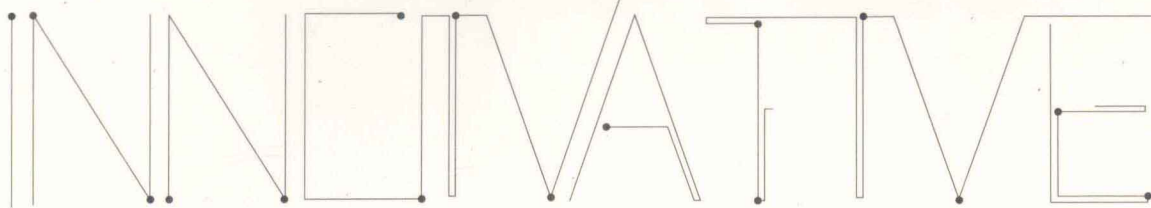




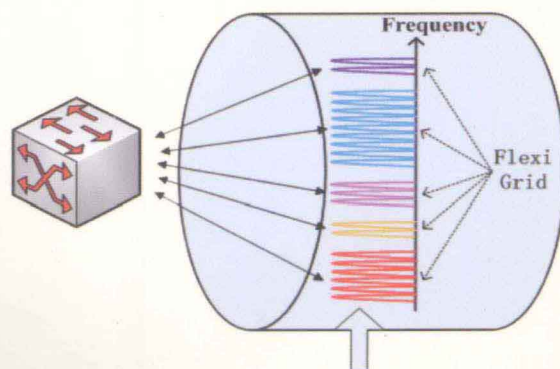
创新技术学术专著



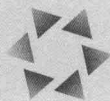
频谱灵活 光网络

Flexible Spectrum Optical Networks

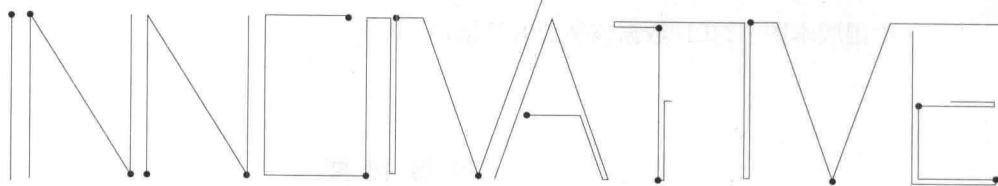
赵永利 张杰 纪越峰 著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



创新技术学术专著



频谱灵活 光网络

Flexible Spectrum Optical Networks

赵永利 张杰 纪越峰 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

频谱灵活光网络 / 赵永利, 张杰, 纪越峰著. — 北京: 人民邮电出版社, 2013.9
ISBN 978-7-115-32238-8

I. ①频… II. ①赵… ②张… ③纪… III. ①光纤通信—通信网—研究 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第147991号

内 容 提 要

本书是国内第一本频谱灵活光网络方面的中文书籍, 内容涉及频谱灵活光网络基础原理、关键技术、协议机制、算法策略等, 目的在于帮助读者能够更好地学习和掌握频谱灵活光网络的原理与技术。全书共分为 14 章, 第 1 章为绪论; 第 2 章介绍频谱灵活光网络的实现基础, 即波分复用(WDM)光网络; 第 3~7 章分别讲述以 WDM 为使能技术的波长交换光网络(WSON)的实现框架、信息编码、信令、路由和物理损伤检测与补偿方法; 第 8 章为频谱灵活光网络使能技术; 第 9 章为频谱灵活光网络信息模型; 第 10 章为路由与频谱分配技术; 第 11 章为频谱资源重构技术; 第 12 章是针对频谱灵活光网络的协议扩展方案; 第 13 章以软定义网络为基础, 讲述基于 OpenFlow 的频谱灵活光网络; 第 14 章讲述基于频谱灵活光网络的典型应用示例。

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。

◆ 著 赵永利 张 杰 纪越峰

责任编辑 代晓丽

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京天宇星印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 14

2013 年 9 月第 1 版

字数: 332 千字

2013 年 9 月北京第 1 次印刷

定价: 58.00 元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前 言

随着人们对信息需求的急剧增加和互联网的快速发展,信息交互量与日俱增,以宽带、安全、泛在、融合的新一代信息基础网络为载体,不同国家、不同文化、不同领域、不同行业被一“网”打尽,形成了跨国界、跨语言、跨人机、跨应用的虚拟化空间,正逐渐满足人与人、人与物、物与物的互动性要求。但未来网络的规模、结构与性能要求日益复杂,网络的发展面临高容量(Capacity)、灵活性(Agility)、能效性(Power-Efficiency)3个方面的严峻挑战。

