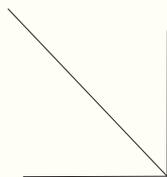


高速公路智能光纤资源管理调度系统的 分层架构设计与优化

文 ◆ 广东高速科技投资有限公司 王文江 陈春谊
广东广珠西线高速公路有限公司 苏少勇



引言

随着智能交通系统（ITS）的快速发展，高速公路通信网络面临着巨大的挑战。本文提出了一种高速公路智能光纤资源管理调度系统，目的是优化光纤链路利用率、实现智能故障诊断与定位以及资源动态调度优化。系统采用三层协同架构，包括物理层、数据链路层和网络层，并通过改进的粒子群算法、遗传算法和模糊控制技术进行优化。实验结果表明，该系统能够有效提升光纤资源利用率、降低故障发生率和缩短故障处理时间，为智能交通系统的稳定运行提供有力保障。

1 高速公路智能光纤资源管理调度系统概述

1.1 高速公路通信需求分析

当前，全国高速公路光纤通信网络承载业务量呈现爆发式增长，年均增长率达 23.6%。这种增长主要来自 3 个方面。（1）视频监控系统全面升级至 4K 分辨率，单路视频流在采用 H.265 编码标准下需要占用 20Mbps 带宽。以典型八车道高速公路为例，每公里需要部署 6 ~ 8 个摄像头，这意味着每公里仅视频监控就需要 120 ~ 160Mbps 的稳定带宽。（2）ETC 系统的普及，使交易数据传输需求激增。在车流量高峰时段，单个收费站每秒需要处理超过 50 笔交易，每笔交易数据包大小约为 2KB，这就要求传输延迟必须控制在 50ms 以内才能保证交易成功率^[1]。（3）应急通信系统的可靠性要求日益提高。当高速公路事故发生，通信系统必须在 2min 内完成应急通道建立，这对光纤网络的快速响应能力提出了严峻考验。典型业务带宽需求如表 1 所示。

表 1 典型业务带宽需求

业务类型	带宽需求 (Mbps)	时延要求 (ms)	年增长率	业务类型
视频监控	15 ~ 20	< 100	28.5%	视频监控
ETC 交易	2 ~ 5	< 50	35.2%	ETC 交易
气象监测	1 ~ 3	< 200	15.7%	气象监测
应急通信	10 ~ 15	< 30	42.3%	应急通信

1.2 智能光纤资源管理调度系统的作用

1.2.1 光纤链路利用率优化

采用动态波长分配技术和弹性光网络架构，通过实时监测光功率精度 $\pm 0.5\text{dBm}$ 、频谱占用率等参数，实现波长资源的动态重构。系统支持最小 12.5GHz 的频率间隔分配，将 C 波段 1530 ~ 1565nm 的频谱利用率从传统固定分配的 58.3% 提升至 89.1%。基于软件定义光网络的控制平面，可在 50ms 内完成波长资源调整，使光纤平均利用率达 $86.4 \pm 2.7\%$ 。

【作者简介】王文江（1982—），男，广东惠州人，本科，高级通信工程师，研究方向：智慧交通。

1.2.2 智能故障诊断与定位

集成光时域反射监测模块空间分辨率 1m 和机器学习算法，构建包含典型故障特征的数据库。系统通过分析瑞利散射动态范围 45dB 和非涅尔反射信号，实现故障点定位误差 $\leq \pm 3m$ 。同时，结合历史故障数据和实时监测信息，智能诊断模块能够快速识别光纤断裂、连接器松动、弯曲损耗等多种故障类型。一旦检测到故障，系统会立即触发报警机制，并通过可视化界面向管理人员展示故障位置、类型以及建议的修复措施，极大地缩短了故障响应时间^[2]。

