



“十三五”科学技术专著丛书

多维光网络 规划与优化技术

黄善国 尹 珊 编著

Multidimensional Optical Network Planning
and Optimization Technology



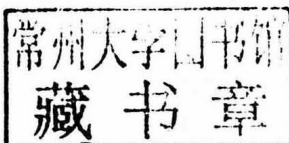
北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”科学技术专著丛书

多维光网络规划与 优化技术

黄善国 尹 珊 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书针对多维光网络规划与优化中的关键问题与典型技术进行研究与分析,是作者及研究团队近年来在相关方向研究成果的系统性总结与介绍。内容包括多维光网络技术概述、路由与资源分配技术、光网络生存性技术、光网络评估技术、网络虚拟化技术与拓扑分析、人工智能与网络规划优化、网络模拟与网络仿真工具等。

本书主要面对网络规划设计、网络运维等从业人员、相关方向的科研学者等,希望相关研究成果能够为读者进行光网络规划优化工作提供理论基础与可行性技术方案。

图书在版编目(CIP)数据

多维光网络规划与优化技术 / 黄善国, 尹珊编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2019. 6

ISBN 978-7-5635-5606-9

I. ①多… II. ①黄… ②尹… III. ①光纤网 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第224485号

书 名: 多维光网络规划与优化技术
作 者: 黄善国 尹 珊
责 任 编 辑: 满志文 穆菁菁
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: 北京九州迅驰传媒文化有限公司
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张: 18
字 数: 471 千字
版 次: 2019年6月第1版 2019年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5606-9

定 价: 58.00 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

本书介绍了多维光网络规划优化,从多维光网络发展入手,根据不同多维光网络的特点,总结了多种规划优化技术。系统地对多维光网络规划优化技术体系进行了总结,是供多维光网络规划优化工作者及研究人员参考的重要著作。

全书分为 8 个章节,循序渐进地介绍了多维光网络规划优化技术。第 1 章介绍了光网络及多维光网络的发展情况及其中规划优化的关键问题与技术。第 2 章介绍了多维光网络技术,包括多维光网络概述,SDH 网络、OTN 网络、灵活栅格光网络及空分光网络的技术与特点。第 3 章介绍了光网络中重要的路由与资源分配技术,包括路由与资源分配问题概述、最优化建模及求解、最短路算法、启发式算法等三种典型技术。第 4 章介绍了光网络生存性技术,从保护和恢复技术入手,着重介绍了多路径保护技术与数据中心中的多故障恢复技术。第 5 章对光网络规划优化中必不可少的光网络评估技术进行讨论,从评估流程、评估因素、评估方法及未来发展方向四个方面对光网络评估技术进行了介绍。第 6 章从网络虚拟化及拓扑分析的角度对光网络规划优化中的逻辑拓扑与虚拟化技术进行了讨论,网络拓扑结构对网络性能会产生直接影响,通过环结构的判别可以有效分析网络中的环结构及抗毁能力。人工智能近年来成为研究重点,人工智能技术可以促进网络规划效率及效果。第 7 章介绍了人工智能技术发展情况及研究进展、人工智能的主要算法、典型应用,并针对人工智能在规划优化中的具体应用方式进行了讨论。第 8 章主要介绍了研究组包括 OpticSimu 光传输仿真软件、光缆网规划与优化系统软件,OTN 网络仿真与规划系统在内的几款国内外网络模拟与网络仿真工具,希望读者可以对网络模拟与网络仿真工具有所了解。

由于多维光网络规划优化技术的发展日新月异,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。我们会在相关领域继续深入研究,跟进规划优化技术发展,吸收您的意见,适时编撰书的升级版本。

作 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光网络发展概述	1
1.2 多维光网络规划优化中的关键问题	2
1.3 多维光网络规划优化中的核心技术	3
1.4 国内外发展现状	4
参考文献	10
第 2 章 多维光网络技术	14
2.1 多维光网络概述	14
2.2 SDH 网络技术与特点	15
2.3 OTN 网络技术与特点	24
2.4 灵活栅格光网络技术与特点	28
2.5 空分光网络技术与特点	33
2.6 本章小结	41
参考文献	42
第 3 章 路由与资源分配技术	46
3.1 路由与资源分配问题概述	46
3.2 最优化建模及求解	51
3.3 最短路径算法	68
3.4 启发式算法	75
3.5 本章小结	85
参考文献	86
第 4 章 光网络生存性技术	88
4.1 网络生存性问题概述	88
4.2 光网络的保护和恢复	91
4.3 多维光网络中的多路径故障保护技术	94
4.4 多故障恢复技术与数据中心光网络	117
4.5 本章小结	137
参考文献	138



