

基于特征事件的PON网络故障分析诊断与应用



PON Network Fault Analysis, Diagnosis and Application Based on Feature Events

余辰东/Yu Chendong¹, 孙志/Sun Zhi²

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;

2. 中国电信集团有限公司深圳分公司, 中国 深圳 518048)

(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

2. Shenzhen Branch of China Telecom, Shenzhen 518048, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202603012

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20241212.1005.002>

网络出版日期: 2024-12-12

收稿日期: 2024-10-16

摘要: 为提升无源光网络(PON)运行稳定性以及相关故障的快速定位能力, 提出了基于事件特征的综合故障处理方法。该方法首先通过事件去噪提升查准率, 然后通过事件聚合提升查全率, 并基于关联数据, 借助算法演进完成相关网络问题的快速感知、预警与定位。以PON网络为例, 通过关键事件(告警)的选取, 并基于上述流程实现PON链路故障的快速高效定位。典型网络分析和仿真表明, 该方案去噪比与聚合查全率都能达到80%以上, 能够显著提升PON网络运维效率。

关键词: 去噪; 聚合; 查准率; 查全率; 无源光网络; 信号丢失; 特定光网络单元信号丢失

Abstract: To enhance the operational stability and rapid fault localization capability of passive optical networks (PON), this paper proposes an integrated fault processing method based on event features. Firstly, the method enhances precision through event denoising, and then improves recall through event aggregation. Combined with auxiliary data, the method employs iterative optimization algorithms to achieve rapid detection, early warning, and accurate localization of network anomalies. For PON, the scheme selects key alarm events and applies the above processing flow to efficiently locate link faults. Typical network analysis and simulation results demonstrate that the proposed scheme achieves over 80% denoising accuracy and event aggregation recall, which can significantly boost PON operation and maintenance efficiency.

Keywords: de-noising; aggregation; precision; recall; PON; loss of signal; LOSi

引用格式: 余辰东, 孙志. 基于特征事件的PON网络故障分析诊断与应用[J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(3): 69-75. DOI: 10.12142/ZTETJ.202603012

Citation: Yu C D, Sun Z. PON network fault analysis, diagnosis and application based on feature events [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(3): 69-75. DOI: 10.12142/ZTETJ.202603012

无源光网络(PON)技术在接入网领域已得到大规模部署。这主要得益于两大核心优势: 1) 采用无源传输网络, 易于部署维护; 2) 采用点对多点(P2MP)拓扑结构, 单PON口下最多可支持64~128个光网络单元(ONU)接入。中国信息通信研究院发布的《中国宽带发展白皮书(2023年)》指出, 当前中国已建成光纤到户端口10.8亿个, 现网10G PON端口数达2 184.8万个, PON已成为主流光接入网技术。

然而, 实际上随着PON网络规模的快速扩大^[1], 运维压力与运维复杂度也在日益增加, 具体体现在两个方面: 1) 根据《接入网技术要求——基于以太网的无源光网络(EPON)》规范, PON作为二层业务转发的系统, 无法直接

感知其承载业务的变化, 即PON网络故障感知能力仍存在不足; 2) 根据IEEE 802.3ah、ITU-T G.984.x等标准定义, PON上行时分多址接入(TDMA)机制和P2MP拓扑结构, 容易导致PON端口下发生单点故障, 增加问题定位与处置难度^[2]。

落实到PON系统现场运维场景中, 现存痛点主要包括3个方面:

1) 位于用户侧的ONU设备受工程安装环境、线路外设质量、用户使用习惯等多重因素干扰, 影响程度远高于传统通信设备^[3]。相较于局端部署的光线路终端(OLT), ONU运行稳定性偏弱, 易出现工作状态异常, 并直接反映在PON链路拓扑上。

2) 随着光接入技术与各类业务应用持续迭代, PON 网络拓扑割接、扩容等工程操作会引发 ONU 状态频繁、大幅波动;与此同时, OLT 与上层运维平台间的信令交互, 同样会改变 ONU 运行状态。

3) 单 PON 端口下挂载多台 ONU, 使得 OLT 侧汇聚的 ONU 状态变更、告警信息数量呈爆发式增长, 容易引发运维信息过载, 导致故障处置效率显著降低^[4]。

综上所述, 当前 PON 网络亟需提升关键异常识别与故障定界、定位的处理效率。

1 故障处理步骤分解

为实现故障的高效精准定位, 打破传统运维模式的局限, 本文从网络层面分析各类异常事件及其关联特征, 推动故障定位方式由单一事件处理模式, 向多源异常数据综合分析模式转变。具体处理流程如图1所示: 对网络中的关键事件进行提取, 并将其作为核心特征, 通过去噪、聚合、识别与定位等过程, 同时以查全率、查准率为评价指标, 实现对整体故障定界、定位结果的评价。

