

ROADM网络业务电再生中继规划方法探讨

Exploration of Planning Method for Business Electric Regeneration Relays in ROADM Networks

赵满良¹,唐晓强²,王浩²,刘树聪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)

Zhao Manliang¹,Tang Xiaoliang²,Wang Hao²,Liu Shucong¹(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:

ROADM全光网络的业务电再生中继规划的影响因素和规划方法有多种。主要从业务可靠性、电再生中继配置规模的角度分析论证,提出在进行业务电再生中继规划时,有必要设置合理的最大链路同时故障条数值。通过对电再生中继规划所采用的穷举法和极限法的基本原理及其仿真结果进行对比分析,总结出这2种规划仿真方法的优劣。

关键词:

ROADM;电再生中继;规划方法

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.03.011

文章编号:1007-3043(2026)03-0058-06

中图分类号:TN913

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

There are various influencing factors and planning methods for business electric regeneration relays in ROADM all-optical networks. It mainly analyzes and argues from the perspectives of business reliability and the scale of electric regeneration relay configuration, and proposes that it is necessary to set a reasonable maximum link simultaneous fault count value when planning business electric regeneration relay. By comparing and analyzing the basic principles and simulation results of exhaustive and limit methods used in the planning of electric regeneration relays, the advantages and disadvantages of the two planning simulation methods are summarized.

Keywords:

Reconfigurable optical add/drop multiplexer; Electric regeneration relay; Planning method

引用格式:赵满良,唐晓强,王浩,等. ROADM网络业务电再生中继规划方法探讨[J]. 邮电设计技术,2026(3):58-63.

1 ROADM全光网络介绍

可重构光分插复用器(ROADM)技术作为当前全光网络中最实用的技术,可远程控制网络节点动态上路或下路业务波长,实现业务的灵活调度^[1]。ROADM具有以下特点。

a) 无需人工现场调配,ROADM可实现对波长的上下路及直通配置,减少光—电—光转换成本,实现

业务完全透明传送,从而增加了光网络弹性。

b) 通过重构能力,极大提升业务开通效率以及对客户新需求的反应速度,同时有效地降低网络建设和维护成本。

c) 采用WSON控制平面,支持多种网络保护/恢复,网络生存性强。

d) 具备远端统一网管功能,支持光功率的自动管理和端到端的波长管理。

e) 适合高速率波长级业务的传送。ROADM网络节点设备主要由以下功能模块组成:光波长交叉调度

收稿日期:2026-02-02

子系统(WSS)、上下路波长转换单元(OTU)、光功率监控和控制(OPM、VOA)、光放大器(OLA、OPA等)、光路保护板(OLP)。ROADM全光网络网元类型主要由ROADM类型节点、OLA类型节点、DGE类型节点组成。

业务在ROADM全光传输网承载时,其路由一般经过多个ROADM、OLA节点。其中仅ROADM类型节点可以进行业务的电再生中继,OLA类型节点仅进行光信号的放大。由于光纤链路及系统的色散、非线性效应、OA放大器噪声系数、系统串扰等因素的影响,光信号在传输一定距离后,性能质量(如OSNR)逐步劣化,需要在ROADM类型节点处进行光信号的电再生中继(即业务光信号的光—电—光转换),以实现业务信号的无损传输^[2]。为提高网络安全可靠性,部分光层网络链路建设有光复用段保护(OMSP)机制。

2 链路同时故障条数对业务可靠性的影响

基于光层OMSP保护的OMS复用段包含有主用链路和备用链路。业务经路由规划设计后,其路径一般由多个OMS复用段首尾连接组成。由于光网络安全可靠性较高,绝大多数时间网络均处于正常状态,业务承载在路由沿线各OMS复用段的主用链路上。当OMS复用段中主用或备用链路因网络故障中断时,其所承载的业务可能受到影响,具体如下:

a) 任一OMS复用段的主用、备用链路同时中断。此时业务原始路由将中断,只能通过其他路径迂回进行保护。

b) 任一OMS复用段的主用、备用链路未同时中断。当主用链路中断时,业务在有故障的OMS复用段上的路径将由主用链路切换至备用链路,此时业务不会中断。当备用链路中断时,业务承载在主用路径,业务也不受影响。