第 5 章 光网络评估技术	142
5.1 光网络评估概述	142
5.2 光网络评估因素	146
5.3 光网络系统评估方法	153
5.4 未来发展方向	162
5.5 本章小结	166
参考文献	166
第 6 章 网络虚拟化与拓扑分析	169
6.1 逻辑拓扑与虚拟化	169
6.2 网络虚拟化技术	172
6.3 拓扑结构与网络性能	191
6.4 功能虚拟化	199
6.5 本章小结	202
参考文献	203
第 7 章 人工智能与网络规划优化	205
7.1 人工智能技术概述	205
7.2 人工智能的研究	210
7.3 人工智能的算法分析	212
7.4 人工智能的典型应用	216
7.5 规划优化应用方式探讨	225
7.6 本章小结	226
参考文献	227
第 8 章 网络模拟与网络仿真工具	229
8.1 网络模拟与仿真技术概述	229
8.2 WDM 超长距离仿真软件	235
8.3 光缆网规划与优化系统软件	245
8.4 OTN 网络仿真与规划系统	266
8.5 本章小结	282

第 1 章

绪 论

◆ 1.1 光网络发展概述 ◆

光网络是指以光为传输载体,利用光纤作为传输媒介的通信网络。近年来,随着传输技术的快速发展,光网络传输资源从传统的时分资源、频分资源向更加灵活的多维资源复用方向发展,具有时分、频分、空分等资源的多维光网络成为未来光网络的主流表现形式。从 20 世纪 80 年代数字光纤通信技术开始被应用之后,其发展极为迅速。从最初的单波长开始到现在,已经可以使用包括空分资源在内的多维网络资源;系统结构也从最初的点对点系统发展成具有复杂拓扑结构的多层多域光网络。传统的固定栅格波分复用技术以及密集波分复用技术,可以通过提高单个波长的传输容量来提高整个传送网承载的业务量,单波长传输容量正在从 10 GB、40 GB、100 GB 一直到 400 GB 甚至 1 TB 的过程进行演进。当前阶段随着高清电视、3DTV、物联网、云计算、数据中心等宽带应用不断涌现,所需带宽持续增长,骨干网面临巨大的传输压力,100 GB DWDM 大容量传输是缓解运营商传输压力的有效手段。2012 年是 100 GB 正式在我国得到大规模商用的元年,目前 100 GB 系统已经在各大运营商商用,400 GB 系统能够在 100 GB 的基础上进一步提升网络容量并降低每比特的传输成本,有效地解决了运营商面临的业务流量及网络带宽持续增长的压力,预计在 2019 年开始逐步商用。为了进一步提高光纤的频谱利用率和网络传输容量,灵活光网络成为目前研究的热点。当前实验室中的单模光纤传输容量已经接近了其理论极限,商用系统预计在 2020 年也会达到该理论极限。因此,为了应对即将出现的网络带宽危机,下一代光纤通信技术只有挖掘全新的领域,利用光纤传输通道上最后一个的物理维度,即空间维度,才能实现光网络传输容量的再一次飞跃性发展。空分复用(Space Division Multiplexing,SDM)技术在这种情况下得到越来越多的关注,逐渐成为近期光纤通信技术的研究焦点^[1]。如图 1-1 所示的是光网络近年来的发展情况与趋势。

随着光网络容量与结构的快速发展与应用需求的日益增长,光网络的管控技术与应用场景也快速发展。近年来,如数据中心光网络、内容分发光网络、软定义光网络的发展为多维光网络的应用与发展提供了更广阔的方向。但无论是何种应用场景与管控技术,在光网络的具体应用过程中网络的规划与优化问题都是必须要解决的,只有合理科学的规划优化设计才能保证网络的服务质量与资源效率。

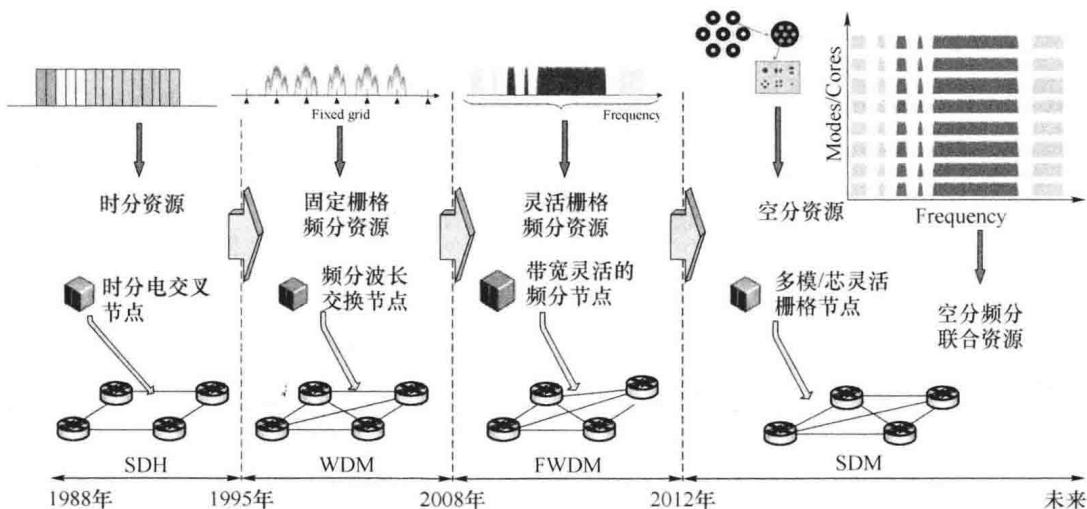


图 1-1 光网络近年来的发展情况与趋势

本书针对多维光网络规划与优化中的关键问题与典型技术进行研究与分析,是笔者及研究团队近年来在相关方向研究成果的系统性总结与介绍。希望相关研究成果能够为读者进行光网络规划优化工作提供理论基础与可行性技术方案。