传统故障处理方式主要依托运维人员人工经验, 通过筛选概率最高的故障诱因完成定位。该方式主观依赖性较强, 预估故障原因往往与实际故障存在偏差, 直接影响故障查全率与查准率。其中, 查准率 (Precision) 是衡量检索系统信

噪比的一种指标, 如公式 (1) 所示; 查全率 (Recall) 是指检出的相关信息量与总量的比值, 如公式 (2) 所示。查全率与查准率两者之间具有互逆相关性:

$$\text{查准率} = \frac{\text{预测为1且正确预测的样本数}}{\text{所有预测为1的样本数}} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1),$$

$$\text{查全率} = \frac{\text{预测为1且正确预测的样本数}}{\text{真实情况下所有为1的样本数}} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)。$$

查准率与查全率的计算涉及4个评估分类模型性能参数, 其中:

TP 表示: 真实情况为“真”, 模型也正确预测为“真”的样本数。

FN 表示: 真实情况为“真”, 但模型错误预测为“假”的样本数。

FP 表示: 真实情况为“假”, 但模型错误预测为“真”的样本数。

TN 表示: 真实情况为“假”, 模型也正确预测为“假”的样本数。

1.1 去噪

去噪即筛选虚假事件, 以此提高查准率。滤除无效数据的事件类型主要包括: 网络割接、设备升级等主动运维操作产生的事件, PON 端口上行光信号丢失 (PON LOS) 等存在多义性、需要语义转译的告警事件, 以及子接口告警抖动等高频波动事件。

如果去噪后数据质量比较好 (查准率评价), 那么异常事件识别结果与实际运行状态之间的偏差就会大幅减小。以主干光纤断裂场景为例, 传统运维模式通常将 PON LOS 告警直接判定为主干光纤断裂, 然而该告警也可能由小区断电等场景触发。结合公式 (1) 可知, 传统方法判定的主干光纤断裂预测样本 (TP+FP) 中, 混入了小区断电导致的误判样本 (FP), 通过数据去噪手段剔除该类无效样本, 能够有效减少误判数量, 降低 FP 值, 优化故障定位精度。

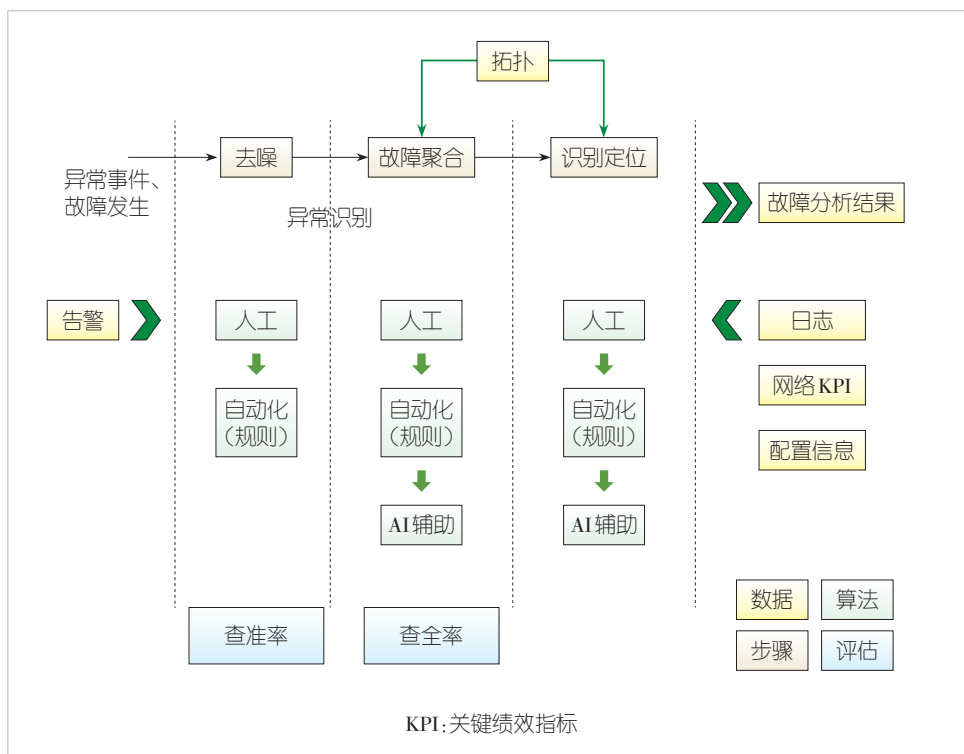


图1 基于事件特征的综合故障处理流程

1.2 故障聚合

外在事件与故障根因之间并非简单映射。故障根因除了会导致本端口异常外,也可能导致多个子端口异常,且各子端口表现为各自独立的事件。为此,可借助聚合策略,将多个相对独立的子事件通过内在逻辑进行关联,以确定根因,有效提升查全率^[5]。

