

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250307.

专题:纪念创刊50周年

杨仕奇,朱长银,王晓玲,等. 损伤感知的C+L波段光网络专用保护资源优化方法[J]. 光通信研究, 2025(6): 250307.

Yang S Q, Zhu C Y, Wang X L, et al. Impairment-Aware Resource Optimization Method with Dedicated Path Protection in C+L Band Optical Networks [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250307.

损伤感知的 C+L 波段光网络专用保护资源优化方法

杨仕奇¹,朱长银¹,王晓玲¹,邵卫东¹,李 凡²,陈博文¹

(1. 苏州大学 电子信息学院,江苏 苏州 215006; 2. 中通服网盈科技有限公司,南京 210019)

摘要:【目的】随着人工智能(AI)技术的不断发展,AI催生的各种应用方兴未艾,网络的带宽资源已经逐渐满足不了业务增长的需求,拓宽频谱是容量演进的一个重要方向。而引入C+L波段光网络能够有效解决光网络的带宽容量问题。【方法】为了有效降低网络的阻塞率和保障光网络的生存性,考虑C和L波段频谱资源分配造成的影响,采用不同工作路径和保护路径的路径选择方式、不同频谱资源的分配方式和不同调制格式的选择方式,文章提出了C+L多波段弹性光网络的损伤感知专用保护频谱分配方法(IASADP)。为了方便比较,引入了K条最短路径首次命中专用保护方法(KSPFFDP)、基于信噪比再验证专用保护方法(RSNRDP)、基于最大化信噪比专用保护方法(MSNRDP)3种方法作为对比,分析了在不同网络负载下各个方法的网络阻塞率和频谱利用率。【结果】仿真结果表明,与KSPFFDP、RSNRDP和MSNRDP相比,文章所提方法能明显降低网络的阻塞率,提高资源利用效率,解决了光网络的传输质量问题。【结论】因此,通过IASADP可实现C+L波段光网络频谱资源优化的目标。

关键词:C+L波段;专用保护;距离自适应调制;损伤感知

中图分类号:TN915 **文献标志码:**A

Impairment-Aware Resource Optimization Method with Dedicated Path Protection in C+L Band Optical Networks

YANG Shiqi¹, ZHU Changyin¹, WANG Xiaoling¹, SHAO Weidong¹, LI Fan², CHEN Bowen¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. China Comservice Wanging Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: 【Objective】 With the continuous development of Artificial Intelligence (AI), a wide range of AI-driven applications is rapidly emerging. The growing service requirements have progressively surpassed the capacity of the existing network bandwidth resources, thus making spectrum expansion an essential avenue for capacity enhancement. Therefore, introducing C+L band optical networks can effectively address the problem of limited bandwidth capacity. 【Methods】 To reduce blocking probability and ensure network survivability, this paper considers the impact of spectrum allocation on both the C and L bands, employing different strategies for the selection of the working path and protection path, spectrum resource assignment, and modulation format selection. We propose an Impairment-Aware Spectrum Allocation method with Dedicated Protection (IASADP) in C+L band elastic optical networks. For comparison, three dedicated protection strategies are introduced: the Kth Shortest-Path First-Fit with Dedicated Protection method (KSPFFDP), Revalidated Signal-to-Noise Ratio with Dedicated Protection method (RSNRDP), and Maximize Signal-to-Noise Ratio with Dedicated Protection method (MSNRDP). The performance of these methods is analyzed under different network loads in terms of blocking probability and spectrum utilization. 【Results】 Simulation results show that, compared with KSPFFDP, RSNRDP, and MSNRDP, the proposed method significantly reduces the blocking probability, improves the spectrum utilization, and achieves higher transmission quality. 【Conclusion】 Therefore, the IASADP effectively achieves the goal of optimizing spectrum resources in C+L band optical networks.

Key words: C+L band; dedicated protection; distance adaptive modulation; impairment awareness

0 引言

第五代无线网络、物联网和虚拟现实等新兴技术的普及引发了网络数据流量的迅猛增长。导致基于传统波分复用(Wavelength Division Multiplexing,

WDM)结构的光通信网络容量已逐渐无法满足未来日益增长的带宽需求。目前空分复用(Spatial Division Multiplexing, SDM)技术被视为提升传输能力的重要途径之一^[1-3],这种技术主要通过3种途径来扩充空间信道,分别是多芯光纤、少模光纤或

收稿日期:2025-09-20; 修回日期:2025-10-20; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2903303);国家自然科学基金资助项目(62471327)

