

光传输网的安全评估模型

Security Evaluation Model of Optical Transmission Network

刘树聪¹, 马重阳², 赵满良¹, 李乐坚¹, 毛志伟¹ (1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450007; 2. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033)

Liu Shucong¹, Ma Chongyang², Zhao Manliang¹, Li Lejian¹, Mao Zhiwei¹ (1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China; 2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

摘要:

随着光传输网络技术的不断发展和广泛应用,光传输网络的复杂度越来越高,光传输网络的安全性评估工作就显得尤为重要。针对光传输网络中的2种场景:底层光缆网拓扑和业务端到端,分别提出了安全评估模型。在对光缆网拓扑可靠性的研究中引入跳面概念,进一步完善了安全评价体系,为光传输网络的安全评估提供了新的思路。

关键词:

光传输网络;安全评估;光缆网;业务端到端
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.05.013
文章编号:1007-3043(2026)05-0068-05
中图分类号:TN913.3
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the continuous application and development of the optical transmission network technology, the complexity of optical transmission network is getting higher and higher, and the security evaluation of the optical transmission network is particularly important. Two security assessment models are proposed for two scenarios in the optical transmission network: the underlying optical cable network topology and the end-to-end service. The concept of jump plane is introduced into the study of topological reliability of optical fiber network, which enriches the safety evaluation system and provides some reference opinions and new ideas for the safety evaluation of the optical transmission networks.

Keywords:

Optical transmission network; Safety assessment; Optical cable network; Business end-to-end

引用格式: 刘树聪, 马重阳, 赵满良, 等. 光传输网的安全评估模型[J]. 邮电设计技术, 2026(5): 68-72.

1 概述

经过多年来的大力建设,各大运营商的光传输网络已具有相当的规模。光传输网络的建设重点正由以满足业务需求、构建基本网络结构为主的系统新建和扩容,转变为以增强网络可靠性、生存性为目标,通过对网络进行全面优化来提高网络的业务解决能力和综合效能,并有效降低网络总体成本。

随着网络规模的不断扩大和ASON技术的逐步引入,光传输网络的复杂程度日益增加^[1-2]:网络拓扑由

链状系统、环形网络全面向网状网过渡,网络的智能性和灵活性越来越高,用户对服务质量和网络安全的要求也更加严格和多样化^[3]。光传输网络建设方案的比选,也将由以往侧重于系统层面分析、以业务需求满足度和工程投资比较为主的简单比选,转变为更加重视网络层面分析,从业务需求满足度、业务质量满足度、工程投资、网络可靠性、网络扩展性等方面进行全面综合比选。安全是传输网络的重中之重。近年来,随着光传输网的发展,传统的安全分析方法已不能满足当前网络建设和优化方案的要求。

本文主要针对光传输网络中光缆网模型和端到端业务模型进行相应的安全性分析,建立一套科学完

收稿日期:2026-04-14

整的安全性评价模型,为运营商提供更加合理的网络建设和优化方案。

2 评价模型介绍

光传输网络由底层光缆网和传输系统共同构成,两者共同决定了光传输网的安全性。光缆网是光传输网的基础,所有的光信号传输和业务承载都需要在光缆网上进行,所以对光缆网的可靠性进行评价十分必要。对于传输系统而言,其可用性模型涉及链路、设备可用度指标,通过分析传输系统的结构可以最终得到业务可用性结果。

2.1 光缆网可靠性评价模型

光缆网具有固有可靠性,因为网络一旦建成,即使没有投入运营,该网络连通性相关的可靠性就已经确定^[4]。对于相对固定的网络拓扑,其可靠性计算模型有多种,其中最小路集算法可以很好地体现网络节点间的连通性^[5],但单一使用最小路集算法会丧失对网络整体性的考虑,所以需要在传统的评价模型基础上结合行业经验来丰富评价指标。

