



专题：细颗粒光传送网

## 面向新型电力系统的fgOTN关键技术与应用研究

汤瑞<sup>1</sup>, 广泽晶<sup>2</sup>, 唐佳<sup>2</sup>, 郭小溪<sup>2</sup>, 赵俊峰<sup>1</sup>

(1. 中国信息通信研究院技术与标准研究所, 北京 100191;

2. 国网信息通信有限公司, 北京 100761)

**摘要:** 新型电力系统面向未来算力接入、算力互联等场景的新业务发展需求, 对电力通信网络的承载能力、接入灵活性、多业务适应性等提出诸多挑战。针对现网大量存在的1 Gbit/s以下客户信号承载效率较低等问题, 分析了提供小颗粒业务承载的细颗粒光传送网 (fine grain optical transport network, fgOTN) 技术体系, 并结合实验数据, 验证fgOTN的技术优势和可行性。结果表明, fgOTN相较于当前虚容器 (virtual container, VC) /分组传输 (packet transmission, PKT) /光通道数据单元 (optical channel data unit, ODU) 多平面光网络终端 (optical transport network, OTN) 承载技术在多个方面具有明显优势, fgOTN在新型电力系统中的应用部署及架构演进将是未来的研究重点。

**关键词:** 算力网络; fgOTN; OTN; 新型电力系统

**中图分类号:** TN915

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2025019

## Research on key technologies and applications of fgOTN for the new electric power system

TANG Rui<sup>1</sup>, GUANG Zejing<sup>2</sup>, TANG Jia<sup>2</sup>, GUO Xiaoxi<sup>2</sup>, ZHAO Junfeng<sup>1</sup>

1. Technology and Standards Research Institute of China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), Beijing 100191, China;

2. State Grid Information & Telecommunication Co., Ltd., Beijing 100761, China

**Abstract:** The development of the new electric power system for the future computing power access and computing power interconnection, many challenges are posed in the carrying capacity, access flexibility and multi-service adaptability of the power communication network. In view of the problems of low carrier efficiency for customer signals below 1 Gbit/s in existing optical transport network (OTN) networks, the fine grain optical transport network (fgOTN) technical system that provides fine grain service bearers had been analyzed, and the technical advantages and feasibility of fgOTN based on key technical solutions and experimental data had also been validated. The results show that fgOTN has obvious advantages in many aspects compared with the current virtual container (VC)/packet

收稿日期: 2024-11-20; 修回日期: 2024-12-30

通信作者: 汤瑞, tangrui@caict.ac.cn

基金项目: 国家电网科技项目 (No.52993923000N)

**Foundation Item:** State Grid Corporation of China Science and Technology Project (No.52993923000N)

transmission (PKT)/ optical channel data unit (ODU) multi-plane OTN. How to deploy fgOTN in the existing network and network evolution will be the focus of future research.

**Key words:** computing power network, fgOTN, OTN, new electric power system

## 0 引言

在新型电力系统建设背景下，“西电东送”特高压工程持续推进，电网东西向数据及计算需求将大幅增长<sup>[1]</sup>。当前，电力通信网已形成行业内规模较大的通信专网，以同步数字体系（synchronous digital hierarchy, SDH）和多业务传送平台（multi-service transport platform, MSTP）为代表的光通信网络承载着电力生产控制和信息管理类的多种业务。随着电网多级数据中心的建设，电力业务上云等新应用场景也驱动着传输带宽从 Mbit/s 级别到 Gbit/s 级别演进，光传送网（optical transport network, OTN）节点从骨干网逐渐下沉到接入网边缘，为 OTN 在电力控制类业务专线和电力监测视频承载带来新的机遇<sup>[2-3]</sup>。