在实际应用中,主干或支路光纤中断会触发告警并推送运维派单任务,需人工维修处理,而终端掉电场景则不需要。若PON端口下ONU掉电(DGi),此时OLT PON端口会检测该ONU上行无光信号(LOSi)。这种情况下的DGi和LOSi实际表征的是同一个故障事件,即ONU掉电。若PON端口下的所有ONU均掉电,此时PON端口检测上行无光信号(LOS)。这种情况下,PON端口下所有ONU的DGi与PON LOS实际表征的也是同一个故障事件,即PON端口下多个ONU掉电。由于PON端口一般会覆盖同一个区域,因此这种掉电也称为小区掉电。由上述描述可知,这两种场景下产生的LOSi或LOS,实际上并非由支路光纤或主干光纤异常(中断)引发PON端口无收光,属于无需运维派单的虚假负样本(FN)。因此,需通过针对性优化降低FN数量,以此提升故障定位查全率,具体原理如公式(2)所示。

事件聚合可实现时间域、空间域与逻辑域的关联事件聚合,将零散、独立的告警事件整合为逻辑统一的事件集合,具体流程如图2所示。首先,通过设定时间范围、关联端口数量等事件集合阈值,完成告警事件的真伪初步判别;其次,以整合后的事件集合为索引开展全网检索,结合检索结果与辅助判定条件,校验当前事件阈值的合理性;最后,依托对应算法完成事件规则的优化,动态调整判别窗口与阈

值大小,实现故障判别精度的持续提升。

以时序关联规则为例,同一条链路产生的LOSi(ONU上行信号丢失)、DGi(ONU断电)、LOS 3类告警通常存在同步触发特征。系统可划定固定时间窗口,依托告警产生先后顺序、触发频次等特征完成多告警聚合,生成统一告警事件集。相较于离散单条告警,该事件集能够更全面、准确地反映对应链路的运行状态与链路质量。除时序维度外,还可基于异常告警所处网络拓扑位置开展关联聚合,从更高物理(逻辑)接口维度完成故障信息整合,实现对故障根因的精准刻画。

1.3 识别定位

借助去噪与聚合手段可使关键事件被快速识别。在此基础上,依托时序维度或拓扑物理维度开展统计对比分析,并结合网络关键绩效指标(KPI)、运行日志、设备配置文件等多源数据,综合研判网络运行状态,完成故障初步定位。通过计算同一时段、同一物理链路内各类事件的关联度,筛选高关联告警组合,综合判定网络异常根因。现有PON链路质差分析便是该类识别定位思路的典型应用。该方案可通过时序网络指标关联分析完成故障研判,例如对OLT侧误码率、前向纠错(FEC)效率、光模块功耗波动等指标开展联合分析。

基于事件关联的故障定位仅能输出PON网络异常现象与潜在诱因,无法直接建立网络异常与上层业务故障的一一映射关系,还需引入外部系统数据交叉核验。例如需要对接宽带远程接入服务器(BRAS)和认证、授权、计费(AAA)服务器的用户账号信息,以便验证业务故障真实发生与否;同时采集故障工单闭环反馈数据,持续迭代优化关联学习算法,不断提升整套故障识别定位流程的处理效率与判定精度^[6]。

