

Information &
Communication
信息与通信创新学术专著

Software Defined Optical Networks



软件定义光网络

► 赵永利 郁小松 张佳玮 杨 辉 王 磊 张 杰 / 编著



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Information
Communication
信息与通信创新学术专著

Software Defined Optical Networks

软件定义光网络

► 赵永利 郁小松 张佳玮 杨 辉 王 磊 张 杰 / 编著



人民邮电出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

软件定义光网络 / 赵永利等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2017.6
(信息与通信创新学术专著)
ISBN 978-7-115-45119-4

I. ①软… II. ①赵… III. ①光纤网—研究 IV.
①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第044357号

内 容 提 要

本书是一本关于软件定义光网络方面的学术专著, 内容涉及软件定义光网络的概念原理、体系架构、关键技术和应用案例等, 目的在于帮助读者更好地学习和掌握软件定义光网络的原理与技术。全书共分为 10 章, 第 1 章为智能光网络发展概述; 第 2 章介绍软件定义光网络的概念与技术特征; 第 3 章介绍软件定义光网络的体系架构; 第 4 章介绍软件定义光网络虚拟化技术; 第 5 章为软件定义光网络多域控制技术; 第 6 章介绍 IP 与光协同控制技术; 第 7 章介绍软件定义数据中心光网络技术; 第 8 章为软件定义光接入网; 第 9 章介绍软件定义光载无线接入网; 第 10 章介绍几种典型的软件定义光网络创新应用案例。

本书的适用对象主要是从事光网络研究的工程技术人员以及高校相关专业的研究生和教师。

◆ 编 著 赵永利 郁小松 张佳玮 杨 辉

王 磊 张 杰

责任编辑 代晓丽

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 700×1000 1/16

印张: 17.5

2017 年 6 月第 1 版

字数: 343 千字

2017 年 6 月河北第 1 次印刷

定价: 108.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

当前,我国信息通信产业持续高速增长,互联网应用呈现出加深发展态势。为了把互联网的创新成果与经济社会各领域深度融合,推动技术进步,提升实体经济创新力和生产力,国务院提出了以“互联网+”为主线的国家信息化战略方针。作为“互联网+”的重要基础设施,光网络在高速、宽带、长距离、大容量传输方面的优势得到了充分体现。随着智能化需求的不断演进,光网络的定位已不再局限于简单的“刚性带宽管道”提供,出现了结构开放化、业务增值化的发展趋势与特征,而带来这一特征的主要因素在于光网络的可编程控制,即软件定义光网络(Software Defined Optical Network, SDON)。

SDON 是指光网络的结构和功能可根据用户或运营商需求,利用软件编程的方式进行动态定制,从而实现快速响应请求、高效利用资源、灵活提供服务的目的。SDON 可以为各种光层资源提供统一的调度和控制能力,根据用户或运营商需求,利用软件编程的方式进行动态定制,重点解决功能扩展的难题,满足多样化、复杂化的需求,其核心在于光网络元素的可编程特性,包括业务逻辑可编程、控管策略可编程和传输器件可编程等。SDON 已经成为未来智能光网络发展的必然趋势。

本书旨在全面概括 SDON 的实现原理以及涉及的关键技术,特别以不同的应用领域为切入点,系统研究了 SDON 在不同场景下的实现方式和关键技术问题,并对基于 SDON 的创新应用进行了描述和展望。

本书凝聚了作者所在单位多年来的科研经验和实践总结,得到了国家自然科学基金项目“面向光网络灵活控制的软定制理论与实现机理研究”、国家“863”计划“新型超大容量全光交换网络架构及关键技术研究”等科研项目的支持,同时也包含了课题组马辰、于一鸣、尹兴彬、陈浩然、朱睿杰、王伟、李亚杰、白巍等博士生和宋伊娜、何锐颖、易帆、周泉伟、黄梁恺、朱晔、郁陈焙、崔瑞、宁贤、李博等硕士生在他们攻读学位期间的部分研究成果,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,本书中难免有错误或者不周之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 11 月 30 日于北京

