



“十三五”科学技术专著丛书

光纤通信网络最优化设计 理论和方法

李新 黄善国 尹珊 赵林 编著

Optimal Design Theory and Method of
Optical Fiber Communication Networks



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

策划人: 马晓仟
责任编辑: 马晓仟
封面设计: 七星博纳

光纤通信网络最优化设计理论和方法

Optimal Design Theory and Method of Optical Fiber Communication Networks

策划中心

电 话: 010-62285935

E-mail: 2449868465@qq.com

ISBN 978-7-5635-5865-0



定价: 48.00元



“十三五”科学技术专著丛书

光纤通信网络最优化设计理论和方法

李新 黄善国 尹珊 赵林 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书对光纤通信网络的路由资源分配问题、网络虚拟映射问题、多故障抗毁问题、网络安全问题进行分析,提出最优化设计的数学模型,旨在实现光纤通信网络高效、灵活、安全的业务承载。全书共7章。第1章介绍了光纤通信网络传输体制;第2章设计了光纤通信网络的路由与资源分配模型,同时阐述了光信号传输质量预测的方法;第3章设计了针对网络虚拟映射的数学模型;第4章阐述了基于内容连通的高抗毁光纤通信网络生存性技术;第5章阐述了基于信息隐藏的保密业务和普通业务一体传输的方案;第6章简单地介绍了CPLEX软件;第7章给出了2018年“华为杯”第十五届中国研究生数学建模竞赛B题的竞赛论文,供读者相互交流。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信网络最优化设计理论和方法 / 李新等编著. -- 北京:北京邮电大学出版社,2019.9

ISBN 978-7-5635-5865-0

I. ①光… II. ①李… III. ①光纤网—最优设计 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第189609号

书 名: 光纤通信网络最优化设计理论和方法

作 者: 李 新 黄善国 尹 珊 赵 林

责任编辑: 马晓仟

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 14.5

字 数: 378千字

版 次: 2019年9月第1版 2019年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5865-0

定 价: 48.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

光纤通信的容量大、电磁绝缘性好、时延低、节约有色金属等优势使光纤通信网络的应用范围遍及骨干网、城域网以及接入网,光纤通信网络已经逐渐成为我国核心的信息通信基础设施。从 20 世纪 70 年代开始,我国一直在深入地开展光纤通信网络的理论研究和实际的建设部署。工业和信息化部发布的通信业统计公报显示,2018 年,我国新建光缆线路长度为 578 万千米,全国光缆线路总长度达 4 358 万千米,可以足足绕地球赤道 1 000 多圈。与此同时,云计算、大数据、5G、虚拟现实、工业互联网、物联网、人工智能等新兴技术获得了蓬勃的发展,互联网大潮已经渗透社会生活的方方面面。这些新兴的互联网技术通常需要快速的数据访问能力、海量的数据处理能力、智能的数据管理能力、灵活的资源配置能力以及较低的成本消耗。光纤通信网络作为最基础的承载网,肩负着数据高效传输的重任,如何高速、高可靠、高效地进行多粒度、多类型、多等级业务的承载一直是光纤通信网络研究的重点。

光纤通信网络的一个典型优势是大容量。据报道,2019 年 2 月中国信息通信科技集团科研人员首次完成 1.06 Pbit/s 超大容量波分复用及空分复用的光传输系统实验,可实现一根光纤上近 300 亿人同时通话。可以看出,光纤通信网络的传输容量在不断提升。然而光纤通信网络理论上所能承载的容量与实际承载的容量存在着“margin”,也就是存在着盈余,这主要是由不能高效地使用光纤通信网络的资源造成的。比如在灵活栅格光纤通信网络中,频谱碎片的产生是不可避免的,然而在灵活栅格光纤通信网络进行路由与资源分配必须满足频谱连续性和频谱一致性约束,这就导致即使网络中存在大量空闲的频谱资源也不能够进行业务的承载,大量空闲的频谱资源以频谱碎片的形式存在,使网络资源浪费和网络的承载能力变低。光纤通信网络作为基础的承载网,可以对单播、多播、组播等多种类型的业务进行承载,可以对普通业务、保密业务等多等级业务进行承载,可以对不同服务质量要求的业务进行承载,可以虚拟出多个子网络,可以抵御自然灾害和人为破坏造成的业务中断,因此造成光纤通信网络资源效率不高的因素有多种。根据上述光纤通信网络的主要作用,可以凝练抽象出光纤通信网络需要解决的问题:路由与资源分配问题、多故障抗毁问题、虚拟网络映射问题、光通信安全问题等。并且这几类问题一般都属于非决定性多项式时间完全(NP-Complete)问题,没有多项式时间算法进行求解,问题复杂度随着网络规模和业务数量呈指数性增长趋势。目前光纤通信网络解决此类 NP-Complete 问题的主要手段有两种,一种是规划,另一种是启发式算法。规划通常采用整数线性规划的方式,根据目标进行约束条件的设计,利用软件求解,最后输出满足约束的最优方案。整数线性规划的优点是能够得出最佳的方案,缺点是约束条件设计复杂,求解过程需要消耗大量的时间,通常只适用于小规模网络、低业务量下的网络场景。启发式算