2 关键事件选取与定义

告警能够直观反映网络实时运行状态,具备感知时效性强、采集便捷的特征,以各类告警为基础筛选关键事件具备较高可行性。

2.1 关键告警选取

PON网络的关键告警筛选规则需结合自身组网运行特征制定。在PON系统中,ONU需先完

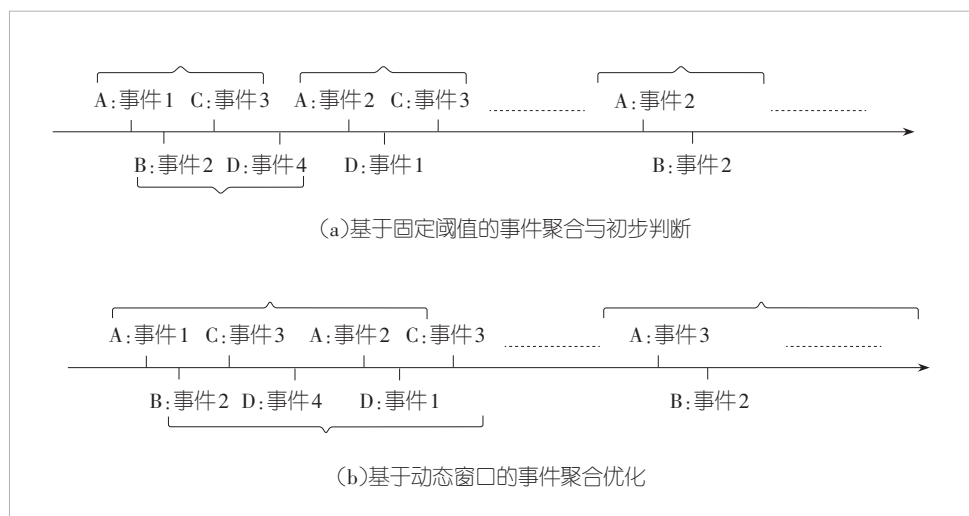


图2 事件合并(聚类)流程图

成OLT注册流程,后续上下行业务数据转发均由OLT统一调度管控,因此ONU稳定注册是PON网络可靠运行的基础条件。PON网络部署海量ONU设备,且终端易出现状态波动,使得ONU注册状态变更成为网络高频发生事件;其中LOS_i(ONU侧信号丢失)告警可直接标识单台ONU运行异常与状态切换。与之对应,PON LOS(PON端口信号丢失)告警能够反映该PON端口下全部ONU的在线连通情况。因此,本文选取PON LOS与LOS_i两类告警作为评判PON网络运行稳定性的核心事件。PON LOS、LOS_i及配套DG_i告警的标准定义如表1所示。

依据设备标准告警定义,当系统上报LOS或LOS_i告警时,代表上行链路无法识别有效光信号,对应PON端口或ONU设备将脱离注册状态。一方面可统计LOS、LOS_i告警的发生频次,以此量化对应物理端口或终端单元的运行稳定程度;另一方面可依托告警持续时长,表征对应接口或ONU的实际业务中断时长。

2.2 LOS/LOS_i告警工程应用

网络运维依托各类告警驱动故障处置流程。在实际工程场景中,LOS、LOS_i告警通常映射为主干光纤故障与分支光纤故障,并自动触发运维工单。为提升用户业务感知,运维对业务中断的管控粒度由多用户群体性故障细化至单台ONU级故障,对应的工单考核标准也同步拓展: PON LOS告警对应主干光纤中断,LOS_i告警对应分支光纤中断。

针对主干光纤中断场景,系统上报PON LOS告警时需附带受影响ONU数量,用于判定故障影响范围并直接生成运维工单;针对分支光纤中断场景,若时间窗口 T_1 内累计产生 N 条LOS_i告警(通常 $N \geq 2$),系统将合并多条告警统一触发工单。

若PON LOS告警与ONU掉电事件DG_i伴随产生,则不生成对应工单。针对LOS_i告警,仅当告

警持续时长超过阈值 T_2 (T_2 大于ONU正常重启时间)时才触发工单,以此过滤终端重启带来的瞬时LOS_i告警。此外,若单台ONU在时间窗口 T_3 内累计上报 M 次LOS_i告警,则判定该终端存在高频闪断故障,系统需对该类异常精准识别并单独标记。

3 LOS/LOS_i告警去噪

对LOS、LOS_i两类关键告警进行去噪处理,可剔除告警中与实际故障无关的干扰信息,保证留存告警与待定位故障具备强关联性。其中,针对PON LOS告警,需区分主干光纤中断与终端断电两类诱因;针对LOS_i告警,则需甄别分支光纤故障与其他非故障类触发因素。

3.1 LOS去噪

PON LOS告警用于表征主干光纤中断故障,其告警判定与原因分析流程如图3所示。ONU通过Ploam通道上传DG_i断电告警,OLT依托DG_i告警状态完成终端告警迁移逻辑:仅上报LOS_i时直接输出该告警;若LOS_i与DG_i同步上报,则将终端状态统一标记为断电DG_i。在此基础上,系统扫描对应PON端口运行状态,结合PON LOS告警时段内全部ONU的状态数据,借助原因分析算法将PON LOS告警划分为7类触发场景^[8]:

1) 主干光纤中断: PON端口下注册多个ONU,主干光

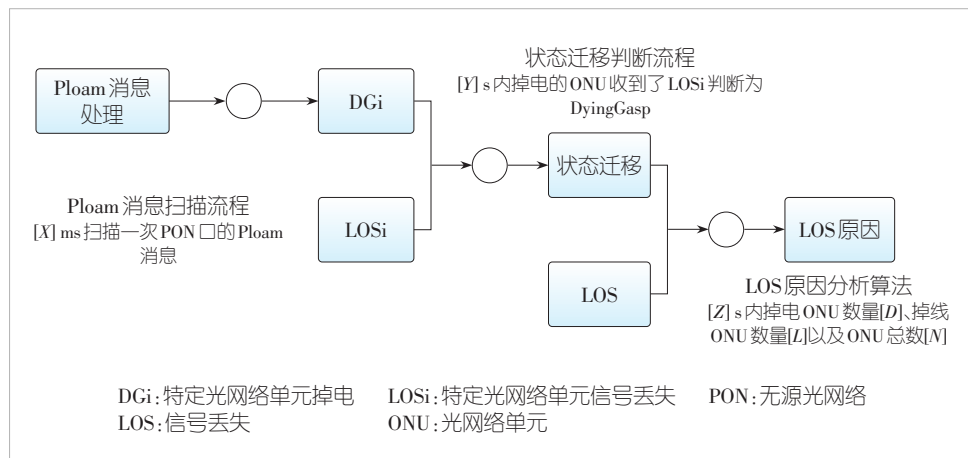


图3 PON LOS告警判定与原因分析流程

表1 LOS/LOS_i的标准定义^[7]

