

引用本文: 陈尚君, 蔡一峰, 蓝求旺, 等. 多芯光纤中基于共享风险组的生存性 RCSA 算法[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 40–44.

多芯光纤中基于共享风险组的生存性 RCSA 算法

陈尚君, 蔡一峰, 蓝求旺, 陈鑫, 沈建华*

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要:传统空分复用弹性光网络中仅考虑纤芯频谱资源的无保护分配, 缺少对业务生存性的保障。提出了一种基于共享风险组的生存性路由纤芯频谱分配(RCSA)改进算法, 该算法基于共享风险纤芯组的设想, 在单根多芯光纤中同时分配业务的工作频隙和保护频隙, 并基于纤芯间串扰机理引入了业务分配优先度参数, 根据优先度选择引起串扰最小的频隙分配方案。仿真结果表明, 所提算法可以在保障业务生存性的同时有效减少带宽阻塞率和芯间串扰。

关键词:空分复用弹性光网络; 共享风险组; 路由纤芯频谱资源分配; 生存性

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0040-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Survivability RCSA algorithm based on shared risk group in multi-core fiber

CHEN Shangjun, CAI Yifeng, LAN Qiuwang, CHEN Xin, SHEN Jianhua*

(College of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Traditional space division multiplexing flexible optical network (SDM-EON) only considers the unprotected allocation of fiber core spectrum resources, which lacks of survivability guarantee. This paper proposes an survivable routing core spectrum allocation(RCSA) improved algorithm based on shared risk group. The algorithm allocates the working frequency slots and the protection frequency slots in single multi-core fiber based on the idea of shared risk core group at the same time, and puts forward the priority parameter of service allocation based on the crosstalk mechanism, and the frequency slots allocation scheme which causes the least crosstalk is selected according to the priority. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce the bandwidth blocking probability and inter-core crosstalk while ensuring service survivability.

Key words: space division multiplexing elastic optical network, shared risk group, routing core spectrum resources allocation, survivability

0 引言

全球范围内互联网应用保持了快速增长趋势, 预计到 2023 年将有 293 亿台设备接入互联网^[1]。急剧增长的互联网流量需求对承载光网络提出了巨大挑战。传统的波分复用(WDM)网络中相邻信道之间遵循固定间隔, 其频谱栅格固定和带宽粒度较粗, 使得 WDM

网络在面对当前及未来复杂多变的业务需求时存在网络频谱利用率低和扩展性较差等缺点^[2]。相比 WDM 网络, 弹性光网络(EON)基于正交频分复用(OFDM)技术, 具有更高的频谱分配灵活性、频谱利用率和更快的传输速率^[3], 被学术界和工业界广泛认为是下一代基础承载网络的主要解决方案。

作为当前互联网的基础网络架构设施, 光网络运行中可能会受到各种物理灾害(如洪水、飓风和地震等)或人为破坏导致的故障。一旦基础承载光网络由于各种灾害原因出现业务受阻, 就会导致许多重要服务的崩溃^[4]。生存性是网络质量保障的重要基础, 网络生存性指的是故障发生期间, 网络仍然能够保证业务质量在可接受范围内的能力。EON 中的网络保护机制

收稿日期: 2021-12-31。

作者简介: 陈尚君(1997—), 男, 江苏苏州人, 硕士, 现就读于南京邮电大学通信与信息工程学院电子与通信工程专业, 主要研究方向为空分复用弹性光网络中的生存性问题以及路由选择和纤芯频谱分配问题。

* **通信作者:** 沈建华(1972—), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为高速大容量光纤通信系统。



一般是通过提前预留保护频隙资源,在故障发生时用于切换受损的业务,是保障网络生存性的一个重要手段,包括专用保护和共享保护等不同方案。为了进一步提高承载光网络的容量,基于多芯光纤(MCF)的空分复用弹性光网络(SDM-EON)近年来受到广泛关注。SDM-EON 虽然可以进一步扩大光网络传输容量^[9],但其承载的业务流量太大,一旦发生故障且无法快速恢复受损业务时,可能会造成更大的损失甚至难以估量的后果。相较于传统 EON 中的路由频谱分配(RSA)问题,基于 MCF 的 SDM-EON 在路由纤芯频谱分配(RCSA)时,引入的芯间串扰会随着传输距离的增大而增加,严重影响信号的传输质量,同时也对于保护资源预留和分配提出了更大的挑战。因此,SDM-EON 中保护机制和 RCSA 已经成为影响其发展的关键。

