

## 光密集波分复用在光纤通信网中的应用及发展

近几年随着多媒体通信的发展和计算机技术的广泛应用，信息交流的领域范围不断扩大，网络通信容量急剧增加，因而不断增加电信网络容量变得越来越重要。而光纤最重要的一个特点是容量大，可以传送高速率的数字信号。因此光纤通信已经成为今后通信事业发展的趋势。为了更进一步提高光纤的利用率，参考已经比较成熟的电复用方法，人们采用了各种光的复用方法。如波分复用、频分复用、时分复用、空分复用、副载波复用、码分复用等。其中，被认为最具潜力的是波分复用。

波分复用（WDM）就是将一系列载有信息的光载波，在光频域内以 1 至几百纳米的波长间隔合在一起沿单根光纤传输，在接收端再用一定的方法将各个不同波长的光载波分开的通信方式。由于每个不同波长信道的光信号在同一光纤中是独立传输的，因此在一根纤芯中可实现多种信息的传输，如声音、数据、文本、图形和影像。它能充分利用光纤宽带的传输特性，使一根光纤起到多根光纤的作用。WDM 扩容方案充分利用了光纤的带宽，可以混合使用各种速率，各种数据格式和各厂家的设备（开放式系统）；可以通过增加新的波长和特性，非常方便地扩充网络容量，以满足用户的要求。对于 2.5Gbit/S 以下速率的 WDM，目前的技术已经完全可以克服由于光纤色散和光纤非线性效应带来的限制，满足对传输距离的各种要求，并且已经在我国的部分通信干线应用。当然，目前 WDM 光传输系统只适用于点到点的传输，如何在网络环路中使用，如何实现光网络层上的保护还需进一步研究。WDM 技术的工作原理一般可以分为无源波分复用器和有源波分复用器两类，每一类又可以分为若干种。比如无源波分复用器（POWDM）可以有棱镜型、熔锥型、光栅型、干涉滤波型等几类，有源波分复用器可以分为波长可调滤波器、光源方向耦合器、波长可调激光器、集成光波导等几类。目前，无源波分复用器在实际中使用较多。在光缆通信干线传输网上采用 WDM 系统具有以下优点。（1）可充分利用光纤的巨大带宽资源，使一根光纤的传输容量比单波传输容量增加几倍至几十倍。（2）对于早期敷设的芯数不多的光缆，采用 WDM 进行扩容可不必对原有系统作较大的改动。（3）在光波分复用技术中，各个波长的工作系统是彼此独立的，各个系统中所用的调制方式、信号传输速率等都可以不一致，甚至模拟信号和数字信号都可以在同一根光纤中占用不同的波长来传输，完成各种电信业务（包括数字信号和模拟信号）的综合和分离，以及 PDH 和 SDH 信号的综合与分离。这样，由于光波分复用系统传输的透明性，所以在使用时带来了很大的方便性和灵活性。（4）目前使用的光波分复用器主要是无源器件，它结构简单，体积小，可靠性高，易于光纤耦合，成本低。（5）同一个光波分复用器即可用作合波也可用作分波，具有方向的可逆性，因此可以在同一光纤上实现双向传输。WDM 是对多个波长进行复用，能够复用多少个波长，与相邻两波长之间的间隔有关，间隔越小，复用的波长个数就越多。一般当相邻两峰值波长的间隔为 50-100nm 时，称为 WDM 系统。而当相邻两峰值波长间隔为 1-10nm 时称之为密集波分复用（DWDM）系统。

波分复用技术（WDM）所谓波分复用是指在一根光纤上，不只是传送一个光载波，而是同时传送多个波长不同的光载波。这样一来，原来在一根光纤上只能传送一个光载波的单一光信道变为可传送多个不同波长光载波的光信道，使得光纤的传输能力成倍增加。也可以利用不同波长沿不同方向传输来实现单根光纤的双向传输。WDM 技术的工作原理一般可以分为无源波分复用器和有源波分复用器两类，每一类又可以分为若干种。比如无源波分复用器（POWDM）可以有棱镜型、熔锥型、光栅型、干涉滤波型等几类，有源波分复用器可以分为波长可调滤波器、光源方向耦合器、波长可调激光器、集成光波导等几类。目前，无源波分复用器在实际中使用较多。光波分复用技术具有以下优点：（1）利用光波分复用技术可以在不增建光缆线路或不改建原有光缆的基础上，使光缆传输容量扩大几倍甚至几十倍、