类型	告警产生条件	告警恢复条件
信号丢失	上行方向,OLT PON端口连续4帧未收到预期有效数据	OLT PON口至少接收到一个有效数据
ONU _i 信号丢失	PON端口连续4帧里没有检测某ONU的上行信号	OLT接收到对应ONU的一个有效光信号
ONU _i 掉电	OLT接收到ONU上报的DyingGasp消息	OLT在ONU测距阶段收到一个Ploam消息

OLT: 光线路终端 ONU: 光网络单元 ONU_i: 特定光网络单元 PON: 无源光网络

纤中断;

2) 小区掉电: PON 端口下注册多个 ONU, 所有 ONU 的电源同时关闭;

3) ONU 未上线: PON 端口下注册多个 ONU, 但是 ONU 从未上线;

4) 唯一 ONU 掉电: PON 端口下只注册一个 ONU, ONU 电源关闭;

5) 唯一 ONU 掉线: PON 端口下只注册一个 ONU, 该 ONU 的光纤中断;

6) 最后 ONU 掉电: PON 端口多个 ONU 掉线或断电 Z 秒后, 最后一个 ONU 电源关闭;

7) 最后 ONU 掉线: PON 端口多个 ONU 掉线或断电 Z 秒后, 最后一个 ONU 光纤中断。

在 7 类场景中, 仅第 1 类对应真实主干光纤中断故障, 其余 6 类均为无主干故障的干扰告警, 可完成过滤剔除, 对应去噪识别率可达 85.71%。

3.2 LOSi 去噪(防抖)

ONU 频繁上报 LOSi 告警不仅会增加后台系统处理负载, 还易引发故障根因误判, 因此需引入告警防抖去噪机制^[9]。该机制的核心逻辑为: 系统缓存预设防抖时长内的告警生成、告警恢复事件, 暂不向上层推送; 待防抖计时器超时后, 再统一上报完整的告警状态变更信息。若告警触发防抖过滤规则, 原始告警明细将无法直达上层运维平台, 为此系统增设高频告警专项通知上报逻辑, 保障运维侧能够感知终端持续闪断现象。两种告警防抖方案如图 4 所示, 其中图 4 (a) 为告警生成、告警恢复独立防抖方案, 图 4 (b) 为生成与恢复联动的综合防抖方案。两种方案的差异在于: 后者对成对出现的告警生成、恢复报文同步执行防抖校验, 逻辑约束更严密, 输出告警数量统计结果准确度更高。

合理配置防抖时间窗口与告警频次阈值, 能够高效过滤无业务影响的无效瞬时告警, 显著提升故障识别查准率。现网实测结果表明, 告警防抖机制可过滤 50%~80% 的干扰告警; 极端场景下无效告警占比可达 99.99%, 例如某台 ONU

