

C+L 波段弹性光网络中拉曼放大器部署方法研究

摘 要

随着 5G、高清流媒体、人工智能等新兴技术的出现，互联网流量将会在全球范围内持续急剧增长，这给骨干传送网带来了巨大的挑战。为此，需要对现有光网络进行扩容，而随着高效频谱传输技术逐渐逼近香农极限，多波段传输成为扩容的首选方案。由于 L 波段衰减系数在除 C 波段外的波段中最低，目前多波段传输的研究主要集中于 C+L 波段光网络。然而，有学者发现当 L 波段开始用于传输光信号时，C 波段光信号会受到受激拉曼散射（Simulated Raman Scattering, SRS）效应的影响，出现光信噪比（Optical Singal-to-Noise Ratio, OSNR）退化现象，因此需要在网络中额外部署拉曼放大器来补偿 OSNR 退化。然而，拉曼放大器的成本相对较高，需要优化部署来实现网络性能的最大化。因此，本文着重研究 C+L 波段弹性光网络中拉曼放大器部署问题。主要研究内容和贡献如下：

（1）针对 C+L 波段弹性光网络中的拉曼放大器部署问题，本文基于固定路由算法构建了混合整数线性规划（Mixed Integer Linear Programming, MILP）优化模型，同时提出两种拉曼放大器部署策略：最大流量部署策略和最大流量部署+删除策略，并将上述策略与随机部署策略、最长跨段部署策略进行对比以评估其性能。同时，对 C+L 波段弹性光网络的路由、波段、调制格式和频谱分配（Routing, Band, Modulation Format, and Spectrum Assignment, RBMSA）问题，提出了高效的启发式算法。通过比较需要额外部署的拉曼放大器数量，发现最大流量部署策略以及最大流量部署+删除策略的结果与 MILP 优化模型结果相近，并且相较于其它两种策略可以节省大量的拉曼放大器，这体现了最大流量部署策略和最大流量部署+删除策略的高效性。

（2）针对 C+L 波段生存性弹性光网络中的拉曼放大器部署问题，本文以最小化拉曼放大器数量为优化目标对 1+1 专享路由保护场景和共享备份路由保护（Shared Backup Path Protection, SBPP）场景分别构建相应的 MILP 优化模型，同时提出了两种拉曼放大器部署策略：联合部署策略和独立部署+删除策略，并将上述策略与随机部

Research on Raman Amplifier Deployment for C+L-band Elastic Optical Networks

Abstract

With the emergence of new generation technologies such as 5G, high-definition streaming, and artificial intelligence, Internet traffic is expected to continue its rapid growth on a global scale, presenting significant challenges to backbone networks. Consequently, capacity expansion of existing optical networks is imperative. As spectrally-efficient transmission techniques approach the Shannon limit, multi-band transmission emerges as the preferred solution for the capacity expansion. Given that the attenuation coefficient of the L-band is the lowest among bands excluding the C-band, current research on multi-band transmission primarily focuses on the C+L-band optical network. However, scholars have observed that when the L-band is utilized for optical signal transmission, the C-band optical signal is susceptible to the effect of Stimulated Raman Scattering (SRS), resulting in degradation of Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR). Consequently, additional Raman amplifiers need to be deployed in the network to compensate for the OSNR degradation. However, Raman amplifiers incur relatively high costs, necessitating careful selection of deployment locations to maximize network performance. Therefore, this paper emphasizes the study of Raman amplifier deployment in C+L-band elastic optical networks. The main research content and contributions are outlined as follows:

(1) To address the Raman amplifier deployment issue in C+L-band elastic optical networks, this thesis constructs a Mixed Integer Linear Programming (MILP) optimization model based on the fixed routing algorithm. Additionally, two Raman amplifier deployment strategies are proposed: maximum traffic-based deployment strategy, and maximum traffic-based deployment and deleting strategy. The above strategies are compared with random deployment strategy and longest span deployment strategy to evaluate their performance.

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 C+L 波段光网络中的光放大器	3
1.2.2 光网络的生存性问题.....	3
1.2.3 拉曼放大器部署问题.....	4
1.2.4 C+L 波段光网络优化设计	5
1.2.5 研究现状总结.....	5
1.3 课题来源与主要研究内容.....	5
1.4 论文组织架构.....	7
第二章 C+L 波段弹性光网络	8
2.1 引言.....	8
2.2 基于 HFA 的 C+L 波段光传输系统	8
2.3 C+L 波段光网络中光通道信号质量评估	9
2.3.1 EDFA 跨段的 OSNR 模型.....	10
2.3.2 HFA 跨段的 OSNR 模型	12
2.4 C+L 波段 EON 中的 RBMSA 问题.....	14
2.4.1 路由选择.....	14
2.4.2 波段选择.....	15
2.4.3 调制格式分配.....	15
2.4.4 频谱分配.....	16
2.5 频谱窗平面算法.....	17
2.6 本章小结.....	19
第三章 C+L 波段弹性光网络中拉曼放大器的部署	20
3.1 引言.....	20

