



基于业务感知与熵评估的波长分配协同优化研究

湛广志, 龙晓婷, 赵志成, 葛平路, 陈銮雄, 潘晨昇, 程广展, 王师克, 张丽红

(中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司, 广东 广州 510623)

摘要: 光传输网络中的路由与波长分配 (RWA) 问题是提升网络资源利用率的关键。传统的邻域加权累积 (WNA) 策略在面对实际网络中非均匀的业务分布和高负载下的波长碎片问题时, 其性能表现受到限制。为解决此问题, 提出了一种基于热点感知与着色熵的波长碎片优化分配方法。所提方法首先通过分析历史业务数据, 定义了链路历史业务强度系数以量化网络热点区域, 并据此改进了 WNA 的度量表达式, 使其能自适应地优先占用高业务负载链路的波长。其次, 创新性地将 RWA 问题建模为动态图着色, 通过深度优先搜索识别空闲波长的连通分量, 并引入着色熵作为波长碎片化程度的精确量化指标。实际工程结果表明, 与传统 WNA 及 Most-Used 等策略相比, 所提方法能有效降低连接阻塞率, 提升网络资源利用率, 为光网络的智能化资源调度提供了新方法。

关键词: 波长分配; 业务热点感知; 着色熵; 波长碎片优化

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025309

0 引言

光传输与交换技术的快速发展, 已促使全光交换在核心网络中占据主导地位, 其中波长路由技术因其成熟且实现简便而被广泛应用。波长路由技术的核心挑战是路由与波长分配 (RWA) 问题, 该问题的核心任务在于为给定的光连接请求选择传输路径并分配可用的光波长通道。根据业务请求的特征, RWA 问题通常划分为静态 RWA 和动态 RWA 两大类。在静态 RWA 中, 节点间通信需求预先确定, 需要为每对节点规划路由并分配满足需求的波长数量, 目标是最小化网络所需的总波长资源。在动态 RWA 中 (现网实际工程更多), 网络链路可用波长数量固定, 连接请求随机动态到达, 需要为每个请求实时选择路由并

分配波长; 若选定路径无空闲波长, 请求将被阻塞, 目标是最大限度降低此类阻塞率。其中, 静态和动态 RWA 均属于计算复杂度极高的 NP 难问题。针对此复杂性, 静态 RWA 常通过构建整数规划模型或设计启发式算法来寻求高效解。动态 RWA 则常被拆分为路由决策和波长分配两大核心环节。在波长分配策略方面, 存在随机选择、First-Fit、Last-Fit、Least-Used、Most-Used 等多种策略, 其中 Most-Used 策略通常被认为表现较优。特别值得注意的是, 邻域加权累积 (WNA) 策略被提出作为一种更先进的思路, 该策略创新性地引入了“路径邻域”的概念和“距离加权”的思想, 其核心理念是靠近当前请求所选路径的链路状态对未来潜在的需求影响更大, 因此在选择波长时会赋予这些链路上的可用波长更高的权



重,能获得比Most-Used策略更低的阻塞率。

目前,在该领域的WNA的波长分配策略不足之处如下。(1)参数 α (调整距离对度量指标的影响)需要手动调优,权重衰减因子 α 的取值显著影响性能,但 α 需要通过离线仿真确定,无法自适应网络状态变化。不同拓扑(如NSF-Net与US-Net)需要不同 α 值,泛化能力受限。(2)未考虑业务分布不均,该方法仿真假设所有节点对业务密度均匀,但实际网络存在热点区域(如数据中心互联链路负载更高)。WNA的“均匀邻域加权”在非均匀业务下可能失效。(3)对波长碎片问题解决有限,WNA的目标是“将占用波长集中在路径附近”,但未显式优化波长碎片化(即空闲波长分散在不同链路,无法被长路径利用)。在稀疏业务下表现好,但在高负载时碎片仍是阻塞主因。

本文要解决的核心技术问题,正是针对上述现有技术的不足,具体如下。

(1)自适应权重调整,结合业务感知优化。根据实际网络的业务情况,优化WNA算法中参数 α 的取值。结合业务热点区域加权,用统计聚合的方法确定参数 α 的取值,根据历史阻塞率反馈优化权重,为高业务量区域的链路分配更高权重,并优化度量表达式,对长路径请求优先选择“碎片友好”波长。

(2)显式减少波长碎片。将改进的WNA与碎片整理策略结合,用改进的WNA选择候选波长,若候选波长会导致高碎片(如路径外有大量孤立空闲波长),则选择次优但碎片更少的波长。将RWA问题建模为动态图着色,结合最大团搜索和着色熵度量碎片程度,直接优化碎片指标。