目 录

第 1 章 智能光网络发展概述	1
1.1 光网络数据面技术演进	1
1.1.1 波分复用技术	1
1.1.2 时分复用技术	5
1.1.3 空分复用技术	7
1.2 光网络智能化需求与挑战	12
1.2.1 体系扩展性问题	13
1.2.2 业务复杂性问题	14
1.2.3 路由协同性问题	14
1.2.4 网络高效性问题	15
1.3 智能光网络技术演进	16
1.3.1 ASON	16
1.3.2 PCE	16
1.3.3 SDON	17
1.3.4 SDON 与 ASON、PCE 关系	17
1.4 本章小结	18
参考文献	18
第 2 章 SDN	23
2.1 SDN 概述	23
2.1.1 SDN 概念和产生背景	23
2.1.2 SDN 核心技术	24
2.1.3 SDN 发展现状	27
2.1.4 SDN 典型控制器的介绍	28
2.1.5 SDN 应用案例分析	38

2.2 SDON 概述	41
2.2.1 SDON 概念与技术特征	41
2.2.2 SDON 解决的核心问题	42
2.2.3 SDON 与 SDN 的区别和联系	43
2.2.4 SDON 核心使能技术	44
2.3 SDON 发展前瞻	45
2.3.1 SDON 研究现状	45
2.3.2 SDON 产业动态	46
2.3.3 SDON 面临的挑战	47
2.4 本章小结	48
参考文献	49
 第 3 章 SDON 体系架构	 51
3.1 SDON 分层架构与接口定义	51
3.1.1 SDON 分层架构	51
3.1.2 SDON 南向接口及功能描述	52
3.1.3 SDON 北向接口及功能描述	53
3.2 SDON 传送层技术	55
3.2.1 SDON 传送平面设备功能模型	55
3.2.2 基于灵活栅格的 SDON 光交换节点结构	56
3.3 SDON 控制层技术	63
3.3.1 SDON 控制平面功能模型	63
3.3.2 SDON 控制平面核心功能	64
3.3.3 控制器集群技术	72
3.4 SDON 应用层技术	75
3.5 SDON 控制层与管理层关系	76
3.6 本章小结	76
参考文献	77
 第 4 章 SDON 虚拟化技术	 78
4.1 SDON 光层虚拟化技术	78
4.1.1 可编程切片光收发设备	79
4.1.2 可变带宽光交换设备	79

4.1.3 弹性光再生器	80
4.1.4 节点的分割和聚合技术	80
4.1.5 虚拟光网络提供技术	85
4.2 虚拟光网络映射算法	89
4.2.1 虚拟网络映射	89
4.2.2 基于链路可切片的虚拟网络映射算法	90
4.2.3 基于交换节点可切片的虚拟网络映射算法	92
4.2.4 仿真结果及数据分析	94
4.3 光网络功能虚拟化技术	97
4.3.1 NFV 实现原理	97
4.3.2 NFV 与 SDN 的关系	98
4.3.3 传送网功能虚拟化	98
4.3.4 数据中心光网络功能虚拟化	102
4.4 本章小结	106
参考文献	107
 第 5 章 软件定义光网络多域控制技术	111
5.1 软件定义多域光网络层次化控制体系	111
5.1.1 层次化控制体系的基本构成	112
5.1.2 层次化控制体系的功能模型	113
5.2 软件定义多域光网络业务提供机制和资源分配	115
5.2.1 端到端业务提供机制	116
5.2.2 域间路由资源优化方法	117
5.2.3 域间频谱资源优化方法	119
5.3 软件定义多域光网络实验系统与性能验证	126
5.3.1 OpenFlow 协议扩展	127
5.3.2 实验系统组成与配置	128
5.3.3 系统测试与功能验证	129
5.4 本章小结	132
参考文献	132
 第 6 章 IP 与光协同控制技术	135
6.1 IP 与光协同控制需求	135

6.2 基于软件定义的 IP 与光协同控制体系和功能研究	137
6.2.1 基于软件定义的 IP 与光协同控制体系	138
6.2.2 基于软件定义的 IP 与光协同功能研究	140
6.3 基于软件定义的 IP 与光协同控制机制	144
6.3.1 针对 IP 与光协同网络基本功能的控制机制	145
6.3.2 针对 IP 与光协同网络 Bypass 功能的控制机制	149
6.3.3 针对 IP 与光多层协同功能的控制机制	151
6.4 基于软件定义的 IP 与光协同网络故障恢复案例	153
6.4.1 光层优先的多层故障协同恢复策略	154
6.4.2 IP 层优先的多层故障协同恢复策略	156
6.5 本章小结	158
参考文献	158