3.2 C+L 波段光网络拉曼放大器的部署问题	20
3.3 MILP 模型	23
3.4 启发式算法	28
3.4.1 拉曼放大器部署策略	28
3.4.2 基于频谱窗平面的 RBMSA 算法	31
3.5 仿真条件与结果分析	32
3.5.1 仿真条件	32
3.5.2 MILP 模型结果	34
3.5.3 固定路由算法下各部署策略的仿真结果	35
3.5.4 频谱窗平面算法下各部署策略的仿真结果	37
3.6 本章小结	40
第四章 C+L 波段生存性弹性光网络中拉曼放大器的部署	41
4.1 引言	41
4.2 C+L 波段弹性光网络中的路由保护方法	41
4.3 C+L 波段生存性弹性光网络中拉曼放大器的部署问题	44
4.4 MILP 模型	45
4.5 启发式算法	52
4.5.1 拉曼放大器部署策略	53
4.5.2 基于频谱窗平面的 RBMSA 算法	55
4.6 仿真条件与结果分析	57
4.6.1 仿真条件	57
4.6.2 1+1 路由保护仿真结果	58
4.6.3 SBPP 保护仿真结果	62
4.7 本章小结	64
第五章 总结与展望	65
5.1 本文工作总结	65
5.2 未来工作展望	66
参考文献	67

攻读硕士期间的研究成果.....	73
缩略语对照表.....	74
致谢.....	76

图表索引

图 1.1 标准单模光纤不同波长上的衰减系数.....	2
图 2.1 基于 HFA 的单跨段光传输系统.....	8
图 2.2 拉曼散射示例.....	9
图 2.3 拉曼增益谱.....	10
图 2.4 前向泵浦拉曼放大器示例.....	12
图 2.5 反向泵浦拉曼放大器示例.....	13
图 2.6 频谱连续性和频谱邻接性.....	16
图 2.7 频谱窗.....	17
图 2.8 三节点网络.....	18
图 2.9 各链路上的频谱使用情况.....	18
图 2.10 频谱窗平面.....	18
图 3.1 在 100km 跨段中 C 波段信号的 OSNR.....	21
图 3.2 在不同拉曼放大器部署方式下的性能.....	23
图 3.3 拉曼放大器部署组合示例.....	25
图 3.4 随机部署策略.....	29
图 3.5 最长跨段部署策略.....	29
图 3.6 最大流量部署策略.....	31
图 3.7 测试网络拓扑.....	33
图 3.8 最大流量部署策略和最大流量部署+删除策略与 MILP 模型的结果对比.....	35
图 3.9 不同部署策略在 n6s9 网络中的性能.....	36
图 3.10 不同部署策略在 NSFNET 网络中的性能.....	37
图 3.11 不同路由算法下需要的拉曼放大器数量.....	38
图 3.12 在自适应 RBMSA 路由算法下不同放大器部署策略的性能.....	39
图 4.1 弹性光网络中 1+1 专用路由保护技术示例.....	42
图 4.2 弹性光网络中 SBPP 保护技术示例.....	43
图 4.3 生存性弹性光网络中拉曼放大器部署示例.....	44

图 4.4 联合部署策略.....	54
图 4.5 独立部署+删除策略	55
图 4.6 测试网络拓扑.....	58
图 4.7 独立部署+删除策略与 MILP 模型的结果对比.....	59
图 4.8 模拟退火过程.....	59
图 4.9 不同部署策略在 n6s9 网络中的性能	60
图 4.10 基于固定路由算法 NSFNET 网络中拉曼放大器数量	61
图 4.11 基于自适应路由算法 NSFNET 网络中拉曼放大器数量.....	61
图 4.12 独立部署+删除策略与 MILP 模型的结果对比.....	62
图 4.13 不同部署策略在 n6s9 网络中的性能	63
图 4.14 基于固定路由算法 NSFNET 网络中拉曼放大器数量	63
图 4.15 基于自适应路由算法 NSFNET 网络拉曼放大器数量	64
表 2.1 不同调制格式下的 OSNR 阈值和 FS 容量	15