网络的光缆线路、设备板卡等发生故障是不可避免的,为提高业务的可靠性,在ROADM全光网络进行业务电再生中继规划时,需要考虑让网络具备抗多条

链路同时故障的能力^[3]。

OMS复用段的主用链路可靠性用 $P_{主}$ 表示,备用链路可靠性用 $P_{备}$ 表示,主、备用链路相当于并联系统^[4]。当OMS复用段主用链路或备用链路出现故障时,业务在不同故障场景下的状态如表1所示。

表1 基于OMSP保护的OMS复用段不同故障场景下业务状态

项目	场景1	场景2	场景3	场景4
主用链路	正常	正常	故障	故障
备用链路	正常	故障	正常	故障
场景概率	$P_{主} \times P_{备}$	$P_{主} \times (1 - P_{备})$	$P_{备} \times (1 - P_{主})$	$(1 - P_{主}) \times (1 - P_{备})$
业务状态	业务不中断		业务中断	

1条业务由 n 个OMS复用段组成,各个OMS复用段主用、备用链路故障的发生具有随机性、突发性和不确定性等特点。当 k 条($k \leq n$)OMS复用段主用链路出现故障时,业务的 n 条OMS复用段主、备链路组合共有场景数量 $S=C(k, n)$ 个,即从 n 条OMS复用段中任意选择 k 条同时发生故障,使OMS链路工作在备用路径。每个场景的概率用 P_{ki} 表示, k 条OMS复用段主用链路故障的场景发生的总概率 P_k 为:

$$P_k = \sum_{i=1}^S P_{ki} = \sum_{i=1}^S \left[\prod_{j=1}^{n-k} P_{主j} \right] \left[\prod_{m=1}^k P_{备m} \times (1 - P_{主m}) \right]$$

当进行业务电再生中继规划时,为保证业务光层OSNR性能满足要求,需要考虑业务具备最多抗 k 条OMS链路同时断纤的能力,其包含0条,1条,2条, ..., k 条OMS主用链路故障场景,其发生的概率为 $P(k) = \sum_{i=0}^k P_i$ 。以某运营商100 Gbit/s现网业务(A-R)为例,其路由如图1所示,沿线经过17条具备OMSP保护能力的OMS复用段,主用、备用链路全程长度均接近3 000 km。从概率角度看,业务链路发生故障的概率极大。为便于计算,假定这17条OMS复用段的主用、备用链路的可靠性均为0.99,对业务(A-R)路由沿线同时发生多条链路故障且业务不中断的概率进行计算模拟。最多发生 k 条链路同时故障且业务不中断的