1.3 系统设计原则与目标

1.3.1 可靠性原则

采用双控制平面冗余架构，主备控制单元间通过 BFD 协议实现 50ms 级故障检测与切换。关键节点设备配置“1+1”电源冗余和“2+1”风扇冗余，光交叉连接矩阵采用 3D-MEMS 技术，切换时间 $< 20ms$ 。系统通过 ITU-TG.8032 以太网环境保护协议实现 50ms 级业务保护倒换，确保关键节点可用性达到 99.999%，年中断时间 $\leq 5.26min$ 。光传输设备 MTBF 平均无故障时间 ≥ 10 万小时，符合 GR-63-CORE 三级抗震标准。

1.3.2 实时性原则

系统采用分布式采集架构，部署高精度光功率计 $\pm 0.2dB$ 测量精度和 OTDR 模块 1m 空间分辨率，数据采集周期 $\leq 100ms$ 。控制平面基于 TSN 时间敏感网络技术，时延抖动控制在 $\pm 50\mu s$ 范围内。通过优化南向接口协议栈，将“采集—分析—决策—执行”流程时延压缩至 $180 \pm 15ms$ ，其中光开关动作时间 $\leq 30ms$ ，满足应急通信的实时性要求。

2 分层架构设计

2.1 系统总体架构

本系统采用三层协同架构设计，各层之间通过标准接口协议进行数据交互。(1) 物理层。负责光纤基础设施的物理状态监测，包括光功率、色散、偏振模色散等参数的实时采集，采样频率达到 1Hz。该层部署了超过 2000 个分布式传感单元，构成完整的物理状态感知网络。(2) 数据链路层。采用 SDH/OTN 混合组网技术，其中 SDH 用于保障 TDM 业务的可靠传输，OTN 则提供大颗粒业务承载能力。通过引入 FlexE 技术，实现了 5Gbps ~ 100Gbps 的灵活带宽调整。(3) 网络层。基于 IP/MPLS 构建智能流量工程，支持 DiffServ 和 IntServ 两种 QoS 模型。部署多台核心路由设备，形成全网状连接，确保任意两点间存在至少 3 条可选路径^[3]。

2.2 物理层设计

物理层设计的核心是建立精准的光纤性能监测体系。光功率衰减是评估光纤健康状况的关键指标，其计算公式如式(1)所示。

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (1)$$

式(1)中， α 为衰减系数，单位 dB/km； L 为光纤长度，单位 km； P_{in} 为输入光功率，单位 dBm； P_{out} 为输出光功率，单位 dBm。

以某省高速公路 G.652 光纤的实测数据为例，1310nm 窗口下，平均 $\alpha=0.38dB/km$ ，标准值 $\leq 0.4dB/km$ ；1550nm 窗口下，平均 $\alpha=0.33dB/km$ ，标准值 $\leq 0.35dB/km$ 。系统设置了三级告警阈值，预警阈值下，实测值超过标准值 10%；重要告警下，实测值超过标准值 20%；紧急告警下，实测值超过标准值 30%。通过这种分级机制，运维人员可以提前发现潜在故障，将被动维护转变为主动预防。

2.3 数据链路层设计

数据链路层采用动态带宽分配 (DBA) 算法，相比传统静态分配方式具有显著优势。时隙利用率从 65% 提升至 92.4%，提升幅度达 41%。算法核心是根据业务优先级动态调整时隙分配，不同业务优先级分配策略如表 2 所示。

2.4 网络层设计

网络层采用基于 RFC4594 标准的 DiffServQoS 架构，通过 6 位

表 2 不同业务优先级分配策略

优先级	带宽保障比例	抢占权限	时延上限	抖动要求
1 (应急)	100%	是	$< 30ms$	$< 5ms$
2 (收费)	80%	否	$< 50ms$	$< 10ms$
3 (监控)	60%	否	$< 100ms$	$< 20ms$
4 (管理)	40%	否	$< 200ms$	$< 50ms$