针对光缆网拓扑的可靠性模型,分别从整体网络拓扑、网络节点和拓扑链路3个维度制定评价指标。

2.1.1 网络拓扑整体指标

2.1.1.1 跳面定义

首先定义传输网络为 $G(N,E)$ ^[6]。接着引入网络跳面节点的概念,在网络 $G(N,E)$ 中,任意节点对之间都有一定跳数(可以理解为网络跨段)的距离,对于节点 N_i ,称与 N_i 具有相同跳数距离 a 的所有节点为 N_i 节点具有跳数 a 的跳面节点。

以图1所示的简单网络拓扑为例,针对节点 A ,其经过1个跨段可以到达节点 B 和节点 C ;经过2个跨段可以到达节点 D 和节点 E 。因此,节点 A 的第一跳面包括 $\{B,C\}$,第二跳面包括 $\{D,E\}$,这里的“第几跳面”也可称为跳数。需要注意的是,节点 A 同样可以通过 $A-C$ 、 $C-B$ 和 $B-E$ 3个跨段到达节点 E ,但在划分跳面时,是根据两节点间的最短跨段数来区分的。相应地,每

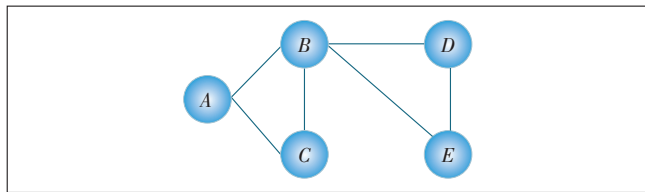


图1 拓扑示意1

个节点都可以按照跳数找到其所有跳面的节点集合。

2.1.1.2 拓扑指标计算方法

定义网络 $G(N,E)$ 的拓扑可靠性 R_c 为各网络节点到任一跳面节点可靠性的加权值,权值为该节点路由数量占全网路由数量的比例,计算公式如下:

$$R_c = \sum_{i=1}^N R_i w_i, R_i = \sum_{j=1}^M r_{ij}, w_i = \frac{t_i}{\sum T} \times 100\%$$

其中, R_i 为节点 i 到其所有跳面节点间的可靠性; M 为节点 i 所拥有的跳面节点的最大跳数,称为节点 i 的最大跳距; r_{ij} 为节点 i 到第 j 跳面节点间的可靠性。 w_i 为节点 i 的可靠性权值,即该节点链路数占全网总链路的比例; t_i 为节点 i 所涉及的链路数; $\sum T$ 为网络拓扑所有节点的链路总数。

由于网络 $G(N,E)$ 中节点 i 到其余节点的连接关系被转化为节点 i 到其所有跳面的连接关系,而不同跳面间为串联关系,则节点 i 到第 j 跳面节点间的可靠性 r_{ij} 有如下级联关系:

$$r_{ij} = r_{i(j-1)} \cdot r_{(j-1)j}, 1 < j \leq M$$

其中, $r_{(j-1)j}$ 表示第 $j-1$ 跳面节点到第 j 跳面节点的归一化可靠性;同时 $r_{(j-1)j}$ 也反映了第 $j-1$ 跳面到第 j 跳面的连接链路数,及这些链路的可靠性情况,反映了网络拓扑的抗毁性和可靠性。为此,引入第 $j-1$ 跳面到第 j 跳面节点间的链路数归一化因子 u_j :

$$u_j = \frac{n_j}{N-1} \cdot \frac{l_j}{n_{j-1} \cdot n_j} = \frac{l_j}{n_{j-1} \cdot (N-1)}$$

其中, n_{j-1} 和 n_j 分别表示第 $j-1$ 跳面和第 j 跳面的节点数; l_j 表示两跳面的连接链路数,则 $\frac{n_j}{N-1}$ 为第 j 跳面上节点数目占除节点 i 之外节点数的比例, $n_{j-1} \cdot n_j$ 表示两跳面间可能存在的最大链路数。