◆ 1.2 多维光网络规划优化中的关键问题 ◆

针对不同的网络运营目的与客户服务需求,多维光网络的规划优化中有多个关键问题需要在规划优化时进行解决。本小节对这些关键问题进行简要介绍。多维光网络的规划优化技术根据规划时间范围可分为短期规划、中期规划和长期规划。根据业务的类型可分为静态规划与动态规划。考虑到多维光网络以传输网为主,本书主要针对的是静态规划场景。在静态规划中,需要考虑多种规划优化目标或规划优化约束条件。下面以比较有代表性的关键问题为例进行介绍。

1. 传输质量与物理损耗

随着网络规模的增大,多维光网络的传输距离日益增加,长距离的光传输,使得多维光网络中的物理损耗不能被忽略。多维光网络中的色散和插损会降低接收光信号的信噪比。为保证传输质量,在进行多维光网络规划时,应充分考虑物理损耗问题,在合适的位置增加放大器或电中继等设备。

2. 资源碎片

由于多维光网络中的资源往往具有连续性需求,在多次业务拆建后,或在进行规划时由于未充分考虑这一问题,网络中可能产生资源碎片。资源碎片是指那些空闲但由于其前后相邻资源被占用使得其被业务使用的概率极低的那些资源,网络中的资源碎片会大大降低网络资源效率。应采用合理的规划优化算法对资源碎片进行处理。

3. 业务疏导

业务疏导是规划优化需要解决的重要的问题之一。解决复杂网络中的复杂业务流向导致

的流量均衡、业务分组等业务疏导驱动问题是进行网络规划的重要原因。有效的业务疏导策略可以大大提高网络性能、增加网络吞吐量,提高业务服务质量。

4. 网络生存性

多维光网络作为传输基础网络,大量业务承载于其上。随着大容量多维光网络的快速发展,一旦网络中出现故障将会有大量业务受到影响。2001年由于地震引起的海底光缆中断,导致数千万美元的经济损失。通过有效的生存性策略提高网络生存性是网络规划优化中必须解决的重要问题。如何设计合理的保护恢复策略来保证故障下的业务保障能力,或规划合理的拓扑结构来提高故障下网络的连通性,是网络生存性问题主要需要解决的问题。

5. 降低经济成本

网络规划优化时需要解决的一个重要问题就是如何降低经济成本。网络建设与运维成本、网络中资源配置、业务路由以及资源分配有直接关系。因此通过有效的光网络规划优化策略可以实现经济成本与网络效能的充分均衡。

6. 网络评估问题

有效地评估一个网络,可以为网络的规划优化提供有力的评判标准支撑。但如何有效地完成多维光网络的评估是一个复杂的问题。进行多维光网络评估时,需要考虑网络的具体应用场景,同时有多种因素可以供评估使用。如何选择评估因素,如何对评估因素进行定量分析等问题,是需要在网络规划优化中具体研究和解决的。

◆ 1.3 多维光网络规划优化中的核心技术 ◆

为解决多维光网络规划优化中的关键问题,多维光网络规划优化的核心技术主要包括路由与资源分配技术、生存性技术、网络评估技术、逻辑拓扑规划与设计、网络规划工具等。

1. 路由与资源分配技术

通过有效的路由与资源分配技术可以有效地解决多维光网络规划优化中的众多问题。路由与资源的计算和选择将直接影响网络的各方面性能,一个好的解决该问题的策略将能够有效地提高网络性能,充分利用网络能力。在传统的波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光网络中,资源就是指的波长资源,所以涉及路由选择与资源分配的问题被称为路由和波长分配(Routing and Wavelength Assignment, RWA)问题。具体来说就是如何为业务请求建立光通路连接的过程,是按照一定策略在网络的物理拓扑结构中,为业务请求计算并选择一条从源节点到宿节点的路由,并为该路由所经过的链路分配波长资源的问题。在多维光网络中资源形式更为多样,包括波长资源、频谱资源、空分资源、时序资源等,这也使得多维光网络中的路由与资源分配问题更加复杂。但万变不离其宗,路由与资源分配问题的主要约束思想与解决方法直接是具有相似性的。

路由与资源分配技术可以分为路由技术与资源分配技术。目前常用的路由技术可以分为基于拓扑的寻路算法与基于数学模型求解的最优化算法。前者有最短路算法、负载均衡算法、最大流算法、最小割算法等典型算法;后者是通过建立流量守恒模型,结合网络约束条件求解线性规划模型来实现最优路由计算。

常用的资源分配算法大致可以分为以下三类:

(1)基于局部信息的首次命中(First-Fit,FF)资源分配算法、随机(Random-Fit,RF)资源分配算法等;