为解决上述技术问题,本提案旨在建立一种高效、可靠、低成本的波长分配策略算法,以提升OTN设计中波道分配的质量,节约OTN建设的投资。

1 建立波长碎片优化模型

1.1 模型概述

本模型整体流程如图1所示,核心是通过结合改进的WNA算法和连通分量着色熵的波道碎片评估,形成一套严谨的数学模型,可以精确地定义和度量波长碎片化,并在分配决策时结合热点区域业务和最小化碎片化的影响,从而更有效地解决WNA策略中未能充分优化的碎片问题,使用该波长分配策略模型的具体过程如下。

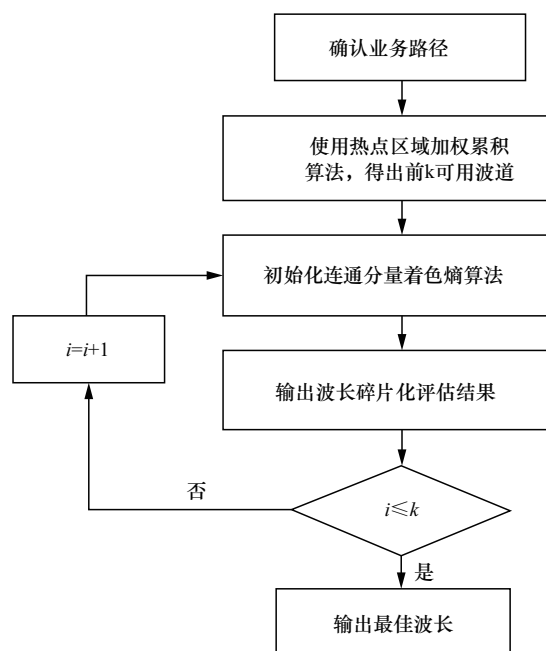


图1 整体流程

1.2 实现流程

(1) 确认业务路径

根据业务节点的位置和业务的安全性要求,基于预处理的思想,在自动排路之前对网络拓扑进行分层,减少搜索范围;提前对重要节点的路由参数进行计算,节省排路计算时间;使用双向Dijkstra搜索算法,如图2所示,缩短搜索时间;使用资源参数与拓扑参数结合得cost值作为路由代价,得到业务路径 P 。

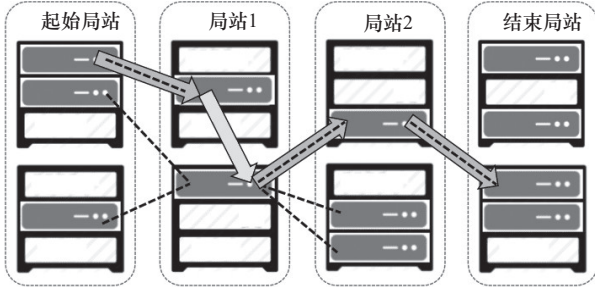


图2 双向Dijkstra寻路示意图

(2) 热点区域加权累积算法（改进的WNA算法）

对于一条路径 Q (1-2-3)，传统的WNA算法，需要先确定各个边邻域，路径的边邻域举例如图3所示。

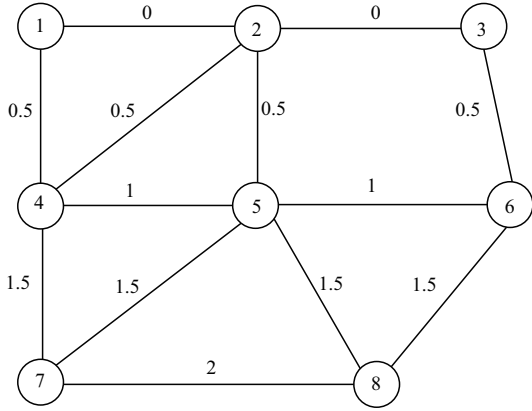


图3 路径的边邻域示意图

根据WNA波长分配算法，可以得出节点到路径的距离如下。

$$\begin{aligned} d_Q(1, 2) &= d_Q(2, 3) = 0 \\ d_Q(1, 4) &= d_Q(2, 4) = d_Q(2, 5) = d_Q(3, 6) = 0.5 \\ d_Q(4, 5) &= d_Q(5, 6) = 1 \\ d_Q(5, 7) &= d_Q(4, 7) = d_Q(5, 8) = d_Q(6, 8) = 1.5 \\ d_Q(7, 8) &= 2 \end{aligned} \quad (1)$$