法通常利用各种策略选择可接受的解决方案,如常用的贪婪策略。启发式算法最大的优势是能够在可接受的时间内获得较好的解决方案,能够适用于大规模、大业务量的网络场景,主要的缺点是不能求得最优解,求得的解决方案有可能偏离最佳解决方案。虽然整数线性规划有诸多缺点,但是它能够求得最优解的优势是不可替代的,比如判断启发式算法的性能,就是将启发式算法和整数线性规划同时应用到小规模、低业务量的网络中,对比整数线性规划和启发式算法求得的解决方案的性能,从而佐证启发式算法的性能。此外,为了降低整数线性规划求解的复杂度,可以对整数线性规划进行分步求解。自从2016年AlphaGo火遍全球以来,人工智能获得了空前的繁荣发展,利用人工智能解决光纤通信网络的路由与资源分配问题、多故障抗毁问题、虚拟网络映射问题、光通信安全问题的工作也如火如荼地开展着。人工智能涵盖一大批算法,以深度神经网络算法为代表。深度神经网络具有强大的非线性建模能力,针对复杂庞大的问题能够求得较好的结果,可以预见人工智能算法将比启发式算法在光纤通信网络中具有更好的应用前景,或者在不远的将来,人工智能能够逐渐代替目前光纤通信网络各类算法。

本书侧重于利用整数线性规划对光纤通信网络中的路由与资源分配问题、多故障抗毁问题、虚拟网络映射问题、光通信安全问题等进行数学建模,对问题本质进行直观清晰的描述。然后本书利用CPLEX软件进行整数线性规划模型的求解和数据分析,并且给出部分实现的代码,方便光纤通信网络的初学者深入理解网络设计的数学本质,并能够使他们在此基础上进行更深入的研究。同时,通过本书,光纤通信网络管理运维人员可以方便地对已有网络进行优化和调整。本书也介绍了部分启发式算法在解决路由与资源分配、多故障抗毁、虚拟网络映射、光通信安全等问题时的思路和成果。此外,本书还介绍了如何利用深度神经网络进行光信号传输质量的预测,高精度的光信号传输质量可以提高光纤通信网络业务承载的成功率,并且研究人员可以根据预测的结果进行进一步的优化设计,提升光纤通信网络的资源效率。

在编写本书的过程中,作者参考了本研究团队已毕业硕士和博士的部分科研成果,其中第3章参考了王雨雨硕士和金斌武硕士关于虚拟化映射的科研成果,并已在文中进行了标注。同时,本书也参考了国内外同行已出版的文献资料,引用的部分在文中进行了标注。第6章CPLEX软件简介主要参考了IBM ILOG CPLEX Optimization Studio官网上的介绍和操作说明。第7章给出了本团队参加2018年“华为杯”第十五届中国研究生数学建模竞赛B题的二等奖获奖论文,供读者交流讨论。此外,本研究团队的高涛博士、唐颖博士、张路硕士、郭俊峰硕士对本书的编写工作也提供了很大的帮助,在此一并表示最深切的谢意。由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请同行和读者批评指正。

目 录

第 1 章 光纤通信网络传输体制介绍	1
1.1 光纤通信网络的重要地位	1
1.2 波长路由光纤通信网络	3
1.3 灵活栅格光纤通信网络	5
1.3.1 灵活栅格光纤通信网络系统组成	7
1.3.2 弹性光节点模型	10
1.4 空分复用光纤通信网络	12
1.5 本章小结	15
本章参考文献	15
第 2 章 路由与频谱分配问题	17
2.1 WDM 光纤通信网络 RWA 问题	17
2.1.1 RWA 问题的定义	17
2.1.2 光纤链路波长的划分	18
2.1.3 RWA 问题模型	21
2.1.4 ILP 模型程序	22
2.1.5 仿真结果和分析	24
2.2 灵活栅格光纤通信网络 RSA 问题	25
2.2.1 RSA 问题的定义	26
2.2.2 RSA 问题 ILP 模型	28
2.2.3 ILP 模型程序	29
2.2.4 仿真结果和分析	32
2.3 基于多播光树的多播承载问题	35
2.3.1 单光树问题定义	35
2.3.2 单光树 ILP 模型	36
2.3.3 ILP 模型和程序	38
2.3.4 仿真结果和分析	40
2.3.5 考虑链路故障概率的光树构建	48
2.4 基于光树的多播业务聚合问题	50
2.4.1 多播业务聚合背景	51
2.4.2 多播业务聚合模型	51

2.4.3	基于光树的多播聚合模型	55
2.4.4	仿真结果和分析	58
2.5	基于分布式子树的多播业务聚合问题	59
2.5.1	基于分布式子树的多播聚合背景	59
2.5.2	基于分布式子树的多播聚合模型	61
2.5.3	仿真结果和分析	70
2.6	多播光树共享保护问题	71
2.6.1	针对光树的生存性策略	71
2.6.2	基于分布式子光树的共享路径保护策略	73
2.6.3	PDSLTT-SP 的 ILP 模型	73
2.6.4	仿真结果和分析	77
2.7	多播聚合按需的频谱分配问题	85
2.7.1	按需的路由与频谱分配方案	85
2.7.2	按需的路由与频谱分配 ILP 模型	86
2.7.3	仿真结果和分析	89
2.8	光信号传输质量预测	97
2.8.1	光信号传输质量预测的意义	97
2.8.2	深度神经网络和 TensorFlow 平台简介	98
2.8.3	基于机器学习的光路/光树 OSNR 预测方法	101
2.8.4	基于机器学习的光路/光树可用性预测方法	102
2.8.5	数据结果和分析	103
2.9	本章小结	106
	本章参考文献	106
第 3 章	网络虚拟映射问题	109
3.1	数据中心光纤通信网络及网络虚拟化	109
3.2	虚拟网络的映射问题	113
3.2.1	虚拟网络的映射问题概述	113
3.2.2	虚拟网络映射模型	114
3.3	基于共享保护的虚拟化问题	116
3.4	基于共享保护的虚拟化映射模型	118
3.4.1	符号和变量及其含义	118
3.4.2	约束条件	119
3.4.3	目标函数	120
3.5	基于共享保护的启发式算法	120
3.5.1	SPVM 算法	120
3.5.2	基准算法	123
3.6	仿真结果和分析	123
3.6.1	仿真平台	123
3.6.2	仿真结果	124