针对基于 MCF 中的 RCSA 问题,文献[6-10]的工作主要集中在如何减小芯间串扰及频谱碎片以降低阻塞率,但缺少对网络生存性的保障;文献[11]在 SDM-EON 中提出了一种基于多路径的路径保护 RCSA 算法,通过使用多路径分配多个连续小频带来提供业务保护,从而降低阻塞率;文献[12]提出了一种使用生存多径方案的距离自适应能量感知资源分配(DER-A)算法,利用频谱紧凑性实现了生存多径方案,从而最小化 SDM-EON 中的动态串扰。以上研究虽然已经开始关注如何在 MCF 中提供生存性支持,但研究内容缺少对 MCF 特性的充分利用,尤其是在考虑串扰对 RCSA 影响的同时,如何将保护资源配置与 RCSA 有机结合在一起的研究尚处于初期阶段。基于此,本文针对 SDM-EON 提出一种基于共享风险组(SRG)和串扰(XT)的生存性 RCSA(SRG-XT-RCSA)算法。

1 算法工作原理

针对网络保护,国际标准化组织 IETF 提出了共享风险链路组(SRLG)的概念,SRLG 指共享相同物理资源的一组链路^[13]。一组 SRLG 也具有共同的失效风险,为了提高生存性,光网络中可以采用专用保护的思想,即将业务的工作路径和保护路径建立在不同的 SRLG 上以降低失效风险。对基于 MCF 的 SDM-EON 而言,SRG 的概念可以不局限于传统的 SRLG,本文基于不同的故障风险概率将多根纤芯划分为不同的共享风险纤芯组。当 MCF 在灾害影响下发生光纤切断故障时,从纤芯同时受损概率角度而言,只有在故障严重到切断程度最大时,才可能出现除了中心纤芯外的每根纤芯与其对角的纤芯同时被切断情况,因此对角

纤芯同时发生故障的概率最小。由于位于对角侧的 2 根纤芯拥有不同的失效风险,本文将这一对纤芯划分在不同的共享风险纤芯组内,再将业务的工作频隙和相应的保护频隙分配在同一根光纤内,从而有效地解决了传统 EON 保护机制中工作频隙和保护频隙需要占用不同光纤的局限性。

共享风险纤芯组示例如图 1 所示,通过对角纤芯(纤芯 0 和纤芯 3、纤芯 1 和纤芯 4、纤芯 2 和纤芯 5)划分在不同的共享风险纤芯组内,可将某业务工作纤芯对角纤芯的频谱资源分配为相应的保护资源。例如,当工作业务建立在纤芯 0 上时,将保护资源分配在纤芯 3 的对应频隙上。假设灾害发生导致

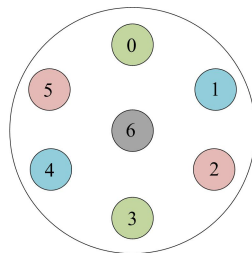


图 1 共享风险纤芯组示例

少于半数纤芯出现故障,此时中心纤芯 6 不会发生故障,则在中心纤芯分配的业务可不分配保护资源。通过设立共享风险纤芯组,并在其中进行工作和保护频隙分配,不仅可以提供生存性保障机制,同时也避免了传统专用保护算法中保护路径需要选择不同 SRLG 的路径问题。本算法工作和保护路径都可以选择最短路径,避免了频谱资源的浪费,从而获得相较于传统专用保护更低的带宽阻塞率。

芯间串扰是 SDM-EON 中不可忽视的一项重要性能指标。MCF 中不同纤芯承载业务时可能引入串扰导致信号失真。通常认为只有相邻纤芯相同位置的频隙被占用时易出现芯间串扰,不相邻纤芯间产生的串扰可以忽略不计^[14]。因此,位于中心位置的纤芯具有最多的相邻纤芯数量。为了减少芯间串扰,中心纤芯的业务分配优先级相对于其它纤芯应更低。在为业务分配工作频隙时,针对工作频隙所在纤芯,应尽量选取相邻纤芯中同序号且未被占用的频隙;分配保护频隙时,针对保护频隙所在纤芯,应尽量选取相邻纤芯中同序号且已被占用的频隙。定义业务分配优先级 φ 为

