

光栅型智能 ODN 关键技术研究与应用探讨

Research and Application Discussion on Key Technologies of Fiber Bragg Grating-Based Intelligent ODN

李洪栋, 迟 鑫, 李 倩 (中国联通研究院, 北京 100048)

Li Hongdong, Chi Xin, Li Qian (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

目前,各运营商的宽带接入网已基本实现全面覆盖,后期建设重点将逐步转向网络智能化。然而,现有的智能化技术尚未完全实现 ODN 网络的数字化和智能化,仍需大量人工参与,因此各运营商基本处于试点阶段,尚未完全推广。论述了光纤光栅型智能 ODN 的工作原理和主要功能,并提出 ODN 智能化的部署建议。

关键词:

ODN; 智能 ODN; 光栅

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.06.015

文章编号: 1007-3043(2026)06-0082-05

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:

Currently, broadband access networks have been substantially established by major telecom operators, and the focus of future construction will gradually shift towards network intelligence. However, existing intelligent technologies demonstrate insufficient digitization and intelligent capabilities in ODN networks, leading to continued heavy reliance on manual interventions. Consequently, most operators remain in pilot phases and have not yet proceeded to full-scale deployment. Through a comprehensive analysis of the operational principles and functional mechanisms of fiber Bragg grating-based intelligent ODN systems, it proposes deployment suggestions for intelligent ODN.

Keywords:

ODN; Intelligent ODN; Fiber bragg grating

引用格式: 李洪栋, 迟鑫, 李倩. 光栅型智能 ODN 关键技术研究与应用探讨[J]. 邮电设计技术, 2026(6): 82-86.

0 前言

目前,传统 ODN 在运行维护、规模化建设和数智化提升等方面面临挑战,主要体现在以下几个方面:一是传统 ODN 资源管理主要依赖标签和人工记录,资源准确率低,且依赖人工巡检,故障响应不及时。二是传统运行维护方式已不适应规模化建设的发展需求。据工信部统计公报数据,截至 2024 年底,全国光纤接入 (FTTH/O) 端口达到 11.6 亿个,比 2023 年末净增 6 570 万个。传统人工管理模式难以支撑亿级端口的精准调度与维护。三是技术演进驱动传统运行维

护向数智化转型。人工智能与光纤光栅刻蚀等技术驱动网络向数智化发展,目前华为、中兴、烽火等公司在光纤光栅刻蚀方面的研究已取得较成熟的研究成果,并在部分地(市)进行了试点。四是政策与战略的顶层牵引。2023 年 2 月,中共中央、国务院印发的《数字中国建设整体布局规划》提出,要加强传统基础设施数字化、智能化改造。在此背景下,各运营商都在积极探索适合自身发展的智能化道路。本文基于目前最具代表性的光栅型智能光分配网 (ODN) 的工作原理和主要功能,提出了部署方案。

1 传统 ODN 资源管理面临的痛点

传统 ODN 在资源管理方面主要面临哑资源管理

收稿日期: 2026-05-11

不清晰,扩容投资浪费,人工巡检定障困难,效率低且成本高,弱光体验差,整改困难等问题。

a) 光纤资源和端口资源无法清查和利用:目前ODN网络资源的状态主要依靠人工手段进行梳理,对实占、虚占、空闲、损坏的光纤和端口无法及时更新,造成大量的光纤和端口资源无法清查和有效利用。人工进行资源核查成本高。

b) 无源链路监测与排障运维难:接入网维护力量不足,尤其在抢修过程中,修复一根光纤/端口所需的时间超过直接更换一根光纤/端口,导致故障光纤和端口越积越多。

c) 人工巡检定障困难:市政施工、自然灾害、动物活动等导致光缆损坏时,故障定界定位难,人工巡检定障难。

d) 弱光定位难:光路劣化隐患难识别,弱光排障误判率高,无法预知潜在的质差光纤和端口,只能事后补救。

2 ODN的智能化发展趋势

传统ODN网络建设模式已固化多年,面临诸多问题 and 挑战,难以适应网络全覆盖和高质量发展的新要求。各运营商也在积极探索通过接触式标签(eID)、非接触式射频识别(RFID)、光时域反射仪(OTDR)等技术对ODN资源进行管理,但将无源ODN网络进行有源化改造会增加供电与维护成本,也违背了无源网络设计的初衷。现有eID、RFID等技术,由于需要人工采集数据或电源,已不适宜ODN的数智化发展^[1]。