作者简介:杨仕奇(2002-),男,河南郑州人。硕士,主要研究方向为多波段光网络生存性资源优化。

通信作者:陈博文,副教授。E-mail: bwchen@suda.edu.cn

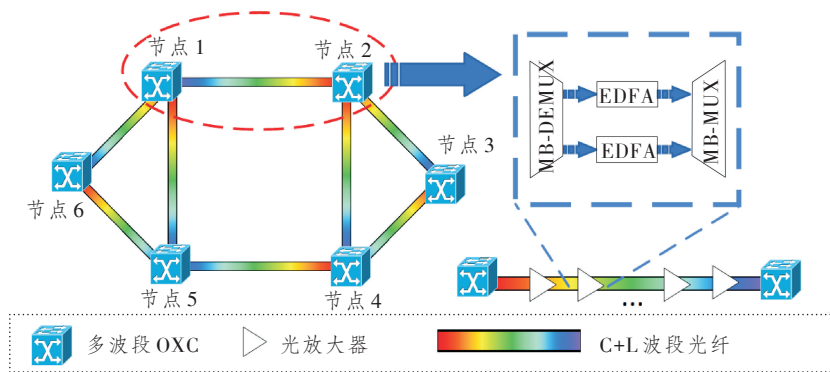
© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

多模光纤以及少模多芯光纤。近年来,针对 SDM 光网络的资源配置与体系优化已有多项研究成果。针对异构多芯光纤中的芯间串扰问题,考虑频谱从 C 波段拓展至 L 波段,构建基于按需架构节点的多维 SDM 弹性光网络,提出面向多域 SDM 弹性光网络的风险规避光路配置算法,以提升网络资源利用率,降低网络阻塞率^[4-7]。然而,从 C 波段拓展到 L 波段,会引入放大噪声累积、功率不均衡及跨波段性能差异等问题。特别是加剧通道间受激拉曼散射 (Inter-Channel Stimulated Raman Scattering, ISRS) 和放大器自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 噪声,这些损伤因素会严重劣化当前连接请求的传输质量,因此在部署 C+L 波段时,对链路传输性能进行准确评估至关重要。针对多波段资源分配问题,提出了多波段混合场景下的资源分配方案,通过采用不同调制格式的方式,提出了多波段的频谱资源分配方法,有效地提高了网络的频谱资源效率^[8-9]。此外,为了保障光网络的可靠性,需要为工作路径和与链路不相交的保护路径进行频谱资源分配,解决光网络生存问题。对每个连接的光信噪比 (Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR) 进行实

时监测与评估,能够及时发现光纤链路性能退化,以及预测网络潜在风险,降低光网络业务发生故障的概率,提高网络传输可靠性。

1 C+L 波段弹性光网络模型

C+L 波段弹性光网络模型如图 1 所示,6 个交换节点为多波段光交叉连接器 (Optical Cross-Connect, OXC),在不同的光路径之间进行光信号交换,节点间通过光纤链路连接。该 C+L 波段弹性光网络的物理拓扑可以定义为 $G(V, D, F)$, 其中, V 为网络中所有光交换节点的集合,可以表示为 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$; D 为光纤链路的集合; F 为两个交换节点之间光纤中所有可用的频谱隙总数量,设置 C+L 波段的频谱隙总数量为 916, 其中 375 个属于 C 波段, 10 个 (376~385) 是 C 和 L 波段之间的保护带宽, 剩下的 531 个频谱隙属于 L 波段^[10]。网络中每一个连接请求用 $CR(s, d, B, t_s, t_d)$ 来表示, 其中, s 和 d 分别为连接请求在拓扑中传输路径的源节点和宿节点; B 为当前请求所需要的带宽大小; t_s 和 t_d 分别为该连接请求的起止时间。



注: EDFA 为掺铒光纤放大器; MB-DEMUX 为多波段分波器; MB-MUX 为多波段合波器。

图 1 C+L 波段弹性光网络模型

Figure 1 C+L band elastic optical network architecture

2 距离自适应调制和 OSNR 评估模型

2.1 距离自适应调制方法

为减少非线性损伤,根据路径距离选择合适的调制格式,进而计算所需的频谱隙数量。本文考虑了 4 种不同调制格式:二进制相移键控 (Binary Phase Shift Keying, BPSK)、正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)、8 阶正交幅度调制 (8-ary Quadrature Amplitude Modulation, 8-QAM) 和 16 阶正交幅度调制 (16-ary Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM)。将这 4 种调制

格式作为一个集合 $M = \{1, 2, 3, 4\}$ 。为满足带宽需求 B , 在频谱资源分配时, 所需频谱隙数量 F_r 由所选调制格式的频谱效率决定, r 为第 r 个连接请求, F_r 计算公式为

$$F_r = \left\lceil \frac{B}{M \cdot \Delta} \right\rceil + GB, \quad (1)$$

式中: Δ 为每个频谱隙的带宽大小, 设置 $\Delta = 12.5$ GHz; GB 为保护频谱隙。在调制格式的选择上, 通过计算每个连接请求所选工作路径的实际物理传输距离, 在满足传输距离要求的基础上选取效率最高的调制格式, 如表 1 所示。