(2)基于全局资源信息的最大使用(Most-Used,MU)资源分配算法、最小使用(Least-Used,LU)资源分配算法等;

(3)基于全局通路信息的最大总和(Max-Sum,MS)资源分配算法、最小影响(Least Influence,LI)资源分配算法、相对容量损失(Relative Capacity Loss,RCL)资源分配算法以及相对最小影响(Relative lease Influence,RLI)资源分配算法等。

2. 生存性技术

网络生存性技术经常用业务故障下的恢复率来表示,可定义为当网络中某条线路或节点出现故障时,受影响的业务是否能从其他线路上调配到充分资源恢复业务通道,保障业务通信。网络生存性技术主要包括网络拓扑结构策略和网络保护恢复技术。保护恢复技术分为保护与恢复两大类。保护是指使用预先规划的方法为工作通道预留冗余资源,以便在发生故障时建立保护连接。这部分起到保护作用的资源会被保留下来,不能被其他的业务所使用,其他业务只能以竞争的方式占用。恢复是在故障场景下为业务动态计算路由分配资源来实现通信保障和网络生存性,根据网络的实时状况及空闲容量配置新路由来替换故障路由。网络拓扑结构本身将对网络生存性起到举足轻重的作用,因此在进行规划优化时,可以通过拓扑结构的调整有效提高网络生存性。同样的,在通过保护恢复技术在进行保护路由与恢复资源规划时,提高业务生存性是能够在网络拓扑基础上有效提高网络生存性的重要手段。

3. 网络评估技术

光传输技术飞速发展,光传输网络由点到点的链网、环形网逐步向网状网演变。与之同时出现的还有网络结构复杂、影响因素多、生存性保障难度高等问题,这些问题对光传输网络的性能会造成极其不利的影 响。因此研究构建一套科学、合理、全面的评估体系,即多维光网络评估指标体系非常重要。在宏观战略层面上,能够对光传输网络的发展水平进行评价,对光传输网络带来的安全效益、经济效益和社会效益进行评估,为光传输网络的发展规划提供科学指导;在微观过程层面上,能够对光传输网络运行状态和薄弱环节进行分析、识别,为光传输网络的运行管理提供决策依据。

4. 逻辑拓扑规划与设计

网络的逻辑拓扑又称为虚拓扑,它与节点间的业务流量的分布密切相关。逻辑拓扑结构的引入可以克服业务需求和网络物理设计之间的矛盾,在目标和有效性上,对业务需求的变化提供更好的适应性,从而有效地节约网络资源。

5. 网络规划工具

近年来,传统人工规划设计所带来的巨大时间和人力代价越来越无法胜任随网络规模的不断增大的多维光网络规划设计工作。利用计算机与信息技术能够有效地提高多维光网络规划优化工作的效率与优化性能。通过网络信息化并利用网络模拟与网络仿真工具,对网络进行模拟与仿真,从而为规划设计人员对网络进行规划与优化提供参考。

◆ 1.4 国内外发展现状 ◆

近年来,多维光网络的规划优化技术快速发展集中在路由与资源分配技术领域,有效地利

用路由与资源分配技术,能够在一定程度上解决其他规划优化中的关键问题。本节我们针对近年来灵活光网络邻域路由与频谱分配(Routing and Spectrum Assignment, RSA)发展现状分别对路由、频谱分配和联合策略进行介绍。

1.4.1 路由

解决灵活光网络中路由问题的方法可分为两类,即没有弹性特性的路由,以及具有弹性特性的路由。

1. 没有弹性特征的路由

没有弹性特征的路由方法与传统光网络中的路由方法类似,又可以分为四种:固定路由、固定交替路由、最少拥塞路由和自适应路由。这些路由方法主要用于发现源节点到目的节点之间的合适路由,但没有考虑光网络的弹性特性。有关这些算法的研究进展如下。

(1) 固定路由

在固定路由(FR)^[2,3]中,使用一些最短路径算法(如 Dijkstra 算法^[4])为每个源-目的节点对预先计算单个固定路由。当连接请求到达网络中时,该算法尝试沿着预定的路由建立光路。它检查在预算路由的每条链路上是否有所需的资源可用。任何一个链路没有所需的资源,连接请求将被阻塞。在多个所需资源可用的情况下,使用资源分配策略来选择最佳资源(slot, 频隙)。

(2) 固定交替路由

固定交替路由(FAR)^[2,3]是 FR 算法的更新版本。在 FAR 中,网络中的每个节点都为所有其他节点维护一个路由表(包含多个固定路由的有序列表)。这些路由是离线计算的。当带有给定的源-目的节点对的连接请求到达时,源节点尝试从路由表中依次获取的每个路由的资源情况,直到找到具有所需资源的路由。虽然该算法的计算复杂度高于 FR,但与 FR 算法相比,它提供的呼叫阻塞概率相对较低。

(3) 最小拥塞路由

最小拥塞路由(LCR)^[2,3]为类似于 FAR,为每个源-目的节点对预先确定一系列路由。根据连接请求的到达时间,从预定路由中选择已用资源最少的路由。LCR 的缺点是计算复杂度较高,其呼叫阻塞概率几乎与 FAR 相同。