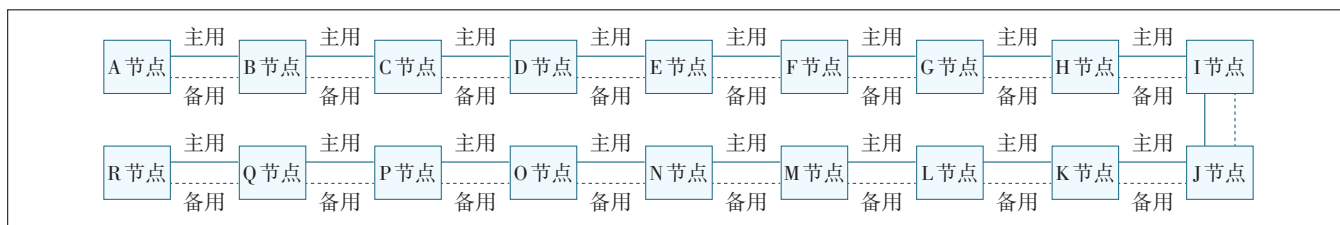


图1 业务(A-R)具体路由

概率如表2、图2所示。

表2 同时发生多条链路故障且业务不中断概率统计

链路故障次数	k 条链路同时故障场景数	k 条链路同时故障,业务不中断概率	最多发生 k 条链路同时故障业务不中断概率
0	1	0.842 943 193 4	0.842 943 193
1	17	0.143 300 342 9	0.986 243 536
2	136	0.011 464 027 4	0.997 707 564
3	680	0.000 573 201 4	0.998 280 765
4	2 380	0.000 020 062 0	0.998 300 827
5	6 188	0.000 000 521 6	0.998 301 349
6	12 376	0.000 000 010 4	0.998 301 359
7	19 448	0.000 000 000 2	0.998 301 359
8	24 310	0.000 000 000 0	0.998 301 359
9	24 310	0.000 000 000 0	0.998 301 359
10	19 448	0.000 000 000 0	0.998 301 359
11	12 376	0.000 000 000 0	0.998 301 359
12	6 188	0.000 000 000 0	0.998 301 359
13	2 380	0.000 000 000 0	0.998 301 359
14	680	0.000 000 000 0	0.998 301 359
15	136	0.000 000 000 0	0.998 301 359
16	17	0.000 000 000 0	0.998 301 359
17	1	0.000 000 000 0	0.998 301 359

从表2、图2可以看出业务(A-R)全部工作在主用路径的概率仅为84.29%。如果业务电再生中继设置仅考虑OMS复用段主用链路参数,其可靠性不高。链路同时发生0条、1条、2条故障且不影响业务的概率为99.77%,如果业务电再生中继设置按照最多支持抗2条链路同时故障能力进行电再生中继规划设置,业务不受2次链路故障影响的概率将提高15.48%,其可靠性能力有显著提升。此外,当同时故障条数 $k \geq 4$ 且逐步增大时,故障组合场景更加复杂且多样,计算量更大,但业务可靠性能力提升速度却成倍下降,其对业务可靠性提升能力已经不足万分之一。因此,从业务最多抗故障能力和相应的可靠性提升角度看,进行电再生中继规划设置时,其 k 值不宜取得过大,用户可以根据业务需求和维护要求合理确定 k 值。

3 链路同时故障条数对电再生中继配置规模的影响

进行ROADM网络的OMS复用段设计时,OMS复用段主用、备用链路采用的光缆线路的路由、长度、损耗、类型等参数不同,且光放大器的型号、噪声系数、

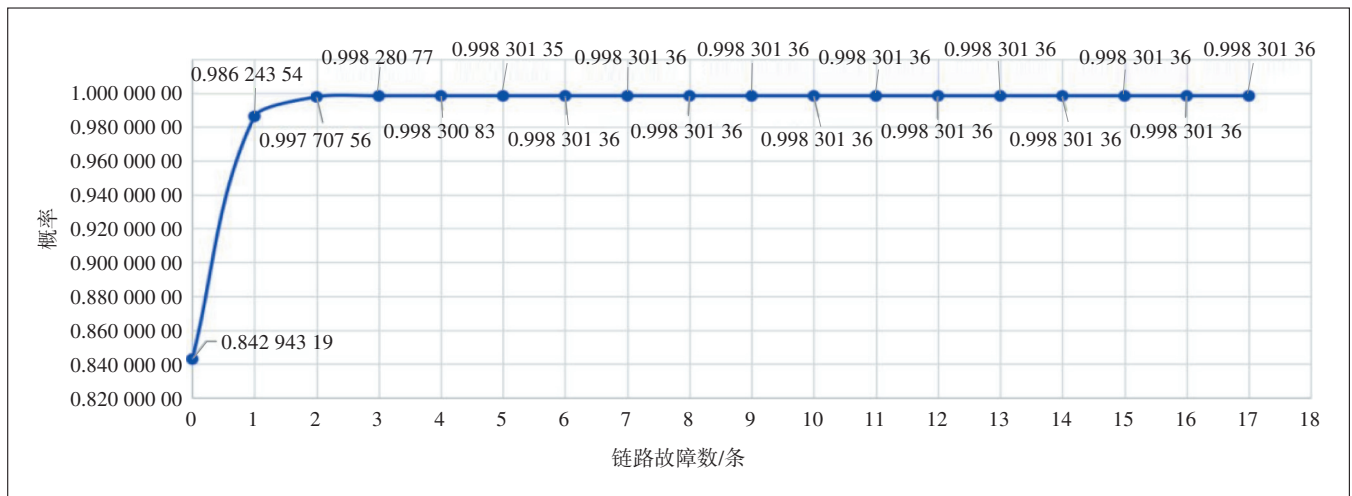


图2 最多发生 k 条链路同时故障且业务不中断的概率

增益曲线也存在差异,这使得OMS复用段主、备用链路的OSNR性能、OTS跳数等网络性能指标各不相同。因此,业务在各OMS段落主用、备用链路参数组合场景下进行电再生中继规划设置时,其电中继次数、位置和业务OSNR性能也不同^[3]。仍以业务(A-R)为例,其路由沿线各OMS复用段的指标参数如表3所示。