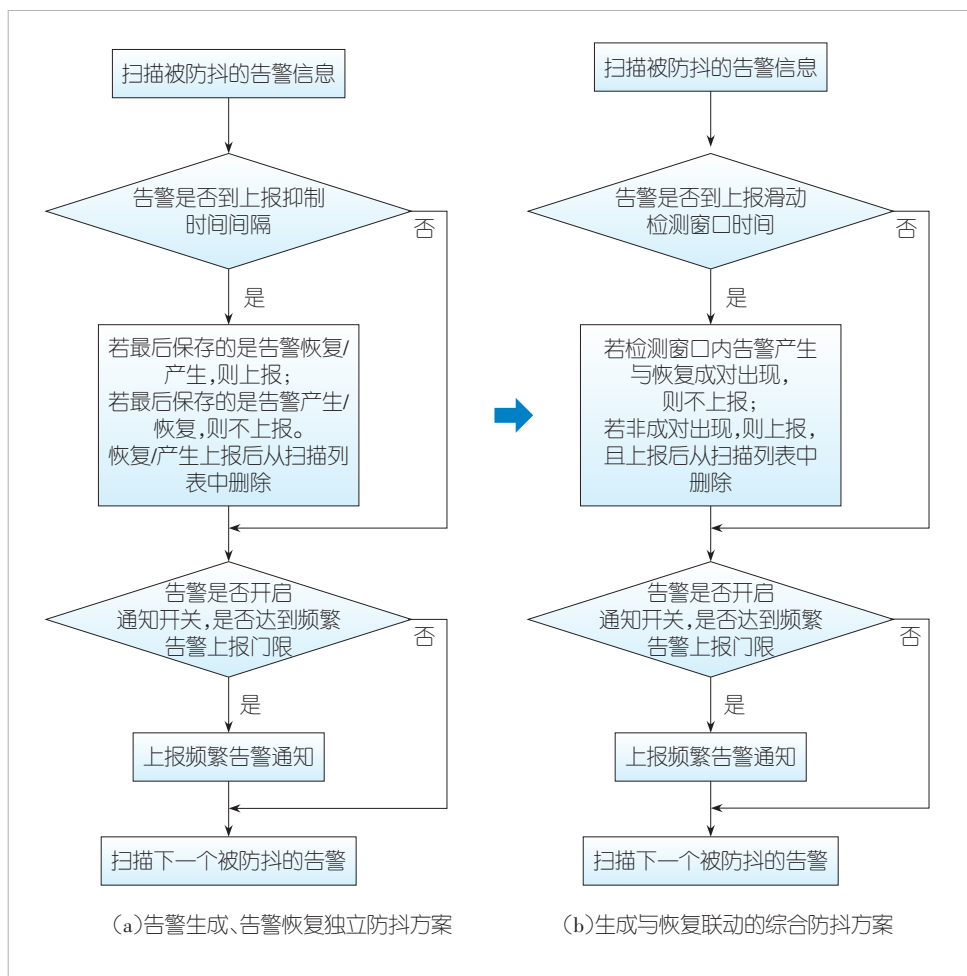


图4 两种告警防抖方案

累计产生 73 787 条 LOSi 告警, 其中 73 785 条均为终端高频闪断引发的无效瞬时告警。

4 告警聚合

完成关键告警筛选与去噪处理后, 留存告警虽可准确反映某一物理/逻辑节点在特定时刻的运行状态, 但仅依靠单条告警无法完整刻画链路、业务乃至整网的实时运行状态。因此, 对多条关键告警开展聚合与关联分析, 从多维度还原网络整体运行状态具备重要工程价值。实践表明, 可从时域、空域两大维度完成告警关联挖掘与聚合处理。

1) 时域关联聚合

以固定物理或逻辑端口为分析对象, 将时间作为分析维度, 依托滑动时间窗口(如图 2 所示)挖掘窗口内多条告警的关联特征。如图 5 所示, 针对单一端口下所有 ONU 告警开展关联性分析: 同一接口产生的多条告警在时间轴上存在区间重叠, 或告警触发顺序呈现固定先后时序。以现网故障为例, 当 ONU 频繁离线时, 经告警聚合可发现 ONU 离线告警

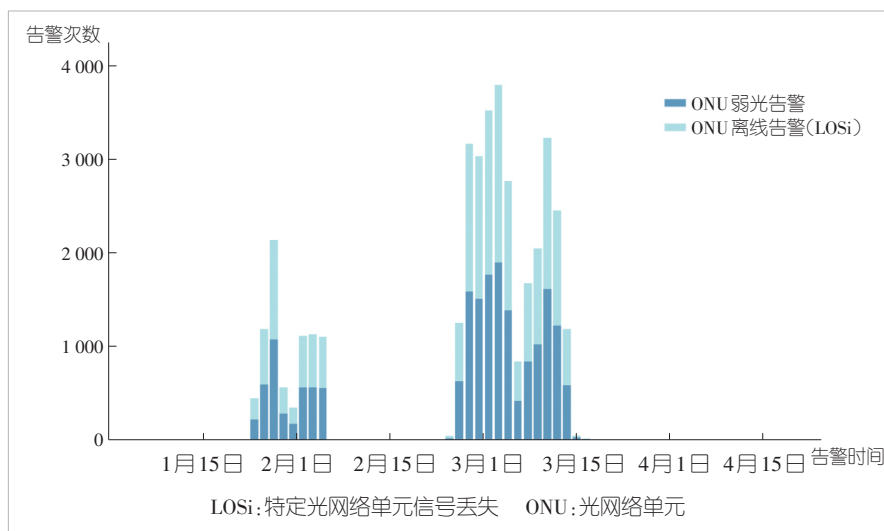


图5 告警时域关联性分析

与弱光告警具备高度时间同步性，由此可判定 ONU 离线故障由光功率过低引发。

2) 空域关联聚合

锁定固定时间区间，以物理/逻辑端口为分析维度，调整空域分析范围，挖掘存在拓扑关联的各端口告警的同步特征。例如统计同一PON端口下多台ONU同步上报LOSi离线告警的发生概率，并结合其他辅助条件，分析批量终端离线现象与特定时段的关联规律。