由上节点的距离可以得出路径 Q 的各边邻域为：

$$\begin{aligned} N_0(Q) &= \{(1, 2), (2, 3)\} \\ N_{0.5}(Q) &= \{(1, 4), (2, 4), (2, 5), (3, 6)\} \\ N_1(Q) &= \{(4, 5), (5, 6)\} \\ N_{1.5}(Q) &= \{(5, 7), (4, 7), (5, 8), (6, 8)\} \end{aligned}$$

$$N_2(Q) = \{(7, 8)\} \quad (2)$$

在路径 Q 进行波长时，对于特定波长 λ 需要衡量其度量指标，根据WNA给出的波长度量指标表达式为：

$$\begin{aligned} D(\lambda) &= \alpha^{0.5} |N_{0.5}(Q, \lambda)| + \alpha^1 |N_1(Q, \lambda)| + \cdots + \\ &\alpha^A |N_A(Q, \lambda)| = \sum_{d=1}^{2A} \alpha^{\frac{d}{2}} |N_d(Q, \lambda)| \end{aligned} \quad (3)$$

其中， α 是WNA算法中的常量，用来调节距离对度量指标的影响； A 为与链路 Q 最远的距离。针对波长度量指标表达式有两个问题：一是热点区域缺问题，虽然原表达式考虑了距离靠近业务路径的链路更重要，对未来请求能否成功建立的影响更大，可以降低整体阻塞率，原模型中是假设所有节点对业务密度均匀，但实际网络存在热点区域（如数据中心互联链路负载更高），WNA的“均匀邻域加权”在非均匀业务下可能失效；二是波长碎片问题，对波长碎片问题解决有限，WNA的目标是“将占用波长集中在路径附近”，但未显式优化波长碎片化（即空闲波长分散在不同链路，无法被长路径利用），在稀疏业务下表现好，但在高负载时碎片仍是阻塞主因。

针对第一个问题，结合业务感知优化，使用热点区域加权为高业务量区域的链路分配更高权重，修改度量表达式为：

$$D'(\lambda) = \sum_{d=1}^{2A} \left(\alpha^{\frac{d}{2}} \cdot \sum_{e \in |N_{d/2}(Q, \lambda)|} \beta_e \right) \quad (4)$$

其中， β_e 表示链路历史业务强度系数，这是一个针对每条链路 e 定义的系数，用于量化该链路的历史繁忙程度或承载业务量的强度， β_e 的值越大，表示链路 e 的历史业务强度越高。 $\sum_{e \in |N_{d/2}(Q, \lambda)|} \beta_e$ 这个求和代替了原表达式中的 $|N_{d/2}(Q, \lambda)|$ 。它不再仅仅是统计距离路径 Q 为 $d/2$ 的邻域中被波长 λ 占用的链路数量 $|N_{d/2}(Q, \lambda)|$ ，而是计算这些被占用链路的历史业务强度系数 β_e 的总和。



$D'(\lambda)$ 现在选择的是波长 λ ，它不仅在空间分布上（通过邻域和权重 α ）倾向于被占用链路更靠近目标路径 Q ，而且这些被占用的链路本身是网络中历史业务量较大的关键链路 β_e 。通过优先占用那些已经被高业务量链路占用的波长，从而将那些相对“空闲”的波长（即当前主要被低业务量链路占用的波长）保留下来，留给后续可能经过高业务量区域的连接请求使用。

OTN业务历史数据见表1，历史业务强度系数 β_e 定义为每条链路（复用段） e 在历史业务中承担的总带宽负载，它基于业务带宽速率和电路条数， β_e 越高表示历史负载越大。为了计算每条链路 e_j 的历史业务强度系数 β_{ej} ，需要构建历史业务强度系数函数：

$$\beta_{ej} = \sum_{S_i \in P_j}^n i_j = \sum_{S_i \in P_j}^n (r_j \times q_j) \quad (5)$$

其中， r_j 表示业务的速率（转换为数值，如100 Gbit/s→100）， q_j 表示业务的数量， i_j 表示业务 b_j 的强度（总带宽需求）， S_i 表示复用段的集合， P_j 表示业务 b_j 经过的复用段集合，这里对业务强度向量 i 进行定义：

$$i = [i_1, i_2, \dots, i_n]^T, i \in R^n \quad (6)$$

其中， $i_j = r_j \times q_j$ ， R^n 为业务强度向量的集合。为了计算业务强度，还需要结合业务-复用段关联矩阵 $A \in \{0, 1\}^{n \times m}$ ，矩阵 A 捕获OTN中mesh拓扑的业务与复用段的关联，里面的元素取值如下。

$$A_{j,i} = \begin{cases} 1, \text{业务} b_j \text{使用复用段} S_i \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