第 7 章 软件定义数据中心光网络技术

7.1 数据中心的发展现状与面临的挑战	160
7.1.1 数据中心的发展现状	160
7.1.2 数据中心的发展趋势	161
7.1.3 数据中心面临的挑战	164
7.2 软件定义数据中心光网络体系结构	165
7.2.1 软件定义数据中心之间的光组网结构	165
7.2.2 软件定义数据中心内部的光组网结构	167
7.3 数据中心光网络跨层优化技术	170
7.3.1 数据中心光网络跨层优化功能架构	170
7.3.2 跨层优化中多控制器间协作方案	171
7.3.3 面向跨层优化的全局负载均衡机制	172
7.4 软件定义数据中心光网络典型案例分析	177
7.5 本章小结	180
参考文献	181

第 8 章 软件定义光接入网

8.1 软件定义光接入网的产生背景	185
8.1.1 当前光接入网面临的问题与挑战	185
8.1.2 光接入网技术	187

8.1.3 软件定义光接入网的优势	192
8.2 软件定义光接入网络架构	194
8.2.1 软件定义光接入网控制架构	194
8.2.2 软件定义光接入网关键技术	196
8.3 软件定义光接入网应用场景	198
8.3.1 面向应用/用户的接入网开放控制	198
8.3.2 接入网设备的集中管理与统一控制	201
8.3.3 网络虚拟化和多业务接入	204
8.3.4 多租户光接入网	206
8.4 本章小结	207
参考文献	208
 第 9 章 软件定义光载无线接入网	210
9.1 光载无线接入网的发展需求	210
9.1.1 发展背景	210
9.1.2 无线接入网的技术演进	210
9.1.3 关键问题和挑战	213
9.1.4 国内外研究进展	214
9.2 面向移动前传的光层组网技术	221
9.3 软件定义光与无线融合控制技术	227
9.3.1 光使能 C-RAN 的软件定义技术	227
9.3.2 基于 SDN 的光与无线资源编排器设计	228
9.3.3 协议扩展	230
9.4 本章小结	235
参考文献	235
 第 10 章 软件定义光网络创新应用	239
10.1 基于软件定义光网络应用层的业务逻辑处理模型	239
10.1.1 软件定义光网络北向接口	239
10.1.2 基于北向接口的业务逻辑处理模型	240
10.2 基于软件定义光网络的 BoD 应用	246
10.2.1 软件定义光网络 BoD 业务简介	246
10.2.2 软件定义光网络 BoD 预约配置功能	248

10.2.3 软件定义光网络 BoD 预约调整功能	249
10.2.4 软件定义光网络 BoD 功能验证	250
10.3 基于软件定义光网络的 VON 应用	255
10.3.1 软件定义光网络 VON 应用简介	256
10.3.2 软件定义光网络 VON 应用实现方案	256
10.3.3 软件定义光网络多租户应用功能验证	259
10.4 未来新型应用展望	262
10.5 本章小结	264
参考文献	264

名词索引	267
------------	-----

第 1 章

智能光网络发展概述

作为国家重要的信息基础设施，光网络近年来得到了飞速发展，网络带宽一直以超摩尔定律的速度增长，目前光通信链路单通道传输容量已经突破 Tbit/s，节点交换容量将达到 Pbit/s。在网络容量不断攀升的同时，光网络的智能化需求越发迫切，新型的智能光网络控制技术不断涌现。本章将阐述智能光网络的演进历程，首先从光网络的数据面技术入手，介绍了全光的波分复用技术、时分复用技术以及空分复用技术；然后从体系扩展性、业务复杂性、路由协同性和网络高效性等角度分析了光网络的智能化需求；最后阐述了从自动交换光网络（Automatically Switched Optical Network, ASON）到软件定义光网络（Software Defined Optical Network, SDON）的演进历程。

1.1 光网络数据面技术演进

光网络数据面作为信息的承载平面和光网络承载容量的主要贡献者，近年来承载能力不断增强。在光纤链路中，不同维度资源可以得到不同程度的挖掘利用，从而形成了不同的复用技术，如波分复用技术、时分复用技术和空分复用技术等。