对电力专网来说，目前的网络承载了大量 2 Mbit/s 等时隙化业务与以太网（Ethernet, ETH）业务，同时也有集控站终端远传、综合数据网、调度数据网等高带宽接入业务，生产控制区与信息控制区之间要求物理隔离。OTN 如何提高 1 Gbit/s 以下业务的承载效率（从 2 Mbit/s 到 1 Gbit/s），以及网络如何平滑扩展和演进，是传输网目前面临的主要挑战，也是过去两年国际电信联盟电信标准化部门（International Telecommunications Union for Telecommunications Standardization Sector, ITU-T）和中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）研究的重点<sup>[4]</sup>。本文全面分析了面向新型电力系统算力网络的细颗粒光传送网（fine grain optical transport network, fgOTN）关键技术及其标准进展，并结合实验数据，探讨了电力 fgOTN 技术的未来发展。

## 1 fgOTN 关键技术

### 1.1 fgOTN 概述

fgOTN 是现有 OTN 对小粒度业务支持的扩展，定义了面向业务的灵活细粒度光数据单元（fine grain flexible optical data unit, fgODUflex）容器，并提供了完整的层网络功能，具体包括业务适配功能、开销管理监控功能、交叉调度功能、复用功能、无损调整功能、保护功能等。fgOTN 的协议栈如图 1 所示。

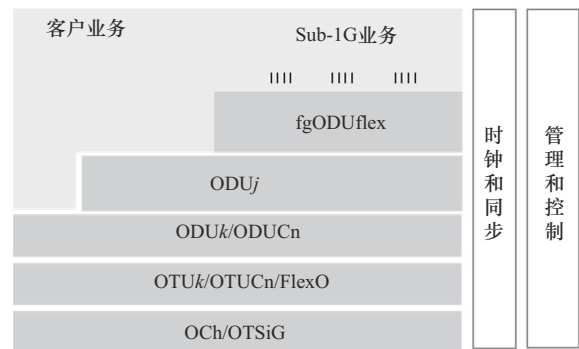


图1 fgOTN 协议栈

注：Och（optical channel）为光通道，OTSiG（optical tributary signal group）为光支路信号组，OTUk（optical transport unit-k）为光传送单元k，OTUCn（optical transport unit-Cn）为光传送单元Cn，FlexO（flexible optical transport network information structure）为灵活光传送网信息结构，ODUk（optical data unit-k）为光通道数据单元-k，ODUCn（optical data unit-Cn）为光数据单元Cn，ODUj（optical data unit-j）为光通道数据单元j。

fgODUflex 容器能够提供 10 ~ 10 240 Mbit/s 级别业务承载能力，承载业务种类包括电路业务和分组业务。典型业务速率有 2 Mbit/s、10 Mbit/s、50 Mbit/s、100 Mbit/s、155 Mbit/s、622 Mbit/s 和 1 000 Mbit/s 等。fgODUflex 信息包含关系如图 2 所示。客户业务首先映射到灵活细粒度光净荷单元（fine grain flexible optical payload unit, fgOPUflex）净荷区，映射开销添加到 fgOPUflex 开销



区，生成 fgODUflex 通道连接监控信息并插入 fgODUflex 通道监控 (path monitoring, PM) 开销，生成的 fgODUflex 串联连接监控信息插入 fgODUflex 串联连接监视 (tandem connection monitoring, TCM) 开销，其中 fgODUflex 最多支持两级 TCM，最终映射到服务层光净荷单元 (optical payload unit, OPU) 的 1 个或多个细粒度时隙 (fine grain time-slot, fgTS) 中。

### 1.2 fgOTN 帧结构、帧速率与帧周期

fgOTN 继承了现有光数据单元  $k$  (optical data unit- $k$ , ODU $k$ ) 4 行×3 824 字节列帧结构，基础速率为 10.4 Mbit/s。为继承 OTN 定帧机制，fgODUflex 在第 1 905~1 920 列插入新的 fgODUflex 开销，第 1~14 列开销区域重新定义，第 15 列和第 16 列仍保持为映射开销区，第 17~1 094 列和第 1 921~3 824 列为净荷区。fgOTN 帧结构设计如图 3 所示，其中 FAS0-FAS7 为帧定位信号。