表 1 不同调制格式下 OSNR 阈值

Table 1 OSNR threshold under different modulation formats

调制格式	调制水平	传输距离范围/km	OSNR 阈值/dB
BPSK	1	>4 000	9.0
QPSK	2	(2 000, 4 000]	12.0
8-QAM	3	(1 000, 2 000]	16.0
16-QAM	4	≤1 000	18.6

2.2 OSNR 评估模型

在 C+L 波段光网络中, OSNR 只考虑传统的 ASE 噪声。ASE 噪声是光放大器在放大光信号过程中产生的自发辐射光子噪声。在长距离传输系统中, 光信号经过多个光放大器级联后, ASE 噪声会逐段累积。ISRS 的产生原因是当光在光纤中传输时, 光子与光纤中的分子相互作用, 引起分子振动。克尔电光效应在光通信中导致多种现象, 如自相位调制 (Self-Phase Modulation, SPM)、交叉相位调制 (Cross-Phase Modulation, XPM) 和四波混频 (Four-Wave Mixing, FWM)。所以在多波段网络中, 非线性效应引起的噪声与 ASE 噪声同等重要, 都是在计算 OSNR 时不可忽略的部分。本文中采用式 (2) 计算连接请求 r 的 OSNR $OSNR^r$ ^[11]:

$$OSNR^r = \frac{P^r}{P_{ASE}^r + P_{NLI}^r}, \quad (2)$$

式中: P^r 为连接请求 r 的发射功率; P_{ASE}^r 为 r 的 ASE 噪声功率; P_{NLI}^r 为 r 在传输过程中所有非线性效应引起的噪声功率, 主要分为自信道干扰 (Self-Channel Interference, SCI) 噪声功率和交叉信道干扰 (Cross-Channel Interference, XCI) 噪声功率。 P_{ASE}^r 可表示为

$$P_{ASE}^r = \sum_{l \in p^r} \sum_{s=1}^{N_l} 2n_{sp} h f_r B_r (e^{\alpha L_s^l} - 1), \quad (3)$$

式中: p^r 为 r 所选择的工作路径; N_l 为链路 l 的跨度数, 即沿链路 l 部署的连接请求数; n_{sp} 为自发发射因子; h 为普朗克常数; f_r 为连接请求 r 的中心频率; B_r 为 r 的所需带宽; L_s^l 为链路 l 的第 s 个跨度的长度; α 为光纤衰减系数。

P_{NLI}^r 可表示为

$$P_{NLI}^r = \sum_{l \in p^r} (P_{SCI}^{r,l} + P_{XCI}^{r,l}), \quad (4)$$

式中: $P_{SCI}^{r,l}$ 为连接请求 r 在链路 l 中传输的 SCI 噪声功率; $P_{XCI}^{r,l}$ 为 r 在链路 l 中传输的 XCI 噪声功率^[12], $P_{SCI}^{r,l}$ 和 $P_{XCI}^{r,l}$ 的表达式分别为

$$P_{SCI}^{r,l} = N_l \frac{8}{81} \frac{\gamma^2 P^3}{\pi \alpha^2} \frac{1}{\phi_r B_r^2} \times \left[\frac{(2\alpha - D^l PC_k f_r)^2 - \alpha^2}{\alpha} \operatorname{asinh} \left(\frac{3\pi}{2\alpha} \phi_r B_r^2 \right) + \frac{4\alpha^2 - (2\alpha - D^l PC_k f_r)^2}{2\alpha} \operatorname{asinh} \left(\frac{3\pi}{4\alpha} \phi_r B_r^2 \right) \right], \quad (5)$$

$$P_{XCI}^{r,l} = N_l \frac{16}{81} \frac{\gamma^2 P^3}{\pi^2 \alpha^2} \sum_{r'} \frac{1}{\phi_{r,r'} B_{r'}} \times \left[\frac{(2\alpha - D^l PC_k f_{r'})^2 - \alpha^2}{\alpha} \operatorname{atan} \left(\frac{2\pi^2}{\alpha} \phi_{r,r'} B_{r'} \right) + \frac{4\alpha^2 - (2\alpha - D^l PC_k f_{r'})^2}{2\alpha} \operatorname{atan} \left(\frac{\pi^2}{\alpha} \phi_{r,r'} B_{r'} \right) \right], \quad (6)$$