1.1.1 波分复用技术

1. 波分复用技术

波分复用（Wavelength Division Multiplexing, WDM）是将两种或多种不同波长的光载波信号（携带各种信息）在发送端经复用器（亦称合波器，Multiplexer）汇合在一起，并耦合到同一根光纤线路中进行传输的技术，其原理如图 1-1 所示。在接收端，经解复用器（亦称分波器或去复用器，De-multiplexer）将各种波长的光载波分离，然后由光接收机作进一步处理以恢复原信号。这种在同一根光纤中同时传输两个或众多不同波长光信号的技术，称为波分复用技术。

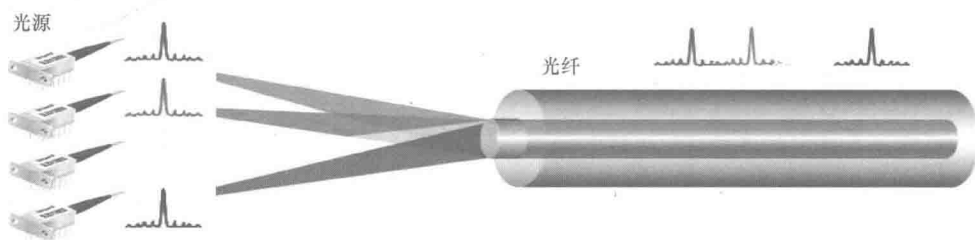


图 1-1 波分复用原理示意

WDM 和 DWDM (Dense WDM, 密集波分复用) 是在不同发展时期对 WDM 系统的称呼。在 20 世纪 80 年代初, 人们想到并首先采用的是在光纤的两个低损耗窗口 1 310 nm 窗口和 1 550 nm 窗口各传送 1 路光波长信号, 也就是 1 310 nm、1 550 nm 两个波长共传的 WDM 系统。随着 1 550 nm 窗口掺铒光纤放大器 (Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA) 的商用化, WDM 系统的相邻波长间隔变得很窄 (一般小于 1.6 nm), 且工作在一个窗口内, 共享 EDFA 光放大器。为了区别于传统的 WDM 系统, 人们称这种波长间隔更紧密的波分复用系统为密集波分复用系统。所谓密集, 是指相邻波长间隔而言, 过去 WDM 系统是几十纳米的波长间隔, 现在的波长间隔只有 0.2~1.2 nm, 其频谱分配如图 1-2 所示。密集波分复用技术其实是波分复用的一种具体表现形式。如果不特指 1 310 nm 和 1 550 nm 的两个 WDM 系统外, 人们谈论的 WDM 系统就是 DWDM 系统。