整套告警聚合流程分为去噪、聚合、优化3个步骤：第1步借助去噪机制过滤终端高频LOSi干扰告警；第2步统计单位时间内同一PON端口下多台终端产生的同类LOSi告警，结合预设阈值筛选并生成告警事件集合；第3步对告警集合与其他网络事件开展关联分析，推导故障集合对应的潜在根因，各环节详细流程如下：

- 去噪：统计PON端口下LOSi告警数量，设定阈值 k ，剔除任一告警数量 $\geq k$ 的ONU；

- 聚合：统计剩余LOSi告警平均值 μ ，设定系数 α ，记录任一告警数量超过 $\alpha \times \mu$ 的ONU；

- 优化：调整系数 α ，设定影响因子 β ，记录聚合ONU数量超过 $\alpha \times \mu$ 或 β 的ONU。

如图6所示，某PON口下ONU离线事件集合与未注册ONU事件存在某种关联性，在30分钟内ONU离线事件集合

（多个ONU同时离线）发生5次。以1分钟为关联分析窗口判断，离线告警事件与未注册ONU事件相关性为80%；以5分钟为关联分析域，相关性为100%。也即该网络中多ONU出现同时离线问题高概率由链路中的未注册ONU引入。

5 定位验证

依托前文关键告警提取、去噪与聚合全流程，系统能够高效识别网络异常事件并初步推导潜在故障诱因。但各类告警与真实故障根因之间不存在严格一一映射关系，PON LOS告警即为典型案例。仅依靠告警聚合分析不足以完成精准根因定位，还需引入上层多源辅助数

据开展交叉核验，例如对接第三方运维平台、设备运行日志等外部信息。本文结合PON网络组网架构设计一套分层故障研判体系，整体流程如图7所示^[10]，具体执行步骤如下：

第1步，结合PON网络拓扑结构与故障分布特征，将全网故障划分为四大类别：PON局端设备故障、ONU终端设备故障、ODN链路结构故障、ODN链路质量故障。

第2步，针对每一类故障梳理完备的潜在根因清单，并逐条配置故障判别规则完成逻辑校验；针对难以通过固定规则判定的复杂故障场景，引入人工智能学习模型实现智能识别。判别规则所需原始数据取自单位周期内PON端口与ONU终端的告警信息、性能指标统计值。原始数据先经前文去噪、聚合算法完成标准化特征提取，再输入故障判别规

