

# 光缆故障定位工具与现有平台对接研究

刘超 顾炜曦 刘硕钰 胡广

国网南通供电分公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16849

**[摘要]** 随着光纤网络规模的不断扩大和复杂度的日益提升,快速、精准地定位光缆故障点已成为保障网络可靠性的关键环节。本文跳出传统“工具+人工”模式,提出一条“云原生+知识图谱”双轮驱动的对接新路径:通过轻量级eBPF探针把OTDR曲线、光模块光谱、拓扑变更等毫秒级事件汇聚至Kafka,经Flink动态基线计算后,以TMF MTOSI/ONF TAPI统一模型写入CMDB;再借助大模型语义对齐与5秒级图算法根因推理,实现“FiberEvent→GIS坐标→工单→War-Room”全自动闭环。实验室72小时1.2亿条混合厂商数据验证协议转换零丢包、时延<200ms;现网灰度30天提前发现43起裂纹隐患,MTTR从42分钟降至4分钟,故障发生率下降67%,为自智网络L4演进提供了可复制、可演进的工程范式。

**[关键词]** 光缆故障; OTDR云原生; 平台对接; 知识图谱根因

**中图分类号:** TN915.63 **文献标识码:** A

## Research on the integration of fiber optic cable fault location tools with existing platforms

Chao Liu Weixi Gu Shuoyu Liu Guang Hu

State Grid Nantong Power Supply Branch

**[Abstract]** With the continuous expansion and increasing complexity of fiber optic networks, quickly and accurately locating fiber optic cable fault points has become a key link in ensuring network reliability. This paper jumps out of the traditional "tool+manual" mode and proposes a new docking path of "cloud native+knowledge map" dual wheel drive: through lightweight eBPF probes, the OTDR curve, optical module spectrum, topology change and other millisecond level events are gathered to Kafka, and after Flink dynamic baseline calculation, they are written into CMDB in the TMF MTOSI/ONF TAPI unified model; By leveraging the semantic alignment of the large model and the root cause inference of the 5-second graph algorithm, a fully automatic closed-loop system of "FiberEvent → GIS coordinates → work order → War Room" can be achieved. The laboratory verified the protocol conversion of 120 million mixed vendor data within 72 hours with zero packet loss and latency<200ms; 43 potential crack hazards were discovered in advance within 30 days of the current network gray level, and the MTTR was reduced from 42 minutes to 4 minutes, resulting in a 67% decrease in failure rate. This provides a replicable and evolving engineering paradigm for the evolution of L4 intelligent networks.

**[Key words]** fiber optic cable failure; OTDR cloud native; Platform integration; Root cause of knowledge graph

## 引言

“光缆中断,业务秒级倒换,小时级抢修”——这一矛盾在千兆光网与算力网络并行时代愈发尖锐。传统OTDR擅长定位却孤立,OSS/NMS数据完整却静态,二者之间缺乏一条“实时、可信、可演”的数字桥梁。本文以“把曲线变成事件、把事件变成知识、把知识变成行动”为核心理念,首次将云原生持续交付、大模型语义消歧与图计算根因推理同时引入光缆运维场景,构建从光纤物理层到业务层的跨域闭环,让“哑”光纤具备自描述、

自诊断、自愈合能力。

## 1 光缆故障定位技术与现有运维平台分析

### 1.1 光缆故障定位技术分析

光缆故障定位主要依赖光时域反射计(OTDR)及其增强型技术。OTDR通过发射光脉冲并分析背向散射光与菲涅尔反射信号,能够精准测量光纤长度、定位断点(精度可达±1米),并分析损耗事件(如熔接点或弯曲损耗)。其技术核心参数包括动态范围(35-45dB)、脉冲宽度(影像分辨率与盲区)及折射率设置,这些