3.7 本章小结	126
本章参考文献.....	127
第4章 光纤通信网络多故障抗毁问题.....	128
4.1 内容连通出现的背景	128
4.2 K-节点(链路)内容连通	130
4.2.1 K-节点(链路)内容连通的定义	130
4.2.2 K-节点(链路)内容连通的判定	131
4.3 K-节点(链路)内容连通网络的构建	132
4.3.1 K-节点(链路)内容连通的 ILP 模型	132
4.3.2 仿真结果与数据分析	134
4.4 节点到节点集最大不相交路径的计算	136
4.4.1 ILP 模型	137
4.4.2 ILP 结果	139
4.5 满足 K-节点(链路)内容连通的共享保护技术	142
4.5.1 基于完美匹配的共享判定原则	142
4.5.2 ILP 模型	143
4.5.3 ILP 结果	147
4.6 基于内容连通的多路径保护机制	150
4.6.1 多路径保护策略	150
4.6.2 基于内容连通的多路径保护策略	151
4.6.3 基于内容连通的多路径保护 ILP 模型	152
4.6.4 仿真结果和分析	161
4.7 本章小结	164
本章参考文献.....	165
第5章 光纤通信网络安全问题.....	166
5.1 光纤通信网络安全现状	166
5.2 相关安全防护技术	167
5.2.1 光学码分多址	167
5.2.2 光通信加密	168
5.2.3 频谱搬移机制	169
5.2.4 光子防火墙	169
5.3 光学信息隐藏技术原理	170
5.4 光学信息隐藏 ILP 模型	172
5.4.1 面向光学信息隐藏的路由资源分配 ILP 模型	172
5.4.2 普通业务和保密业务独立传输	175
5.4.3 保密业务隐藏于单个普通业务的协同传输 ILP 模型	179
5.4.4 仿真结果与数据分析	180
5.5 本章小结	181

本章参考文献	181
第 6 章 CPLEX 软件简介	183
6.1 CPLEX 软件介绍	183
6.1.1 集成开发环境	183
6.1.2 OPL	184
6.1.3 优化求解器	184
6.1.4 CPLEX 的优点	185
6.2 CPLEX 软件安装与使用	186
6.2.1 CPLEX 安装步骤	186
6.2.2 CPLEX 的简单使用	186
6.3 CPLEX 构建模型与样例测试	187
6.4 本章小结	188
第 7 章 第十五届中国研究生数学建模竞赛论文	189
7.1 问题重述	189
7.1.1 问题背景	189
7.1.2 需要解决的问题	190
7.2 模型假设	194
7.3 符号说明	194
7.4 问题 1 模型建立与求解	195
7.4.1 子问题 1 数学模型和结果	195
7.4.2 子问题 2 数学模型和结果	199
7.5 问题 2 模型建立与求解	200
7.5.1 网络参数配置	200
7.5.2 子问题 1 数学模型和结果	205
7.5.3 子问题 2 数学模型和结果	209
7.5.4 子问题 3 数学模型和结果	214
7.6 问题 3 模型建立与求解	218
7.7 本章小结	221
本章参考文献	222

第1章 光纤通信网络传输体制介绍

1.1 光纤通信网络的重要地位

我国的光通信起步于20世纪70年代。1966年,高锟博士和霍克哈姆发表了关于传输介质的论文《光频率的介质纤维表面波导》,指出利用光纤进行信息传输的可能性和技术途径,可以通过原材料的提纯制造出适合长距离通信使用的低损耗光纤^[1]。当时石英纤维的损耗高达1 000 dB/km以上,高锟等人指出:这样大的损耗不是石英纤维本身固有的特性,而是由材料中的杂质,如过渡金属离子的吸收产生的。材料本身固有的损耗基本上由瑞利散射决定,它随波长的四次方而下降,其损耗很小。因此有可能通过原材料的提纯制造出适合长距离通信使用的低损耗光纤。1976年3月,武汉邮电科学研究所的科研人员拉出了中国第一根光纤,该光纤短波长0.85 μm,衰减为300 dB/km。1995年10月,我国自行研制开发的第一套155 Mbit/s、622 Mbit/s同步数字体系(SDH, Synchronous Digital Hierarchy)光通信系统及设备通过了由邮电部、电信科学技术研究院和中国邮电工业总公司共同组织的鉴定验收。2019年2月,中国信息通信科技集团科研人员首次实现1.06 Pbit/s超大容量波分复用及空分复用的光传输实验,可实现一根光纤上近300亿人同时通话。该实验采用单模19芯的特种光纤,可在1 s内传输约130块1 TB硬盘所存储的数据。据报道,该系统设备在C+L波段内产生了375个光载波,基于硅光相干收发芯片实现了25 GHz通道内的178.18 Gbit/s DFTs-PDM-16QAM信号光收发,在单模19芯光纤内完成了光传输验证,频谱效率达到了113 (bit/s) · Hz⁻¹,传输总容量达到1.06 Pbit/s,实现了从“太比特每秒级”到“拍比特每秒级”的突破。此外,在2019年3月的光通信大会上,日本NTT公司报道了利用多核光纤实现100 Pbit/s传输的可能,然而实际实验达到的速度为118.5 Tbit/s,传输距离为316 km^[2]。可以看出,光纤通信的传输容量在不断地提升着,并且目前主要聚焦于利用空分复用(SDM, Space Division Multiplexing)技术来提升光纤的传输容量。如图1-1所示,本章参考文献[3]综述了提升光纤容量的各类技术,可以看出,光纤通信的传输容量平均每年增长1.4倍,利用时分复用(TDM, Time Division Multiplexing)技术、波分复用(WDM, Wavelength Division Multiplexing)技术、SDM技术逐步提升了光纤通信的传输容量。