上百倍，这一点在目前线路投资占很大比重的情况下，具有重要意义。（2）目前使用的光波分复用器主要是无源器件，它结构简单，体积小，可靠性高，易于光纤耦合，成本低。（3）在光波分复用技术中，各个波长的工作系统是彼此独立的，各个系统中所用的调制方式、信号传输速率等都可以不一致，甚至模拟信号和数字信号都可以在同一根光纤中占用不同的波长来传输，这样，由于光波分复用系统传输的透明性，所以在使用时带来了很大的方便性和灵活性。（4）同一个光波分复用器即可用作合波也可用作分波，具有方向的可逆性，因此可以在同一光纤上实现双向传输。WDM 是对多个波长进行复用，能够复用多少个波长，与相邻两波长之间的间隔有关，间隔越小，复用的波长个数就越多。一般当相邻两峰值波长的间隔为 50-100nm 时，称为 WDM 系统。而当相邻两峰值波长间隔为 1-10nm 时称之为密集的光波分复用（DWDM）系统。

随着 Internet 的引入通信业受到了日益增长的带宽需求及速度要求的挑战。这些需求使得现今各类通信系统的局限性变得更为突出。近期产生一项新的技术，该技术能解决通信业所面临的任务。

带宽的需求促成 DWDM 系统产生。

供应商曾为如何有效应付带宽增加的要求而愁眉不展。虽然光纤技术的不断改进已部分减轻了供应商的压力，并为其打开了数据和语音传送的新领域，但由于各类格式的不兼容性，使得光纤必须被严格限于某一单独格式。对于那些要涉及很多系统的供应商来说，高价的新光纤在成本中占很大的份额。于是，一项最具前景的专门解决高速问题的方案 DWDM 技术（密集波分复用）就应运而生。

ITU·T·G692 规定的 DWDM 为通信网络提供更大的功效。通过在一条光纤上同时传播多波长光的方式，DWDM 技术大大增加了光纤传播的信息量。此外，每一信号可以在不同速率和格式中传送，这就降低了单一格式光纤的需求。DWDM 技术还具备一个优点，它能使供应商为今后的增量打下基础。DWDM 技术可用于单独的光纤跨度，并能与具备 DWDM 部分的传播系统平稳对接，它在降低用户最初费用的同时，仍能为今后的更高容量提供必需的基础。

目前来说，DWDM 关键技术都已基本成熟，Gb/s 级系统得到广泛应用，Tb/s 级系统的商用也正在计划中。目前 DWDM 技术体现出如下发展趋势。首先是系统传输容量的持续增长，可通过提高通道速率、增加复用波长数量、扩宽应用波长范围等方案实现传输容量的扩大。（以下方法摘自《中国光网》）

#### 1. 提高通道速率。

最先实用的 DWDM 系统多基于 2.5Gb/s 的通道速率，现在基于 10Gb/s 的多波长系统正在实用，基于 40Gb/s 速率的系统已进入实验阶段，技术日渐成熟。此外应用 OTDM 技术可将单通道速率提高至 ETDM 方式无法达到的高度，目前的实验系统已经使通道速率达到了 160Gb/s。

#### 2. 增加复用波长数量。

8、16、32 个波长的 DWDM 系统已经大范围使用，100 个波长的系统也走向商用。而实验室里的成绩尤为突出，已完成了 1022 个波长的复用试验。应用波长范围受限时，要增加复用波长数量，必须缩窄通道间隔。目前的 DWDM 实验中，通道间隔已达到 25GHz。

#### 3. 扩宽应用波长范围。

除了充分利用目前使用的“C 波段”的传输能力外，DWDM 系统应用的波长范围正在向“L 波段”发展，甚至有人将 L 波段的长波长一侧延伸到 1700nm。此外，对“S 波段”的应用也在计划之中。当 1385nm 波长的 OH<sup>-</sup>吸收峰被削减之后，S 波段与 1310nm 窗口便连接起来。对于比较短距离的传输，应用波长范围将扩宽至 1100nm~1700nm。DWDM 技术的另一个发展趋势是光再生中继器的开发。受光信噪比恶化、光信号波形恶化等因素限制，