对于100 Gbit/s传输系统的光层OSNR性能门限,当OTS跨段数 ≤ 12 段时,系统OSNR门限值取15.5 dB,当OTS跨段数 > 12 段时,系统OSNR门限值取16.0 dB。通过“58公式”,按照业务最多抗 k 条链路同时故障能力要求,对各个OMS复用段主备用链路组合场景进行模拟仿真,计算其电再生中继配置的数量、位置及OSNR性能指标。表4所示为 k 取不同值时业务(A-R)

表3 业务(A-R)路由沿线OMS链路部分参数指标

序号	复用段名称	主用路由			备用路由		
		OSNR (正)	OSNR (反)	OA跳数	OSNR (正)	OSNR (反)	OA跳数
1	OMS_AB	20.8	20.8	7	22	22	4
2	OMS_BC	24.5	24.5	1	23.9	23.9	1
3	OMS_CD	23.8	23.8	2	22.1	22.1	2
4	OMS_DE	20.8	20.8	1	21.5	21.5	1
5	OMS_EF	21.6	21.6	3	20.5	20.5	3
6	OMS_FG	25.3	25.3	2	22.1	22.1	2
7	OMS_GH	24.5	24.5	1	20.5	20.5	2
8	OMS_HI	21.6	21.6	2	18.8	18.8	2
9	OMS_IJ	20.4	20.4	2	21.7	21.7	2
10	OMS_JK	25.2	25.2	1	21.7	21.7	1
11	OMS_KL	20	20	3	19.5	19.5	4
12	OMS_LM	27.6	27.6	1	23.4	23.4	1
13	OMS_MN	23.7	23.7	1	23.7	23.7	1
14	OMS_NO	22.3	22.3	1	22.2	22.2	1
15	OMS_OP	22	22	5	21.9	21.9	5
16	OMS_PQ	24.9	24.9	2	21.2	21.2	2
17	OMS_QR	18.8	18.8	6	17.8	17.8	8

表4 100 Gbit/s 业务(A-R)电再生中继规划仿真结果统计

最多抗故障次数	电再生中继次数	电再生中继方案数
0次	4	33
1次	4	4
2次	5	13
3次	5	8
4次	5	8

的仿真结果统计。

从表4可以看出,当电再生中继规划数量为4个时,其最多仅能满足抗1条链路故障的场景,且0条链路故障的电中继方案数要明显多于1条链路故障的方案数。当电再生中继规划数量为5个时,其能满足抗4条主用链路同时故障的场景。在相同电再生中继数量情况下,随着k值的增大,其电再生中继方案数逐步变少,通过表3分析可以看出,这是由于大部分OMS复用段的主用链路OSNR性能要优于备用链路性能。当业务最多抗故障k值由1变为2时,需要对业务新增1次电再生中继,其设备及维护成本比较高。因此,从业务最多抗链路同时故障能力和相应的经济及成本角度看,进行电再生中继规划设置时,要充分考虑电再生中继成本因素,合理设置k值,可以在确保一定的可靠性基础上,有效节约网络建设和维护投资成

本。

4 电再生中继规划方法原理及优劣分析

在确定业务的最多抗k条链路同时故障的容忍性条件后,如何在业务OMS路由沿线寻找合适的ROADM局站进行电再生中继位置规划是一个较为复杂的问题。现对2种不同的寻找电中继位置的实现思路和方法进行对比分析。