fgOTN 通用开销大部分继承了 ODU $k$  开销，包括 PM、TCM1/TCM2、路径踪迹标识 (trail trace identifier, TTI) 等，其中为支持恒定比特速率 (constant bit rate, CBR)，新定义了相位偏移累积 (difference accumulation, DA) 开销，用于承载中间节点引入的相位差信息。映射开销与 ODU $k$  类似，包括用于 CBR 业务的映射调整开销、分组业务映射定帧开销、净荷类型 (payload type, PT) 等。

fgOTN 承载客户业务净荷的速率范围为  $p$  个 10.322 097 Mbit/s ( $p=1\sim119$ )， $p$  值可以理解为一个完整传送周期中 ODU $k$  净荷以 10.4 Mbit/s 基准速率可以划分的时隙数量。如 OPU0 可划分为 119 个 10.4 Mbit/s 时隙，OPU1 可划分为  $2\times 119$  个 10.4 Mbit/s 时隙，OPU2 可划分为  $8\times 119$  个 10.4 Mbit/s 时隙，OPUflex ( $n$ ) 可划分为  $n\times 119$  个 10.4 Mbit/s 时隙。对 OPU0 来讲，其承载客户业

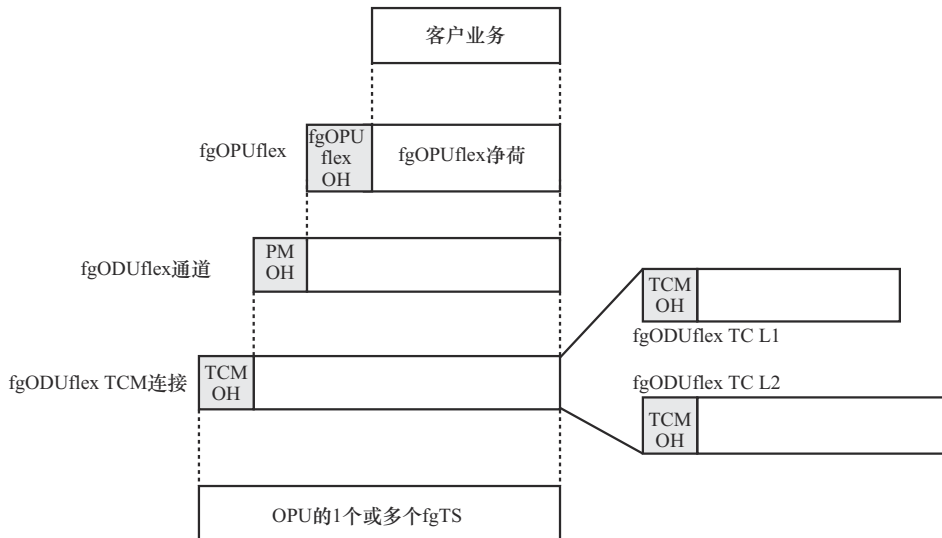


图2 fgODUflex 信息包含关系

	1~4	5	6	7~14	15	16	17~1 904	1 905~1 908	1 909~1 918	1 919	1 920	1 921~3 824	
1	FAS0	预留	预留	开销	映射开销	净荷 4× (118×16 byte)	映射开销	FAS1	开销	映射开销	帧净荷 4× (119×16 byte)		
2	FAS2	开销						PT/CSF				映射开销	FAS3
3	FAS4												FAS5
4	FAS6												FAS7

图3 fgOTN 帧结构设计

表 1 fgODUflex 帧速率和帧周期

fgODUflex 类型	fgODUflex 标称 比特速率/(kbit·s <sup>-1</sup> )	fgOPUflex 净荷标称 比特速率/(kbit·s <sup>-1</sup> )	帧周期/ms	比特速率 容限/10 <sup>-6</sup>
fgODUflex ( <i>p</i> ) ( <i>p</i> =1~119)	$(p/119.525) \times 1\,244\,160$ <i>p</i> =1, 即 10.4 Mbit/s 速率	$(p/119.525) \times (237/239) \times 1\,244\,160$	11.756/ <i>p</i>	±20