则有: $r_{ij} = r_{i(j-1)} \cdot u_j \cdot r'_{(j-1)j}$, $r_{i(j-1)}$ 为节点 i 到第 $j-1$ 跳面的可靠性; $r'_{(j-1)j}$ 为跳面间的可靠性。

2.1.1.3 跳面转化逻辑

以图1所示的拓扑为例,对于节点 A ,其共有2个跳面:第一跳面 $\{B,C\}$;第二跳面 $\{D,E\}$ 。根据第1.2节的定义,节点 A 的可靠性 $r_A = r_{A1} + r_{A2}$, $r_{A2} = r_{A1} \times r_{12}$ 。其中 r_{A1} 表示节点 A 到第一跳面的可靠性, r_{A2} 表示节点 A 到第二跳面的可靠性, r_{12} 表示节点 A 第一跳面到第二跳面的可靠性。

计算 r_{A1} 时,首先把节点 A 和第一跳面节点所组成的子拓扑分离出来,并将节点 B 和节点 C 抽象为一个虚拟点 T ,将点到面的可靠性计算转化为点到点的可

靠性计算(见图2)。

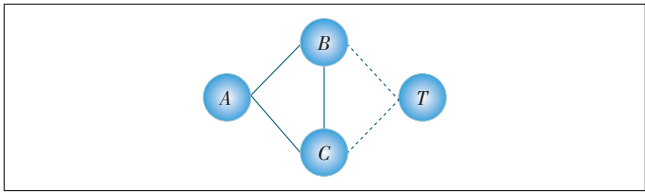


图2 拓扑示意2

计算 r_{12} 时,采用类似前面的方法,将面到面的可靠性计算转化为点到点的可靠性计算(见图3)。

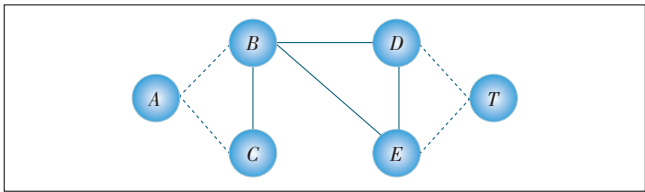


图3 拓扑示意3

对于复杂网络拓扑,处理方式一致,都是将跳面抽象成点,将点到面和面到面的计算转化为点到点的计算。在计算拓扑点到点的可靠性时,采用最小路集算法即可^[1]。

2.1.2 网络拓扑节点指标

节点和链路是组成网络拓扑的基本元素。针对节点指标,本文从节点“度”出发,节点的度可以简单理解为节点的链路数,同样以图1所示的简单拓扑为例。在图1中,共有5个节点,节点A度为2;节点B度为4;节点C度为2;节点D度为2;节点E度为2。

在制定节点指标时,结合通信网络的分析经验,引入对数函数作为评价函数。

图4所示为以底数为10的对数函数曲线,由图4可知,其在自变量较小时函数梯度较高。在对光缆网络安全进行分析时,行业专家通常更关注较为孤立的网络节点,采用对数函数刚好可以体现这些孤立节点的重要性。

由此,定义网络安全度节点指标 $R_i = \sum_{i=1}^x \frac{N_i}{N} \lg i$,其中, x 表示网络拓扑中节点度的最大值, N_i 表示节点度为 i 的节点数量, N 表示网络拓扑节点总数。