式中: γ 为光纤的非线性系数; C_k 为归一化拉曼增益谱的线性回归斜率; D^l 为链路 l 下存在的其他连接请求的数量; $r' \in R^l$, R^l 为链路 l 已部署的连接请求; $f_{r'}$ 为已部署连接请求的中心频率, ϕ_r 和 $\phi_{r,r'}$ 可表示为

$$\phi_r = \beta_2 + 2\pi\beta_3 f_r, \quad (7)$$

$$\phi_{r,r'} = [\beta_2 + \pi\beta_3 (f_r + f_{r'})] (f_{r'} - f_r), \quad (8)$$

式中: β_2 和 β_3 为对应于不同组速度色散参数的线性斜率, 由式 (8) 可在涉及多波长长距离传输的高容量光网络中准确计算出 OSNR, 以评估传输质量。

3 IASADP

3.1 专用保护方法

由于光网络承载着巨大流量, 光网络的生存性至关重要。因此, 本文提出了损伤感知专用保护频谱分配方法 (Impairment-Aware Spectrum Allocation with Dedicated Protection method, IASADP), 为每个连接请求选择一条与工作链路不相交的保护路径, 并在所选择的工作路径和保护路径上分配相应的频谱资源。在专用保护方法中, 在光纤链路上的频谱资源只能被一个连接请求的保护资源占用^[13]。本文主要使用的 IASADP 如图 2 所示, 在该拓扑中建立两个连接请求, 采用专用保护时, 保护路径不能与工作路径的链路相交。一个连接请求的保护资源只能被该连接请求占用。当频谱资源被占用为保护资源时, 其他连接请求的工作资源和保护资源都不能占用该频谱资源。

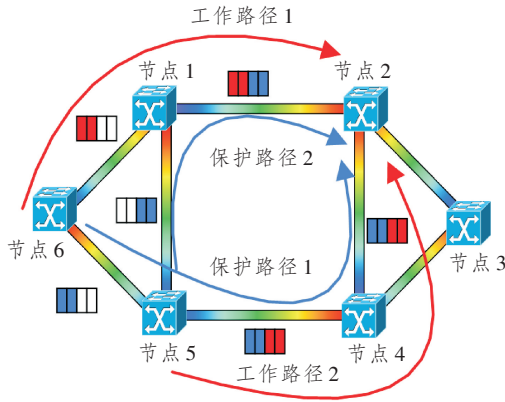


图2 专用路径保护方法

Figure 2 Dedicated path protection method

3.2 损伤感知的频谱选择方法

在确定了请求的工作路径和保护路径之后,需要在路径上寻找可用的频谱资源,每一个候选路径有多条链路,每条链路存在的连接请求不完全相同,需要根据频谱一致性和频谱连续性原则,对每条链路上的可用频谱资源进行评估,如果找到多个可用的频谱隙区域,需要对所有可用的候选频谱块进行评估,评判标准包括两个方面:一方面需要考虑分配在该候选区域时受到的SCI影响;另一方面需要考虑分配在该区域时与其他请求之间产生的XCI影响。图3所示为损伤干扰的示例,图中, $I_{m,n}$ 为以频谱隙索引和路径链路为维度的二维损伤感知矩阵中的矩阵元素,为连接请求 r 在当前路径下,在第 n 条链路中,索引值为 m 的频谱隙下的损伤值。 f 为频谱区域,在寻找可用资源时,需要满足频谱一致性和频谱连续性的原则,图中黑色虚线区域为不满足两个原则的空闲频谱区域,用符号 \otimes 标记。图中的1和2则为满足条件的可用频谱区域,用①和②表示。对于候选可用频谱区域逐个进行干扰计算,链路可用频谱区域①和②中都存在3个已部署的连接请求,其都会对当前部署的连接请求产生叠加干扰,表示不同干扰时间下,当前链路上每个已部署的连接请求对部署在候选可用频谱区域时产生干扰的示例。

为了准确计算损伤影响,构建以频谱隙索引和路径链路为维度的二维损伤感知矩阵,矩阵元素为 $I_{m,n}$ 。 $I_{m,n}$ 由两部分组成:一部分表示请求在传输过程中的SCI,另一部分表示请求在传输过程中的XCI。在量化XCI时,引入了一个与时间相关的权重因子,该权重因子与已存在请求干扰当前请求的持续时间成正比,较短的干扰持续时间对应于较低的XCI贡献权重系数。