作为支撑宽带业务承载的光网络,面对新需求与新挑战,技术上的更新换代已成业内共识。传统的波分复用光网络利用波长选路技术,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。在带宽分配与性能管理上采用了“一刀切”(One-Size-Fits-All)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全光网灵活性不高、带宽浪费严重、功耗效率低下,已不能适应未来大容量、高速率、可扩展的光层传送需要。因此,面向灵活栅格的新一代频谱灵活光网络应运而生。频谱灵活光网络的特点是通过引入可变带宽的光收发和光交换机制,在有效支持上层多粒度业务的同时(特别是超波长业务)能够有效地利用频谱资源,提高频谱资源的利用效率,因而得到了产业界和学术界的广泛关注,成为未来光网络发展的有效途径。

本书凝聚了笔者所在单位多年来的科研经验和实践总结,得到了国家“863”计划《新型超大容量全光交换网络架构及关键技术研究》、国家“973”计划《Pbits级可控管光网络基础研究》等科研项目的支持,同时也包含了王磊、王颖、陈博文、张佳玮、韩佳巍、张伟、郁小松、杨辉、陈赛、于一鸣、马辰、尹兴彬、张楷博士和彭甜甜、王晶晶、白云、王守宇、刘金艳、喻玥、崔雅迪和邓俊妮硕士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

2013年5月2日于北京

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 光网络发展历程	1
1.2 面临的问题与挑战	2
1.3 国内外研究现状	2
1.3.1 国外相关研究	2
1.3.2 国际标准化进展	7
1.3.3 国内研究现状	9
1.4 未来发展趋势	10
参考文献	11
第2章 波分复用技术	19
2.1 WDM 技术原理	19
2.1.1 DWDM	19
2.1.2 CWDM	20
2.2 WDM 系统组成	21
2.3 WDM 功能特点	22
2.4 可重构光分插复用器	23
2.4.1 ROADM 关键技术	23
2.4.2 ROADM 的技术要求	26
2.4.3 基于 ROADM 的波长重构	26
2.4.4 ROADM 小结	28
2.5 WDM 组网案例	28
2.5.1 DWDM 网络拓扑结构	28
2.5.2 DWDM 网络管理	30
2.6 小结	32
参考文献	32



第3章 波长交换光网络框架	33
3.1 WSON 技术背景	33
3.2 WSON 标准化现状	34
3.3 WSON 节点结构	35
3.4 WSON 节点设备应用类型	36
3.5 WSON 中的路由与波长分配控制问题	36
3.6 小结	37
参考文献	38
第4章 WSON 信息模型与信息编码	40
4.1 无损伤的 WSON 资源信息模型	40
4.1.1 网络节点信息模型和信息编码	41
4.1.2 链路信息模型和信息编码	54
4.2 基于光层损伤的网络信息模型和信息编码	57
4.2.1 物理层损伤信息	57
4.2.2 基于光层损伤的信息编码	58
4.3 小结	64
第5章 WSON 中的信令机制	65
5.1 WSON 信令技术需求	65
5.2 WSON 信令流程	65
5.3 GMPLS 信令协议扩展	67
5.4 小结	70
第6章 WSON 中的路由机制	71
6.1 WSON 路由控制机制要求	71
6.2 无损伤的 WSON 路由控制机制	71
6.2.1 路由和波长分配机制	71
6.2.2 路由协议扩展	73
6.3 基于光层损伤的路由控制机制	85
6.3.1 感知损伤的路由计算机制	85
6.3.2 基于光层损伤的路由协议扩展	87
6.4 小结	88

第 7 章 WSON 中光层损伤的评估与控制	89
7.1 链路损伤发现机制	89
7.2 WSON 光层损伤评估模型	90
7.2.1 单指标约束评估模型	91
7.2.2 多目标约束评估模型	92
7.2.3 综合评估模型	93
7.2.4 关联评估模型	94
7.3 光层损伤敏感的自适应控制机制	94
7.3.1 基于路由扩展的控制模型	95
7.3.2 基于信令扩展的控制模型	96
7.3.3 混合控制模型	98
7.3.4 自适应传输功能扩展	99
7.4 WSON 中的损伤补偿控制机制	100
7.5 小结	102
参考文献	102
第 8 章 频谱灵活光网络使能技术	103
8.1 频谱灵活光网络的概念	103
8.2 相干光探测与电均衡技术	105
8.2.1 相干接收电处理的一般流程	105
8.2.2 电处理技术常用算法模型	106
8.3 基于 OFDM 的灵活栅格技术	108
8.3.1 OFDM 基本介绍	108
8.3.2 OFDM 通信系统的基本原理和基本结构	109
8.3.3 基于 OFDM 的相干光通信	111
8.3.4 光 OFDM 频谱分割方案	113
8.3.5 光 OFDM 的灵活栅格技术	114
8.4 基于奈奎斯特 WDM 的灵活栅格技术	114
8.5 小结	115
参考文献	116
第 9 章 频谱灵活光网络信息描述模型	118
9.1 频谱灵活光网络约束限制条件	118