$$\varphi = \sum_{m=1}^M \varphi(m) \quad (1)$$

其中, $\varphi(m)$ 表示第 m 条链路上的分配优先度, M 表示路径中的链路数量。则第 l 条链路上的分配优先度 $\varphi(l)$ 为

$$\varphi(l) = \sum_{j=1}^J \varphi_j^i \quad (2)$$

陈尚君, 蔡一峰, 蓝求旺, 等: 多芯光纤中基于共享风险组的生存性 RCSA 算法

其中, φ_j^i 表示第 i 根纤芯中待分配频谱块的第 j 个频隙对应的分配优先度, J 表示待分配业务所需频隙数量。

$$\varphi_j^i = \begin{cases} \sum_{k \in p} f_j^{kl} - \sum_{n \in w} f_j^{nl}, & i \neq 6 \\ - \sum_{n \in w} f_j^{nl}, & i = 6 \end{cases} \quad (3)$$

其中, w 表示与工作频隙分配纤芯相邻的纤芯集合, p 表示与保护频隙分配纤芯相邻的纤芯集合。 n 表示与第 i 根纤芯相邻的第 n 根纤芯, f_j^{nl} 表示第 l 条链路的第 n 根纤芯中第 j 个频隙的频谱占用状态, $f_j^{nl}=1$ 代表频隙被占用, $f_j^{nl}=0$ 代表频隙未被占用。 k 表示与第 i 根纤芯的对角纤芯相邻的第 k 根纤芯, f_j^{kl} 表示第 l 条链路的第 k 根纤芯中第 j 个频隙的频谱占用状态, $f_j^{kl}=1$ 代表频隙被占用, $f_j^{kl}=0$ 代表频隙未被占用。业务分配优先度 φ 越大, 表示在该位置分配业务时, 分配工作频隙和保护频隙下引起的串扰值越小。SRG-XT-RCSA 算法可根据业务分配优先度 φ 排序, 并记录可分配的工作保护频隙方案, 最终分配引起串扰最少的工作频隙和保护频隙。

2 算法实现流程和代码

SRG-XT-RCSA 算法基本流程如下: 首先, 输入业务请求 (s, d, r) , 其中 s, d 和 r 分别为源节点、目的节点和业务请求带宽速率。根据 K 最短路径(KSP)算法找出 K 条最短路径, 对应候选路径集 P 。然后, 根据路径长度由短到长依次遍历路径集 P , 对于每一条路径 p 对应的链路组, 将链路组中每条链路可以分配的频隙相与组成联合的频谱资源 S , 并按顺序从纤芯序号从 0 到 6 遍历 S 。在 S 中的当前纤芯遍历所有空闲频隙, 寻找能够满足请求速率为 r 的业务的连续空闲频谱块。如果可以分配连续的空闲频谱块满足业务请求, 则在集合 M 中记录该频谱块分配方案; 否则, 继续遍历下一个空闲频隙直到找到可分配方案。如果 M 中的方案数量大于等于集合容量 $size$ 则退出循环遍历; 如果 M 中方案数量小于 $size$, 则继续遍历 S 中下一根纤芯的频谱资源, 直到遍历完所有纤芯的联合频谱。遍历结束后, 对于 M 中的所有频谱块分配方案, 计算业务分配优先度, 并且选取业务分配优先度最大的方案建立业务。如果业务建立在非中心纤芯上, 则将保护频隙分配在其对角纤芯上索引相同的频隙上; 如果业务建立在

中心纤芯上, 则不分配保护频隙。若候选路径集 p 中所有纤芯都不能建立满足速率为 r 的业务, 业务被阻塞。

SRG-XT-RCSA 算法实现部分的伪代码如下:

输入: 网络拓扑、业务请求 (s, d, r)