(4) 自适应路由

在自适应路由(AR)^[3,5]中,根据网络的链路状态信息动态选择源到目的节点对之间的路由。当连接到达时,确定源-目的节点对之间的最短路径。如果有多条路径具有相同的距离,则随机选择其中一个。由于 AR 考虑了源-目的节点对之间所有可能的路由,因此它提供较低的呼叫阻塞概率,但其建立时间比其他路由算法相对较高。

(5) 路由算法的比较

针对已有研究在路由算法的阻塞概率、平均建立时间和时间复杂度等方面可比较它们的性能^[6]。网络中的阻塞概率^[7,8]被定义为阻塞连接请求数与网络中连接请求数的比值。网络中的平均建立时间^[9]被定义为建立网络中所有连接到成功连接数所需的总执行时间。相比较而言,FR 具有所有路由算法的最低平均建立时间和时间复杂度。然而,其阻塞概率是最高的。AR 在阻塞概率方面提供了最佳性能,但其时间复杂度最高。FAR 提供了时间复杂度和阻塞概率之间的折中。

2. 具有弹性特征的路由

在灵活光网络中,由于资源从传统的固定栅格变为灵活弹性的网络资源,大大提高了频谱资源的灵活性。通过 RSA 方法进行单路径路由会导致频谱碎片化问题,从而导致资源效率低下。为了克服这个问题,对于弹性光网络已经考虑了多路径路由^[10-12]。多路径路由可用于处理动态流量场景中非常常见的频谱碎片问题。

1.4.2 频谱分配

为了更好地适应动态的带宽需求,建立在网络中的光路可以动态地改变其分配的频谱。这种能力被定义为弹性频谱分配^[13,14],并且其在未来的多维光网络中的实施,预计将提供更好的网络性能。本节对不同的频谱分配策略进行介绍,并根据频谱带宽和单链接频谱分配进行分类。

1. 频谱范围

根据为需求分配的频谱中心频率和频谱带宽是否可调,频谱分配策略可以分为三种类型,即固定频谱分配、半弹性频谱分配和弹性频谱分配。

(1) 固定频谱分配

在固定频谱分配策略^[13,14]中,频谱中心频率和分配的频谱带宽始终为静态。在每个时间段,需求可以利用整个分配的频谱带宽或仅利用一部分频谱来传送该时段所请求的比特率。这种方法没有提供任何弹性,光路的频谱分配与带宽需求的变化无关。在这种情况下,所使用的传输频谱可能比分配频谱少,导致网络容量使用无法达到最优。当带宽需求高于频谱带宽时,无法提供频谱进行传输。

(2) 半弹性频谱分配

在半弹性频谱分配策略^[13,14]中,频谱中心频率保持固定,但分配的频谱宽度可以在不同时间段中变化。不同数量的频隙被分配给光路以适应带宽需求。同时,未使用的频隙可用于后续的连接请求。这种频谱分配策略能够比固定的频谱分配策略提供更高的频谱灵活性。

(3) 弹性频谱分配

在弹性频谱分配策略^[13,14]中,频谱中心频率和频谱宽度可以在每个时间间隔中改变。这一频谱分配策略为以前的策略增添了新的自由度。它不仅可以随时改变每个光路的频隙,还可以改变频谱中心频率。

2. 单链接频隙分配

在进行单链接频谱分配时,可以使用以下分配策略之一来执行单个链接请求的频隙分配。

(1) 首次命中

在首次命中频谱分配策略^[15,16]中,通过对频隙进行索引,保存空闲或可用频隙的索引列表。此策略始终尝试从可用频隙列表中选择索引最小的频隙,并将其分配给光路以提供链接请求带宽。当请求结束后,该频隙将返回到可用频隙列表。通过以这种方式选择频谱,可以尽量将链接按频谱顺序使用,留下更多数量的频隙供将来使用。实施这项策略并不需要全网信息。由于首次命中频谱分配策略的呼叫阻塞概率和计算复杂度较低,因此被认为是最好的频谱分配策略之一。

(2) 随机命中

在随机命中策略^[2,15]中,维护一个空闲或可用频隙列表。当链接请求到达网络时,该策略会从可用频隙列表中随机选择一个频隙,并将其分配给用于链接请求的光路。在为光路指定

频隙后,该频隙将被从空闲列表中删除。请求结束后,频隙将重新添加到空闲或可用频隙列表中。通过随机方式选择频谱,可以降低多个链接选择相同频谱的可能性,此方法适用于分布式执行频谱分配。

(3) 末次命中

该策略^[2,17]总是尝试从可用频隙列表中选择索引最大的频隙,并将其分配给光路以提供链接请求。

(4) 首尾匹配

在首尾频谱分配策略^[16]中,每个链路的所有频隙可以划分为多个分区。在奇数分区中,策略尽量选择索引最小的可用频隙;在偶数分区中,策略尽量选择索引最大的可用频隙。