9.2 基于频谱连续度的资源描述方法	119
9.2.1 网络频谱碎片	119
9.2.2 链路可用频谱连续度	120
9.2.3 路径可用频谱连续度	121
9.3 基于路径连通度的资源描述方法	122
9.3.1 节点资源使用矩阵	122
9.3.2 节点频谱特征向量	123
9.3.3 路径频谱连通度	124
9.3.4 节点频谱特征向量计算示例	125
9.4 小结	126
参考文献	126
第 10 章 路由与频谱分配技术	128
10.1 路由与频谱分配问题描述	128
10.1.1 WSON 中路由与波长分配问题	128
10.1.2 频谱灵活光网络中路由与频谱分配问题描述	130
10.2 路由与频谱资源分配模型及体系方案	131
10.2.1 路由与频谱资源分配模型	131
10.2.2 基于 PCE 架构的路由频谱分配体系方案	132
10.3 路由与频谱资源分配算法	135
10.3.1 基于频谱连续度的动态频谱分配算法	135
10.3.2 基于业务分类的频谱分配方法	140
10.4 小结	146
参考文献	147
第 11 章 频谱资源重构技术	150
11.1 频谱碎片的产生	150
11.2 频谱重构判决机制	151
11.2.1 面向受阻业务的频谱重构判决机制	151
11.2.2 面向网络性能的频谱重构判决机制	152
11.3 频谱重构方法	153
11.3.1 基于路径频谱连通度的频谱重构算法	154
11.3.2 面向频谱规整度的频谱重构方法	165

11.4 频谱重构评估机制	166
11.4.1 评估指标	167
11.4.2 频谱重构效益 Q 值	168
11.5 小结	170
参考文献	170
 第 12 章 频谱灵活光网络协议扩展	172
12.1 路由协议扩展	172
12.1.1 协议概述	172
12.1.2 功能摘要	173
12.1.3 路由协议分组	173
12.1.4 LSA 功能描述	174
12.1.5 OSPF 模块架构设计	175
12.1.6 关于流量工程信息的扩展	176
12.2 信令协议扩展	176
12.2.1 RSVP 及 RSVP-TE 的基本原理	176
12.2.2 用 RSVP-TE 实现的 ASON 信令	178
12.2.3 用 RSVP-TE 实现频谱灵活光网络信令	180
12.3 PCEP 扩展	181
12.3.1 路径计算单元	182
12.3.2 PCE 算法技术实现模块架构设计	184
12.3.3 PCEP 及其扩展	187
12.4 小结	188
参考文献	189
 第 13 章 基于 OpenFlow 的频谱灵活光网络控制技术	190
13.1 软件定义网络与 OpenFlow 协议	190
13.1.1 SPN 的产生背景	190
13.1.2 SDN 的相关标准化技术	190
13.1.3 基于 OpenFlow 的 SDN	191
13.2 频谱灵活光网络可编程控制因素	192
13.2.1 速率可变的光收发技术	192
13.2.2 带宽可变的光滤波技术	194



13.2.3 高度可重构的光交换节点结构	195
13.3 基于 OpenFlow 的频谱灵活光网络控制模型	195
13.4 面向频谱灵活光网络的 OpenFlow 协议扩展方案	196
13.4.1 基于 OpenFlow 的带宽可变光交换机	196
13.4.2 基于 OpenFlow 的流表信息扩展	197
13.5 小结	198
参考文献	198
第 14 章 频谱灵活光网络典型应用示例	200
14.1 针对光信号串扰的发射机自适应调节	200
14.1.1 技术研究背景	200
14.1.2 自适应调节系统设计	201
14.2 频谱灵活光网络中频谱资源碎片的级联方法	203
14.2.1 技术研究背景	203
14.2.2 带宽灵活光网络频谱资源碎片级联实现系统	204
14.2.3 带宽灵活光网络频谱资源碎片的级联方法及流程	205
14.3 基于带宽压缩的频谱灵活光网络业务恢复方法	207
14.3.1 技术研究背景	207
14.3.2 基于带宽压缩的业务恢复流程	208
14.3.3 压缩通道保护带宽的恢复路由策略	209
14.3.4 基于调制阶数可控压缩业务带宽	211
14.4 小结	212
名词索引	213

第1章 绪论

1.1 光网络发展历程

信息通信是当今全球创新性最为活跃、渗透性最为广泛、带动性最为显著的行业领域之一，在不断增长的业务需求以及技术进步的驱动下，持续保持着高速发展水平。截至 2011 年底，我国移动电话用户数接近 10 亿，网民总人数突破 5 亿，互联网国际出口带宽已达 1.4 Tbit/s。我国骨干网的通信速率已经步入 80×40 Gbit/s 的 Tbit/s 时代，单通道 100 Gbit/s 高速波分复用（WDM）光传输技术和 10 Tbit/s 以上的大容量光传送网（OTN）技术也将逐渐成熟并服务现网。随着宽带业务的普及和三网融合、物联网等重大战略的实施，在我国发展超大容量、动态灵活的全光网新技术成为必然趋势和必经之路。