2.1.3 网络拓扑链路指标

2.1.3.1 连通度定义

对于某一连通的网络拓扑,若去掉 n 条边后,出现不连通的子图,则该拓扑的连通度为 n 。

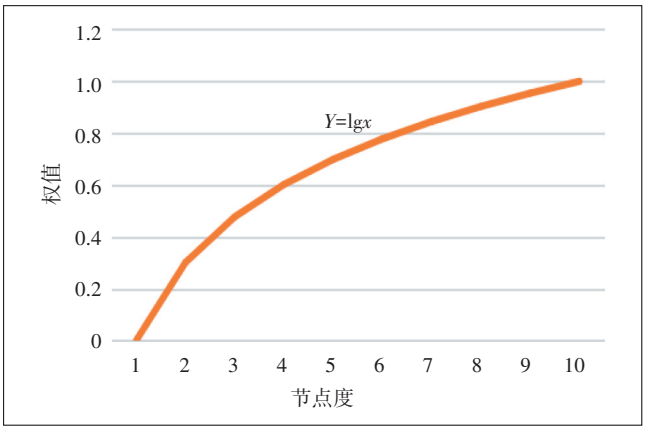


图4 节点度权值对数曲线

2.1.3.2 图密度定义

图密度(ρ)可定义为网络拓扑实际边数与理论边数之比,其计算公式为: $\rho = \frac{L}{\frac{1}{2}N(N-1)}$,其中, L 为拓扑

实际链路数量, N 为节点数量。

2.1.3.3 链路可靠性

链路指标 $R_L = T \times \rho$,其中, T 代表网络拓扑连通度, ρ 代表网络拓扑密度。

连通度代表网络拓扑最稀疏的程度,而图密度代表网络拓扑整体的稀疏程度,所以需要同时考虑这2个指标,下面利用图5所示的例子进行解释。

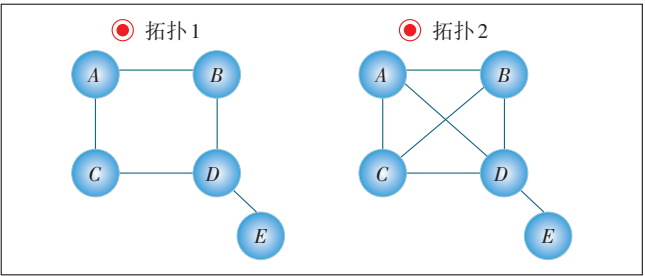


图5 拓扑示意4

对于图5所示的2个网络拓扑,由于 DE 边的存在,在断开 DE 边后节点 E 就与其余节点不再连通,所以该网络拓扑连通度为1。

但可以观察到,拓扑2中除节点 E 外,其余各个节点均两两互联,所以拓扑2的可靠性要高于拓扑1。同时考虑连通度和图密度,能更加科学地反映网络拓扑的可靠程度。

结合上文对拓扑指标、节点指标和链路指标的介绍,最终得到网络可靠性计算模型:

$$R = R_c + R_i + R_L$$

其中, R_c 代表拓扑可靠性, R_i 代表节点可靠性, R_L 代表链路可靠性。

2.1.4 计算实例

下面以 2 个具体的简单网络拓扑为例, 使用光缆网安全度模型对其进行评价。图 6 所示为 2 个光缆网拓扑, 且各链路安全度均为 0.9。

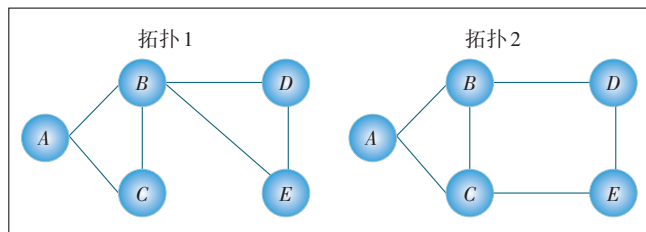


图 6 拓扑示意 5

2.1.4.1 整体拓扑指标计算

对于图 6 所示的 2 个网络拓扑的整体拓扑指标计算, 已通过计算机代码实现, 拓扑可靠性如表 1 所示。

表 1 拓扑可靠性计算结果

指标	拓扑1	拓扑2
拓扑可靠性	0.737 6	0.749 4

2.1.4.2 节点指标计算

节点可靠性计算结果如表 2 所示。

表 2 节点可靠性计算结果

节点度	拓扑1节点数量	拓扑2节点数量
1	0	0
2	4	3
3	0	2
4	1	0

对于拓扑 1 来说, 根据 $R_i = \sum_{i=1}^x \frac{N_i}{N} \lg i$, 则 $R_i^1 = \frac{4}{5} \times \lg 2 + \frac{1}{5} \times \lg 4 = 0.361 2$; 同样, $R_i^2 = \frac{3}{5} \times \lg 2 + \frac{2}{5} \times \lg 3 = 0.371 5$ 。