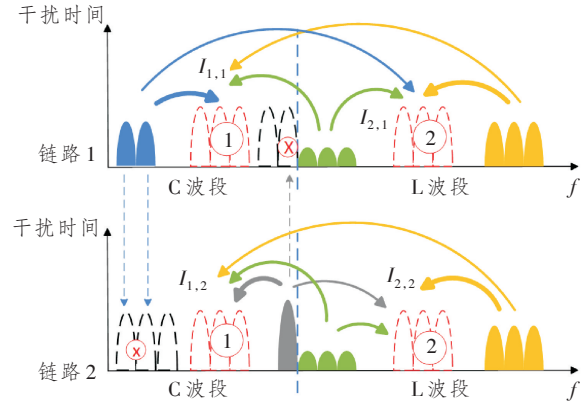


图3 损伤干扰的示例

Figure 3 An example of impairment interference

如图4所示, $r_{a,b}$ 为在第 a 条链路上已部署的第 b 个连接请求,图中,链路1和链路2上均有4个已部署的请求,链路3上有3个已部署的请求。首先,根据频谱一致性和频谱连续性准则,在连接请求经过的3条链路中找到所有可用的频谱区域,如图所示的3个频谱区域可用,然后对每条链路进行损伤建模。在链路1中对于可用频谱区域1,链路中已有4个连接请求,根据候选频谱区域1当前的波段,以及已存在连接请求的持续时间和占据的波长段,计算出区域1的损伤值 $I_{1,1}=20.13$ 。利用相同方法计算出其他候选可用频谱区域的损伤值,以及其他链路上各个候选频谱区域的损伤值。最后,将不同链路上相同候选频谱区域的损伤值进行联合,得到损伤值最小的区域1即为该连接请求分配的可用频谱区域。

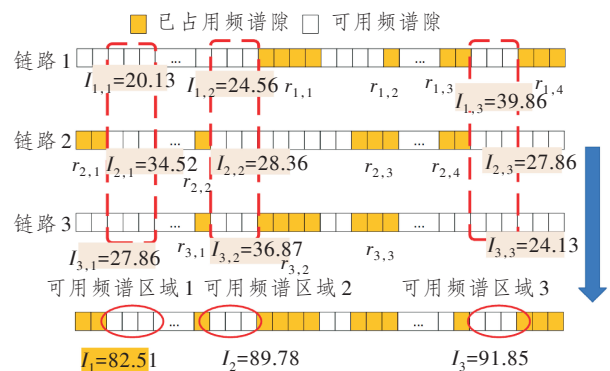


图4 基于损伤感知的频谱分配区域选择示例

Figure 4 An example of impairment-aware spectrum allocation

3.3 IASADP 描述

IASADP 主要分为两个阶段。第1阶段是建立工作路径和分配工作频谱资源,只有工作路径建立以及分配资源成功之后,才进行第2阶段建立与工作路径链路不相交的保护路径和分配保护频谱资源

源。IASADP 的具体步骤如下：

步骤 1: 对 C+L 波段弹性光网络进行初始化, 即初始化网络 $G(V, D, F)$ 。光通道使用固定线路率 R (单位为 Gbit/s)。

步骤 2: 选取一组连接请求集合 CR , 连接请求以到达时间的先后进行排序, 从 CR 中取出到达时间最早的连接请求。利用 K 条最短路径 (K -Shortest Path, KSP) 算法, 计算 K 条候选工作路径, 作为一个集合 $P^w = \{P_1^w, P_2^w, P_3^w, \dots, P_K^w\}$, w 为工作路径, 以光纤链路的物理距离长短判断优先级, 距离越短优先级越高。若建立工作路径成功, 选择集合中优先级最高的一条路径, 进入步骤 4; 若集合为空, 则该连接请求阻塞。

步骤 3: 计算在该路径上光纤链路的物理总距离, 根据表 1 选择效率最高的调制格式 e , 并计算出集合 $M = \{1, 2, \dots, e\}$, 其为连接请求传输中可用的调制格式。根据式 (1) 计算在该调制格式下连接请求传输所需要的频谱隙数量, 进入步骤 4; 若集合 M 为空, 则返回步骤 2。

步骤 4: 检查所选路径上的频谱资源占用状况, 根据频谱一致性和频谱连续性约束条件, 遍历出所有可用的频谱资源并记录频谱隙索引值 S_j , 作为一个频谱隙索引集合 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_j\}$ 。如果集合非空, 进入步骤 5, 否则返回步骤 3。

步骤 5: 对于频谱隙索引集合 S 计算相应的损伤值 I , 并将路径上每个 S_j 对应的所有链路 I 相加, 采用 I 越小优先级越高的原则, 重新对频谱隙索引

集合 S 进行排序。

步骤 6: 以频谱隙索引集合 S 中优先级最高的值作为该连接请求在频谱中的预占用索引, 利用式 (2) 计算 OSNR, 若满足 OSNR 阈值, 将该处频谱标记为工作路径占用, 进入步骤 7; 若不满足 OSNR 阈值, 选择优先级次之值作为预占用索引, 若集合为空, 返回步骤 3。