务净荷的速率范围即 10.3 Mbit/s (对应 *p*=1) ~ 1 230 Mbit/s (对应 *p*=119)。fgODUflex 帧速率和帧周期见表 1。

### 1.3 fgOTN 映射与复用

fgOTN 的业务映射、复用映射、CBR 时钟机制在继承 ODU<sub>k</sub> 技术体系的基础上也进行了创新<sup>[5]</sup>。在业务映射方面, 分组业务采用空闲映射规程 (idle mapping procedure, IMP) 映射, 以太网业务数据流采用 64B/66B 编码和循环冗余校验 (cyclic redundancy check, CRC), 保持了编码的低时延和低处理复杂度, 通过使用 64B/66B 控制码块承载 CRC 校验信息, 加速了码流错误检验, 减少缓存。CBR 业务统一映射方案, 采用通用映射规程 (generic mapping procedure, GMP) 映射。

此外, fgOTN 也支持虚容器 (virtual container, VC) 承载, 源端从同步传送模块 -*N* (synchronous transport mode-*N*, STM-*N*, *N*=1, 4, 16, 64) 接口中解出管理单元 (administrative unit, AU) /支路单元 (tributary unit, TU) 映射到 fgODU 净荷区; 宿端先从 AU/TU 解出 VC-*n*, 再生成 AU/TU 到 STM-*N*。特别地, 对于 E1 业务承载, 当 1 路或多路 E1 信号通过 STM-*N* 客户接口承载连接到 fgOTN 时, E1 通过封装为 VC-12/

TU-12 进行传送, 1 路或多路 TU-12 从 STM-*N* 接口中解出, 并通过 GMP 映射到 fgOPUflex 中。当 1 路或多路 E1 信号通过 E1 接口直接连接到 fgOTN 时, E1 将异步映射到 VC-12, 之后 VC-12 同步映射到 TU-12, 再通过 GMP 同步映射到 fgOPUflex。

在复用方面, 简化了 fgODUflex 到服务层 OPU 异步映射, 对于不同业务速率 fgOTN 采用 16 byte 固定映射粒度, 实现低时延、低缓存资源、低映射开销。在服务层, OPU 服务层划分固定的细粒度支路时隙, 如每个 OPU0 划分为 119 个 10.4 Mbit/s 支路时隙, 实现了类 SDH 的硬隔离机制。fgOTN 业务映射复用示意图如图 4 所示。

在时钟方面, fgOTN 采用了时钟相位差累积机制, 在承载 CBR 业务时, 无须全网时钟同步, fgODUflex 通过在开销中记录相邻节点之间积累的相位误差, 避免了 fgODUflex 信号时钟在中间交换节点的低通滤波处理, 节约芯片资源, 降低了设备实现复杂度。

### 1.4 保护倒换

fgOTN 保护主要应用场景为线性子网连接保护 (subnetwork connection protection, SNCP), fgOTN 保护倒换架构如图 5 所示。除了单向 1+1