随着光纤通信的容量不断提升,光纤通信网络已经是我国现代宽带网络的重要基础设施,建设高速、可靠、安全的光纤通信网络一直是我国的战略级规划。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》提出:“重点研究开发国家基础信息网络和重要信息系统中的安全保障技术,开发复杂大系统下的网络生存、主动实时防护、安全存储、网络病毒防范、恶意攻击防范、网络信任体系与新的密码技术等。”我国《“十一五”规划纲要》提出:“积极推进‘三网融合’。建设和完善宽带通信网,加快发展宽带用户接入网,稳步推进新一代移动通信网络建设。

建设集有线、地面、卫星传输于一体的数字电视网络。构建下一代互联网,加快商业化应用。制定和完善网络标准,促进互联互通和资源共享。”我国《“十二五”规划纲要》提出:“统筹布局新一代移动通信网、下一代互联网、数字广播电视网、卫星通信等设施建设,形成超高速、大容量、高智能国家干线传输网络。统筹布局新一代移动通信网、下一代互联网、数字广播电视网、卫星通信等设施建设,形成超高速、大容量、高智能国家干线传输网络。”我国《“十三五”规划纲要》提出:“构建现代化通信骨干网络,提升高速传送、灵活调度和智能适配能力。推进宽带接入光纤化进程,城镇地区实现光网覆盖,提供 1 000 兆比特每秒以上接入服务能力,大中城市家庭用户带宽实现 100 兆比特以上灵活选择;98%的行政村实现光纤通达,有条件地区提供 100 兆比特每秒以上接入服务能力,半数以上农村家庭用户带宽实现 50 兆比特以上灵活选择。”《中国制造 2025》提出:“加强互联网基础设施建设。加强工业互联网基础设施建设规划与布局,建设低时延、高可靠、广覆盖的工业互联网。加快制造业集聚区光纤网、移动通信网和无线局域网的部署和建设,实现信息网络宽带升级,提高企业宽带接入能力。”同时,“2018 宽带通信和新型网络重点研发计划指南”也对光纤通信网络进行了重点部署,其中项目“P 比特级光传输系统与关键技术研究”对光纤通信系统的传输容量提出了明确的技术指标。从上述国家制定的发展规划和计划指南可以看出,光纤通信网络在未来很长的一段时间内依然是科学研究和实际建设的重点。

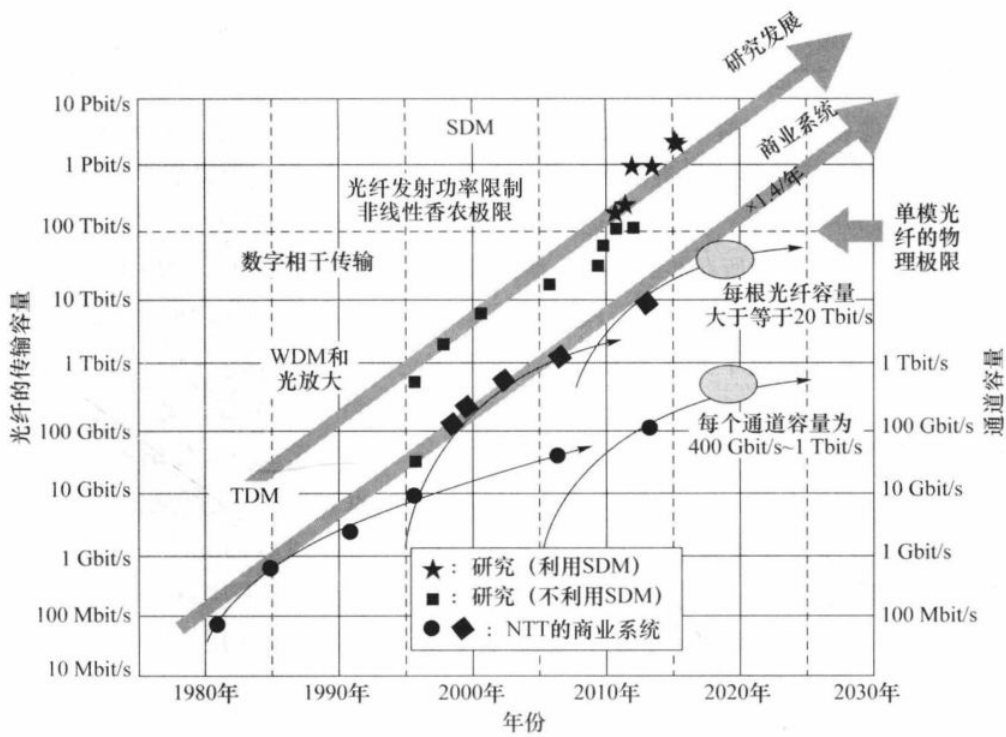


图 1-1 光纤通信传输容量提升的关键技术^[3]