(5) 最少使用

最少使用的频谱分配策略^[2,18],从网络中光纤链路所使用的频谱最少的列表中为光路分配一个频隙。以这种选择频谱的方法试图将负载均匀分布在所有的频隙中。

(6) 精确拟合

精确拟合分配策略^[15]根据链接请求的频隙数目搜索确切可用的频谱块(多个连续频谱的集合)。如果存在与请求频隙数准确匹配的资源块,则此策略将分配该频谱块给该需求。否则,根据首次命中分配策略为该需求分配频谱。通过这种方式选择频隙,可以减少光网络中的碎片问题。

3. 单链接频隙分配策略的比较

研究表明,最少使用分配策略比其他分配策略具有更高的时间复杂性。这种频谱分配策略需要全网信息。像随机命中、首次命中、末次命中、精确拟合、首尾匹配的频谱分配策略具有较低的时间复杂度,根据不同业务负载下的阻塞概率,得到这些频谱分配策略的性能。仿真数值结果表明^[19],首尾匹配比其他频谱分配方案具有更低的阻塞概率,因为它比其他频谱分配策略提供更少的分段。精准拟合的阻塞概率要高于首尾匹配的阻塞概率,但其阻塞概率要低于其他频谱分配策略的阻塞概率。首先命中和末次命中的频谱分配策略提供了几乎相似的性能,随机命中的阻塞概率在所有频谱分配策略中最高。

1.4.3 联合策略

除了分别进行路由和频谱分配,许多研究人员通过同时考虑路由选择和频谱分配提出了联合 RSA 策略^[20-22]。他们通常使用矩阵来描述链路或路径频谱状态,同时考虑了频谱连续性和邻接约束,并从所有可用矩阵候选中选择最佳性能。

Liu 等人^[21]提出了一种基于层的方法来设计集成多播路由和频谱分配(MC-RSA)的算法,以高效地服务多播请求,并最小化弹性光网络中的带宽阻塞概率。同样,Yin 等人提出了两种联合路由和频谱分配算法以减轻光路供应过程中的频谱碎片化^[22],即支持分片的 RSA 和支持拥塞避免的分片的 RSA。另一些研究^[23-25]着重于通过调制选择来实现联合策略 RSA。这种类型的问题被称为路由、调制和频谱分配(RMSA)问题。在这个方向上,Zhou 等人^[24]为弹性光网络引入了 RMLSA 问题。在他们的工作中,作者为 RMLSA 算法引入了整数线性规划(ILP),该算法使用于服务流量矩阵的频谱最小化。

利用联合 RSA 策略,能够解决多种规划中的关键问题,下面我们按问题分类,对研究情况进行介绍。

1. 频谱碎片问题

为了克服由于动态建立和拆除连接可能会产生频谱碎片^[23,26]问题,许多 RSA 方法已经被提出^[23, 27-30]。在这个方向上,Kadohata^[31]和 Zhang 等人^[20]通过考虑绿地规划场景提出了链接重新路由的带宽碎片整理方案。Patel 等人^[32]针对弹性光学网络中制定碎片整理问题提出了考虑频谱连续性和连续性约束条件的 ILP 模型,提供最佳碎片整理方案。他们提出了两种启发式算法,即贪婪碎片整理法和大规模网络的最短路径碎片整理法,以最大化频谱利用率。可识别碎片的 RSA 算法或碎片整理方法可分为两类,即主动式碎片感知(RSA)和碎片整理(RSA)。

(1) 主动式碎片感知(RSA)

当网络新的连接请求到达时,主动式碎片感知 RSA 技术会尝试阻止或最小化网络中的频谱碎片。Wang 等人^[16]提出了四种频谱分配技术,用于为不同数据速率的链接分配频谱资源。在他们的方法中,所有连接都使用首次命中的频谱分配策略。Christodoulopoulos 等人提出了类似的频谱预留概念^[23]。

(2) 碎片整理(RSA)

在动态环境中,碎片问题不可能完全被消除。因此,碎片整理 RSA 算法试图恢复网络中的资源连续性。碎片整理的主要目标是重新配置现有连接的频谱分配,以便将频隙进行整合,为即将到来的连接请求提供更多连续的频隙资源。文献中的大多数方法^[16,23,26-30]都是在子载波频隙发生带宽割裂后执行带宽碎片整理。这意味着在执行带宽碎片整理时,链接会因重新路由而中断。使用链接重新路由的带宽碎片整理增加了链接延迟和系统复杂性。为了克服这个问题,Wang 和 Mukherjee^[33]提出了一种避免带宽碎片而不执行任何连接重新路由的方案。采用基于频谱划分的预防性准入控制方案来实现更高的配置效率。同样,Fadini 等人^[34]提出了用于弹性光网络中频谱分配的子载波时隙划分方案。它会减少未对齐的可用频隙的数量,而无须链接重新路由,这样就减少了网络中的带宽阻塞概率。