未来智能化的ODN应通过引入传感技术、AI分析和数字孪生等手段,对传统无源ODN进行“可识别ID”改造,从而实现无源网络拓扑动态可视可管、端口资源精准管理、弱光预判及实时故障诊断和定位等^[2]。

3 光栅型智能ODN

3.1 光栅型智能ODN网络结构

光纤光栅FBG(Fiber Bragg Grating)型智能ODN可满足未来智能ODN的发展需求^[3]。如图1所示,光栅型智能ODN由局端设备、光栅型光分路器、监控中心、光纤光缆及其配套设备组成^[4-5]。局端设备包括具有探测和智能分析功能的光接入板卡(Optical Access Interface, OAI)、合波器WDM和光开关(Optical Switch, OSW),配套设备包括光纤配线架(ODF)、光缆交接箱、光缆分纤箱、光纤插座等^[6]。

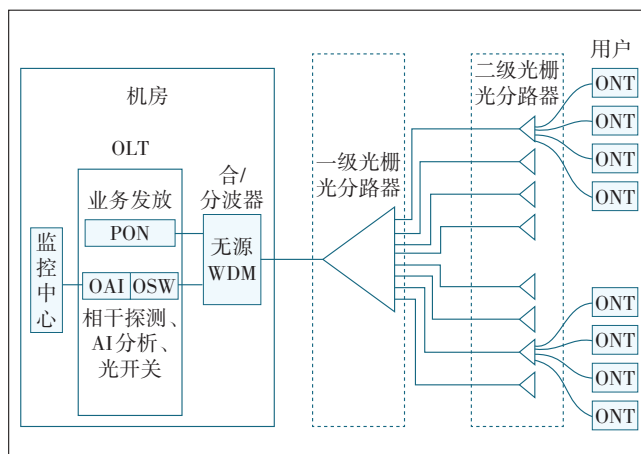


图1 光栅型智能ODN网络结构

与传统ODN相比,光栅型智能ODN的主要变化在局端、光分路器、监控中心3个部分。

a) 在局端,光栅型智能ODN需要在OLT机框内增加智能分析板卡OAI,基于神经网络AI算法,可精准识别链路节点、端口状态信息,构建点到多点的光路拓扑,实现亚米级测量精度和光信号特征精准识别。通过无源合/分波器WDM将业务光和探测光进行合波,合/分波后再发送到每个端口和用户。通过光开关OSW对每个端口进行定时扫描,将每个端口的信息及时反馈到OAI进行分析。在局端安装智能分析板卡OAI的同时,还需安装无源合/分波器WDM,用于业务光和探测光的合分波。对于现有ODN网络,在安装WDM后,需对业务光纤进行割接^[7]。

b) 在ODN处,需要将传统光分路器替换为光栅型光分路器^[8]。

c) 在监控中心,需部署云端数智化ODN分析管理系统,实现网络拓扑可视、弱光故障可见等功能^[9]。

3.2 光栅型智能ODN的关键技术

3.2.1 光纤光栅FBG技术

FBG是一种通过在光纤纤芯中形成周期性折射率调制结构的光学器件,属于无源滤波器件。其核心原理是通过外界作用(如紫外光曝光)改变光纤材料的折射率分布,形成轴向周期性的折射率变化,从而实现对特定波长光的反射或透射。光纤光栅具有体积小、兼容性强(可直接熔接于光纤系统)、抗电磁干扰等特点,广泛应用于光纤通信、光纤传感、光纤激光器等领域。