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着 5G、高清流媒体、人工智能等新兴技术的出现，互联网流量将会在全球范围内持续迅速增长，这给骨干传送网带来了巨大的挑战^[1]。为了应对快速增长的网络流量，运营商正考虑如何进一步提升骨干光网络的容量。目前，实现光网络容量扩展的三个主要技术分别是高频谱效率传输技术^[2]、空分复用技术 (Space Division Multiplexing, SDM)，以及多波段传输技术 (Multi-Band Transmission, MBT)^[3]。高频谱效率传输技术通过提高单位带宽所能传输的信号比特数，来实现光网络的扩容。目前已经存在大量的关于高频谱效率传输技术的研究，随着高阶调制格式等技术的使用，当前的光通信系统容量已经逼近香农极限，很难再大幅度提升频谱效率^[4]。空分复用技术通过使用多根光纤或者多芯光纤进行信号传输，该技术的优势在于只利用目前较为成熟的 C 波段进行信号传输，因此无需解决太多技术挑战，易于实现容量升级。然而，该方案需要额外部署大量的光器件和设备，如多芯光纤等，成本相对较高^[5]。最后，多波段传输技术是指在目前被广泛铺设的 G.652.D 单模光纤的低损耗区间上，使用更宽的频谱区进行信号传输。图 1.1 给出了 G.652.D 单模光纤的衰减谱，其中衰减系数小于 0.4dB/km 的区间被称为低损耗区间^[6]。目前主流的光纤传输系统主要使用 C 波段 (1530nm - 1565nm)，而整体的低损耗区间还包括 O 波段、E 波段、S 波段、L 波段和 U 波段，覆盖了从 1250nm 到 1675nm 之间超过 400nm 的频谱资源。如果能够完全利用这些频谱资源，将会为光纤通信带来数十倍的容量提升。此外，多波段传输技术对现有的光纤设施改造较少，成本支出相对较低，因此，它是目前光网络扩容最具竞争力的技术方案。

然而，基于波段的扩容不是一蹴而就的，需要从 C 波段逐渐扩展到其它波段，最终实现全波段的信号传输。目前，L 波段被认为是下一个最具潜力的波段，这是因为 L 波段的衰减系数是除了 C 波段外最低的，并且 L 波段紧邻 C 波段，所以相关的光

器件开发可以借鉴 C 波段，甚至直接使用 C 波段中的光器件^{[7][8]}。然而，目前已经观察到当 L 波段开始传输光信号时，原本 C 波段的信号会受到受激拉曼散射（Stimulated Raman Scattering, SRS）的影响，导致信号的光信噪比（Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR）退化。

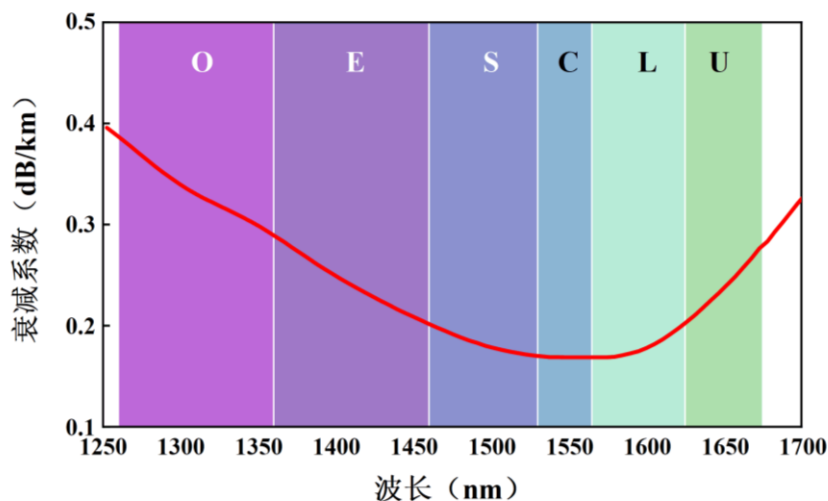


图 1.1 标准单模光纤不同波长上的衰减系数

Figure 1.1 Attenuation coefficients of different wavelengths in a standard single-mode fiber

为了解决这一问题，有学者提出了使用拉曼放大器（Raman Amplifier, RA）来改善链路的 OSNR，以提升网络性能^[9]。通过在已有的掺铒光纤放大器（Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA）站点部署拉曼放大器，将原先的 EDFA 升级为混合光纤放大器（Hybrid erbium-doped Fiber amplifier/Raman Amplifier, HFA），可以有效地提高光路的 OSNR。然而，由于拉曼放大器的成本相对较高^[10]，在网络中所有的 EDFA 站点都部署拉曼放大器会导致网络成本的急剧上升，因此，需要研究如何选择性地部署拉曼放大器，使得网络能够在较低的成本下获得尽可能好的性能。综上，本文将面向弹性光网络（Elastic Optical Network, EON），就 C+L 波段信号传输下拉曼放大器部署问题展开研究，提出高效的拉曼放大器部署策略以及相应的路由、波段、调制格式和频谱分配算法。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 C+L 波段光网络中的光放大器