2. 调制

传统固定栅格光网络将频谱资源分配给连接时,不考虑调制技术的选择。这导致频谱利用效率低下。最近关于基于调制的频谱分配的研究^[35-37]表明,与弹性光网络中基于固定调制的频谱分配相比,这种类型的频谱分配方案增加了频谱利用率,为 9%~60%,与基于固定调制的频谱分配方案相比,这可以更好地利用频谱资源。在基于调制的频谱分配方案中^[27,38],适配考虑了物理条件,同时确保了所需的数据速率。Jinno 等人^[27]提出了一种距离自适应频谱分配方案通过对长距离路径采用高级调制格式,以及对较短路径采用高级调制格式。这是由于 64-QAM 的光信噪比(OSNR)容限低于 QPSK,所以它适合更短距离的光路。

基于调制的频谱分配方案可以分为两类,即基于离线调制频谱分配和基于在线调制频谱分配。

(1) 基于离线调制频谱分配

Christodoulopoulos 等人^[23]提出了一种基于离线调制的频谱分配方案。在他们的方案中,根据请求的数据速率和端到端路径的距离将每个需求映射到调制级别,他们提出了基于路径的 ILP 公式,然后将问题分解为两个子问题,即路由和调制级别和频谱分配。他们依次使用 ILP 解决了子问题。最后,提出了一种顺序算法来逐个为连接提供服务,并依次解决规划问题。

(2) 基于在线调制频谱分配

大多数基于在线调制的频谱分配研究^[36,37,39,40]已经引入了启发式算法来处理随机到达的链接请求。这些算法为每个源-目的节点对计算多个固定备用路径,并按照其端到端路径长度的降序进行排列。紧接着通过考虑备用路径路由和调制,频谱分配策略用于为每个链接请求分配光路径。

3. 传输质量

灵活光网络架构提供了选择调制格式和信道带宽以适应传输距离和所需传输质量的能力。基于在线调制的频谱分配方案(称其为传输质量感知 RSA),Beyranvand 等人^[40]提出了一种传输质量的在线 RSA 方案,并用于灵活光网络。此方案采用三个步骤来构建完整的框架,即路径计算、路径选择和频谱分配。Dijkstra 和 k-最短路径算法适用于计算路径;而损耗和物理层上的非线性影响被建模来估算给定路由的 QoT。S. Yang 等人^[39]已经提出了考虑 QoT 感知的 RSA 方案,以便为每个请求选择一条可行路径,并通过使用适合的传输范围和请求数据速率的调制格式分配频隙。

4. 生存性

灵活光网络有能力支持每路 400~1 000 Gbit/s 的数据速率^[41],每条光纤链路的吞吐量可达到 10~100 Tbit/s。因此,网元(如光纤或网络节点)的故障会中断数百万用户的通信,会导致数据和收入的巨大损失。例如,2004 年,由于光网络故障,Gartner 研究小组损失了大约 5 亿美元^[42]。因此,生存性已经成为多维光网络的基本要求。故障恢复^[43]在这里被定义为在故障情况下通过在故障后重新路由不同设备上的信号来重新建立流量连续性的过程。灵活光网络的生存性机制我们将分保护和恢复进行介绍。

(1) 保护

本章后的文献^[44-48]中介绍的保护技术是在故障发生后使用备用路径传送光信号。备份路径在故障发生之前计算,但在发生故障后会重新配置。Klinkowski 等人^[48]提出了一种静态业务需求专用保护 RSA 方法来解决此问题。尽管专用保护可以提供更高的可靠性,但由于保护频隙在故障发生前就被分配空闲,因此无法有效利用频隙。为了克服这个问题,研究人员^[44,45]提出了一种共享保护方案:如果相应的工作路径是链路不相关的,那么通过在链路上两个相邻路径之间共享备份频隙来增强频谱利用。

(2) 恢复

在恢复^[11,49-54]算法中,故障发生后,根据链路状态信息动态计算备份路径,因此与保护相比可提供更高的资源利用效率。Ji 等人^[55]提出了三种算法用于动态预置环(p 圈)配置,以便为灵活光网络提供 100% 的单链路故障恢复。Paolucci 等人^[54]提出了一种恢复技术,能够在弹性光网络中实现多径恢复和比特率压缩。他们将问题作为 ILP 模型制定,最后提出了一种启发式算法:通过沿多条路线利用有限的频谱资源部分来有效地恢复网络故障。由于在故障发生后才寻找备份路径,它提供的恢复比保护慢。根据所使用的重新路由类型,可将恢复视为由三类组成,即链路恢复、路径恢复和基于段的恢复。

5. 节能

近几年,研究人员^[56-58]专注于弹性光网络的节能 RSA 方案。在这个方向上,Fallahpour 等人^[56]提出了一种动态节能的 RSA 算法,该算法考虑了再生器放置来抑制总的网络能量消耗。此外,通过在可能的候选路径中找到最节能的路径来服务新到达的链接请求。同样,Zhang 等人^[58]提出了节能动态配置,显著降低能耗同时有效利用频谱资源。