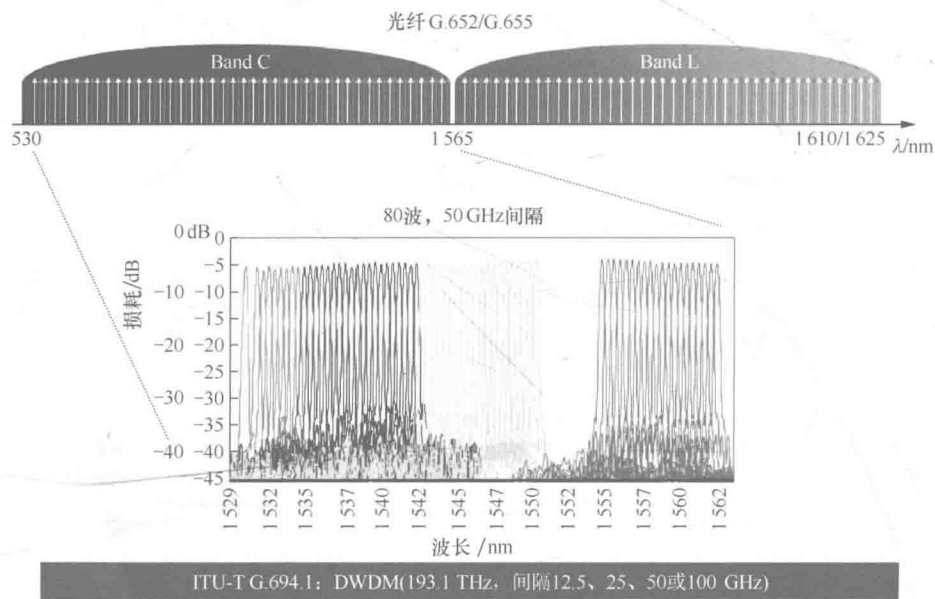


图 1-2 密集波分复用频谱分配

CWDM (Coarse WDM, 稀疏波分复用) 和 DWDM 的区别主要有两点: 一是 CWDM 载波通道间距较宽, 因此, 同一根光纤上只能复用 5~6 个左右波长的光波, “稀疏”与“密集”称谓的差别由此而来, CWDM 的频谱分配情况如图 1-3 所示; 二是 CWDM 调制激光采用非冷却激光, 而 DWDM 采用的是冷却激光。冷却激光采用温度调谐, 非冷却激光采用电子调谐。由于在一个很宽的波长区段内温度分布很不均匀, 因此温度调谐实现起来难度很大, 成本也很高。CWDM 避开了这一难点, 因而大幅降低了成本, 整个 CWDM 系统成本只有 DWDM 的 30%。CWDM 是通过利用光复用器将在不同光纤中传输的波长结合到一根光纤中传输来实现。在链路的接收端, 利用解复用器将分解后的波长分别送到不同的光纤, 接到不同的接收机。

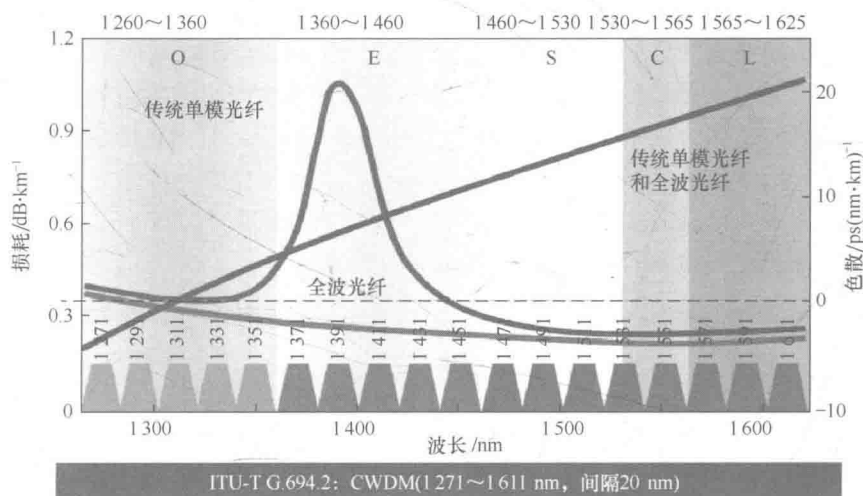


图 1-3 稀疏波分复用频谱分配

2. 灵活栅格技术

基于传统 WDM 技术的光网络技术可以实现端到端的全光连接, 波长通道是信号传输与带宽调度的基本单位^[1]。然而, WDM 光网络的根本性问题是: 为了降低组网实现难度, 在带宽分配与性能管理上采用了“一刀切”模式, 即通道间隔、信号速率与格式等参数都是固定不变的。这一问题导致了 WDM 光网络灵活性不高、带宽浪费严重, 已不能适应未来大容量、高速率、可扩展的光层传送需求。主要表现为: ① 通道建立时, 不能根据业务容量的实际要求灵活分配可用的带宽资源, 造成频谱利用率低下; ② 当通道容量需求为多个波长带宽时, WDM 光网络由于相邻波长之间的保护频谱间隔使得这类超波长业务无法在网络中适配承载; ③ 通道建立后, 无法动态调整通道间隔、信号速率以及调制格式, 难以适应业务和网络性能变化。因此, 研究如何进一步提升光网络的频谱利用效率成为发

展新一代光网络技术的迫切需求。

为了更好地利用频谱资源及有效的承载超波长带宽需求，针对 WDM 光网络缺乏带宽灵活性的问题，2008 年 9 月，日本学者在国际会议 ECOC 上首次提出了灵活栅格光网络概念^[2]。这一思想迅速受到广泛关注，并发展成为产业发展的主要技术路线^[3,4]。除此之外，在欧洲及美国，许多研究者也提出相似的网络架构，如欧洲学者提出的 EO-Net (Elastic Optical Network, 弹性光网络)^[5-7]和美国学者提出的 FWDM (Flexible WDM, 灵活 WDM) 网络^[8-11]。我国在此领域也展开了大量研究^[11-13]。随着构成灵活栅格光网络架构关键技术的不断成熟完善，例如基于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 调制方式的带宽可变 (Bandwidth-Variable, BV) 的光收发技术和带宽可变的光交叉连接技术，目前灵活栅格光网络已从概念阶段走向现实^[14]。