由业务强度向量 i 和业务-复用段关联矩阵 A 可得出历史业务强度系数向量 β ：

$$\beta = [\beta_{e1}, \beta_{e2}, \dots, \beta_{em}]^T = A^T i, e \in R^m \quad (8)$$

其中， A 是 A^T 的转置，该矩阵乘法高效计算所有 β_{em} 。针对表1中的数据，可示例计算历史业务强度系数的具体数值，代入数据可以得出 $i = [200, 100, 200, 100, 200, 10]^T$ ，关联矩阵 $A(n \times m = 6 \times 5)$ ：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

计算 $\beta = A^T i$ ：

$$\beta = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 200 \\ 100 \\ 200 \\ 100 \\ 200 \\ 10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{e1} \\ \beta_{e2} \\ \beta_{e3} \\ \beta_{e4} \\ \beta_{e5} \\ \beta_{e6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 + 100 + 200 + 100 + 200 \\ 200 + 100 + 200 \\ 100 + 200 + 10 \\ 100 + 200 + 10 \\ 100 + 200 + 10 \\ 10 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 800 \\ 500 \\ 310 \\ 310 \\ 310 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (10)$$

历史业务强度系数 β_{ej} 的数值比较大，为便于在权重中使用，需要做归一化处理到[0,1]范围：

$$\beta'_{ej} = \frac{\beta_{ej} - \min(\beta)}{\max(\beta) - \min(\beta)} \quad (11)$$

由此可以得到历史业务强度系数 $\beta_{e1} \sim \beta_{e6}$ 归一化的值分别为1、0.62、0.38、0.38、0.38、0。

表1 OTN业务历史数据

序号	业务编号	速率(r_j)	数量(q_j)	强度($r_j \times q_j$)	经过的复用段(P_j)
1	10010	100	2	200	{s1, s2}
2	10011	100	1	100	{s1, s2}
3	10012	100	2	200	{s1, s2}
4	10013	100	1	100	{s1, s3, s4}
5	10014	100	2	200	{s1, s3, s4}
6	10015	10	1	10	{s3, s4, s6}
...	...	...	...	...	...

(3) 波长碎片评估（连通分量着色熵）

WNA策略的初衷是通过聚集占用，腾出大片连续区域。但它在执行“聚集”的过程中，可能无意间割裂了网络其他区域该波长的连续性，或者在已有碎片区域上继续占用，使其更加碎片

化。它主要关注了“当前路径附近”的状态，但缺乏对全局波长碎片化程度的感知和优化。这里将 RWA 问题建模为动态图着色，结合最大团搜索或着色熵度量碎片程度，直接优化碎片指标。

为了使用连通分量的着色熵评估波长碎片化程度，可以先为 OTN 建立图着色模型，其中图的顶点 (Vertex) 代表 OTN 中的一条链路，图的边 (Edge) 代表两个顶点 (链路) 在网络拓扑中连通，而颜色 (Color) 则表示一个波长。因此，RWA 问题被转换成了如何给代表链路的顶点分配颜色 (波长)，使得对于每一个连接请求指定的路径，该路径上的所有顶点都被赋予同一种颜色。相邻的顶点 (在同一个路径上的链路) 不能冲突。同一顶点上 (即同一链路上) 不能分配相同颜色 (即同一链路上不能分配相同波长给不同连接)。对 OTN 建立图着色模型 $G=(V,E)$ ，其中 V 是节点集合， E 是复用段链路的集合。波长 λ 的空闲状态图为：

$$G_{\lambda}^{\text{free}}=(V_{\lambda}^{\text{free}}, E_{\lambda}^{\text{free}}) \quad (12)$$

其中，顶点集 $V_{\lambda}^{\text{free}} \in E$ 包含当前波长 λ 处于空闲状态的所有链路。边集 $E_{\lambda}^{\text{free}}$ 定义两个顶点 (链路) $e_i, e_j \in V_{\lambda}^{\text{free}}$ 之间存在边 $(e_i, e_j) \in E_{\lambda}^{\text{free}}$ ，当且仅当链路 e_i 和 e_j 在原始网络拓扑 G 中共享一个公共节点 (即它们是相邻的链路)。