由于世界范围内全光网仍处在研究阶段，尚未形成一整套统一的标准。国际上比较认同的全光网定义是：信号在交换和传输过程中始终以光的形式存在，只有当进、出网络需要进行电光和光电转换时进行处理。全光网节点利用光波信号携带信息并实现动态传送与组网等功能，可显著提高网络的宽带互联能力和路由交换效率，增强通信系统的灵活性、扩展性和可靠性，保障未来网络融合应用。

早在 20 世纪 90 年代，全光网就已进入研究视野。利用 WDM 技术完成对光层信号转发的设想，直接导致了全光网的产生，并随着 WDM 传输系统的广泛铺设而掀起全光网络研究热潮。到目前为止，已被广泛应用的面向光路连接的全光网发展可分为两个阶段：第一个发展阶段是以小规模静态波长路由为特征的固定波长路由全光网络，其使能技术包括光分插复用、光交叉连接技术等，在这种网络架构下，波长路由取决于光纤物理接口连接，一旦预置无法在线更改；第二个发展阶段是以大容量端到端波长交换为特征的波长可重构全光网络，如 WSON（Wavelength Switched Optical Network）交换节点中使用可重构光分插复用（ROADM）设备，可在线实现波长级业务的动态调度。

综上所述，全光网络的这两个发展阶段都是采用传统 WDM 技术实现的。通过 WDM 波长选路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]。在带宽分配与性能管理上，这两代全光网采用“一刀切”（One-Size-Fits-All）模式，即通道间隔、信号速率与格式等参数都是固定不变的，网络只提供波长级的业务接口，端到端节点之间的流量可能不够充满整个波长，也不能满足超波长业务的应用需求。



1.2 面临的问题与挑战

波长路由全光网由于其在带宽分配与性能管理上采用“一刀切”的固定模式,导致网络灵活性不高、带宽浪费严重、功耗效率低下。不断增长的大容量、高速率业务需求以及不断扩大的网络规模,对波长路由全光网提出了挑战。当前的全光网面临的挑战主要表现在如下几个方面^[2]。

- 在建立波长通道时,不能根据业务容量的实际要求灵活分配可用的带宽资源,容易产生频谱碎片。按照 WDM 标准,只有位于规定栅格位置的波长可以分配给用户,而均匀的波长间隔直接决定了通道可用带宽的大小,与用户容量和数据速率无关。目前的波长路由全光网在建立波长通道时已分配了固定的光路带宽,必然存在超量配置现象,如果节点之间的流量低于波长可用容量,将导致带宽浪费。例如 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 的不同数据速率同样采用 50 GHz 的标准通道间隔,在传输 10 Gbit/s 信号时,通道带宽没有得到充分利用。

- 波长通道一旦建立,其光层可用带宽不能动态调整,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。由于当前波长通道光发射/接收机的工作速率以及中间转发节点的交叉带宽间隔固定,不能及时响应用户容量的变化,按需增加或减少波长通道占据的带宽,提高光纤利用率。同时,固定通道带宽限制对全光组网的生存性也会带来不利影响,一条失效光路只有在迂回路由带宽相等或超出原始带宽条件下才能得到恢复。

- 由于光纤损伤影响,不同速率、格式的全光信号具有不同的传输性能,物理属性固定配置的波长通道无法满足光路重构引起的传输质量动态可变要求。例如,全光交换造成端到端波长通道的路径变化,使得交换前后传输距离增加或缩短,接收端的信号质量也会相应发生改变。传统的波长通道由于光层物理属性固定配置,无法自动适应这一变化,需要引入针对信号速率、格式等的动态调整能力,以最大程度地匹配光路传输条件,优化通道性能。

总结起来,如何根据用户需求合理地分配全光网带宽资源是问题的关键。当前的波长路由全光网采用“一刀切”模式,导致网络灵活性不高、带宽浪费严重、功耗效率低下,究其原因缺少光层带宽调整、性能监测与调节、动态网络控制和管理的的能力。为适应未来大容量、高速率的传送需要,必须从技术上寻求提高资源整体利用率的解决方案。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 国外相关研究

针对 WDM 光网络缺乏带宽灵活性的问题,2008 年 9 月,日本 NTT 公司首次提出了频谱切片弹性光网络(Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network, SLICE)的概念^[3~5]。这一思想迅速受到广泛关注,并发展成为频谱灵活全光网络的解决方案。目前,基于频谱灵活的全光网络技术已经成为近年来光网络领域最重要的研究热点之一。下面就频谱灵活全光网络的体系架构、物理层实现机制、频谱资源分配及优化策略、生存性及协议