2.1.4.3 链路指标计算

对于图 6 所示的 2 个拓扑, 当去掉 2 条链路 (比如去掉 AB 和 AC) 后, 就出现不连通子图, 所以 2 个拓扑的边连通度 T 都为 2。

同时, 2 个拓扑节点数量和链路数量也一致, 根据图密度计算公式 $\rho = \frac{L}{\frac{1}{2} N(N-1)}$, 两者图密度为 0.6。

根据 $R = R_c + R_i + R_L$, 2 个拓扑的安全度模型评价结果如表 3 所示。

表 3 网络可靠性计算结果

指标	拓扑1	拓扑2
可靠性指标	2.298 8	2.320 9

2.2 业务端到端评价模型

2.2.1 可用性相关指标定义

光传输网的可靠性是指网络的可用性和抗毁性。主要指针对网络拓扑的连通性进行分析, 在考虑了网络中节点和链路的可用度、链路的共担风险、特定的业务分布等因素后, 考察故障情况下网络的生存能力^[7]。网络的可用性分析主要利用下述几个定义。

a) 平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failure, MTBF) 是指在规定的条件和时间内, 系统累计运行时间和故障次数之比。MTBF 越长表示可靠性越高。其计算方法为: 该设备总的计划运行时间/故障次数。

b) 平均修复时间 (Mean Time To Repair, MTTR) 是指在规定的条件和时间内, 产品修复性维修总时间与被维修产品的故障总数之比。MTTR 越短表示易恢复性越好。

c) 平均无故障时间 (Mean Time To Failure, MTTF) 是指系统平均能够正常运行多长时间, 才发生一次故障。其计算方法为: 总的正常运行时间/故障次数。该值越大, 表示系统的可靠性越高, 平均无故障时间越长。

上述 3 个指标数学关系为: $MTBF = MTTF + MTTR$ 。

2.2.2 可用性指标计算

可用度 (Availability, A) 是指可维修产品在规定的条件和时间内, 维持其规定功能的能力, 它综合反映了可靠性和维修性。其计算方法为: 产品能工作时间/(产品能工作时间+产品不能工作时间)。如: $A = MTTF / (MTTF + MTTR)$ 。

通常, 产品的可用性包括可靠性和可维修性 2 个方面: 可靠性用 MTTF 来衡量, 可维修性用 MTTR 来衡量, 而可用性则用 A 来衡量。

根据所供设备的性能给出设备单板的平均无故障间隔时间 (MTBF)^[8], 结合本工程网络结构及业务路由表, 计算出设备可用度、光缆可用度, 从而计算出每条业务的可用度, 计算方法如下。

单板可用度=MTBF×8 760/(MTBF×8 760+ MTTR)

设备可用度=设备所有单板可用度相乘

链路可用度=光纤可用度×OA 站点可用度

这里有2个关键假设:

a) 光纤可用度:每年每百公里光缆允许的故障时间为300 min。

b) 平均修复时间(MTTR)为4 h。

网络串并联模型示意如图7所示。串联模型可用度=多个OA的可用度相乘;并联模型可用度=1-(1-链路1可用度)×(1-链路2可用度)。

系统可用度= $A_1 \times A_2 \times A_3$,在某运营商传输系统新建

工程中,采用业务端到端可用性分析模型对不同建设方案的业务可用性进行比较。在考虑 OMSP 保护方案下,系统可用性从2个9(99%)提升至5个9(99.999%)。该分析结果为运营商确定最终建设方案提供了参考。

3 总结

本文提出的安全评估模型在评价计算网络拓扑整体指标时,引入跳面的概念,将相对独立的点到点连接关系转化为面到面的连接关系,更好地反映了计算结果的整体性。在计算拓扑整体指标的过程中,对