在 $G_{\lambda}^{\text{free}}$ 上采用连通分量深度优先搜索 DFS 分析算法，可以得到 K_{λ} 个连通分量 $CC_{\lambda}^1, CC_{\lambda}^2, \dots, CC_{\lambda}^{K_{\lambda}}$ 。每个连通分量 CC_{λ}^k (其中 $k=1, 2, \dots, K_{\lambda}$) 是 $V_{\lambda}^{\text{free}}$ 的一个极大连通子集。这里需要注意的是，分量内部的任意两个顶点 (空闲链路) 通过路径相连 (路径由 $E_{\lambda}^{\text{free}}$ 中的边构成)，并且分量之间互不相连。记连通分量 CC_{λ}^k 的大小为 $|CC_{\lambda}^k|$ ，则波长 λ 的总空闲链路数为：

$$S_{\lambda} = \sum_{k=1}^{K_{\lambda}} |CC_{\lambda}^k| = |V_{\lambda}^{\text{free}}| \quad (13)$$

将每个连通分量 CC_{λ}^k 视为一个“资源块”，定义该分量的大小占所有空闲资源的概率如下。

$$p_k^{\lambda} = \frac{|CC_{\lambda}^k|}{S_{\lambda}} \quad (k=1, 2, \dots, K_{\lambda}) \quad (14)$$

其中， p_k^{λ} 表示波长 λ 的空闲链路，它落在分量 CC_{λ}^k 中的概率是多少，这个概率分布 p_k^{λ} 满足以下条件：

$$\sum_{k=1}^{K_{\lambda}} p_k^{\lambda} = \sum_{k=1}^{K_{\lambda}} \frac{|CC_{\lambda}^k|}{S_{\lambda}} = \frac{S_{\lambda}}{S_{\lambda}} = 1 \quad (15)$$

波长 λ 基于连通分量的着色熵 H_{λ}^{CC} 定义为该概率分布 p_k^{λ} 的着色熵，具体如下。

$$H_{\lambda}^{\text{CC}} = - \sum_{k=1}^{K_{\lambda}} p_k^{\lambda} \cdot (p_k^{\lambda}) = - \sum_{k=1}^{K_{\lambda}} \left(\frac{|CC_{\lambda}^k|}{S_{\lambda}} \cdot \lg \left(\frac{|CC_{\lambda}^k|}{S_{\lambda}} \right) \right) \quad (16)$$

熵值 H_{λ}^{CC} 可以很好地量化评估波长碎片，熵值 H_{λ}^{CC} 反映了波长 λ 上空闲资源分布的“混乱程度”或“不确定性”。当且仅当 $K_{\lambda}=1$ 且 $|CC_{\lambda}^1|=S_{\lambda}$ 时， $H_{\lambda}^{\text{CC}}=0$ 达到最小值，此时只有一个分量且包含所有空闲资源，这表示所有空闲链路都连通成一个大块，碎片化程度最低。 H_{λ}^{CC} 值越大表示分布越“均匀”或“分散”，这种情况会发生在连通分量数量 K_{λ} 很大的时候，此时空闲资源被分割成很多小碎片，或者分量大小 $|CC_{\lambda}^k|$ 很均匀没有主导的大块，碎片大小都差不多。当所有 K_{λ} 个分量的 p_k^{λ} 都相等，即 $|CC_{\lambda}^1|=|CC_{\lambda}^2|=\dots=|CC_{\lambda}^{K_{\lambda}}|=S_{\lambda}/K_{\lambda}$ 时 H_{λ}^{CC} 会达到最大值：

$$H_{\lambda}^{\text{max}} = \lg K_{\lambda} \quad (17)$$

因此， H_{λ}^{CC} 的值越大，表明波长 λ 的空闲资源碎片化程度越严重。结合热点区域的历史业务强度，通过修改后的波长度量表达式可以得出 top- k 个可选用的波长，对于一个新请求的路径 Q ，在其所有可用波长 (在 Q 上所有链路空闲的波长) 中，选择 H_{λ}^{CC} 值最小的那个波长 λ 。这样选择是为了尽量保护那些当前碎片化程度低 (资源成块) 的优质波长资源，从而降低未来长路径请求的阻塞率。



2 波长碎片优化模型的应用

在某省干OTN建设工程中应用该模型,将业务AZ点需求、业务速率、保护类型作为输入数据,具体见表2。

表2 业务需求数据

业务名称	业务需求速率/ (Gbit·s ⁻¹)	保护类型	业务起点	业务终点
CMNET 省网	100	1+1 保护	×××IDC	××机楼1
CMNET 城域网	100	1+1 保护	×××IDC	××机楼1
IDC	100	1+1 保护	×××IDC	××机楼2
SPN省干 回传	10	1+1 保护	××机楼3	××机楼6
CMNET 省网	10	1+0 保护	××机楼6	××机楼8
...	...	...	...	...