a) 布拉格反射原理:光纤光栅的工作原理基于布拉格条件(Bragg Condition)。当入射光的波长与光栅

的周期及光纤有效折射率满足布拉格条件时,形成窄带滤波器或反射器,光波会发生相长干涉并反射,其余波长则透射。其传感基础是当外界环境(如温度、应变)变化时,光栅周期或折射率随之改变,导致布拉格波长漂移,通过检测波长变化即可反推物理量的变化。布拉格反射原理如图2所示。

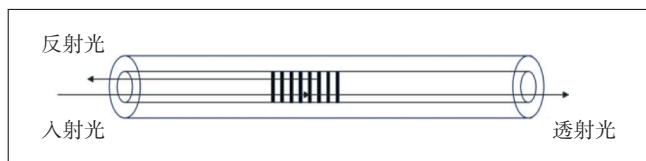


图2 布拉格反射原理

b) 光纤光栅制作方法:光纤光栅的制作依赖于光纤材料的光敏性,通过紫外光(通常为248 nm或193 nm)照射纤芯,在纤芯内形成空间折射率周期性分布的光栅,其实质是在纤芯内形成一个窄带滤波器或反射镜,从而产生折射率变化效应。光纤光栅刻蚀方法如图3所示。

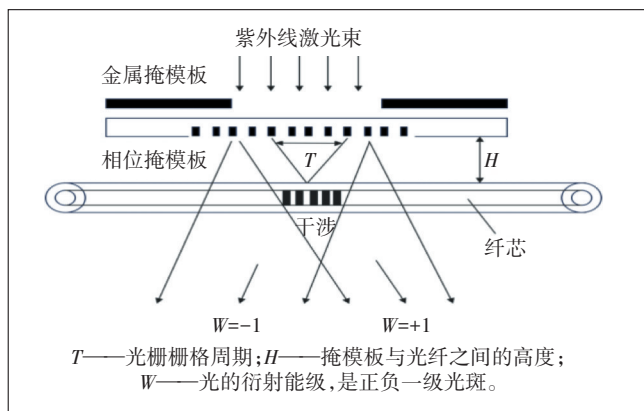


图3 光纤光栅刻蚀方法(相位掩模板法)

3.2.2 光栅型光分路器

光栅型光分路器是光栅型智能ODN的关键光器件。它是通过精密制造+光学技术,在光分路器处构建光可探测ID(即光刻蚀),通过不同中心波长、不同带宽、不同反射率让不同光纤端口具有唯一的特征。光纤光栅刻蚀分为以下3种方式。