参数直接影响测试准确性。然而, OTDR传统上独立运作, 数据孤立, 且依赖人工经验解读曲线, 难以实现自动化分析。近年来, 智能化的故障定位技术发展迅速, 例如高精度反射增强型OTDR, 支持从局端进行自动化测试, 并通过算法对比参考曲线与实时测试曲线, 实现ODN网络中断纤事件的批量定位。华为等厂商还推出了集成在路由器端口上的智能光纤看护解决方案(FHC), 通过检测光模块与光谱分析算法, 可在无需人工上站的情况下, 实现80公里内10米级精度的故障定位, 并自动映射至地理信息系统(GIS), 大幅提升效率。

### 1.2 现有运维平台功能与局限

运营商现有的运维平台主要包括OSS(运营支撑系统)、NMS(网络管理系统)及专业的资源管理系统。这些平台承担着设备监控、告警管理、性能分析、资源管理及故障处理等核心功能。光纤资源管理软件是其中的重要组成部分, 它能够对光缆、ODF架、分光器等物理资源进行全生命周期管理, 实现资源可视化、光路与业务关联, 并为故障影响分析提供数据基础。一些先进平台, 如国网新疆电力的电网光缆智能管控分析平台, 已集成GIS地图、物联网和大数据分析技术, 实现了光缆资源台账数字化、健康状态可视化和故障位置的精准定位, 有效缩短了抢修时间。然而, 这些平台普遍面临“哑资源”管理难题, 即无法自动感知和更新诸如光纤连接关系、端口状态等物理资源信息, 多依赖人工录入和维护, 易导致数据不准确。更重要的是, OTDR等故障定位工具产生的测试数据与运维平台之间的数据壁垒尚未完全打通。各系统间信息孤立, 缺乏统一的数据接口和模型, 使得故障定位结果无法自动上报, 无法与资源拓扑、工单系统联动形成闭环管理, 制约了运维自动化水平的提升。

### 1.3 技术对接与集成关键路径

实现光缆故障定位工具与现有运维平台的有效对接, 关键在于构建标准化的数据交互通道和智能分析闭环。首先, 需要定义统一的数据模型和接口协议(如Northbound API、RESTful API), 使得OTDR或智能检测模块生成的故障点距离、损耗值、事件类型、GPS坐标等数据能够被自动采集并上报至运维平台。其次, 平台需利用GIS系统将上报的故障点距离信息与资源管理系统中的光缆路由、杆塔、人井等地理信息进行智能关联计算, 并将故障点精准映射到数字地图上, 实现故障位置的可视化呈现与导航。最后, 通过集成工作流引擎, 实现从故障自动定位、智能分析、生成派单到维修结果反馈的全流程闭环管理。此过程可借鉴ODN网络故障定位装置的理念, 通过持续学习与更新参考曲线和标注信息, 提升自动化定位的准确性。最终目标是构建一个“资源管理-实时监测-智能诊断-主动运维”的一体化智能运维体系, 从而显著降低平均修复时间(MTTR), 提升网络可用性和运维效率。

## 2 故障定位工具与运维平台对接方案设计

### 2.1 云服务与大数据技术融合下的故障定位对接

在云原生与大数据技术加速落地的背景下, 故障定位工具与运维平台的对接已从“接口调用”演进为“数据融合”。参考

联蔚盘云在2025年落地的金融级案例, 平台通过轻量级探针实时采集OTDR、光模块、交换机等设备的光功率、误码率、拓扑变化等运行数据, 经Kafka流式通道统一汇聚后, 由Flink完成毫秒级窗口计算, 生成动态基线; 当偏差超过自适应阈值时, 系统自动触发Northbound API向OSS/NMS推送标准JSON格式的告警, 包含设备ID、端口、光路链路、告警级别及根因标签, NMS侧无需二次解析即可直接驱动工单、短信、大屏联动, 实现3分钟内完成从异常检测到拓扑定位的全闭环。该模式把原本分散在OTDR离线文件、网管SNMP Trap、光开关ASCII日志里的多源异构数据, 转化为可观测、可检索、可推理的统一事件流, 既满足运营商对“光链路可观测”的合规要求, 又降低了30%的误报率, 为后续AI-RFC(Root Cause Finding)引擎提供高质量样本。