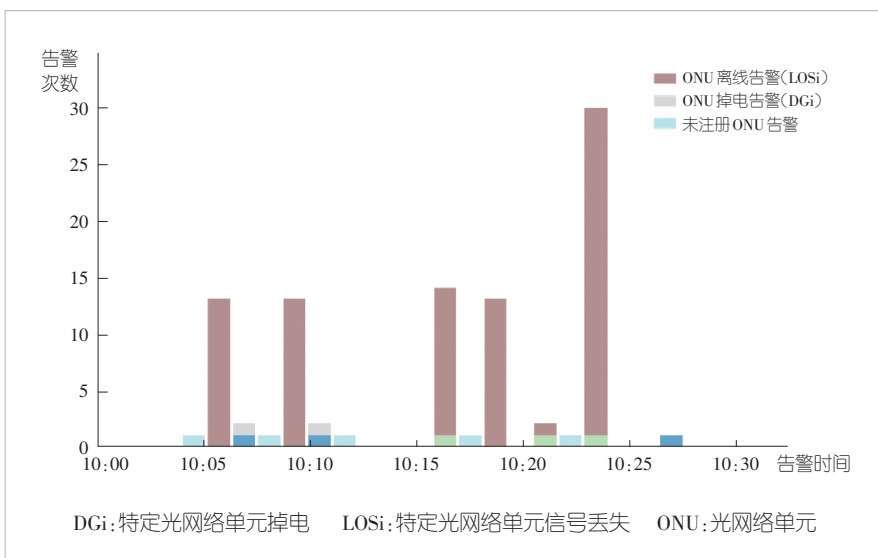


图6 告警空域关联性分析

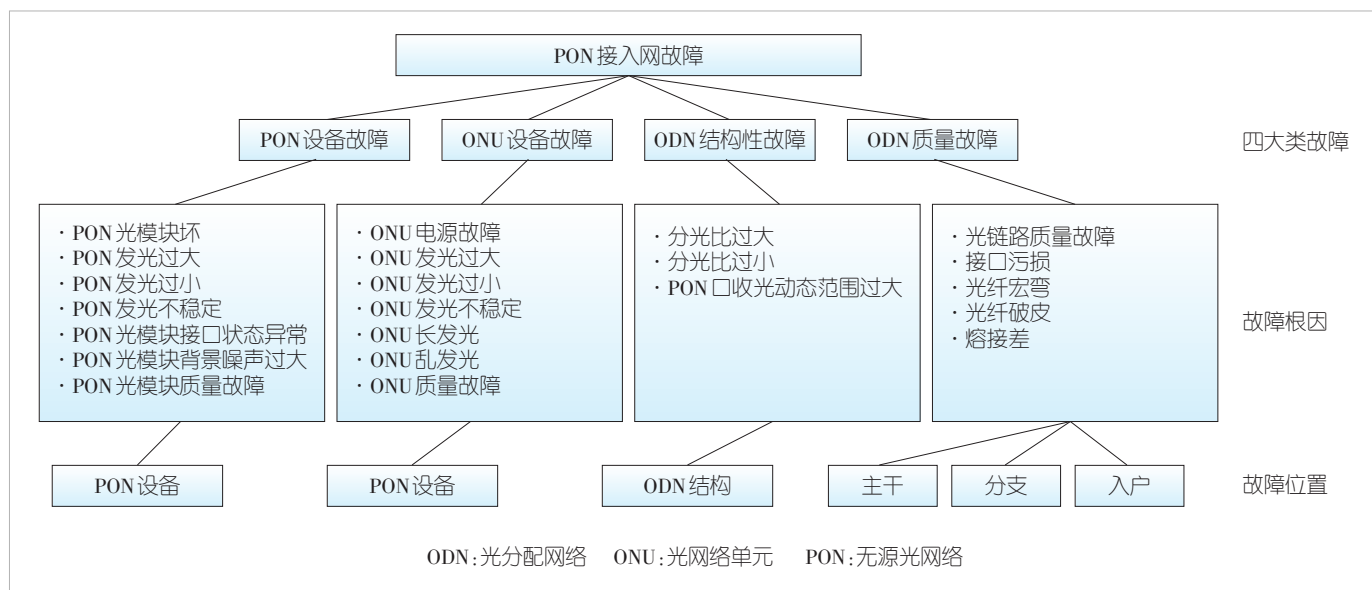


图7 PON接入网故障构成和故障位置设计

则库完成初步根因判定。

第3步，针对规则库无法明确判定状态的样本数据，采用AI故障识别模型二次研判，确认是否存在隐性故障；针对识别为ODN质量类故障的样本，模型进一步智能区分故障发生区段，判别故障位于主干光纤、分支光纤还是入户光纤。

第4步，汇总4类故障的研判结果，综合输出故障精准发生位置与最终故障根因。

6 结束语

综上所述，伴随光接入网部署规模持续扩张，网络智能运维的落地需求愈发突出。基于网元光信号告警完成去噪处理，能够有效提升原始数据洁净度，是后续故障分析高效开展的基础；对去噪后的告警数据实施关联聚合，可完成原始离散告警向结构化网络事件的转换；在此基础上依托可自定义配置的判别规则对事件开展智能分析与根因诊断，能够整体提升PON网络故障排查效率。除告警去噪环节外，文中其余数据处理流程均可与PON网元设备解耦，研究人员能够以故障识别的查全率、查准率作为量化指标，对各模块算法分别迭代优化。

参考文献

- [1] 张伟良, 王霄雨, 黄新刚. 基于动态通道绑定的更高速无源光网络[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(2): 100-106. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402014
- [2] 沈成彬. 无源光网络的运行、维护与管理[J]. 中兴通讯技术, 2014(5): 17-18
- [3] 余辰东. PON突发式长发光ONU的防护与检测[J]. 光通信研究, 2017(1): 23. DOI: 10.13756/j.gtxyj.2017.01.008

- [4] 张鹏, 阎阔. FTTx PON技术与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010
- [5] QB-B-102-202001 面向集中运维的无源光网络(PON)OMC系统功能测试规范[S]
- [6] 赵宇粟, 张鹏飞, 金耀辉. 软件定义网络中网络诊断的思考和探索[J]. 中兴通讯技术, 2015, 21(4): 41-44
- [7] YD/T 1949.2-2009 接入网技术要求. 吉比特的无源光网络(GPON). 第2部分: 物理媒质相关(PMD)层要求[S]
- [8] 余辰东, 于金辉. 一种光网络单元的注册方法、装置及光线路终端: CN107295428B [P]. 2020-07-31
- [9] 余辰东, 于金辉. 无源光网络设备告警信息处理方法及光线路终端: CN105991320B [P]. 2020-07-31
- [10] 陈爱民, 陆云, 余辰东. 一种PON系统的故障分析方法、装置及设备: CN118101416A [P]. 2024-05-28

作者简介



余辰东, 中兴通讯股份有限公司固网产品技术支持总工; 主要研究方向为PON智能运维技术、光接入网SDN与自智网络演进; 发表论文22篇, 拥有专利21项。



孙志, 中国电信集团有限公司深圳分公司客户服务调度与资源中心总经理; 主要研究方向为网络资源管理、运营支持系统、确定性网络等。