光纤通信网络按照物理层采用的传输技术可以分为 TDM 系统、频分复用(FDM, Frequency Division Multiplexing)系统和 SDM 系统。对于 FDM 而言,当复用的频率采用几个固定间隔的频率,此时也称 FDM 为 WDM。下面分别介绍 TDM 系统、FDM 系统和 SDM 系统的网络模型和资源特征。

1.2 波长路由光纤通信网络

WDM 技术是一种特殊的 FDM 技术,它在一根光纤中同时传输多路光信号,多路光信号分别调制到不同频率的光载波上,多路光信号并行传输,可以成倍地提升光纤通信的容量。如图 1-2 所示,WDM 的基本原理是在发送端将数据调制到不同波长的光载波上,并利用复用器将不同波长的光信号组合起来,然后耦合到同一根光纤中进行传输,在接收端将耦合的光信号利用解复用器分开,恢复出原信号后送入不同的终端。

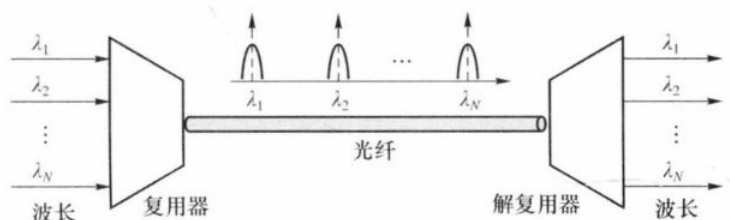


图 1-2 WDM 技术示意图

WDM 技术可以细分为粗波分复用(CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplexing)和密集波分复用(DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing)。DWDM 系统和 CWDM 系统的主要区别是波长之间的间隔,DWDM 系统中的波长间隔从 0.2 nm 到 1.2 nm,而 CWDM 系统波长间隔通常为 20 nm,CWDM 系统较 DWDM 系统具有更宽的波长间隔。虽然 CWDM 系统具有较宽的波长间隔,即 CWDM 系统比 DWDM 系统的传输容量要小,然而 CWDM 系统设备的制造成本比较低,设备体积小、易于搬运、维护简单,特别适用于传输容量相对不高的网络场景。WDM 技术采用并行的光载波进行数据的传输,它的优势包括:①提高了光纤通信的通信容量,从单个载波扩展到多个载波并行传输,更多的频谱资源被使用;②降低光纤通信网络的建设成本,一个光纤中可以同时传输多个不同波长的光载波,避免了大量光缆线路的铺设,通常光缆的铺设需要消耗大量的人力和物力成本,尤其是在超长距离传输的网络场景中;③对于 WDM 技术来说,每个并行的光载波可以按照需要选择相对应的传输速率、调制格式等参数,每个波长信道并不对上述参数进行硬性规定,也就是说,对传输信号是透明的;④WDM 作为最基础的承载网络,可以承载多种协议的数据,如 SDH 协议的数据和互联网协议(IP, Internet Protocol)的数据,无论数据采用什么协议都可以调制在光载波上进行传输;⑤WDM 系统组成简单,易于对网络进行扩容,同时在光层可以避免频繁的光电转化,降低对光电器件光电处理速度的要求^[4]。对于 WDM 系统来说,任意一条 WDM 链路需要完成双向的数据传输,这就产生两种处理方式,一种是采用一根光纤只传输一个方向的光信号,那么一条 WDM 链路需要由两根光纤来实现,两根光纤传播的光信号方向相反,称为双纤单向传输;另一种方式是在一条光纤中传输不同方向的光信号,这就要求不同方向的光信号占用不同的波长,称为单纤双向传输^[5]。如图 1-3 所示,按照通信原理中通信系统的分类,WDM 系统主要由光发射机、光放大器、光接收机、光监控信道、网络管理系统 5 个主要部分组成^[6]。光发射机主要负责产生不同的光载波,需要传输的数据信号通过光发射调制到光载波上,每个光载波具有幅度和相位两个参量,因此按照调制参量的不同,可以分为幅度调制、相位调制以及幅度相位调制。对光发射机的要求主要是:①由于光纤低损耗窗口有 3 个,分别为 0.85 μm 、1.31 μm 和 1.55 μm ,因此光发射机发射的波长必须与这 3 个低损耗窗口相对应,或者说光发