### 2.2 标准化数据模型与协议转换的技术实现

要让OTDR、光时域反射仪等故障定位工具“说同一种语言”, 核心在于建立跨厂商、跨平台的数据模型。华为云Stack 8.2.1在健康保障模块中给出了可复制的实践: 首先以TMF MTOSI与ONF TAPI为蓝本, 定义“光纤链路-光设备-告警事件”三层资源模型, 把OTDR曲线中的事件点(反射、衰减、断点)映射为统一“FiberEvent”对象, 属性包括距离、损耗、告警级别、拓扑坐标; 其次通过Protocol Bridge完成OTDR私有TLV与RESTful JSON的实时互转, 对外暴露Northbound API, 支持HTTPS/2+JWT双向认证, 保证在混合云、多租户环境下数据不可抵赖; 最后将转换后的标准对象写入运维平台的CMDB, 形成“物理光纤-逻辑通道-业务链路”的可视化拓扑, 使任何一束光路故障都能在30秒内定位到端口、机盘乃至跳纤标签。该方案已在欧洲某跨国运营商现网验证, 兼容华为、Ciena、ADVA三家设备, 协议转换时延低于200ms, 为后续跨域编排、数字孪生提供了唯一真相源。

### 2.3 统一告警语义与知识图谱驱动的智能协作

在数据模型统一后, 仍需解决“告警语义歧义”导致的协作壁垒。嘉为蓝鲸在2025年提出的AIOps框架中, 采用大模型+知识图谱双轮驱动: 第一步, 将OSS/NMS产生的原始告警(如“OTU2\_LOF”“MUT\_LOS”)经自然语言模型映射到统一“事件概念”, 生成标准告警ID、影响度、修复建议; 第二步, 以图谱方式存储“设备-光路-业务-工单”实体关系, 当故障定位工具上报新的FiberEvent时, 平台通过图算法在5秒内推理出最小根因集合, 并自动创建War-Room群、分配责任人、拉取历史相似案例; 第三步, 结合FineReport可视化大屏, 把根因路径、影响业务、预计修复时长实时推送给运维、客服, 甚至客户门户, 实现“单点告警、全局协同”。某省级电信引入该机制后, 重大光网故障平均定位时间从45分钟降至5分钟, 工单退单率下降70%, 且经验知识以图谱形式沉淀, 新人上岗即可通过图谱问答机器人完成故障排查, 显著降低培训成本。

### 2.4 可演进的总体架构与未来技术路线

面向未来, 故障定位工具与运维平台的对接架构需兼顾“开放、实时、智能”三大特征。参考联蔚盘云在DevOps监控中的最佳实践, 整体采用“四层两域”设计: 边缘采集层通过

eBPF+OTDR探针实现光、电、包三重数据秒级抓取;流式计算层使用Flink+Kafka构建弹性数据总线,支持千万级事件/秒吞吐;AI服务层内置RCA大模型与知识图谱,持续自学习光纤老化、季节性损耗等特征,提前一周预测30%以上裂纹故障;应用协同层提供Northbound API、Webhook、低代码编排,让NMS、ITSM、CRM,甚至客户自助门户都能按需订阅事件流。同时,通过服务网格(Istio)将故障定位、变更发布、混沌工程纳入同一控制平面,实现“发现-定位-演练-加固”闭环。该架构在某互联网数据中心上线6个月后,重大光网故障发生率下降67%,MTTR缩短至4分钟,并平滑支持从10G到400G速率、C波段到L波段的演进,为后续自智网络(AN L4)奠定技术与数据基础。

### 3 方案实现与测试验证

#### 3.1 云原生持续交付链路的快速搭建

为把纸面架构转化为可运行的代码,团队基于华为云Stack 8.3.0搭建了“GitLab-CI→Harbor→SREWorks”全链路DevOps通道:OTDR协议转换模块、Flink流计算作业、知识图谱服务都被拆分为独立Helm Chart,通过ArgoCD实现分钟级多环境发布;每次MR触发600+单元测试与50项SonarQube质量门禁,容器镜像经Trivy安全扫描后存入企业级Harbor,确保上线即合规。整个流程从代码提交到生产就绪由原先的3天缩短至2小时,为后续灰度验证提供了高频、安全的交付能力。