4.1 极限法

从业务的发端开始,将电中继预设在第1个OMS复用段末端。通过仿真计算,如果该业务中继段的OSNR性能满足要求,则暂不在第1个OMS复用段末端设置电中继节点,继续考虑在第2个OMS复用段末端预设电中继节点,再进行仿真计算。依次循环尝试,直至业务光层性能可达的极限位置,该位置的ROADM节点即为第1个电再生中继节点规划处。把第1个电中继节点作为起点,遵循上述思路和步骤,重新开始极限寻找,直至到达业务终点为止^[2]。该算法通过依次计算电再生中继,可以快速获得解决方案。对于n个OMS复用段,其计算的电再生中继设置场景最多为n-1个,复杂度为O(n)。

4.2 穷举法

该方法从业务路由沿途的所有ROADM节点集合中,依次尝试选择0个,1个,2个,⋯,n个ROADM节点作为电再生中继预置位置,采用穷举方法模拟仿真所有的场景和方案组合,筛选出所有符合要求的电再生中继设置方案。再建立一套评价体系,对各个方案的不同指标进行对比分析和评价,最终确定一个合适的方案^[5]。该算法遍历所有的电再生中继设置场景,计算效率较低。对于n个OMS复用段,其计算的电再生中继设置场景最多为 $\sum_{i=0}^{n-1} C(i,n) = 2^n - 1$ 个,复杂度为O(2ⁿ)。但由于方案多,便于对不同方案多个指标进行对比,并结合用户需求(如指定在维护力量强的节点中继)、机房电力和配套设施(如电力紧张节点无法作为电中继节点)情况,灵活选择可用的方案。

以业务(A-R)为例,本文仅对该业务信号承载于所有OMS复用段的主用链路场景进行仿真和分析。业务电再生段的OSNR余量=业务电再生段OSNR值-OSNR门限值,OSNR余量越大,其链路抗链路劣化能力越强。

当采用穷举法进行电再生中继位置规划后,每种

中继方案的各业务再生中继段 OSNR 性能余量结果如图 3 所示。穷举法能够遍历出所有的电再生中继方案,所以需要建立评价体系对多个方案进行比较分析,推荐科学合理的电再生中继方案。由于各个业务复用段是串联的整体,本文采用木桶理论来进行方案的择优。将各个中继方案的 OSNR 余量最小值按从大到小的顺序排序,同时将 OSNR 余量的均方差按从小到大的顺序排序,然后选择 OSNR 余量值最大且 OSNR 余量均方差最小的方案作为业务电再生中继的择优选择策略。该评价体系一方面可以保障 OSNR 指标余量最大,以提升业务整体的抗链路劣化能力;另一方面可减小各电再生段 OSNR 余量值的整体离散程度,使 OSNR 性能更均衡,进而提升整体性能。从图 3、图 4 可以明显看出,方案 1、4、7 的 OSNR 余量基本没有,

业务抗链路劣化能力极弱。方案 18、30,业务复用段 OSNR 余量最小值较小,且 OSNR 余量值整体离散度非常大,不利于提升业务抗链路劣化能力。从图 3 和表 5 可以看出,方案 6 的各项指标较好,其最小 OSNR 余量值最大,且其他段落的 OSNR 余量相对均衡,整体性能较好。

表 5 业务(A-R)通过穷举法进行电再生中继规划设置仿真

穷举方向	业务电再生段落	电再生段 OSNR 性能/dB	OSNR 门限/dB	OSNR 余量/dB
A-R 方向/R-A 方向(方案 6)	A-E	16.135	15.5	0.635
	E-I	16.917	15.5	1.417
	I-L	16.548	15.5	1.048
	L-P	17.399	15.5	1.899
	P-R	17.847	15.5	2.347