控制机制等几个方面的国外相关研究现状进行简单介绍。

(1) 频谱灵活全光网络的体系架构

目前,针对频谱灵活的全光网体系架构,日本、欧盟、美国等各个国家和地区的研究工作者分别提出了各自具体的网络名称。日本 NTT 公司的 Jinno M 等人在光通信领域顶级会议 ECOC2012 上首次提出频谱切片弹性光网络概念,并在此基础上展开深入研究^[6-10]。其中在参考文献[3]中详细介绍了 SLICE 作为一种新颖的、高频谱效率、可扩展的光传送网络体系架构,能够提供子波长业务通道和超波长业务通道,满足动态高效的带宽服务需求。

在欧盟, Olivier Rival 和 Alcatel-Lucent Bell Lab 联合提出的弹性光网络 (EO-Net) 是目前正在积极开展的全光网研究项目^[11-13]。这个项目旨在设计并展示一种基于“弹性”的新型网络概念,改善并提高 WDM 网络的资源利用率。“弹性”的含义代表一系列在当前网络中固定的通信参数,如光信号速率、调制格式、通道间波长间隔,在新型网络结构中变得可调节。因此,这种弹性的特性使得传输参数、网络结构和业务特性之间的映射更加紧密,这些优点将大幅提升网络容量,有效降低每比特成本,使网络扩展性增强并更加高效节能。

在美国,基于频谱灵活的全光网被定义为灵活波分复用网络 (Flexible Wavelength Division Multiplex, FWDM)^[14-16]。在参考文献[14]中, Gringeri S 等人提出了 FWDM 网络架构,这种网络架构能够支撑格型网络拓扑,支持动态容量分配、自动网络控制、光路自动建立,并将为未来光网络的发展提供重要依据。另外,由 Finisar 公司提出的一项名为 Flex Grid 的全光网研究项目正在积极的展开过程中^[17]。Flex Grid 网络旨在强调面向灵活栅格的网络架构。参考文献[17]中讨论了这种网络架构下带宽可变交叉节点的基本设计结构,包括波长无关性、方向性、连接上下路等基本特征。在 2013 年光通信领域顶级会议 OFC 上, Mathieu Tahon^[18]等人阐述了现有 WDM 网络向 Flex Grid 网络演进的不同可能性。图 1-1 为参考文献[18]总结的 Flex Grid 网络的演进趋势。本文预言,尽管当前技术还处于发展初期,但 Flex Grid 网络必将成为未来骨干网的架构基础,其演进方向有 3 种可能: Flex Grid 路线、Flex Grid 演进路线、DWDM 演进路线。其中, Flex Grid 演进路线的成本风险最低,既满足日益扩大的数据传输需求,又综合考虑了技术发展成熟性和设备成本。

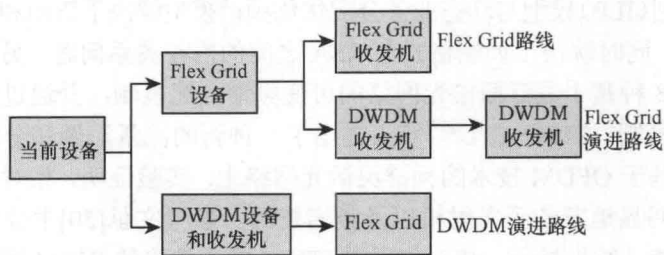


图 1-1 Flex Grid 网络的演进选择^[18]

(2) 频谱灵活全光网络的物理层实现

频谱灵活全光网的物理层关键技术主要包括以光 OFDM 调制技术为代表的带宽可变光收发技术^[19-24]、以带宽可变 WSS (Bandwidth Variable WSS, BV-WSS) 为主要器件的带宽可变交叉技术^[25-29]及频谱灵活光网络中物理损伤研究^[30-34]。

在带宽可变光收发技术的研究中,参考文献[35]提出并展示了一种比特率灵活可调



的全光 OFDM 光收发机。通过这个光收发机成功产生了速率为 107 Gbit/s、42.8 Gbit/s、32.1 Gbit/s 和 10.7 Gbit/s 的光信号,并且速率为 107 Gbit/s 的信号在 40 km 长无色散补偿的单模光纤中成功传输。在参考文献[23]中综述了到目前为止的多载波调制技术的发展现状及未来发展趋势。

在带宽可变交叉技术的研究中,参考文献[35]中首先提出使用 BV-WSS 作为核心模块的带宽可变交叉节点结构。在 2012 年 3 月召开的 OFC/NFOEC2012 会议上, NICOLAS K 等人^[23]提出了一种新的 $N \times M$ 波长选择连接器,该波长选择连接器是基于一种具有灵活滤波通带的单 LCOS。参考文献[26]中阐述了与传统 WDM 网络相比,频谱灵活光网络中使用带宽可变交叉节点的代价评估。