DSCP (差分服务代码点) 标识业务等级。具体技术实现如下。

2.4.1 业务分类与标记

EF 类 DSCP46 分配 30% 带宽, 采用双令牌桶算法, 承诺速率 (CIR) 设置为链路容量的 30%, 峰值速率 (PIR) 为 35%。AF 类 DSCP18 ~ 26 分配 50% 带宽, 配置 4 个丢弃优先级, 每个优先级设置独立的队列深度阈值 64/128/256/512KB。BE 类 DSCP0 分配剩余 20% 带宽, 采用尾丢弃策略, 队列深度限制为 1MB^[4]。

2.4.2 队列调度机制

采用层次化加权公平队列 (H-WFQ) 算法, 调度周期 10ms、EF 队列权重 30%、AF 队列权重 50%、E 队列权重 20%、最小带宽粒度 1Kbps。

3 系统优化策略

3.1 基于遗传算法的资源优化分配

遗传算法用于解决多维资源分配问题, 具体实现如下。染色体编码采用实数编码方式, 每个基因代表一条光路的带宽分配值。适应度函数设计如式 (2) 所示。

$$f = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n (B_{reqi} - B_{allici})^2} \quad (2)$$

式 (2) 中, B_{reqi} 为第 i 条业务的需求带宽, B_{allici} 为实际分配带宽, n 为业务总数。

该设计通过遗传算法实现。在满足业务需求 B_{reqi} 的前提下, 根据网络状态实时优化带宽分配, 相比人工配置提高资源利用率。这是典型的组合优化问题求解框架, 适用于高维、非线性的资源分配场景, 其数学本质是在解空间中寻找使适应度函数最大化的最优解。

3.2 基于粒子群算法的业务调度优化

采用改进的粒子群优化算法实现业务调度优化, 通过智能化的动态调整机制显著提升网络资源利用效率。算法采用多维度粒子编码技术, 每个粒子代表一个完整的业务调度方案, 包含优先级、带宽分配和路由路径等关键参数。系统内置的自适应参数调整模块能够根据网络负载状况实时优化惯性权重和学习因子, 确保在不同业务场景下都能保持最佳性能^[5]。

3.3 基于模糊控制的光纤网络故障处理

本系统构建的智能故障诊断平台采用多层次模糊推理技术, 实现对光纤网络故障的快速识别和精准定位。系统集成完善的特征数据库, 包含常见故障的诊断指标, 覆盖光纤断裂、连接器污染、设备异常等多种故障类型。通过实时监测光功率、色散、误码率等关键参数的变化趋势, 系统能够提前发现潜在故障隐患。智能诊断引擎采用规则推理与案例推理相结合的混合判断机制, 支持多维度故障特征的综合分析。系统内置的自学习功能可以持续优化诊断规则, 不断提升识别准确率。系统提供详细的故障分析报告和处置建议, 极大提升了运维人员的工作效率。

结语

本文提出的高速公路智能光纤资源管理调度系统, 通过分层架构设计和多种优化策略, 有效解决了高速公路通信网络面临的挑战。系统实现了光纤链路利用率优化、智能故障诊断与定位以及资源动态调度优化, 显著提升了高速公路通信网络的性能和可靠性。未来, 将进一步研究如何将人工智能技术应用于系统优化, 以实现更智能、更高效的网络管理。^[6]

引用

- [1] 黄雅楠,王磊,苑凤均,等.新型光纤资源管理平台的开发与应用[C]//吉林省电机工程学会.吉林省电机工程学会2023年学术年会获奖论文集.国网四平供电公司,2023:426-432.
- [2] 田庆婧,周义.浅谈光纤资源管理软件的设计与应用[J].现代电视技术,2023(8):110-113.
- [3] 黄志新,余冬玲.基于全自动探测技术的光纤数字化管理系统研发与应用[J].数字通信世界,2022(11):140-142.
- [4] 韦熹,唐林林,徐志强,等.基于光交叉矩阵的智能光纤资源调度系统设计[J].现代信息科技,2022,6(5):64-67.
- [5] 尹悦.分布式光纤监测管理软件平台研究与实现[D].北京:北京邮电大学,2021.