步骤 7: 在网络拓扑中删除工作路径 P^w , 利用 KSP 算法计算 K 条候选保护路径, 作为一个保护路径集合 $P^p = \{P_1^p, P_2^p, P_3^p, \dots, P_K^p\}$, 其中 p 为保护路径, 在保护路径上执行步骤 3~5, 得到保护路径上可用的索引值集合 S' , 以集合 S' 中优先级最高的值作为该连接请求在频谱中的预占用索引。利用式 (2) 计算 OSNR, 若满足 OSNR 阈值, 将该处频谱标记为保护路径占用的频谱资源, 并进入步骤 8; 若不满足 OSNR 阈值, 选择优先级次之的值作为预占用索引; 若集合为空, 重新选取调制格式, 重复上述步骤。若无可用调制格式, 在 P^p 重新选取路径, 直至 P^p 为空。

步骤 8: 更新工作路径和保护路径上频谱资源占用状态, 如果连接请求结束, 释放占用的频谱资源。如果存在未处理的连接请求, 选择接下来需要处理的连接请求进入步骤 2; 如果所有连接请求处理完成, 计算连接请求的阻塞率、频谱利用率和平均 OSNR。

C+L 多波段弹性光网络的 IASADP 流程图如图 5 所示。

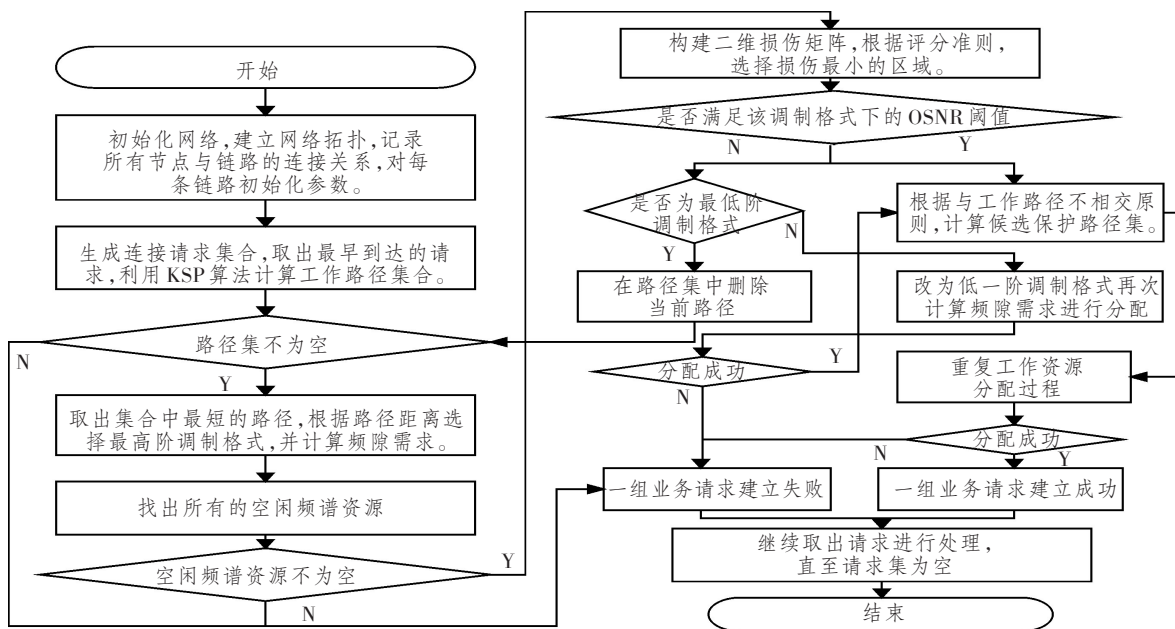


图 5 IASADP 流程图

Figure 5 The flowchart of IASADP

4 仿真与结果分析

4.1 仿真条件设置

如图6所示,本文在14节点的国家自然科学基金会网络(National Science Foundation Network, NSF-NET)中讨论了IASADP,并与 K 条最短路径首次命中专用保护方法(K th Shortest-Path First Fit with Dedicated Protection method, KSPFFDP)、基于信噪比再验证的专用保护方法(Revalidation Signal-to-Noise Ratio with Dedicated Protection method, RSNRDP)和基于最大化信噪比的专用保护方法(Maximized Signal-to-Noise Ratio with Dedicated Protection method, MSNRDP)这几种方法作了对比。KSPFFDP是使用KSP方法找到候选路径后,从较小序号的频谱隙开始搜索可用的连续频谱资源段,以满足该连接请求的带宽需求;RSNRDP以同样的方法找到路径,以连接请求持续时间以及所需带宽作为选择标准,分别用首次命中和最后命中在C和L波段寻找频谱资源;MSNRDP选择路径的方法与其他两种方法相同,在寻找频谱资源时,选择OSNR最大的频谱区域。