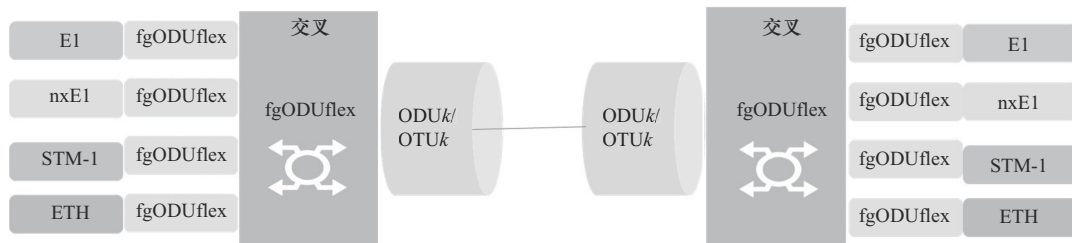


图 4 fgOTN 业务映射复用示意图

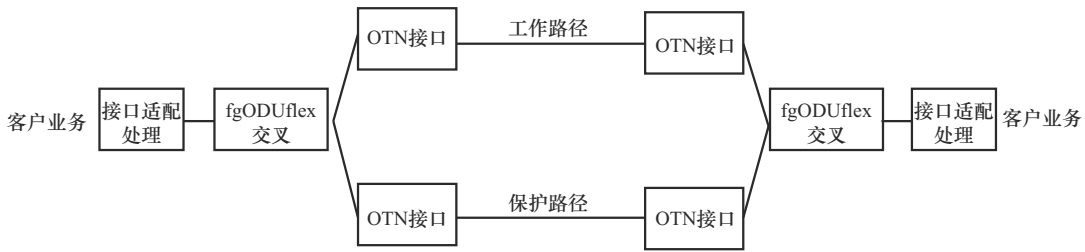


图5 fgOTN保护倒换架构

保护倒换，其他的保护类型都需要在保护组内各节点进行保护倒换协议的交互。信令通道使用fgOTN开销中的自动保护倒换（automatic protection switching, APS）字段来实现<sup>[6-7]</sup>。

由于fgOTN的帧周期达到了数毫秒级别，如 $p=1$ 时，10 Mbit/s时隙的帧周期约为11.7 ms，双端保护实现50 ms内切换难度较高，需要有针对性的优化设计。因此，国内在讨论行业标准规范时，不考虑拖延时间的情况下，目前对50 Mbit/s及以上业务的1+1保护类型，要求保护倒换引起的业务受损时间小于50 ms，10~50 Mbit/s级别业务待研究<sup>[10]</sup>。

### 1.5 无损带宽调整

针对现有OTN无损带宽调整方案存在的协议复杂、调整时间长等问题<sup>[8-9]</sup>，fgOTN开发了简化的无损带宽调整机制。简化的无损带宽调整机制支持无统一网管的应用场景，源节点发起，调整过程可不需要网管参与，调整完成后源节点向网管反馈调整结果，同时也具备端到端确认机制，保障了调制的可靠性<sup>[10]</sup>。

在协议方面，简化了链路连接调整握手协议，从源到宿端到端握手确定时隙。通过带宽调整（bandwidth resize, BWR）开销实现一步速率调整，即fgODUflex速率与服务层的时隙同时调整，并且速率调整位置更加灵活，fgOTN带宽无损调整的流程如图6所示。开销方面也进行了优化，10比特复用结构指示（multiplex structure identifier, MSI）除用于放置支路端口号（tributary port identifier, TPID），指示当前fgTS承载fgODUflex信号对应的端口外，也用于无损带宽调整中的TPID开销。

## 2 fgOTN标准化进展

从2015年开始，国内单位即开始在ITU-T SG15 Q11 课题组提交OTN支持小于1 Gbit/s速率专线应用需求。经过多轮推动，2018年立项了G.Sup.sub1G研究项目，并在2020年1月正式立项了G.osu项目<sup>[11]</sup>。标准项目经过多次讨论，2023年4月ITU-T决定将该项目更名为G.fgotn<sup>[12]</sup>，在