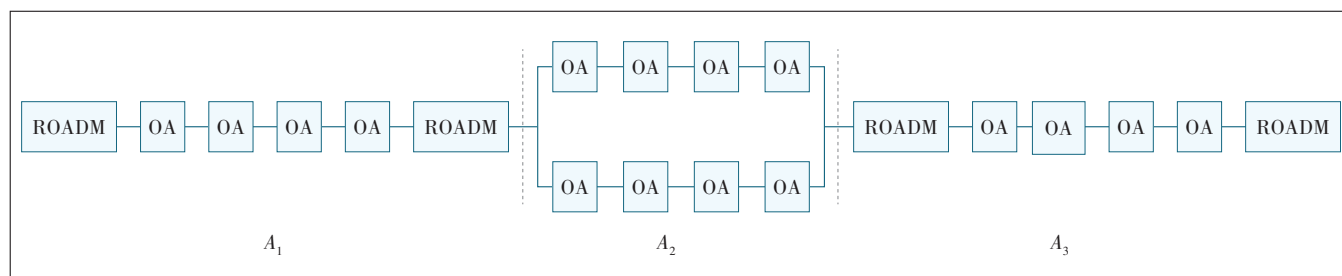


图7 网络串并联模型示意

模型进行归一化处理,避免单个指标对分析结果造成较大影响。在分析节点指标时,模型充分结合了通信行业中传输专业专家的分析经验,引入对数函数作为评价函数,重点考虑相对孤立的节点。同时也可以通过分析过程发掘现有网络中存在的安全隐患。通过引入以上创新点,本文构建出了一个科学有效、综合适用性较强的光传输网安全评估模型。

光传输网作为通信网络的最底层网络,其安全性决定了整张网络的安全与否。本文提出的光缆网可靠性分析模型和业务端到端评价模型基本涵盖了光传输网安全评估的主要需求场景。通过模型的定量分析,可帮助运营商在网络规划、网络改造和网络运维的过程中及时发现网络安全隐患,解决需求痛点,确保网络的安全运行,提升用户的使用体验。后续研究可在现有分析的基础上,融合网络建设成本等因素,以定量分析的数据为驱动,进行综合考量,最终生成定性的网络建设方案。

参考文献:

- [1] 张成良,李俊杰,马亦然,等. 光网络新技术解析与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2016.
- [2] 张杰,徐云斌,宋鸿升,等. 自动交换光网络 ASON[M]. 北京:人

民邮电出版社,2004:1-386.

- [3] 王先枝,陈文雄,赵小强. 干线传输系统中引入 ROADM 的初步探讨[J]. 邮电设计技术,2013(9):69-73.
- [4] 梁雄健,孙青华. 通信网可靠性管理[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004:1-225.
- [5] 薛伟,帅典勋. 计算网络两端可靠性的不交化改进算法[J]. 计算机应用与软件,2006(8):19-21.
- [6] 郭伟. 野战地域通信网可靠性的评价方法[J]. 电子学报,2000(28):3-6.
- [7] 袁建国,叶文伟. 光网络信息传输技术[M]. 北京:电子工业出版社,2012:1-381.
- [8] 王永超,刘成龙,张传熙,等. 全光传送网业务节点设备可靠性探究[J]. 邮电设计技术,2023(4):76-80.

作者简介:

刘树聪,工程师,硕士,主要从事光网络数字孪生及仿真技术研究、传输网新技术研究、网络规划咨询和可研设计等工作;马重阳,高级工程师,硕士,主要从事光网络领域 WDM/OTN 网络运营维护工作;赵满良,高级工程师,硕士,主要从事骨干及国际传输网技术研究、光网络数字孪生及仿真技术研究、网络规划咨询和可研设计等工作;李乐坚,高级工程师,硕士,主要从事骨干及国际传输网技术研究、网络规划咨询和可研设计等工作;毛志伟,工程师,硕士,主要从事光网络数字孪生及仿真平台开发和相关算法研究工作。