针对频谱灵活光网络中的物理损伤研究, RIVALO 等人^[30]考虑信道之间的相互串扰的非线性影响,在 5~100 Gbit/s 的弹性频谱光网络中,研究了光的非线性效应对传输系统的性能影响,特别是混合调制格式传输与非线性串扰之间的内在制约关系,并设计了各种不同的传输系统,达到降低光传输层的非线性对业务传输质量的影响。CAI X R 等人^[31]提出了一种自适应的传输质量再生机制,这种机制融合了光路重路由技术和调制格式技术,用于应对灵活栅格光网络中的实时损伤,通过平台测试显示了这种新的再生机制具有无错的特性。

(3) 频谱灵活全光网络频谱资源分配及优化策略

频谱灵活光网络由于在资源分配过程中需要考虑多种约束条件,因而与波长路由光网络相比,其资源分配及优化过程相对复杂。在这方面的研究主要集中在路由及频谱分配(RSA)策略研究^[36~63]及网络资源频谱重构策略研究^[64~80]。

在路由与频谱资源分配策略研究方面,参考文献[36~43]在频谱灵活光网络体系结构的基础上,基于用户提交的业务请求信息,提出了基于距离自适应频谱资源分配策略。这种策略的特点是: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,并配置相应的调制方式;在分配频谱资源时,根据距离的长短动态调整分配频谱资源粒度的大小。通过动态分配与自适应调整策略,网络的频谱资源利用率得到有效的提升。针对频谱效率优先, CHRISTODOULOPOULOS K 等人^[44~47]提出了弹性带宽分配算法,并运用整数线性规划(ILP)模型与动态业务分配优化频谱模型解决了路由和频谱分配(RSA)的优化机制问题,同时解决了调制格式与 RSA 之间的内在关系问题。另外, VELASCOL L 等人^[48]提出了 3 种基于灵活栅格光网络的可变频谱分配机制,并通过大量的实验数据验证不同的分配机制。ZHANG G^[49]等人提出了一种新的流量汇聚和分发的疏导技术,该技术是建立在基于 OFDM 技术的频谱灵活光网络上。实验证明,相对于没有流量疏导的情况,该技术明显地节约了发射机以及频谱资源。参考文献[50]中分析了频谱切片光网络上的多播性能。结果显示,相对于固定 ITU-T 频谱栅格的 WDM 网络来说,对多播业务进行灵活的频谱分配可使光网络的阻塞率明显降低。

在网络频谱资源重构策略研究方面, PATEL AN 等人^[64, 65]提出了频谱灵活光网络中的频谱重构问题,并使用 ILP 算法和两种启发式算法实现频谱重构。仿真实验证明,网络频谱重构过程在保证受损业务连接个数最少的情况下,使可用频谱有效利用并减少频谱碎片的产生。参考文献[66]在基于带宽自适应调制的基础上设计了一种动态的频谱重构算法,仿真实验表明,通过该算法网络阻塞率性能可以优化 10%以上。参考文献[67, 68]

中设计了一种在频谱灵活光网络中具有频谱变换能力的节点结构,提出并设计了相应的频谱重构策略。参考文献[69]中在实际光网络中实现了频谱重构策略。参考文献[70]评估了动态弹性光网络中的中断最小化频谱重构算法,并且在重构过程中采用了距离自适应调制。参考文献[71]提出了一种基于光信道重调的频谱重构技术,并且实现了无中断、无冗余收发机和重平衡操作的频谱重构。在2013年OFC上,参考文献[72]提出了一种基于独立集的辅助图模型和频谱重构策略,以降低阻塞率和提高频谱利用率。参考文献[73]论证了频谱灵活光网络中利用灵活发送机和接收机进行频谱重构的可行性。参考文献[74]提出了若干种基于频谱重调技术的带宽无损频谱重构算法。

(4) 频谱灵活全光网络生存性及协议控制机制

频谱灵活光网络中,带宽可变特征给网络带来了新的功能,例如使用带宽压缩机制的网络生存性策略。与此同时,这种策略需要控制平面使用扩展的GMPLS信令协议来完成。因此,频谱灵活光网络的生存性^[81~85]及协议控制机制^[86,87]也是重要的研究部分。

在弹性光网络中,为了保证业务的可靠性与生存性,提高业务的成本效率与生存性能,参考文献[81~83]提出了一种保护带宽资源不足时带宽可压缩的恢复机制,针对可用保护带宽资源的不足,通过调节源端的调制格式与传输的码速率,实现能够传输恢复业务的工作通道。此方法能做到尽力而为地恢复受损业务,并在光层与用户层进行恢复业务信息的有效互动,实现控制平面灵活快速恢复受损业务,提高频谱灵活光网络的生存性能。另外,SHAO X等人^[84]提出相对于传统的WDM网络,基于OFDM的光网络的备份共享更加复杂且更具有挑战性,基于此,他们提出并验证了备份共享策略。通过时域带宽共享、能效优先和高带宽压缩的生存性恢复技术,实现动态按需的业务接入机制。