射机发射的波长能够在光纤中进行低损耗的传输；②对光发射机的一个重要要求就是光谱单色性要好，也就是说，光发射产生的光载波的光谱近似于脉冲光谱的样子，这是为了降低光纤色散对光载波的影响；③光发射机需要完成电信号到光信号的转换，因此要求光发射机具有较高的电/光转换效率，也就是说，在较低的驱动电流下能够有较为稳定的输出功率；④为了提高光源与光纤之间的耦合效率，光发射机发射光束的方向性要好，即远场的辐射角要小；⑤为了保证 WDM 系统的传输容量，对光载波的调制速率要高且具有较快的响应速度；⑥ WDM 系统需要长期稳定可靠地工作，这就要求发射机也能够在常温下连续工作且稳定性高。此外，从 WDM 系统的建设角度来看，还要求光发射机具有体积小、重量轻、安装使用方便、价格便宜等优点^[7]。光放大器主要的作用就是对光信号进行放大，光信号在光纤中传输会不可避免地受到噪声、散射、非线性效应、串扰等的影响，光信号的功率和传输质量随着传输距离的增加在不断恶化，为了保证光信号能够进行长距离传输，并且满足光信噪比或者误码率的要求，必须对光信号进行放大。光放大器主要包括半导体光放大器（SOA, Semiconductor Optical Amplifier）和光纤放大器两种。SOA 是由半导体材料制成的，根据激发方式的不同分为光致发光、电致发光和阴极发光等^[8]。光纤放大器又包括非线性光纤放大器和掺铒光纤放大器（EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier）。EDFA 的研制成功是光纤通信领域革命性的突破，EDFA 对衰减的光信号进行放大，克服了长距离传输对信号传输质量（QoT, Quality of Transmission）的影响，使得光纤通信具有长距离、大容量、高速率的特点。EDFA 是未来高速光纤通信系统、全光纤通信网络不可缺少的器件。光接收机的主要作用是将经光纤长距离传输后幅度被衰减、频谱被展宽的光信号转换为电信号，并经过放大、采样、判决最后恢复出原始的数字信息。光接收机的性能指标包括灵敏度和动态范围两个方面。光检测器是光接收机实现光信号到电信号转换的关键器件，其响应度和噪声直接影响光接收机的灵敏度。对光检测器的要求为：①检测波长需要与光纤的低损耗窗口相对应；②响应度要高，也就是说在一定的接收光功率下，能够尽可能地产生较大的光电流；③灵敏度要高，对比较微弱的光信号也能够检测到。除此之外，还要求光检测器性能稳定、可靠性高、寿命长、功耗和体积小^[9]。

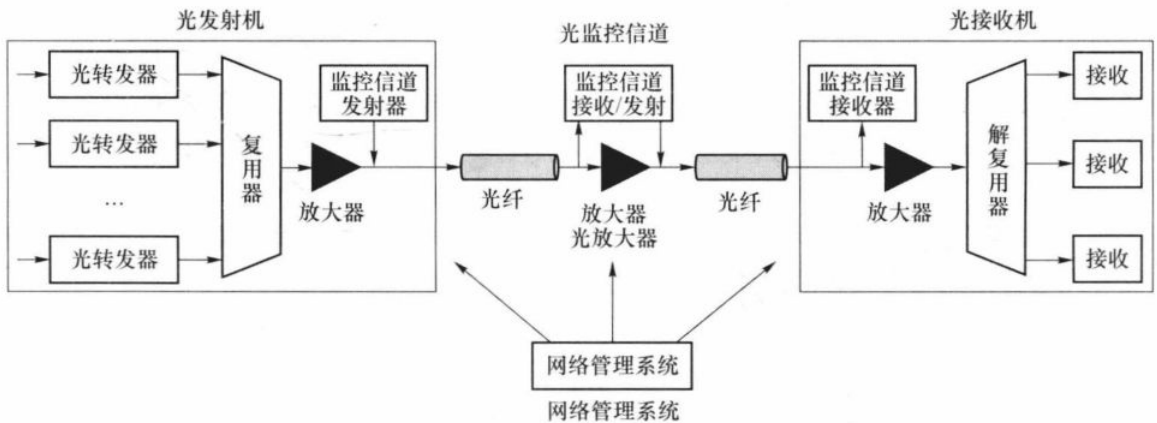


图 1-3 WDM 通信网络的组成

WDM 设备按用途可分为光终端复用器(OTM, Optical Terminal Multiplexer)、光线路放大器(OLA, Optical Line Amplifier)、光分插复用器(OADM, Optical Add-Drop Multiplexer)等。OTM 器件按照类型可以分为复用器和解复用器两种。复用器的主要作用是将多个光载波耦合到一起并在一根光纤中并行传输。解复用器的主要作用是在一根光纤中并行传输的

多路光载波分离出来,分离的光载波彼此不影响。OTM将波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ (这里假设一条光纤中可以传输的波长数目为 N)的光载波经复用器耦合到一起,然后对其进行放大并将波长为 λ_s 的光监控信道注入光纤中进行传输。在接收端,OTM首先把光监控信号取出,然后对光纤中的WDM光信号进行放大,经解复用器分离出 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ 个波长的光信号。在线路侧,每个传输方向的OLA先取出光监控信道(OSC, Optical Supervisory Channel)并进行处理,再将主信道进行放大,然后将主信道与OSC合路并送入光纤。OADM设备可以实现光信号的灵活上下路,每个OADM设备接收线路侧的光信号后,先提取监控信道,再将主光通道预放大,然后将波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_N$ 的光信号按波长取下一定数量后送出设备,要插入的波长经上下路单元直接插入主信道,再经功率放大后插入本地光监控信道,向远端传输^[10]。由于OADM设备可以实现光信号的灵活上下路,因此WDM技术可以支持点到点组网、链形组网、环形组网以及栅格组网等多种类型的组网模式。