◆ 参考文献 ◆

- [1] Takayuki M, Hidehiko T, Akihide S, et al.. Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber [J], IEEE Journal Of Light-wave Technology, January 2016, 34(2).
- [2] Mukherjee B. Optical WDM Networks. Berlin, Germany: Springer Verlag, 2006.
- [3] Ramamurthy R, Mukherjee B. Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks, IEEE/ACM Trans. Netw, 2002,10(3):351-367.
- [4] Cormen T H. Introductions to Algorithms. New York, NY, USA: McGraw Hill, 2003.
- [5] Jue J, Xiao G. An adaptive routing algorithm for wavelength routed optical networks with a distributed control scheme, in Proc. IEEE 9th ICCCN, 2002: 192-197.
- [6] Chatterjee B C. , Sarma N. ,Sahu P. P. Review and performance analysis on routing and wavelength assignment approaches for optical networks, IETE Tech. Rev, 2013,30(1):12-23.
- [7] Chatterjee B C, Sarma N, Sahu P. P. A priority based wavelength assignment scheme for optical network, in Proc. IWNMA, 2011:1-6.
- [8] Chatterjee B C, Sarma N, Sahu P P. Dispersion-reduction routing and wavelength assignment for optical networks, in Proc. 2nd IConTOP, 2011:456-463
- [9] Chatterjee B C, Sarma N. ,Sahu P P. “A heuristic priority based wavelength assignment scheme for optical networks,” Optik Int. J. Light Electron. Opt, 2013,123(17):1505-1510.
- [10] Ruan L, Xiao N. Survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks, IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw, 2013,5(3):172-182.
- [11] Ruan L, Zheng Y. Dynamic survivable multipath routing and spectrum allocation in OFDM-based flexible optical networks, IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw, 2014,6(1): 77-85.
- [12] Zhang M, Shi W, Gong L, et al. Multipath routing in elastic optical networks with distance-adaptive modulation formats,” in Proc. IEEE ICC, 2013, :3915-3920.
- [13] Klinkowski M, et al. “Elastic spectrum allocation for time-varying traffic in flexgrid optical networks, IEEE J. Sel. Areas Commun, 2013,31(1):26-38.
- [14] Garcia A A. Elastic spectrum allocation in flexgrid optical networks, Univ. Politècnica Catalunya, Catalunya, Spain, Tech. Rep, 2012.
- [15] Rosa A, Cavdar C, Carvalho S, et al. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks, in Proc. 9th Int. Conf. HONET, 2012:242-246.
- [16] Wang R, Mukherjee B. Spectrum management in heterogeneous bandwidth optical networks, Opt. Switching Netw. , 2014,11:83-91.

- [17] Fadini W, Oki E. A subcarrier-slot partition scheme for wavelength assignment in elastic optical networks, in Proc. IEEE Int. Conf. HPSR, 2014:7-12.
- [18] Siva R M C, Mohan G. WDM Optical Networks: Concepts, Design and Algorithms. UpperSaddleRiver, NJ, USA: Prentice-Hall, 2003.
- [19] Chatterjee B C, Oki E. Performance evaluation of spectrum allocation policies for elastic optical networks, in Proc. 17th IEEE ICTON, Budapest, Hungary, 2015, to be published.
- [20] M Zhang, W Shi and L Gong, et al. "Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions," in Proc. IEEE ICC, 2013, pp. 3894-3898.
- [21] Liu X, Gong L, Zhu Z. Design integrated RSA for multicast in elastic optical networks with a layered approach, in Proc. IEEE GLOBECOM, 2013:2346-2351.
- [22] Yin Y, et al. Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks [Invited], IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., 2013, 5(10):100-106.
- [23] Christodoulopoulos K, Tomkos I, Varvarigos E. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks, J. Lightw. Technol, 2011, 29(9):1354-1366.
- [24] Zhou X, Lu W, Gong L, Zhu Z. Dynamic RMSA in elastic optical networks with an adaptive genetic algorithm, in Proc. IEEE GLOBECOM, 2012:2912-2917.
- [25] Yin Y, Zhu Z, Yoo S, et al. Fragmentation-aware routing, modulation and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks, presented at the Optical Fiber Communication Conf., Anaheim, CA, USA, 2013, Paper. OW3A-5.
- [26] Khodashenas P S, Comellas J Spadaro S, et al. Using spectrum fragmentation to better allocate time-varying connections in elastic optical networks, IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw., 2014, 6(5):433-440.
- [27] M. Jinno, et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications], IEEE Commun. Mag., 2010, 48(8):138-145.
- [28] Zhang M, You C, Jiang H et al. Dynamic and adaptive bandwidth defragmentation in spectrum-sliced elastic optical networks with time-varying traffic, J. Lightw. Technol, 2014, 32(5):1014-1023.
- [29] Wang Y, Cao X, Pan Y. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks, in Proc. IEEE INFOCOM, 2011:1503-1511.
- [30] Sone Y, Hirano A, Kadohata A. et al. Routing and spectrum assignment algorithm maximizes spectrum utilization in optical networks, in Proc. ECOC, 2011:1-3.
- [31] Kadohata A, et al. Multi-layer greenfield re-grooming with wavelength defragmentation, IEEE Commun. Lett., 2012, 16(4):530-532.
- [32] Patel A N, Ji P N, Jue J P et al. Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation algorithms in transparent flexible optical WDM networks, Opt. Switching Netw, 2012, 9(3):191-204.