结合历史业务经过的复用段经验,输出业务级别的路由方案,同时针对上一步输出的路由方案,结合着色熵算法得到详细的波长分配方案,见表3。

表3 波道分配方案

业务名称	业务需求速率/ (Gbit·s ⁻¹)	保护类型	业务起点	业务终点	完整路径	复用段1	复用段1波道	复用段2	复用段2波道	复用段3	复用段3波道
CMNET T省网	100	1+1 保护	×××IDC	××机楼1	×××IDC → ××机楼3 → ××机楼4 → ××机楼1	×××IDC-××机楼3	76	××机楼3-××机楼4	76	××机楼4-××机楼1	76
CMNET T城域网	100	1+1 保护	×××IDC	××机楼1	×××IDC → ××机楼9 → ××机楼1	×××IDC-××机楼9	42	××机楼9-××机楼1	42		
IDC	100	1+1 保护	×××IDC	××机楼2	×××IDC → ××机楼4 → ××机楼11 → ××机楼2	×××IDC-××机楼4	32	××机楼4-××机楼11	32	××机楼11-××机楼2	32
SPN省干回传	10	1+1 保护	××机楼3	××机楼6	××机楼3 → ×××IDC → ××机楼6	××机楼3-XXXIDC	35	×××IDC-××机楼6	35		
CMNET T省网	10	1+0 保护	××机楼6	××机楼8	××机楼6 → ××机楼3 → ××机楼2 → ××机楼8	××机楼6-××机楼3	32	××机楼3-××机楼2	32	××机楼2-××机楼8	32
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

实测表明,该方案使省级干线网络单系统规划耗时从天级降至分钟级别,通过算法融合创新,将复杂数学建模转化为自动化操作:在路径生成阶段,采用拓扑分层预处理压缩搜索范围,结合A*算法与多参数代价函数快速锁定最优路由;在波道分配环节,引入历史业务强度系数动态调整链路权重,优先分配高负载区域波长,保留低业务量区域的连续资源池,从而使规划人员可以集中精力审核关键决策而非重复低效波道分配工作。

3 结束语

在光传输网络领域,本文针对业务热点区域资源分配不均和波长碎片化问题,创新性地提出了一种融合热点感知与着色熵评估的优化方法,通过历史业务数据动态量化链路负载强度,改进邻域加权累积算法以实现自适应权重调整,同时结合图着色模型引入连通分量着色熵来精确评估碎片程度,指导最小熵波长分配决策。此算法模型可以有效减少波长转换的端口数量,节省网络建设投资,突破传统方法在调参僵化和碎片治理

上的局限,为光网络资源高效利用提供新范式。未来可探索人工智能集成以适配超高速动态业务,推动全光网络向零碎片目标演进。

参考文献:

- [1] 袁俊岭,张迪,张启坤,等. WDM光网中的一种邻域加权累积的波长分配策略[J]. 电讯技术, 2019, 59(2):151-156.
- [2] 袁海涛,张国新,周鹤. ROADM技术在骨干传送网的组网策略研究[J]. 邮电设计技术, 2018(4): 23-28.

[作者简介]

湛广志 (1989-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司资深研究专员, 主要研究方向为有线通信设备工程及管线工程。

龙晓婷 (1998-), 女, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司咨询设计师, 主要研究方向为通信网络规划与优化。

赵志成 (1983-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司工程总监, 主要研究方向为有线通信设备

工程及管线工程。

葛平路 (1986-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司高级咨询设计师, 主要研究方向为通信管线工程设计与建设。

陈銮雄 (1988-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司资深研究专员, 主要研究方向为有线通信设备工程及管线工程。

潘晨昇 (1996-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司咨询设计师, 主要研究方向为通信网络规划与优化。

程广展 (1987-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司资深研究专员, 主要研究方向为通信网络规划与优化。

王师克 (1985-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司高级咨询设计师, 主要研究方向为通信网络规划与优化。

张丽红 (1996-), 男, 中国移动通信集团设计院有限公司广东分公司咨询设计师, 主要研究方向为通信网络规划与优化。