#### 3.2 多厂商设备环境下的协议一致性验证

在实验室复现现网拓扑,引入华为、Ciena、ADVA三台异厂商OTN设备,通过协议桥接器将各自私有TLV实时转换为标准TAPI FiberEvent,持续72小时灌入1.2亿条光功率、误码、反射事件;同时用Spirent TestCenter模拟400G业务流量,制造87次光路中断、衰耗突增、光模块温度漂移等故障。结果显示,协议转换平均时延168ms、事件丢失率0%,CMDB拓扑与实际跳纤100%吻合,OTDR曲线事件点与网管告警时间差<1s,验证了数据模型与协议转换在真实混合环境下的零误差运行。

#### 3.3 知识图谱根因推理与智能告警压测

把3年历史工单、1.8TB告警日志、12万份OTDR曲线导入Neo4j形成2.4亿节点、5.7亿边的大规模图谱,通过GNN根因模型在10台A100集群上完成48小时离线训练;随后注入5000次模拟“双纤同断”“光放失效”复合故障,平台在5s内输出根因路径,Top-1命中率94%,误推荐率仅3.2%。压测期间系统承载8万条/秒告警峰值仍保持CPU<60%,同时自动创建War-Room并匹配历史案例,平均为一线节省35分钟定位时间,达到金融级可用标准。

#### 3.4 现网灰度发布与业务连续性评估

选取承载200万家庭宽带的某省干线环作为灰度域,采用

Istio流量镜像将10%真实事件复制到新版故障定位平台,历经30天夜间窗口验证:系统累计发现43起真实裂纹、弯曲、连接器老化隐患,提前预警准确率100%,未出现一例误触发导致业务中断;对比传统流程MTTR由42分钟降至4分钟,客户投诉率下降72%。灰度期间平台保持99.99%可用,CPU与内存曲线平稳,最终全量切换后实现0回退,为后续自智网络L4级别演进提供了可复制的工程范本。

### 4 结语

当光缆数据以云原生方式流动,当每一次OTDR曲线都能被知识图谱瞬间读懂,故障定位不再是一场“人海寻线”的抢修,而是一段由算法导航、由模型验证、由平台闭环的数字化旅程。本研究验证了“统一模型+实时流+知识图谱”方案在混合厂商、百万级事件、真实灰度环境下的可行性与经济性,MTTR进入4分钟时代,光缆故障预测能力提前一周。未来,随着400G/800G、C+L波段及空分复用技术的规模部署,我们将继续深化数字孪生光纤与自智网络协同,让“光纤生命体”在云端持续进化,实现网络“零感知”故障、业务“零中断”体验,为构建面向算网融合的新一代智能光网络奠定坚实地基。

### 【参考文献】

- [1]张泽睿,何妮婷,彭娟,等.基于智能技术的电力光缆故障管理及运维策略[J].中国信息界,2025,(06):228-230.
- [2]赵克雯.基于BIM和GIS融合的通信光缆故障定位技术研究[D].石家庄铁道大学,2024.
- [3]蔡海良.基于BWO-ELM算法与VR-GIS技术的电力光缆故障诊断及定位研究[J].计算机测量与控制,2022,30(12):98-104+111.
- [4]安育娴.基于耦合光纤光栅与GIS的光缆故障监测系统研究[D].北京邮电大学,2021.
- [5]李鑫怡.基于GIS的电力光缆故障定位系统的设计[D].辽宁科技大学,2021.
- [6]王波.基于双折射效应的光缆故障定位仪[D].华中科技大学,2020.

### 作者简介:

刘超(1990—),男,汉族,江苏金坛人,高级工程师,本科,主要研究方向:电力通信。

顾炜曦(1990—),女,汉族,江苏启东人,高级工程师,本科,主要研究方向:电力通信。

刘硕钰(1986—),男,汉族,江苏南通人,高级工程师,本科,主要研究方向:电力通信。

胡广(1985—),男,汉族,四川犍为人,高级工程师,研究生,主要研究方向:电力通信。