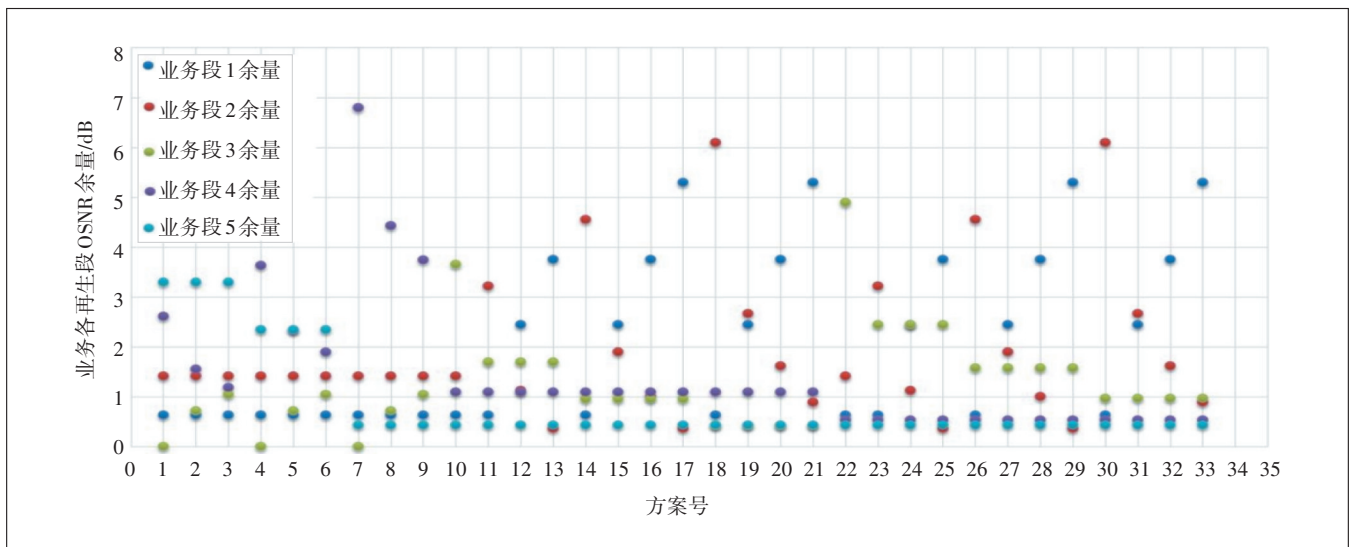


图 3 采用穷举法仿真业务(A-R)各电中继方案的 OSNR 余量

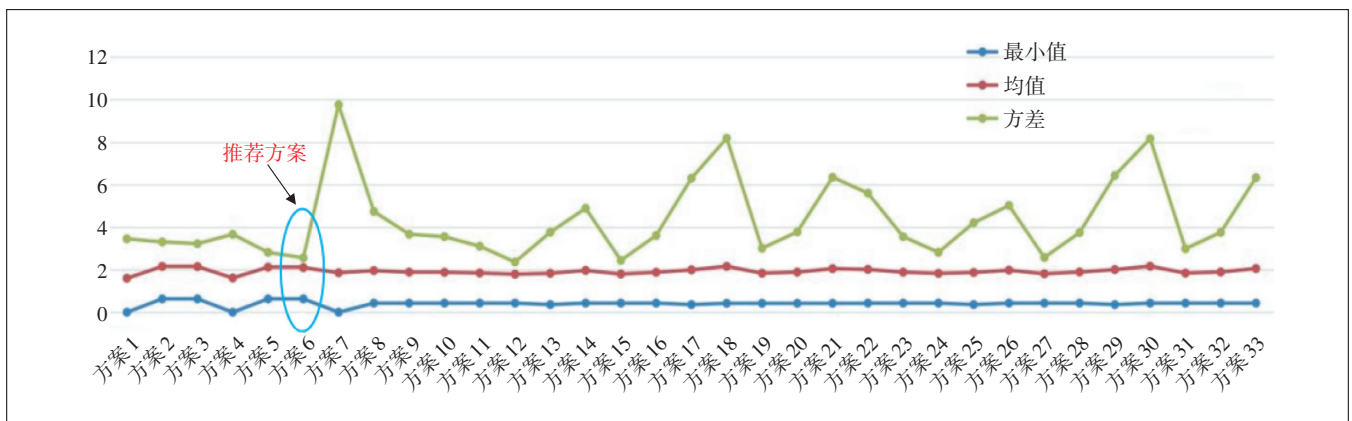


图 4 穷举法不同电中继方案 OSNR 余量统计指标对比分析

采用极限法分别对从节点A到节点R、节点R到节点A方向进行业务电再生中继规划设置模拟仿真,其结果如表6所示。

表6 业务(A-R)通过极限法进行业务电再生中继规划设置仿真

极限法方向	业务电再生段落	电再生段 OSNR 性能/dB	OSNR 门限 /dB	OSNR 余量/ dB
A-R方向 (对应穷举法中方案1)	A-E	16.135	15.5	0.635
	E-I	16.917	15.5	1.417
	I-N	15.506	15.5	0.006
	N-Q	18.115	15.5	2.615
	Q-R	18.8	15.5	3.3
R-A方向 (对应穷举法中方案33)	R-O	16.434	16.0	0.434
	O-J	16.036	15.5	0.536
	J-F	16.471	15.5	0.971
	F-B	16.392	15.5	0.892
	B-A	20.8	15.5	5.3