DWDM 信号经过数个光放段传输后必须再生一次，再生段距离不可能无限制地长。随着通道速率提高、复用波长数量增多，解波分复用后分别进行再生的电再生方式，设备庞杂、建设和运行成本高。开发光再生中继器不仅对传输系统十分必要，对提高光网络的透明性、实现全光传送网络也是不可缺少的。目前已有实验性光再生中继器，但其性能还不能与电再生中继器相提并论。如何实现对 DWDM 系统中的所有波长一起进行再生处理，仍在研究开发中。

目前，DWDM 技术虽然已能解决供应商的难题，但它仍会在不久的将来遇到一些障碍。由于噪音、抖动、信号衰变等问题的存在，有效地测试高数据速率通信传播系统已愈来愈困难，而这些问题又会导致大量的误码。除了自身已具备的高效性和灵活性外，DWDM 仍面临许多高速率测试问题。在高速测试时，要涉及到 3 个领域物理层，定时与同步，以及 BER 测试。每一领域均面临各自的挑战，特别是在很高数据速率的情况下。通过广泛的阅读和学习，我总结了以下几点：

#### 1. 物理层测量

物理层测量提供了验证接口指标以及符合标准的能力。这些测量通常要求具有一些测试设备，诸如水波器、光学基准接受器、光谱分析仪多波长计等。作为确定或制造测试过程的一部分，物理层测量保证了界面设计的裕度得到保持。

#### 2. 眼图

眼图是一重要的物理层测量，1 台示波器显示出当前时间域的信号特征，诸如 bit 时，边缘上升和下降的时间、上过冲、下过冲以及抖动等信号特征均能快速简易地测量出来。通过原始眼图与工业标准图形的对比，就能快速显示发射机是否将所发送衰减的信号送至接收机。根据眼图能推断出如下的一些特征：小个较大的开口表示 1 个较大的系统裕度。1 个较大的开口表示 1 个较大的信噪比。（这跟我们在通信原理中学到的一样）。

#### 3. 平均发射功率

系统的功率预算是物理层测量的 1 个主要考虑，由于信号在系统中传送时，各种网络元件会引起信号的衰减。因此，以足够的功率发射光信号以保证接收器能可靠地区分逻辑 0 逻辑 1 是极为重要的。平均发射功率可用功率计来测量，它亦可用 1 台示波器来测量。

#### 4. 消光比

消光比是对光传送器进行数字调整的调幅量度，它能影响光功率的预算，同时还影响到光纤系统发射信号所通过的距离，在这距离内，信号能由光纤系统可靠地发射和还原。它是由眼图来估算，并且定义为：平均渡光功率在逻辑 1 电平（E1）对激光功率在逻辑 0 电平（E0）的比率。当用 dB 来表示时（SONET / SDH 通常采用），方程式为： $dB: ER = 10 [\log (E1 / E0)]$

（注：ER 为消光比 Extinction Ratio 的缩写。在高速条件下调整时，激光必须在永远不被完全断开的情况下进行操作。激光发射的影响会对信号的使用受到限制。对于 1 个 10Gb / s 的系统来说，10dB 以上的消光比是可以接受的。消光比可以用示波器来测量。）

#### 5. 激光线性（误差）

激光线性是激光波长频率的变化。其测量是在 DWDM 激光系统的组件设计相位里完成的。当激光内部调整时会引起激光的波长瞬时的位移，这就产生激光线性，其影响是引起脉冲增宽。在高数据速率时，由于内部单位间隔 bit 比较短，因而脉冲的增宽就显得极为重要。在 DWDM 系统中，高速率情况下，狭窄的信道间隔也会增加信道单音的作用。由于线性发生的时间很短，因而激光线性测量相当困难。频率变化相当快，故亦难以测量。因此，将频率变化转化为调幅波，然后用干涉仪进行测量。激光线性可借调制技术使其最小化。为了避免激光线性，还可以用外部调制设备。为了线性最小化，可采用电子吸收调解技术。无论是减少还是避免激光线性，在高速 DWDM 系统中测试激光线性的效果对决定激光在数据传输中的适应性极为重要。

## 6. 增益倾斜

增益倾斜反映出大多数光放大器的非线性。由于某些波长会比其它一些波长更为放大，因而调节放大器以保证通过所有的波长都有 1 个固定的增益是十分重要的。如果波长以不同强度放大，那就会产生 1 个所谓阴极效应，从而导致较弱放大的信号消失。调节放大器以避免信道被不均衡放大，否则会导致不同的信噪通过信道，并有可能在相邻的信道中产生串音。增益倾斜最好用光谱分析仪来测试。