在灵活栅格光网络中，网络频谱资源被进一步细化分割。现有的 WDM 网络架构中符合 ITU-T 标准固定波长栅格被进一步细分为更窄小的频谱单元，这些窄小的频谱单元被称为频率隙 (Frequency Slot, FS)^[15,16]。与固定栅格网络相比，灵活栅格光网络是从频域上划分最小粒度单元，并可根据业务需求分配一定数量的邻接频谱单元，从而实现根据用户需求和实际业务量大小动态有效地分配适合的频谱资源和配置相应的调制方式，如图 1-4 所示。

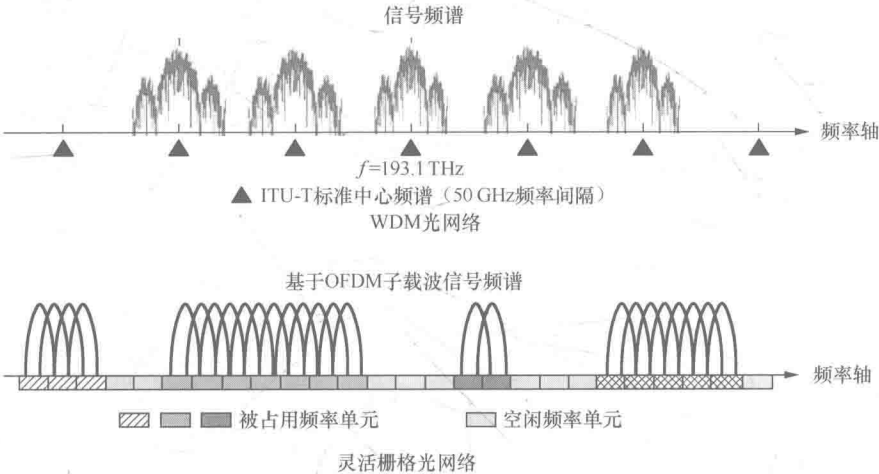


图 1-4 传统 WDM 光网络与灵活栅格光网络的频谱单元对比

灵活栅格光网络架构包含两类节点，分别是由带宽可变的光收发机 (BV-Transponder) 组成的网络边界节点和由带宽可变的交换单元 (BV-OXC) 组成网络的核心节点^[4]。其中，交换单元由连续带宽可变的波长选择开关 (BV-WSS) 组成。通过该单元，可将不同路由上不重叠的任意带宽频率资源交换到任意指定

输出光路上。同时,在网络边界节点,带宽可变的光收发机可采用单载波调制方式(例如 QAM、QPSK)或复杂多载波调制方式(例如 O-OFDM)。例如,借助于 O-OFDM 调制技术,发射机可以通过调整 OFDM 子载波的个数来控制信号带宽^[17]。灵活栅格光网络中带宽可变交换节点的基本结构如图 1-5 所示。

目前实现灵活栅格光网络的使能技术主要有 OFDM 技术和奈奎斯特波分复用技术(Nyquist-WDM)。

OFDM 的基本原理是把高速数据流进行串并变换,形成传输速率相对较低的若干个并行数据流,分别在不同的子信道中传输。由于子信道速率降低,符号周期会相应增加,这样就可以减少由于多径时延而造成的符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI)。在 OFDM 系统中,每个子信道的频谱是重叠的,这样就提高了频谱利用率。OFDM 系统的容量与子信道数目密切相关。通过调整子信道的数目,可以获得所需传输速率。