从表6可以看出,A-R方向,采用极限方法进行仿真在A-E、E-I段,其仿真结果基本符合要求。而在I-N段,由于充分利用了光层可达的性能极限,使得该段落的OSNR性能余量仅为0.06 dB,基本与要求的OSNR门限值相当。后期如果链路发生劣化,极易使该段落光信号产生误码,导致业务无法正常工作。而后的N-Q、Q-R段,业务的OSNR余量比较充足,无法为I-N段分摊链路劣化风险。在R-A方向上,B-A段的OSNR性能非常好,余量很充足,而其他段落OSNR余量较小,业务各段落OSNR余量不够均衡,业务路由的整体抗链路劣化能力较弱。从上述的A-R、R-A这2个方向的仿真结果可以看出,极限法的仿真方案与仿真选择的位置有关,正反向的方案可能完全不同。

表5、表6的对比分析表明,采用穷举法所获得的业务电再生中继设置方案6,相较于极限法获取的方案1和方案33,其OSNR余量最小值指标更大,各段落的OSNR余量更均衡,业务整体光层性能更优。

2种ROADM网络业务电再生中继规划思路及方法对比如表7所示。

5 总结

在对ROADM全光网络进行业务的电再生中继规划时,要充分考虑抗链路同时故障条数设置的合理性,因为这一设置直接影响业务的可靠性和网络建设

表7 2种规划思路方法对比分析

项目	极限法	穷举法
方案数量	少,一般1个方案	多,穷举所有方案
业务OSNR性能	光层性能极限寻找,易造成业务性能差	业务性能优
电再生中继设置场景复杂度及算法效率	场景少,算法效率高,场景复杂度为 $O(n)$	穷举场景多,计算量大,算法效率低,场景复杂度为 $O(2^n)$
方案数量	A端-Z端,Z端-A端规划计算结果不同	确定的评估体系,方案优劣排序,推荐最优
优化能力	仅1种方案,无法对比	多个方案,可根据客户需求 and 配套环境要求等,灵活选择合适方案

成本。如果抗链路故障条数设置过少,则电中继配置少,网络建设成本低,但业务可靠性也会随之降低。如果抗链路故障条数设置过多,则业务可靠性会非常高,但电中继配置增多,网络建设成本也会非常高。用户可以根据自身需求,自行合理设置抗链路同时故障条数,一般建议具备不超3条链路同时中断的抗故障能力。规划算法模型的选择直接影响电再生中继设置方案,进而影响业务的光层性能和抗链路劣化能力。未来可以通过算法模型优化、计算能力提升等手段,降低算法复杂度,提升算法效率,提高择优能力,最终科学合理高效地输出仿真方案。

参考文献:

- [1] 周鹤,杨其芳,武清华,等. ROADM技术在现网应用及问题研究[J]. 邮电设计技术,2022(3):64-68.
- [2] 王鹏,李峥,张传熙. ROADM网络规划设计方法研究[J]. 邮电设计技术,2018(4):6-11.
- [3] 周彦涛,王海军,满祥锐. 规划软件对ROADM MESH组网建议研究[J]. 邮电设计技术,2018(4):23-25.
- [4] 王永超,刘乘龙,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.
- [5] 赵满良,陈文雄,郑波,等. 一种中继配置的确定方法、装置、存储介质及设备:CN202210027280.X[P]. 2022-01-11.

作者简介:

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;唐晓强,高级工程师,硕士,主要从事骨干传输网络技术研究、网络运营维护及管理工作;王浩,工程师,学士,主要从事骨干传输光缆线路数字化技术研究、光缆网运营维护及管理工作;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。