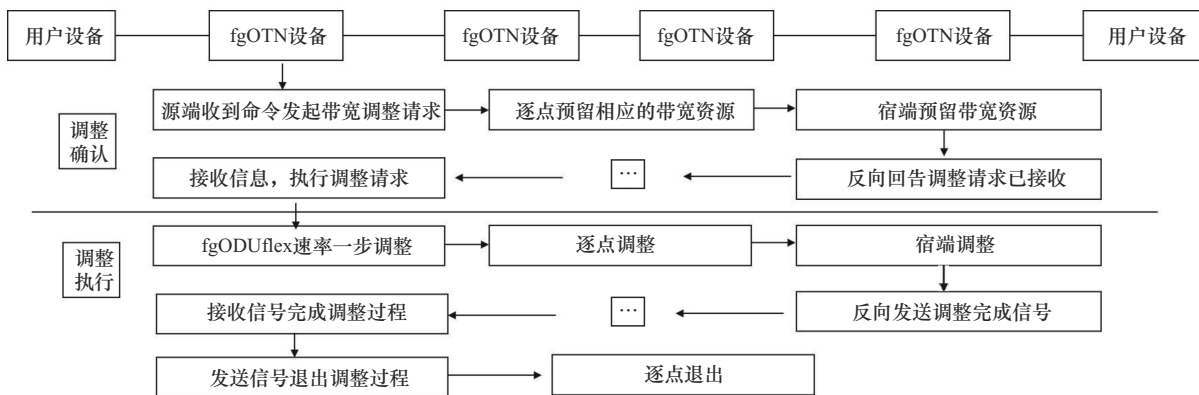


图6 fgOTN无损带宽调整的流程

表2 fgOTN标准体系

标准技术内容	ITU-T 标准	CCSA 标准
总体	G.709.20	—
架构	G.872 Annex	—
接口	G.709 Amd.3	细颗粒光传送网 (fgOTN) 技术要求 (报批公示中)
保护	G.808.4	—
设备	G.798 Annex	细粒度光传送网 (fgOTN) 设备技术要求 (立项申请中)
同步	G.8251 Annex	—
管理	G.874 Annex	基于光业务单元 (OSU) 和细粒度 OTN (fgOTN) 的光传送网 (OTN) 管控技术要求 (报批公示中)
信息模型	G.875 Annex	—
测试方法	—	细粒度光传送网 (fgOTN) 设备测试方法 (立项申请中)

2023年11月的ITU-T SG15全会上,通过了总体、接口、无损带宽调整、架构等4个核心标准,并已在2024年陆续发布。

国内在2023年年底立项了fgOTN技术要求,主要参考引用ITU-T标准,目前已到送审阶段,统一制定基于光业务单元(optical service unit, OSU)和fgOTN的OTN管控技术要求,便于实现OTN统一运维管理,目前完成报批。fgOTN相关标准体系见表2。

### 3 fgOTN实验验证与产业进展

随着fgOTN核心标准的冻结,国内运营商和设备商也开始组织进行fgOTN样机的测试验证工作。测试结果表明,fgOTN相对目前接入型OTN多平面方案更加简洁,fgOTN将ODU容器切分为更小的时隙粒度,提升承载效率,简化映射层次,具备时延优势。

在业务时延方面,设备客户侧采用以太网端口,线路侧采用OTU2接口环回方式,分别配置不同字节和不同速率的以太网业务,测试验证fgOTN的转发时延。fgOTN样机实验室测试配置如图7所示。

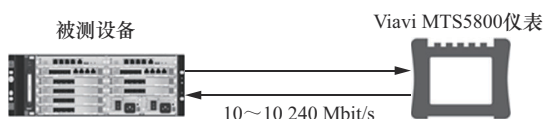
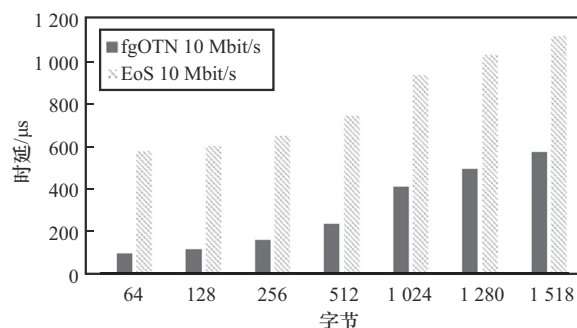
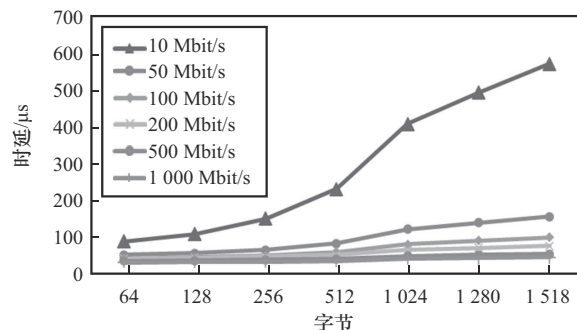