- 在光分路器芯片上刻蚀。
- 在光分路器尾纤上刻蚀。
- 在端口处刻蚀(即在端口处增加光栅组件)。

光纤光栅刻蚀方式如图4所示。

在实际工程中,无论采用哪种光纤光栅刻蚀方式,涉及现有网络改造时,均需将传统光分路器替换

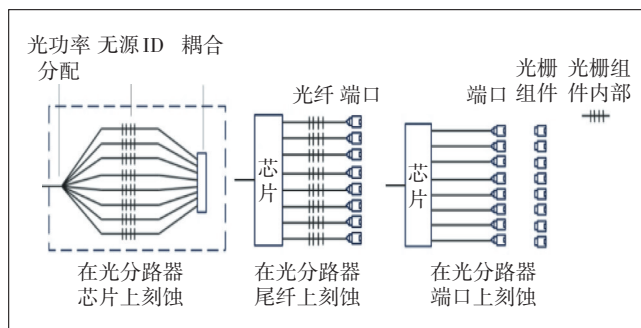


图4 光纤光栅刻蚀方式

为光栅型光分路器。综合考虑制造工艺难度、建设安装难度、运维难度和投资成本,推荐采用光分路器尾纤刻蚀方式。3种光纤光栅刻蚀方式比较如表1所示。

3.2.3 可调谐光源

测试光与业务光不同,它是由OAI发出的专门用于测试的多个不同波长的光脉冲信号,波长可调谐。波长数量根据每个PON口下所带的光分路器端口数量确定,OAI可为光分路器的每个端口配置一个不同的波长,最多可配置64个(目前现网应用的光分路器最大分光比为1:64或2:64)。不同PON口下的光分路器端口波长可以相同。当不同光分路器的端口波长相同时,云端管理系统通过PON口和光分路器端口进行区分。为避免与现有PON网络使用的波长冲突,测试波长范围界定在1522~1562 nm,波长间隔为75 GHz(0.6 nm)。因此,光栅型智能ODN支持在同一ODN网络中,使用不同的PON网络。

目前采用Class C+模块时,光功率预算衰减为32 dB,最小平均发射光功率规范值为5.5 dBm^[10-11]。综合考虑WDM的插入损耗(1 dB/个)、增加的光组件插入损耗(0.3 dB/端口)、原有网络损耗、反射信号清晰识别等因素,OAI测试光源的发光功率一般不低于5 dBm,动态范围不小于40 dB(1550 nm波长),事件盲区一般在0.6 m以内,衰减盲区一般在3.5 m以内。

3.3 工作原理

光信号的传输与分配:光信号向下传输(OLT传输数据至ONT)时,OAI内部有可调光源,以轮流方式逐个发出多个不同测试波长的光,波长数量根据光分路器端口数量自动配置,OAI为每个光分路器端口配置一个不同的波长。测试光经过合/分波器与业务光一起发送至光分路器。光分路器再将下行光信号(业务光+测试光)分为多束,分配到不同的支路中。光信号向上传输(ONT传输数据至OLT)时,光分路器将ONT

表1 3种光纤光栅刻蚀方式比较

光纤光栅刻蚀方式		制造工艺	建设安装难度	运维难度	成本
在光分路器芯片上刻蚀		刻蚀工艺难度大	新建场景直接安装即可, 安装难度同现有光分路器; 改造场景需在拆除原有光分路器后再安装	同现有光分路器	由于芯片厂家较少, 因此成本高
在光分路器尾纤上刻蚀		刻蚀工艺难度小	新建场景直接安装即可, 安装难度同现有光分路器; 改造场景需在拆除原有光分路器后再安装	同现有光分路器	由于光纤厂家多, 因此成本低, 后期成本压降空间大
在端口处刻蚀(刻蚀工艺与尾纤刻蚀相同, 但刻蚀后还需要组装成光栅组件, 因此工艺复杂。该方式分为一体式和后装配式2种)	一体式	光栅刻蚀在连接器插头内部的光纤处, 主要用于新建场景 ^[10]	新建场景直接安装即可, 安装难度同现有光分路器; 改造场景需在拆除原有光分路器后再安装	同现有光分路器	成本低于后装配式, 属于光纤刻蚀, 后期成本压降空间大
	后装配式	把刻蚀后的光纤组装成光栅组件, 类似适配器, 主要用于改造场景	在光分路器端口处安插即可, 安装容易	由于网络上新增了光组件, 因此网络结构变得复杂, 故障点增加, 给管理、维护增加了难度, 增加了采购设备种类	成本高于一体式, 属于光纤刻蚀, 后期成本压降空间大

发送的上行业务光信号和经远端FBG反射后的测试光信号传输至合/分波器, 由其分离出测试光并传输至OAI, 在OAI中进行相干接收得到相位信息, 并进行网络状态分析。

光路标识: 每个光分路器的支路上均有光栅, 这些光栅对不同波长的测试光进行反射或透射。由于不同支路的光栅反射或透射的测试光的波长不同, 因此可实现对光分路器不同支路的状态标识, 使不同光纤端口具有唯一的特征标识。