C+L 波段光网络中的光放大器主要分为掺杂光纤放大器和拉曼放大器。对于拉曼放大器,目前的研究主要集中在优化拉曼放大器参数和优化特定信道的传输性能^{[11][12]}。Song 等人提出了一种放大器参数配置算法,来优化 C+L 波段光网络中光通道的 OSNR,该算法考虑了放大自发辐射噪声、克尔非线性及 SRS 的影响,执行速度快,可以有效应用于 C+L 波段动态光网络^[13]。Yankov 等人在 SRS 物理模型的基础上使用机器学习训练得到了正向泵浦拉曼放大器的模型,并通过神经网络训练得到了反向泵浦的拉曼放大器的模型,为在网络中优化 OSNR 提供了便利^[14]。Zhang 等人提出了一种用于优化 HFA 中拉曼泵浦功率的算法,该算法以各信道的平均信噪比为优化目标来优化拉曼泵浦功率,仿真表明该算法相对于传统方法的平均 OSNR 改善高达 0.54 dB^[15]。Wu 等人提出使用粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 对多波段光网络中的拉曼放大器泵浦功率进行优化,该算法考虑了多波段传输中因为 SRS 效应引起的功率倾斜,可以取得比传统 PSO 算法更好的性能^[16]。此外,对于光放大器来说,增益平坦度是一个重要的性能指标。为了优化拉曼放大器的增益平坦度,Chen 等人通过将极限学习机技术与差分进化算法相结合,提出了新的增益平坦度算法,该算法可以在获得更好的性能的同时具有更快的收敛速度^[17]。

对于掺杂光纤放大器,目前主要使用掺铒光纤放大器,已有研究对 EDFA 的性能进行优化。Verma 等人^[18]通过优化泵浦功率和光纤长度来优化增益平坦度,该方法在维持较高增益的同时,可以在 1546nm-1558nm 之间达到 0.36 dB 的增益平坦度。Peng 等人^[19]通过对 EDFA 的增益设置预倾斜,以应对 C+L 波段光网络中的 SRS 问题,该方法可以有效防止 C 波段信号因 SRS 导致的功率转移。

1.2.2 光网络的生存性问题

对于光网络的生存性问题研究主要分为专享保护和共享保护。其中,专享保护是指以 1+1 路由保护为代表的保护技术,它在源、目的节点间建立一对不相交的光通道,

其中短的一条作为工作通道，长的一条作为保护通道。该技术能够在 50 毫秒内恢复单链路故障，但是相对于无保护情形需要消耗高于双倍的网路资源^[20]。共享保护是指以共享备份路由保护（Shared Backup Path Protection, SBPP）为代表的保护技术。在该技术下，任何对应工作路径不共享任何链路的保护光通道可在它们的公共链路上共享保护资源，因此，这种方法有效地提高了备份资源的利用效率，但同时也使得网络管理变得更为复杂。为了尽可能提高备份资源利用率，Sone 提出了三种恢复方法，分别是全带宽保证、部分带宽保证和尽最大努力恢复带宽，以此实现对光路的不完全保护^[21]。另一方面，Yuksel 发现在一段时间内，大约有 17% 的可能会同时发生两处链路故障^[22]，因此，相关学者也研究了双链路故障下的网络生存性问题。Guo 为每个业务分配了两条保护路径，以应对可能发生的双链路故障，并分析了不同的共享保护和专享保护组合下的保护情形^[23]，该团队也同时研究了弹性光网络中联合考虑频谱资源和再生器共享问题^[24]。

1.2.3 拉曼放大器部署问题

目前，关于拉曼放大器部署策略的研究主要集中在传统 C 波段网络。Vizcaino 等人研究了在 40G 到 400G 线速率的波分复用（Wavelength Division Multiplexing, WDM）网络中如何选择性地将 EDFA 升级为 HFA，以改善能量效率和频谱效率^{[25][26]}。同时，在同样场景下，该团队也评估了不同拉曼放大器部署策略对于网络成本的影响，并考虑了网络成本和网络性能的平衡，结果表明提出的部分部署策略在维持较小的网络成本的同时可以有效地提升网络性能^[27]。Pedro 和 Costa 提出了一种优化网络中拉曼放大器部署的启发式算法，以最小化网络中再生器数量，该算法也对网络中的光路进行优化，以尽可能地升级每条光路使用的调制格式^[28]。在收发机采用数字信号处理技术的情况下，Cantono 与 Ferrari 等人提出如何选择性地将 EDFA 升级为 HFA，以减少网络中再生器的数量^{[29][30][31]}。针对 C+L+S 波段光网络，Souza 等人对拉曼放大器的泵浦光功率和信号光的入纤光功率进行了联合优化，并评估了 HFA 对网络性能的提升^{[32][33]}。可以看到，以上关于 HFA 的研究，大部分针对 C 波段的光网络，对于多波段光网络，目前的研究相对较少，并且仅简单地评估了网络性能，未对光网络展开优化

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/318034043077007032>