图7 fgOTN样机实验室测试配置

10 Mbit/s 基于SDH的以太网(Ethernet over SDH, EoS)和fgOTN两种承载方式的单节点转发时延对比如图8(a)所示。由图8(a)可知,相较于EOS的承载方式,fgOTN具有明显的时延优势,单节点转发时延降低50%以上。同时,测试了不同以太网带宽在不同字节下的fgOTN承载时延,测试结果如图8(b)所示。由图8(b)可知,50 Mbit/s以上业务时延已经非常接近目前SDH的时延性能。



(a) 10 Mbit/s EoS和fgOTN的单节点转发时延对比



(b) 以太网业务不同字节数转发时延

图8 fgOTN样机单节点转发时延测试结果



承载CBR业务的时钟性能方面，验证了3个fgOTN网元时钟自振情况下的2 Mbit/s业务漂移性能，E1业务时钟时间间隔误差（time interval error, TIE）偏差最大28.5 ns，最大时间间隔误差（max TIE, MTIE）符合ITU-T G.823标准要求。由此说明，fgOTN的时钟设计能够满足E1业务的定时需求。

从产业进展来看，目前主要传输厂商，如华为、中兴、烽火等，均已推出fgOTN产品，多业务接入、开销管理、保护倒换等主要功能均已实现，其他传输厂商，如华环、瑞斯康达、格林威尔等，也在积极开发相关产品，预计在2025年陆续推出。2024年国家电网山西、辽宁、山东、江西、新疆、江苏等多家省电力公司完成fgOTN测试验证，验证了隔离性、时延、抖动满足继保、安稳承载要求。运营商方面，中国移动正在积极推进fgOTN的测试验证和标准化工作，并计划在2025年进行首次集中采购，中国联通也确定了fgOTN技术方案，fgOTN的产业生态逐渐形成。

## 4 fgOTN演进分析

### 4.1 fgOTN设备演进方案

目前电力通信网现网普遍采用OTN+SDH组网模式。针对OTN，fgOTN功能的引入可分为存量演进场景和新建站点场景，从实现方案上可分为扩容方案和桥接方案。

**方案一 扩容方案**，如图9所示。对于新建网络或新建站点场景，可在设备上直接部署fgOTN线路板卡支持小颗粒业务承载，上下业务的站点按需部署支路板卡。对于存量网络，如果城域网络业务量大且对时延要求高，也可以在现有站点扩容线路板卡以支持fgOTN功能。支路板卡可按需部署，并可利用已有机框、主控和交叉板卡。

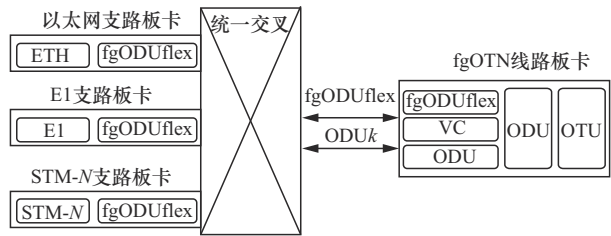


图9 fgOTN扩容方案

**方案二 桥接方案**，如图10所示。在现有设备上部署fgODUflex桥接板支持fgOTN功能，fgOTN支路板卡按需部署。桥接方式最大限度地利用了线路板卡，降低fgOTN部署成本和复杂度，便于快速部署。

比较来看，方案一适用于城域扩容或新建，可靠性高且fgOTN交叉容量大。业务仅经过一级交叉，节点时延低；方案二可以利旧现网线路板卡空闲时隙，整机fgOTN交叉容量受制于fgOTN交叉板的容量，且由于引入低阶交叉，节点时延增加大，也引入了更多故障点。对于存量网络建