1.3 灵活栅格光纤通信网络

尽管波长路由光纤通信网络在一定程度上满足了目前的网络宽带传输需求,然而WDM技术采用的是国际电信联盟电信标准化部(ITU-T, International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector)制定的固定栅格标准,将整个波长频带被划分为若干个波长子信道。WDM技术中固定的栅格、信号传输速率和调制格式带来的频谱分配的不灵活性会导致频谱利用率低下,主要表现在以下两方面:若实际带宽需求小于栅格的粒度,即使需要的带宽仅为子信道的部分容量,也必须分配一个完整的子信道,造成频谱资源的浪费;若实际带宽需求大于栅格的粒度,由于信号传输速率是固定的,能承受的最大负载也是一定的,所以必须将大带宽需求划分成几个频段,再分配多个信道来承载该信号,使传输效率变得极低。本小节的内容主要参考了本章参考文献[11]中关于灵活栅格光纤通信网络的网络模型介绍,文献[11]总结了近几年灵活栅格光纤通信网络的研究进展,分析了灵活栅格光纤通信网络产生的背景以及其节点结构和资源分配策略。如图1-4(a)所示,虽然业务1只需要分配25 GHz的带宽就能够满足传输需要,但是也必须占用50 GHz的带宽。而业务2需要120 GHz的带宽,单独一个波长不足以容纳整个业务,因此需要为业务分配3个波长子信道,再加上为了避免波长信道间的干扰还要保留一定间隔的保护带宽,实际分配的带宽将超过120 GHz。此外,由于受到电子瓶颈的限制,传统的光纤通信网络传输技术的灵活性能难以满足不断增长的业务需求,并且随着传输速度的增加,物理损伤变得愈发严重,大大限制了传输距离。同时,目前业务的多样性、不确定性和不可预见性急需网络能够动态分配带宽。

因此为了克服传统光纤通信网络传输技术的局限性,满足未来网络的需要,光纤通信网络传输技术需要朝着更高效、更灵活的方向发展。在此背景下,基于光正交频分复用(O-OFDM, Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术的灵活栅格光纤通信网络应运而生^[12]。O-OFDM技术将频谱划分为若干个相互正交的子载波。在业务传输时,先将高速光信号转换为若干低速率的子数据流,再调制到子载波上进行传输,这能带来极大的好处。首先,由于各个子载波的频谱是相互正交的,因此相邻子载波之间允许部分重叠;其次,O-OFDM能够根据不同传输距离需求为每个子载波设置不同的调制格式;且其不局限于固定粒度的频谱分配,能够根据不同带宽需求灵活分配子载波,这些特性都大大增加了网络的频谱利用率。此外,O-OFDM能够有效减小频率选择性衰落和窄带干扰的影响。灵活栅格光纤通信网络将固

定栅格的间距大大降低,从 50 GHz 减小到 6.25 GHz 或 12.5 GHz,此时每一个栅格成为一个频隙(FS, Frequency Slot)。在进行频谱分配时,可以根据业务带宽的大小灵活地分配合适数量的 FS 来配置光路,从而可以达到很高的频谱利用效率。如图 1-4(b)所示,业务 1 可以分配 2 个 FS 来完成光路的频谱分配;业务 2 可以分配 6 个 FS 来完成光路的频谱分配。在该例中,相比波长路由光纤通信网络,灵活栅格光纤通信网络的频谱分配方式使得在承载同样的业务的情况下,频谱资源可以节省 87.5 GHz。

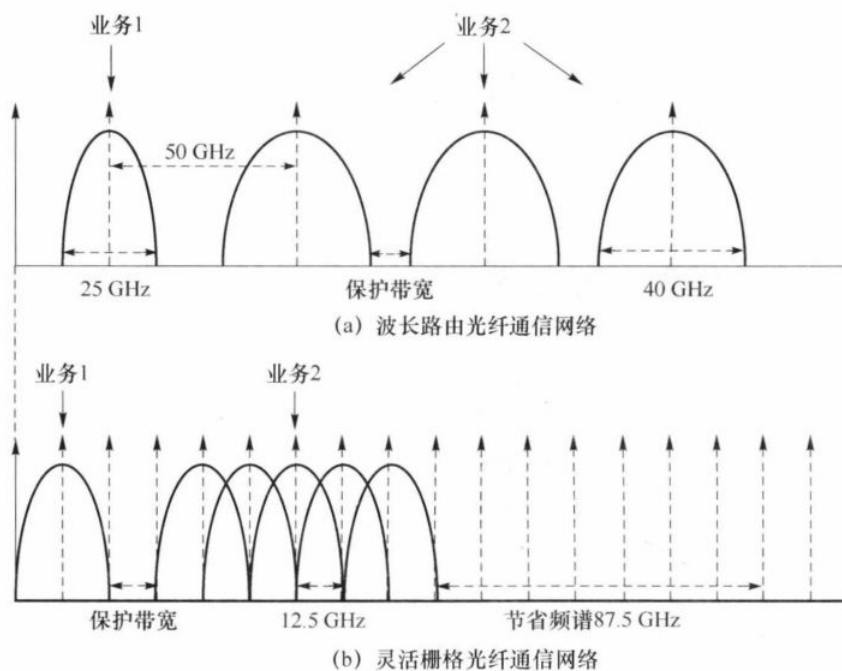


图 1-4 频谱分配

灵活栅格光纤通信网络不仅能够灵活地承载多速率业务,还能够弹性地分配频谱资源,这主要利用了带宽分片和带宽聚合技术。此外,灵活栅格光纤通信网络还具有节能、支持网络虚拟化等特性,下面将分别进行详细介绍。

