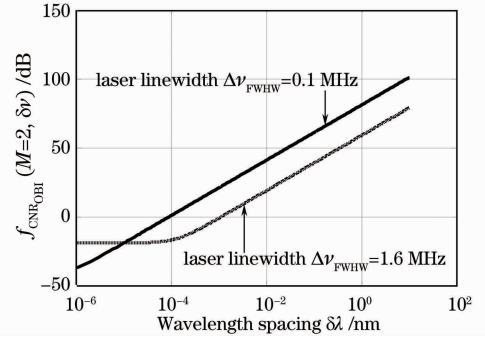


图 9  $f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}(M=2, \delta\nu)$  与 ONU 光源线宽和波长间隔的关系

Fig. 9 Relationship between  $f_{\text{CNR}_{\text{OBI}}}(M=2, \delta\nu)$  and ONU  $\Delta\nu_{\text{FWHM}}$  and  $\delta\lambda$



制。如此一来就可能创造一种时间/频率/幅相的三维调度体制,如图 10 所示。

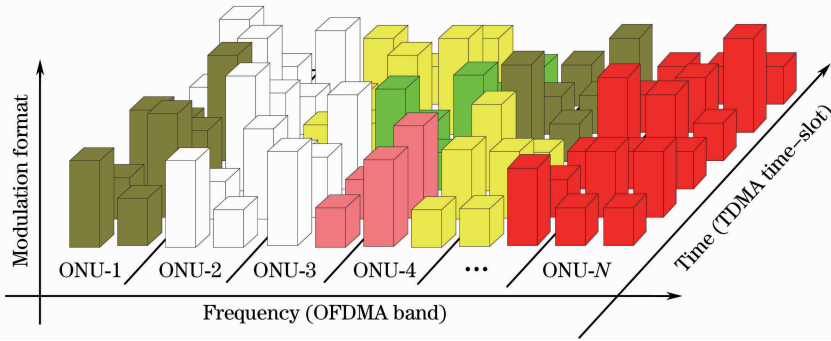


图 10 OFDMA 帧的频域和时域分配(不同的颜色代表不同的业务)

Fig. 10 Time allocation and frequency allocation of OFDMA frame (different color represents different business)

纯粹的 WDM-PON 要实行 MAC 控制和带宽分配,若依赖于波长调度,则实现技术是昂贵的,又难以实现亚波长的细颗粒度的数据调度,故不适宜于光接入网。

## 6 结 论

介绍了 OFDM-PON 与 WDM-PON 的基本原理,论述了它们的异同。在物理层,从 OBI 出发论证了 OFDM-PON 的 ONU 必须工作于不同的发送波长,这一点表面上相似于 WDM-PON。但是 OFDM-PON 运行于相互隔离的射频频率通道,波长通道仅仅起透明载体的作用,不必非要在 OLT 光接收端先用 AWG 来分割波长通道后再进行光电转换。而 WDM-PON 则完全运行于相互隔离的点到点波长通道。

在 MAC 控制层,OFDM-PON 应当运行于 OFDMA 体制,即依靠子载波频率的不同来区分 ONU、接入用户和业务,那些在物理层采用 OFDM 调制方式,在 MAC 层却不利用频率调度的系统,应当称为 OFDM 调制的 WDM-PON,而不是 OFDM-PON。特别指出,现在纯粹的 WDM-PON 只有物理层,要形成一个功能完备的 PON,它必须与其他 PON 级联,利用其他 PON 的 MAC 协议,于是就变成了混合 PON,如 WEPON 或 WGPON 等等。

## 参 考 文 献

- 1 Qian Dayou, Hu Junqiang, Yu Jianjun *et al.*. Experimental demonstration of a novel OFDM-A based 10 Gb/s PON architecture[C]. European Conference and Exhibition of Optical Communication, 2007. MD5. 4. 1
- 2 Ming-Fang Huang, Jianjun Yu, Dayou Qian *et al.*. Lightwave centralized WDM-OFDM-PON network employing cost-effective directly modulated laser [C]. Optical Fiber Communication, 2009. OMV5
- 3 J. C. Daniel, Jair A. L. Silva, Marcelo E. V. Segatto. A bandwidth scalable OFDM passive optical network for future access network[J]. *Photon. Netw. Commun.*, 2009, **18**(3): 409~416
- 4 Soo-Jin Park, Chang-Hee Lee, Ki-Tae Jeong *et al.*. Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(11): 2582~2591
- 5 Shou Guochu, Hu Yihong, Guo Zhigang *et al.*. Spectrum-sliced wavelength division multiplexed passive optical networks and effects of chromatic dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 312~315  
寿国础,胡怡红,郭志刚等. 频谱分割波分复用无源光网络及色散影响[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 312~315
- 6 W. Hung, Chun-Kit Chan, Lian-Kuan Chen *et al.*. An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1476~1478
- 7 Shou Guochu, Hu Yihong, Guo Zhigang *et al.*. 10 Gb/s bi-directional wavelength division multiplexing passive optical network with narrow-FSK as optical carrier source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 83~86  
寿国础,胡怡红,郭志刚等. 窄带频移键控为光载波源的双向 10 Gb/s 波分复用无源光网络[J]. 光学学报, 2009, **29**(s2): 83~86
- 8 Josep Prat, C. Arellano, V. Polo *et al.*. Optical network unit based on a bidirectional reflective semiconductor optical amplifier for fiber-to-the-home networks[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(1): 250~252

- 9 Jean Armstrong. OFDM: from copper and wireless to optical[C]. Optical Fiber Conference, 2008. OMM1
- 10 Sander Lars Jansen, van den Borne Dirk, Adhikari Susmita. Past, present and future of optical OFDM[C]. Asia Communication and Photonics Conference and Exhibition, 2009, ThL2
- 11 Zhang Yimin, Chen Lin, Cao Zizheng *et al.*. Experimental research about a full-duplex OFDM-ROF system based on intensity modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1744~1749  
张益民, 陈林, 曹子峥等. 基于强度调制器的全双工 OFDM-ROF 系统实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1744~1749
- 12 Fang Wuliang, Zhang Junwen, Hou Chunling *et al.*. Employment of new information processing technologies in passive optical network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 52~58  
方武良, 张俊文, 侯春宁等. 新型信息处理技术在光无源接入网中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(12): 52~58
- 13 Dayon Qian, Neda Cvijetic, Yue-Kai Huang *et al.*. Single-wavelength 108 Gb/s upstream OFDMA-PON transmission[C]. European Conference and Exhibition of Optical Communication, 2009, PD3.3, 1~2
- 14 Lin Rujian. Optical Fiber Transmission Technology for Video[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 118~121  
林如俭. 光纤电视传输技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 118~121