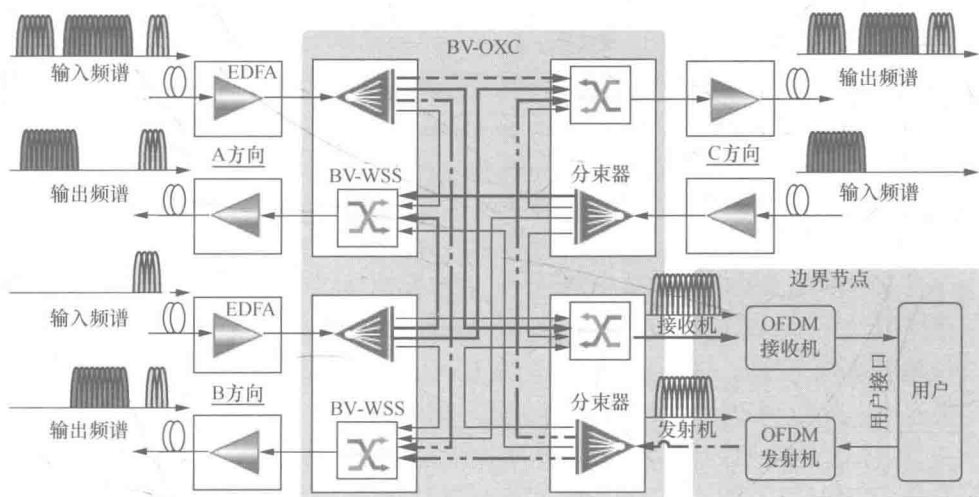


图 1-5 灵活栅格光网络中带宽可变交换节点基本结构

Nyquist-WDM 是另一种用于产生超级信道的技术。相对于 OFDM 信号的多载波调制来说,通常的单载波调制信号想要实现密集频谱的超级信道,需要在每个光子载波产生后,利用一个奈奎斯特滤波器来对频谱进行整形。整形后的子波带频谱接近一个矩形,能够极大地减小带外的能量泄露,从而减小子波带之间的串扰,其频谱带宽等于光子载波信号传输波特率^[18]。

1.1.2 时分复用技术

时分复用(Time-Division Multiplexing, TDM)就是将提供给整个信道传输信

息的时间划分成若干时间片(简称时隙),并将这些时隙分配给每一个信号源使用。光时分复用(Optical Time-Division Multiplexing, OTDM)和电时分复用类似,也是把一条复用信道划分成若干个时隙,每个基带数据光脉冲流分配占用一个时隙, N 个基带信道复用成高速光数据流信号进行传输。其实现原理就是将多个高速调制光信号转换为等速率光信号,然后放在光发射器里利用超窄光脉冲进行时域复用,将其调制为更高速率的光信号,然后再放到光纤里进行传输。

光时分复用通信系统原理如图 1-6 所示,系统主要由光发射部分、传输线路和接收部分等组成,光发射部分和光接收部分的功能介绍如下^[19]。

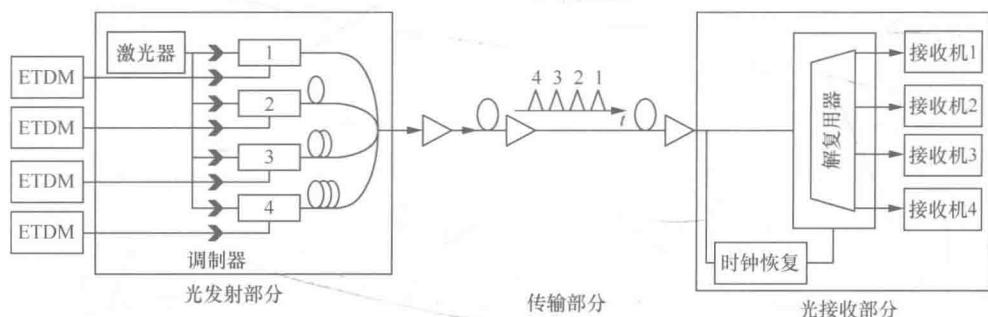


图 1-6 OTDM 通信系统原理示意

(1) 光发射部分

光发射部分主要由超窄脉冲光源及光时分复用器组成。超窄脉冲光源的种类包括掺铒光纤环形锁模激光器、半导体超短脉冲源、主动锁模半导体激光器、多波长超窄光脉冲源等。其所产生的脉冲宽度应小于复用后信号周期的 $1/4$, 应具有高消光比(高达 30 dB 以上), 并且脉冲总的时间抖动均方根值不应大于信道时隙的 $1/14$, 这是因为脉冲形状不是理想的矩形而是高斯脉冲, 信号源与时钟之间的时间抖动会引起解复用信号的强度抖动, 这种强度抖动会使信号的误码加大。