(1) 带宽分片

传统的光纤通信网络需要将光路中所有的波长容量全部分配给信道,而灵活栅格光纤通信网络提供了频谱高效的带宽分片机制。若业务仅需要完整带宽的一部分,灵活栅格光纤通信网络可以分配相应的带宽。如图 1-5 所示,其中 40 Gbit/s 的带宽被分成 3 个大小分别为 5 Gbit/s、15 Gbit/s 和 20 Gbit/s 的子载波。同时,光路上的每个路由节点分配具有适当频谱带宽的交叉连接,以创建适当大小的端到端光路。因此,灵活栅格光纤通信网络允许提供部分带宽服务从而高效灵活地使用网络资源。

(2) 带宽聚合

在 IEEE802.3 中规定了执行链路聚合的标准方法。链路聚合通过将交换机/路由器中的多个物理端口/链路组合成一个逻辑端口/链路,实现业务在各个成员端口的流量分担。因此即使业务需求超过任意一个端口/链路的限制,也能够通过链路聚合保障该业务的传输。类似地,灵活栅格光纤通信网络具有带宽聚合的特性,能够将一个或者多个业务调制到若干个连续的 O-OFDM 子载波传输,且子载波之间不需要保护带宽,从而确保频谱资源的高利用率。在图 1-5 中,通过 O-OFDM 技术将 3 个 40 Gbit/s 的带宽复用组合成了 120 Gbit/s 的超级信道。

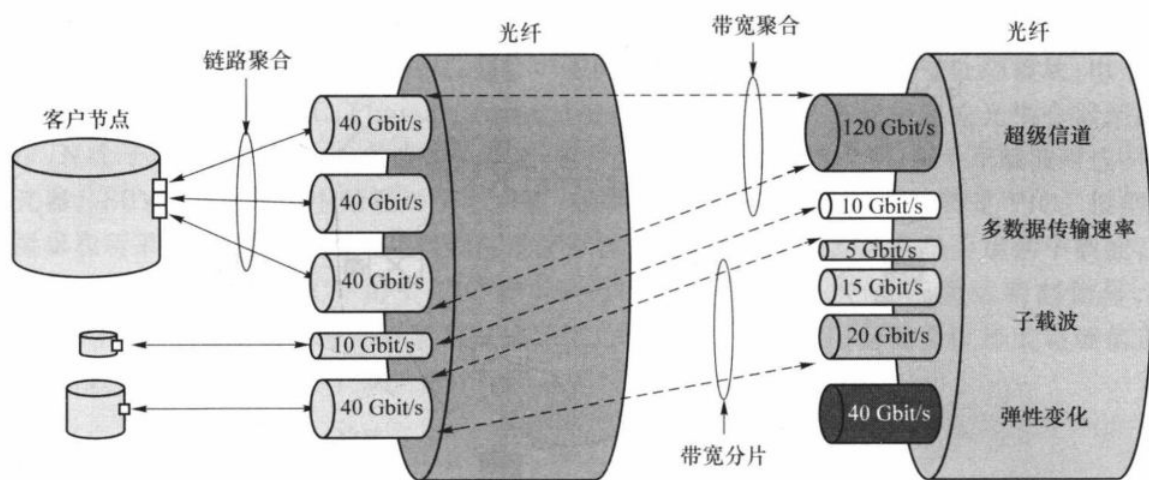


图 1-5 灵活栅格光纤通信网络的特性

(3) 适应多数数据传输速率

如图 1-5 所示,灵活栅格光纤通信网络通过灵活的频谱分配机制能够在光域中提供频谱高效的直接调节的多数数据传输速率。而在固定栅格的波长路由光纤通信网络中,低比特率信号之间的频率间隔会非常大,造成光带宽的浪费。

(4) 距离自适应的速率调整

波长路由光纤通信网络不支持距离自适应调制技术,因此不能根据节点距离自适应地选择调制格式,从而造成频谱资源的浪费。而灵活栅格光纤通信网络支持距离自适应的速率调制,能够根据传输业务的大小、传输距离以及损耗,通过改变子载波的数量和调制格式来支持距离自适应的线路速率。

(5) 节能

能耗和能效一直是网络运营商重点关注的领域。在网络负载较轻时,灵活栅格光纤通信网络能够通过停止使用部分 O-OFDM 子载波,减少光收发机和电子处理设备的使用,从而节省能耗。

(6) 网络虚拟化

网络虚拟化可实现光传输与光交换资源的充分共享,满足资源利用效率和用户安全性能的提升。灵活栅格光纤通信网络通过对光谱资源更精细的分割,对带宽请求更加灵活的适配,为实现光纤通信网络更加高效、敏捷和灵活的管理控制奠定了坚实的基础,使频谱资源的虚拟化成为可能,其允许利用 O-OFDM 子载波支持的虚拟链路实现光纤通信网络可视化。

1.3.1 灵活栅格光纤通信网络系统组成

本节主要讨论灵活栅格光纤通信网络的体系结构。图 1-6 所示为灵活栅格光纤通信网络的典型架构,其主要由带宽可变收发机(BVT, Bandwidth-Variable Transponder)和带宽可变光交叉连接器(BV-OXC, Bandwidth-Variable Optical Cross-Connect)组成^[13]。其中 BVT 通常在网络边界用于连接用户和网络,而 BV-OXC 在网络中心作为核心节点起到连接交换的作用。