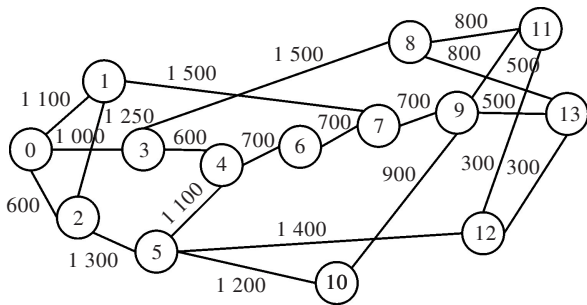


图6 NSFNET网络拓扑图

Figure 6 The network topology of NSFNET

仿真采用NSFNET网络拓扑,图中,光纤链路上的各个数字表示节点之间的物理链路实际传输距离(单位为km),在该拓扑中每条光纤链路上的频谱隙设置为12.5GHz,设置C+L波段的频谱隙总数量为916,其中375个属于C波段,10个频谱隙为C和L波段之间的保护带宽,531个频谱隙属于L波段。连接请求所需带宽资源 B 在12.5~200.0Gbit/s之间服从均匀分布,连接请求到达时间服从泊松分布 λ , λ 的取值范围为0.3~0.9,离去时间的间隔服从负指数分布 μ , μ 的值设为0.001,每个请求的源、宿节点在拓扑的各个节点中均匀分布。在源节点和宿节点之间使用KSP选择候选路径时,设置候选路径数量 $K=3$ 。

4.2 仿真结果分析

①网络阻塞率。网络阻塞率定义为光网络中未传输成功的连接请求数量与总连接请求数量的比值。在网络负载相同的情况下,较低的网络阻塞率证明该方法在这个指标上表现较好。如图7所示,与其他方法相比,IASADP的阻塞率最低。一方面,IASADP根据连接请求工作路径的实际传输距离,在4种调制格式中优先选择效率最高的,从而节省出更多的频谱隙资源,提升了网络容纳能力;另一方面,IASADP在频谱资源选择过程中,以连接请求持续时间为比重,计算连接请求之间的干扰,能够满足OSNR阈值要求。因此,IASADP的阻塞率在4种方法中最低。

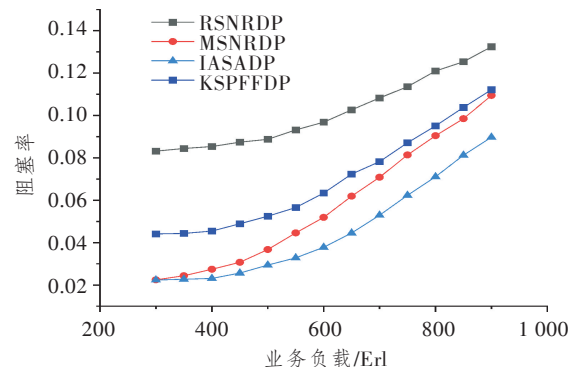


图7 不同网络负载下的网络阻塞率

Figure 7 The blocking probability under different traffic load

②频谱利用率。图8统计了在不同网络负载下各资源分配方法的频谱资源利用率。仿真结果表明,与KSPFFDP、RSNRDP和MSNRDP方法相比,IASADP在实现较低阻塞率的同时,实现了较高的频谱资源利用率。IASADP结合对可用频谱区域的评分以及根据传输距离自适应调整调制格式两种方式,在占用更少的频谱隙的同时保证了传输质量,能够得到更多的可用区域,连接请求成功传输的更多,频谱资源利用率更高。