在协议控制机制研究方面,参考文献[104]中提出并实现了一种基于GMPLS控制平面的分布式频谱分配方法,该方法在信令前向传播过程中计算可用频谱资源信息,在信令到达目的节点时分配资源信息。在参考文献[88]中,具体设计并实现了频谱灵活光网络控制平面的功能结构,结合路径计算单元(PCE)技术,提出一种路由和调制格式分配(Routing and Modulation Assignment, RMA)方法。

ECOC2010-ECOC2012会议、OFC2010-OFC/NFOEC2012会议、OECC等会议中,在频谱灵活光网络频谱调控方面的代表性研究成果见表1-1^[9]。图1-2为参考文献[9]中总结的频谱灵活光网络的技术发展脉络。表1-2中对比了基于频谱灵活光网络技术与传统波长路由光网络技术^[9]。

表 1-1 2010-2012 年度关于频谱调控方面代表性研究成果^[9]

路径配置	静态	准动态	动态
光路径带宽	指标: 所需资源(频谱利用效率)		指标: 阻塞率
最小数目: 混合线路速率	1. A. N. Patel, <i>et al</i> , OFC 2011, OTuI2. 2. O. Rival, <i>et al</i> , OFC 2011, OTuI4. 3. A. Klekamp, ECOC2012, Mo. 1. D. 1	1. A. N. Patel, <i>et al</i> , OFC2011, OTuI8. 2. W. Paul, <i>et al</i> , OFC2012, OTh3B. 5	1. S. Thiagarajan, <i>et al</i> , OFC2011, OTuI6. 2. X. Wang, <i>et al</i> , ECOC2011, Mo. 2. K. 6. 3. K. Axel, <i>et al</i> , OFC2012, Oth3B1



(续表)

路径配置	静态	准动态	动态
光路径带宽	指标: 所需资源 (频谱利用效率)		指标: 阻塞率
比特率自适应: 更好的粒度	1. Jinno <i>et al</i> , IEEE Com. Mag, 2010 2. W. Zheng, <i>et al</i> , OFC2010, OWR5. 3. K. Christodoulopoulos <i>et al</i> , ECOC 2010, We. 8. D. 3. 4. A. Klekamp <i>et al</i> , ECOC 2010, P5.05. 5. Y. Zhang, <i>et al</i> , OFC2011, OTuI1. 6. A. N. Patel, <i>et al</i> , OECC 2011, 7A4_2	Y. Sone, <i>et al</i> , ECOC 2011, Mo. 1. K. 3.	1. G. Shen, <i>et al</i> , OFC2011, OTuI3. 2. K. Christodoulopoulos <i>et al</i> , OFC2011, OTuI5. 3. K. Wen, <i>et al</i> , ECOC2011, Mo. 2. K. 4.
距离自适应	1. H. Takara, <i>et al</i> , ECOC 2010, We. 8. D. 2. 2. T. Takagi, <i>et al</i> , ECOC 2010, We. 8. D. 5.	C. Politi, <i>et al</i> , ECOC2012, Tu. 3. D. 3	1. T. Takara, <i>et al</i> , OFC2011, OTuI7. 2. T. Takara, <i>et al</i> , ECOC 2011, MO. 2. K. 3.