## 7. 衰减

衰减：衰减影响到信号所能传播的互联距离，在这两个区域中衰减到最低点 1300nm 和 1500nm，在这两点中，又以 1500nm 为最低点。这一最低衰减点代表了最长的互联距离，因此，1500nm 的激光是 DWDM 系统最普遍采用的波长。衰减引起数据帧尺寸的减小。因此，随着信号速度提高，衰减显得更为重要。衰减的影响可用光功率计来确定。过大的信号衰减会导致数据中过多的误码，这是因为输入信号中的大部分信号在传输途中损失，使得光接收器无法将输入的信号准确复原和确定。

另外还有信道测试。快速的 BER 测试，相对我现在的学习水平来说还很高深，很难理解和体会其中考虑的方面，但信道测试中设计的抖动测量技术在以前的数电实验中有过防抖动的处理，因此稍微研究了一下：在高速传输时，抖动特性的精确度就十分重要。抖动测量技术目前是从模拟向数字化演变。随着向数字化的转换，抖动和偏移的测试问题就迎刃而解，而且具有可重复性。同时，网络定时问题也可快速确定。目前大多数 SONET / SDH 测试装置都具有测试抖动的能力。抖动测试可用的 3 种仪器在 DWDM 系统中起着十分重要的作用。这 3 种仪器的功能分别是输出抖动、输入抖动容差和抖动传送功能。抖动输出是在设备或网络的界面发生的。这是设备本身的潜隐性的抖动。随着系统速率的提高，裕度允差减小，于是，间歇性的误差就会遍及整个系统。当适应性测试、网络试运行、保养和发生故障时，就要进行抖动输出测试。为了保证网络的互联动作的可能性，所有设备要保持抖动电平不超过 ITU 标准所规定的极限。输入抖动容差就是用来测试设备所能容许的抖动量，以避免性能极限（通常是误差极限被违反）。从输入界面到输出界面，无论抖动放大还是衰减，都要对传送抖动的功能进行测量。若一元件所产生的抖动大于输入界面所出现的抖动，那么就会引发系统中同样的几个级联的元件发生抖动，于是，网络中的抖动就急剧增加。虽然具体在光网中如何防抖我还不很清楚，但是我一定会加深学习，多了解这其中的知识。

总之，通信业曾不得不承受急速的变化以支持世界日益增长容量的需要。现在，由于采用了 DWDM 技术，供应商有可能满足用户的要求。由于传输速度达到 10GB / S，新的测试问题就随之而生。这些问题包括脉冲扩宽，信号衰减及信道间隔狭窄等等。对于长距离及高数据速率的传输，使用较好的光纤及最小色散值的优良激光器有助于控制色散的影响，为了测定和保持系统处于良好健全的状态，特别是在高速传输时，对抖动测定的要求是很严格的。当性能测试时，为了更好地给系统加载，可采用长的 PRBS 规范，PN31。而且，快速的 BER 测试法有助于减少长度测试时间。通信业没有停滞不前，它正在变化和发展。但由于精细的测试及具有对新问题的知识，供应商能卓有成效地充分满足顾客的要求，防止系统失效，并使系统保有高的 QoS 值。（以上总结分析来自于《通信产业报》、《电信工程技术与标准化》、《现代通信》以及一些相关网站。认识还很肤浅，总结也很片面如果有说的不对的还请高老师指正。）

通过对微波技术的学习，对光网还是有很大的兴趣，因此有上面一些浅薄的体会，对于整个网络也还是有一定的了解，而且对光网的前景也怀着很大的期待，希望以后可以多跟老师学习有关方面的知识，现在浅显的了解对真正深入研究还是很不够的。今后，我一定会进一步学习相关知识，尽力有自己的一些独创的想法。

另外还想就我微波学习过程中的一个小想法谈点感想。我们学习的传统传输线匹配，是属于

窄带匹配,甚至几乎是对一个特定频点的匹配.对别的频率的信号有很大的衰减,这让我有个想法,在通信原理中学到的信号解调时经常要在收端提取同步载波,如果这个时候也用对载波频率匹配的传输线来传送这个信号,会不会就相当于提取了载波呢,具体怎么实现我并没有想清楚只是有个这样的想法,以后有机会想跟老师探讨一下.(我猜应该是实现不了的,要不早有人使用了吧.)

总之谢谢老师的教诲,以后一定会加强学习,有更多更好的认识和自己的创新.