光信号的反射与透射: 当光信号通过光分路器时, 光栅会对不同测试波长的光信号进行反射或透射, 使得反射的光信号携带独特的ID信息; 这些ID信息传输至OAI后, OAI能够自动接收并识别。

光路状态识别: OAI接收到反射回来的光信号后, 从中提取出ID信息, 并结合操作维护中心(OMC)的告警、性能等网络信息, 通过AI分析技术实现对光路状态的识别和网络拓扑的呈现。

4 光栅型智能ODN部署建议

4.1 部署原则

光栅型智能ODN的部署需综合考虑网络现状、资源管理、技术兼容性及长期运维需求, 通过光纤光栅技术强化设备管理, 借助AI与数字孪生实现网络自治, 利用算力与光技术协同优化资源效率, 最终实现“用户—端口—光纤—光缆—交接设备端口—PON口”的数据链闭环管理, 并逐步向绿色低碳与全域覆盖演进。部署时应遵循以下原则。

a) 初期投入与长期收益相结合, 保障ODN网络的无源特性, 不引入有源设备。由于部署光栅型智能ODN时需在监控中心部署云端分析系统, 在局端增加

OAI、WDM、OSW等设备, 并在ODN上将传统光分路器更换为光栅型光分路器, 初期部署成本较高, 因此部署时要综合考虑建设投资和运维费用, 以降低总成本为原则进行部署。

从目前试点情况来看, 一块OAI板卡可支持16路OSW, 一个OSW可支持64个PON口, 合/分波器有64个端口, 即一块OAI板卡最大可支持1 024个PON口。光栅型光分路器按新建考虑, 总体分光比按1:64, 即每个PON口可接入64个光分路器端口, 含云端分析系统、局端设备和光栅型光分路器的全部投资大约为12万元, 折合到每个光分路器端口投资增加1.83元/端口。现有宽带接入网ODN建设投资折合单端口造价为240元/端口, 其中光分路器投资占比为3%(光分路器集采价格约为3元/端口, 施工费约为4.2元/端口)。采用光栅型光分路器后, 光分路器单端口投资占比提升为3.7%。以2024年为例, 三大运营商净增宽带接入端口6 570万个, 全部按新建考虑, 共增加投资约1.2亿元, 对网络投资压力影响不大, 另外, 采用光栅型光分路器也会降低运维成本。从技术演进方向来看, eID、RFID等技术由于需要人工采集大量数据或进行有源化改造, 已不适宜无源网络的智能化发展, 光栅型智能ODN将成为未来ODN演进的方向。

b) 试点先行与规模化推广。通过试点验证技术成熟度, 逐步扩大部署范围, 降低风险, 结合各自的50G PON部署策略进行推广应用。

c) 为充分利用OAI端口, 可借助OAI支持多个机房拉远共享的特点, 将OAI集中部署, OSW和WDM拉远至其他OLT局点, 并根据PON口数量测算部署规模。

d) 分场景进行建设, 分阶段进行改造。新建工程

全部采用光栅型智能ODN,现网可结合光纤光缆、光分路器、光缆交接箱等设备的在网年限和使用寿命及故障割接等,分阶段逐步推进改造。

e) 推动行业标准的制订,实现光栅型智能ODN各厂家设备的兼容。

目前,光纤光栅型智能ODN尚存在以下问题,在部署时应综合考虑。

a) 在现有网络上部署时,需将现有光分路器更换为光栅型光分路器(或光栅型适配器),涉及断业务割接,且改造量大,实施难度大。

b) 各厂家采用的光栅技术不同,不同厂家的光栅型光分路器与局端设备互不兼容。

c) 光栅型智能ODN在只改造光分路器的情况下测试准确率较高,可达到90%以上。如果在ODF、光缆交接箱、分纤箱等处的端口上全部增加光栅,需要的波长太多,技术实现难度较大,测试准确率会大幅降低,且投资较大。