1. 在网络拓扑中对于每一个业务请求, 利用 KSP 算法计算 K 条最短路径

2. M 为空集

3. For each 路径

4. 获取路径上所有链路的联合频谱资源 S

5. For each 空闲频谱块 in S

6. if 频谱块可承载业务

7. 在 M 中记录当前频谱块分配方案

8. if M 中方案数 $\geq size$

9. Quit

10. End if

11. End if

12. End for

13. End for

14. if M 为空集

15. 业务被阻塞

16. Else

17. 对 M 中所有频谱块分配方案分别计算业务分配优先度, 选取业务分配优先度最大的方案建立业务

3 数值仿真和结果分析

本文以 USNet 作为拓扑进行仿真实验, 对比分析 SRG-XT-RCSA 算法、传统专用路径保护(DPP)+首次命中(FF)算法和 SRG-RCSA 算法的性能。假设每条链路中只有一个光纤对, 每根光纤总频谱带宽为 4000 GHz, 最小频隙为 12.5 GHz, 频隙数为 320; 仿真业务数量为十万个, 业务请求按参数 λ 的泊松分布到达网络, 业务的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的指数分布, 取 $\mu=1$; 网络业务速率在 10~400 Gb/s 均匀分布; 在此实验环境下考虑降低算法复杂度, SRG-XT-RCSA 算法中集合容量大小设定为 100。仿真主要考察的性能指标为带宽阻塞率(BBP)和单位频隙串扰(C_pS)^[19]。BBP 和 C_pS 的定义分别为

$$BBP = \frac{S_b}{S_b + S_s} \quad (4)$$

$$C_pS = \frac{A}{U} \quad (5)$$

其中, S_b 表示被阻塞的业务集合, S_s 表示成功建立业务

的集合, A 表示处在相邻纤芯且占用同样频率的频隙对数量, U 表示所有被占用的频隙数量。CpS 越高, 表示芯间串扰越严重。

3 种算法的 BBP 性能对比如图 2 所示。可以看出, 在低负载(500 Erl)时, 3 种算法的 BBP 差异不明显, 这是由于 MCF 通过增加空间复用维度提高了传输容量, 因此 3 种算法的业务阻塞情况均较好; 在高负载(1500 Erl)时, 相较于 DPP-FF 算法, SRG-RCSA 算法和 SRG-XT-RCSA 算法的 BBP 分别改善了 56.5% 和 47.6%, 这是因为 SRG-RCSA 算法和 SRG-XT-RCSA 算法将业务的工作资源和保护资源建立在同一条路径上, 避免了 DPP 中基于 SRLG 思路寻找链路不相交的保护路径带来的频谱资源浪费; SRG-XT-RCSA 算法的阻塞率在不同网络负载下均略高于 SRG-RCSA 算法, 原因是 SRG-XT-RCSA 算法在频谱资源分配时通过业务分配优先度排序, 以相对较少的带宽阻塞率提升作为代价减少了串扰。

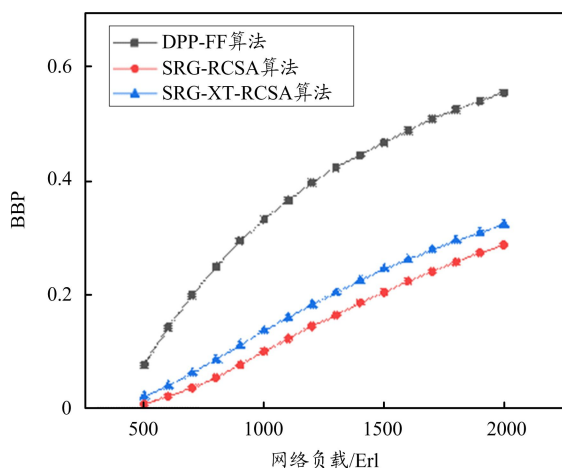


图2 BBP比较

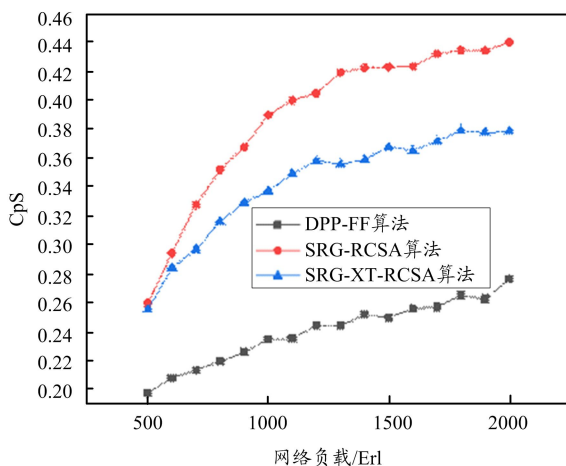


图3 CpS比较

3 种算法的 CpS 性能对比如图 3 所示。可以看出, SRG-RCSA 算法和 SRG-XT-RCSA 算法的 CpS 在不同网络负载下都高于 DPP-FF 算法, 这是因为 DPP-FF 算法阻塞率较高, 因此网络中同时传输的业务较少, CpS 值也就相对更低; 在高负载(1500 Erl)时, 相较于 SRG-RCSA 算法, SRG-XT-RCSA 算法的 CpS 降低了 13.1%, 这是因为 SRG-XT-RCSA 算法在业务建立时要按照业务分配优先度排序分配产生更低串扰值的工作频隙和保护频隙。