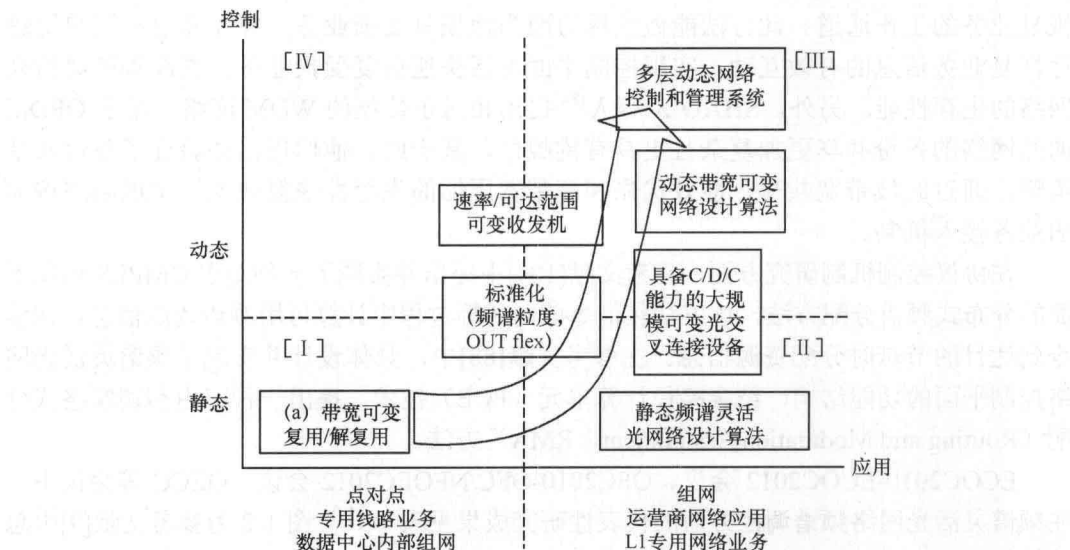


图 1-2 频谱灵活光网络的技术发展脉络

表 1-2 基于频谱灵活光网络技术与传统波长短路由光网络技术对比

应用技术	每比特光纤成本 (等价于利用效率)	大规模灵活的ROADM	客户系统规模	收发机	复用/解复用器	运营成本
点到点 (静态) [I]	☹☹			0	☹	0
点到点 (动态) [IV]	☹		0	0~☹	☹	0
组网 (静态) [II]	☹☹	☹	0	0	☹	0~☹
组网 (动态) [III]	☹	☹	☹?	0~☹	☹	☹☹

☹: 成本降低; ☹: 成本升高; ☹: 主要成本部分

1.3.2 国际标准化进展

在国际标准化进展方面,主要针对频谱灵活全光网络的标准进展情况进行简要介绍。

(1) ITU-T 标准进展

ITU-T G.694.1 标准^[91]中规定了光传送网中使用的频率栅格宽度,针对频谱灵活光网络中的“频率隙”概念,ITU-T G.694.1 标准进行了最新修订。修订后标准阐述了“灵活栅格”的概念,对“Frequency Slot”和“Slot Width”做出了具体定义。在此基础上,定义“Nominal Central Frequency Granulrity”为 6.25 GHz,“Slot Width Granularity”为 12.5 GHz。图 1-3 为新引入定义的关系示意^[85]。

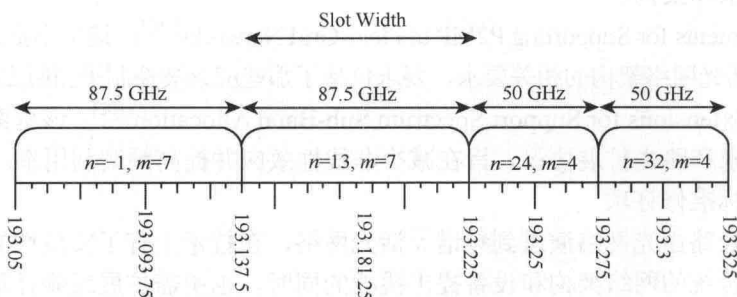


图 1-3 G.694.1 中引入“Slot Width”定义示意

ITU-T G.694.1 针对频谱灵活架构的修订,推动了 ITU-T 其他工作组针对其现有标准的修订进程:例如 ITU-T G.697.1 标准在考虑频谱灵活架构的基础上修订了部分参数编码定义^[86]。除此之外,负责修订 G.694.1 标准的 SG15 Q6 工作组在 2012 年 4 月与其他工作组(包括 SG15 中的 Q7、Q9、Q11、Q12、Q14 工作组)在日内瓦召开会议,共同讨论针对频谱灵活全光网架构对相关标准存在的潜在增补修订工作。

(2) IETF 标准及标准草案进展

IETF 工作组自 2009 年提出“灵活栅格”的概念以来,针对其在控制平面中的路由及信令实现问题,形成了若干标准草案^[93~102],其中包括以下几种。

- Generalized Label for Super-Channel Assignment on Flexible Grid^[93]: 这份标准草案根据修订版 ITU-T G.694.1 中“灵活栅格”概念,定义“超级通道标签”作为超波长带宽业务通道标识符。使用这个标签信息,在 GMPLS 路由和信令协议中建立基于标签交换路径(LSP)的超级通道。

- OSPF Extensions for Support Wavelength Range Allocation in Flexible Grid Supported Network^[94]: 这份标准草案基于频谱灵活光网络体系结构,扩展了 OSPF 路由协议,以实现在路由计算过程中有效利用频谱资源。

- Framework for GMPLS Control of Flexible Grid Network^[95]: 在标准草案中,扩展了 WSON 中基于 GMPLS 和 PCE 的控制平面体系结构,以实现对灵活栅格光网络的管控。该草案着重表述灵活栅格光网络中拓扑单元变化和新的路由约束条件。

- GMPLS OSPF-TE Extensions in Support of Flexible Grid in DWDM Networks^[96]: 该草案描述了频谱灵活光网络中支持 GMPLS 控制平面的 OSPF-TE 路由协议的扩展。