4.2 部署方案

在部署光栅型智能ODN时,应按PON口规模计算局端设备安装容量。为提升资源利用率,在安装光栅型智能ODN的局端设备时,首选在综合业务接入点中的OLT机框内安装,建议依次选择核心机房、汇聚机房、接入机房中的OLT设备。对于下沉到小区和行政村的OLT局点,采取拉远方式进行连接。

在考虑智能ODN光纤链路全程衰减时,需将合/分波器、光栅组件的插入损耗计算在内,一般合/分波器的插入损耗为1 dB/个,光栅组件的插入损耗为0.3 dB/个。

光栅型智能ODN局端设备部署方案如图5所示。

5 结束语

综上所述,光栅型智能ODN能够提升PON端口带宽利用率,提升ODN故障诊断及修复能力,缩短平均障碍历时并可预判故障,及时、精准、动态地更新端口/线路资源数据,改善ONT弱光率,提升用户体验和客户上网满意度,实现线路质量可视可管。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 接入网运维智能化技术要求 总体: YD/T 4847-2024[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2024.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能光分配网络 管理终端技术要求: YD/T 3115-2016[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.

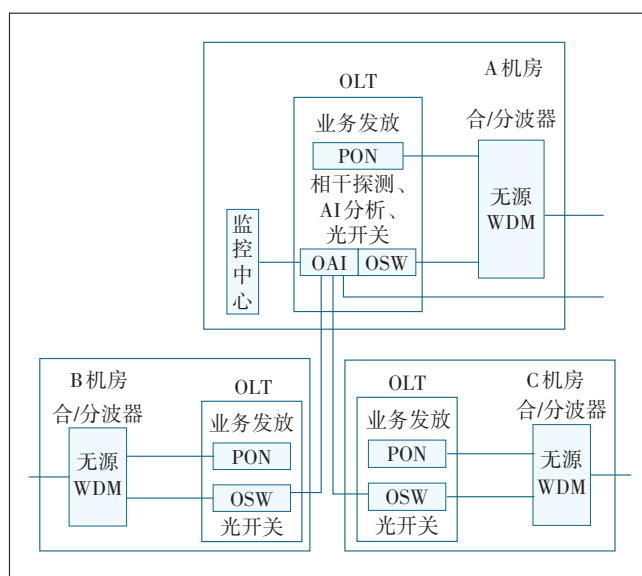


图5 光栅型智能ODN部署方案

- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 通信用基于波长检测的光纤布拉格光栅: YD/T 3128-2016[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能光分配网络 光配线设施 第1部分: 智能光配线架: YD/T 2795.1-2015[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能光分配网络 光配线设施 第3部分: 智能光缆分纤箱: YD/T 2795.3-2015[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能光分配网络 光配线设施 第2部分: 智能光缆交接箱: YD/T 2795.2-2016[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 平面光波导集成光路器件 第2部分: 基于阵列波导光栅(AWG)技术的密集波分复用(DWDM)滤波器: YD/T 2000.2-2018[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. 平面光波导集成光路器件 第1部分: 基于平面光波导(PLC)的光功率分路器: YD/T 2000.1-2014[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 平面光波导集成光路器件 第3部分: 非均匀分路器: YD/T 2000.3-2024[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2024.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能光分配网络 光纤活动连接器: YD/T 3250-2017[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [11] 工业和信息化部. xPON光收发合一模块技术条件 第8部分: 用于GPON和XG-PON共存的光线路终端(OLT)的光收发合一模块: YD/T 1688.8-2018[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.

作者简介:

李洪栋,毕业于长春邮电学院,高级工程师,长期从事接入网专业规划设计工作;迟鑫,毕业于澳大利亚阿德莱德大学,工程师,长期从事接入网专业规划设计工作;李倩,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,长期从事接入网专业规划设计工作。