4 结束语

本文针对 SDM-EON 中的网络生存性和串扰问题, 提出了一种 SRG-XT-RCSA 算法。该算法针对多芯光纤故障失效特点, 通过在同一光纤中的对角纤芯分别分配相同频隙的工作频隙资源和保护频隙资源, 避免了在不同 SRLG 中分配工作资源和保护资源时带来的频谱资源浪费问题。同时, 基于纤芯间串扰机理引入了业务分配优先度, 根据优先度选择引起串扰最小的频隙分配方案。理论分析和数值仿真结果表明, 改进算法与 DPP-FF 算法相比, 能有效降低带宽阻塞率并减少芯间串扰。

参考文献:

- [1] Cisco. 思科重塑互联网基础设施, 支持更具包容性的未来[EB/OL]. [2021-3-31]. https://www.cisco.com/c/zh_cn/about/press/2021/03-31-1.html.
- [2] 程博凯, 杭程, 胡云霏, 等. 基于资源节约策略的弹性光网络碎片整理算法[J]. 光通信技术, 2020, 44(3): 45-48.
- [3] GERSTEL O, JINNO M, LORD A, et al. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): 12-20.
- [4] AGARWAL P K, EFRAT A, GANJUGUNTE S K, et al. The resilience of WDM networks to probabilistic geographical failures [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(5): 1525-1538.
- [5] ZHANG S Y, YEUNG K L. Dynamic service provisioning in space-division multiplexing elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(11): 335-343.
- [6] MUHAMMAD A, ZERVAS G, SIMEONIDOU D, et al. Routing, spectrum and core allocation in flexgrid SDM networks with multi-core fibers [C]//2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling, May 19-22, 2014, Stockholm, Sweden. Stockholm: IEEE, 2014: 192-197.
- [7] ZHU R, ZHAO Y L, YANG H. Multi-dimensional resource assignment in spatial division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fibers[C]//15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Sep. 24-27, 2016, Hangzhou, China. Hangzhou: IEEE, 2016: 1-3.

陈尚君, 蔡一峰, 蓝求旺, 等. 多芯光纤中基于共享风险组的生存性 RCSA 算法

- [8] CHATTERJEE B C, BA S, OKI E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(1): 183–210.
- [9] LEI Y, CHEN Q, JIANG Y, et al. Crosstalk-aware routing, core, and spectrum assignment with core switching in SDM-EONs [C]//18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Aug. 5–8, 2019, Huangshan, China. Huangshan: IEEE, 2019: 1–3.
- [10] LIU H, XIONG Q, CHEN Y. Routing core and spectrum allocation algorithm for inter-core crosstalk and energy efficiency in space division multiplexing elastic optical networks [J]. IEEE Access, 2020, 8 (1): 70453–70464.
- [11] OLIVEIRA H M N S, FONSECA N L S D. Multipath routing, spectrum and core allocation in protected SDM elastic optical networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec. 9–13, 2019, Waikoloa, USA. Waikoloa: IEEE, 2019: 1–6.
- [12] ZHU R, ARETOR S, WANG P, et al. Survival multipath energy-aware resource allocation in SDM-EONs during fluctuating traffic [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(7): 1900–1912.
- [13] 何荣希, 张治中, 李乐民, 等. IP/MPLS over WDM 网中基于共享风险链路组限制的共享通路保护算法[J]. 电子学报, 2002, 41(11): 1638–1642.
- [14] YANG M, ZHANG Y, WU Q. Routing, spectrum, and core assignment in SDM-EONS with MCF: node-arc ILP/MILP methods and an efficient XT-aware heuristic algorithm [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(3): 195–208.
- [15] FUJII S, HIROTA Y, TODE H, et al. On-demand spectrum and core allocation for reducing crosstalk in multicore fibers in elastic optical networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 6 (12): 1059–1071.