(2) 光接收部分

光接收部分包括光时钟提取、解复用器及低速率光接收机。

- 光时钟提取与电时钟提取的功能相同, 但光时钟提取必须从高速率的光脉冲中提取出低速的光脉冲或电脉冲, 例如, 从 160 Gbit/s 的光脉冲信号中提取 10 GHz 的时钟脉冲。提取出来的时钟脉冲作为控制脉冲提供给解复用器使用, 其脉宽必须特别窄, 因此时钟脉冲的抖动应尽可能小, 其相位噪声也应尽量低, 为保证时钟脉冲峰值功率的稳定应使提取系统的性能与偏振无关。能满足这些要求的全光时钟提取技术有锁模半导体激光器、锁模掺铒光纤激光器以及锁相环路(PLL)。使用较多的是 PLL 技术, 它是一种较为成熟的方案。

- 光解复用器的功能正好与光复用器相反, 在光时钟提取模块输出的低速

时钟脉冲的控制下,光解复用器可输出低速率光脉冲信号,例如,当时钟脉冲为 10 GHz 时,光解复用器可从 160 Gbit/s 信号中分离出 10 Gbit/s 信号,16 个相同的光解复用器可输出 16 组 10 Gbit/s 信号。光解复用器主要有半导体锁模激光器、光学克尔开关、四波混频(FWM)开关、交叉相位调制(XPM)开关及非线性光学环路镜(NOLM)等几种。

- 由解复用器输出的光信号为低速率光脉冲信号,然后可以用一般光接收机来接收。

1.1.3 空分复用技术

自 20 世纪 80 年代以来,随着时分复用技术的发展,光纤传输系统的容量几乎每隔两年就实现翻倍增长;进入 21 世纪后,波分复用技术的使用将系统的传输容量推上了一个新的台阶,如图 1-7 (a) 所示。就目前来看,光纤中的时域维度和频域维度已经被充分利用,以提高光网络带宽容量及频谱利用率。在时域维度,系统将时间进行切片完成时域资源的共享,以提升光纤传输系统承载信息的能力。例如,采用光分组交换或光突发交换的时分复用技术,可灵活适配以 IP 业务为代表的分组化需求,然而光缓存技术的瓶颈阻碍了其进一步发展。在频域维度,波分复用技术初步释放了光纤的潜能,将光纤的容量提高了上百倍。而正交频分复用技术和高阶调制技术在系统传输距离受损情况下又使得光纤的频谱效率得到了进一步的提升。之后随着光纤管道弹性化需求的日益迫切,灵活栅格技术走入了人们视野,该技术以超大容量、精细化带宽管理为特征,通过频谱工程与频谱调控技术,可更大程度提升传输系统的传输容量和频谱利用率。

尽管灵活栅格技术通过对光纤中的时域资源和频域资源进行深度开发,实现了传输容量的逐步增长,但其提升程度也面临着极限瓶颈。即使采用频谱效率极高的正交频分复用和超奈奎斯特速率调制等技术,由于数字信号处理算法无法完全补偿光纤信道的随机非线性损伤,单模光纤传输容量已逼近香农定理极限,潜在空间几乎为零。在这种背景下,迫切需要在光纤通信系统中采用新的复用维度以实现信道容量的有效增长。多核光纤传输、少模光纤传输、轨道角动量模式复用等多种空域维度复用技术(Space-Division Multiplexing, SDM)成为继单模光纤时代后进一步挖掘光纤容量的有效方式,如图 1-7 (b) 所示。

SDM 是一种利用空间分割构成不同信道,使同一频段在不同空间内得到重复利用的方法。SDM 有多种实现方案,其中,多核光纤传输是指在一个共同的包层区存在多根纤芯,通过大幅度提高单位面积的信息传输密度,进一步增加可以并行接入的信息;少模光纤传输是指在给定的工作波长上,在一根纤芯中传输若干种模式的光信号,通过使用模式选择复用器或滤波器,独立激发出不同的高阶模式,形成相互独立的传输信道;轨道角动量模式复用是指以光子轨道角动量作为