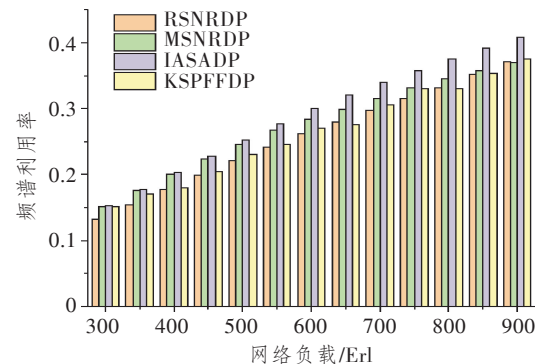


图8 不同网络负载下的频谱利用率

Figure 8 The spectrum utilization ratio under different traffic load

③平均 OSNR。如图 9 所示,随着连接请求数量的增加,连接请求的平均 OSNR 呈下降趋势。这是因为随着网络负载的增加,单位时间内到达的连接请求数量增多,频谱资源变得更加紧张,而频谱资源的限制会导致频率重叠和干扰增加。由图可见,MSNRDP 表现最优,这是因为在频谱分配阶段,MSNRDP 主动计算并选择候选频谱块中 OSNR 值最高的区域分配给连接请求。通过这种基于 OSNR 最大化的资源分配方式,MSNRDP 有效地优化了每个连接请求的传输质量,提升了平均 OSNR 水平;IASADP 次之,虽然 IASADP 方法对全部可用频谱区域进行了评分,但是加入了连接请求持续时间作为权重,忍受了即将结束的连接请求干扰。因此,IASADP 的平均 OSNR 比 MSNRDP 算法低。

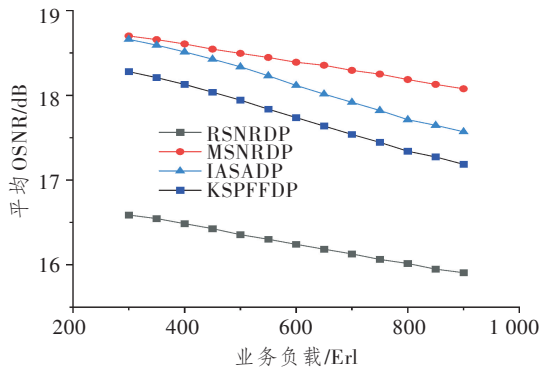


图 9 不同网络负载下的平均 OSNR

Figure 9 The average OSNR under different traffic load

5 结束语

在 C+L 波段弹性光网络中,本文首先根据距离自适应选择调制格式,减少了频谱资源的浪费,提高了平均 OSNR;其次考虑了连接请求的持续时间,提出了损伤感知的 C+L 波段光网络专用保护资源优化方法,进一步提高了频谱资源的利用。仿真结果表明:与 KSPFFDP、RSNRDP 和 MSNRDP 相比,本文所提 IASADP 可以有效地降低阻塞率,提高了频谱利用率,保证了较高的传输质量。

参考文献:

[1] Zhou J, Lu J, Yu C. Improving the Accuracy of QoT Estimation with Insertion Loss Distribution Evaluation for C + L Band Transmission Systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(1): 12-20.
 [2] Guo N, Shen G, Deng N, et al. Can Channel Power Optimization with GSNR Flatness Maximize Capacities of C L-Band Optical Systems and Networks?[J]. Jour-

nal of Lightwave Technology, 2024, 42(16): 5506-5521.
 [3] Hosseini S, De Miguel I, Merayo N, et al. Enabling Service Level Agreement - Differentiated Protection in C+L Multiband Optical Networks [J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 6: 316-331.
 [4] Zhang Q, Zhang X, Gong X, et al. Crosstalk - Avoid Virtual Optical Network Embedding over Elastic Optical Networks with Heterogeneous Multi - Core Fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(24): 7687-7700.
 [5] Zhang X, Feng C, Gong X, et al. On Throughput Optimization in Software - Defined Multi - Dimensional Space Division Multiplexing Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(9): 2635-2651.
 [6] Zhang X, Xu C, Zeng H, et al. Risk - Avoid Lightpath Provision in Space Division Multiplexing Elastic Optical Data Center Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(5): 2100-2116.
 [7] Teng Y, Yang H, Yao Q, et al. SRS - Proactive - Aware Resource Allocation based on All-Optical Wavelength Converters in C L Band Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(19): 6632-6646.
 [8] Yao Q, Yang H, Bao B, et al. SNR Re - Verification - based Routing, Band, Modulation, and Spectrum Assignment in Hybrid C - C L Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(11): 3456-3469.
 [9] Sambo N, Ferrari A, Napoli A, et al. Provisioning in Multi - Band Optical Networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(9): 2598-2605.
 [10] Ghasrizadeh S M, Arpanaei F, Beyranvand H. QoT - Aware Tree Selection, Routing, Modulation, and Spectrum Assignment for Filter Less Eons over C+L Band [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(1): 127-141.
 [11] Mehrabi M, Beyranvand H, Emadi M J. Multi - Band Elastic Optical Networks: Inter - Channel Stimulated Raman Scattering - Aware Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3360-3370.
 [12] Zhang X, Xie W, Feng C, et al. Nonlinear Interference - Aware Routing, Wavelength and Power Allocation in C+L+S Multi - Band Optical Networks [J]. China Communications, 2025, 22(4): 129-142.
 [13] Zhang X, Zeng H, Feng C, et al. Spectrum - Efficient Hybrid Protection with Dedicated and Shared Paths in Elastic Optical Data Center Networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2025, 242: 104238.