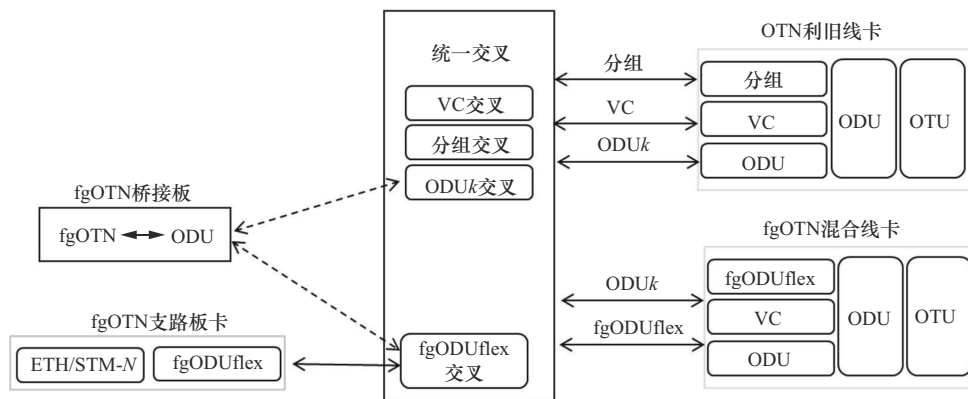


图10 fgOTN桥接方案

议方案二，新建网络优选方案一。

针对 SDH 设备，可以采用以下方案：为 SDH 设备增加 fgOTN 特性，随着 SDH/CPE OTN 网络容量的消耗，在需要新增业务时，新增业务通过 fgOTN 承载。随着业务的迁移，fgOTN 逐步完成对 SDH 的替代。

### 4.2 fgOTN 业务模型与承载方案

当前 SDH 设备持续退网，fgOTN 作为 SDH 的承载技术，需要考虑如何支撑适配 SDH 业务<sup>[13]</sup>。电力通信网中的 SDH 的业务场景可分为两大类：端到端的承载场景和对接 SDH 场景。

(1) 端到端的承载场景，如图 11 所示，OTN 网络已全面覆盖，可考虑使用 fgOTN 方案进行端到端的承载替代，业务上下路节点设备 SDH 替换为 fgOTN CPE，挂接至城域 OTN，网络中间节点增加 fgOTN 梳理调度功能，端到端提供电力专线能力，并支持快速业务切割，减少业务中断时间。

(2) 对接 SDH 场景。SDH 网络继续服务或 OTN 网络未延伸到接入层时，可以考虑使用 MSTP+fgOTN 对接方案，如图 12 所示。组网上，

SDH 与 OTN 在汇聚层通过 SDH 端口对接，接入层由 SDH 承载，核心汇聚层采用 fgOTN 承载。以太网或 STM-N 业务在汇聚层解出并映射至 fgOTN 平面。该场景存在两种情况。一是业务上下路均位于 SDH 设备，需要在 OTN 对接设备上支持 VC over fgOTN 功能，其他中间节点 OTN 设备支持 fgOTN 梳理调度功能，也可以考虑保留在 VC 平面。二是业务上下路一端位于 SDH 设备，另一端位于 OTN 设备。因此，除了 OTN 对接设备的功能变化，中间节点增加 fgOTN 梳理调度功能，还涉及 OTN 一侧业务上下路功能的变化，引入复杂度主要体现在以太网业务的处理上。

### 4.3 fgOTN 目标网络架构

当前电力 OTN 采用多平面方式解决多业务的接入，本质上仍然依赖 SDH、分组传送网 (packet transport network, PTN) 或者无源光网络 (passive optical network, PON) 对业务进行收敛，在 OTN 设备内对多种技术进行简单的多平面叠加和组合，解决多业务的承载。多平面叠加带来网络分割和管理复杂的问题<sup>[14-16]</sup>，当 OTN 下沉到接入网后，将直接提供终端业务 (专线、

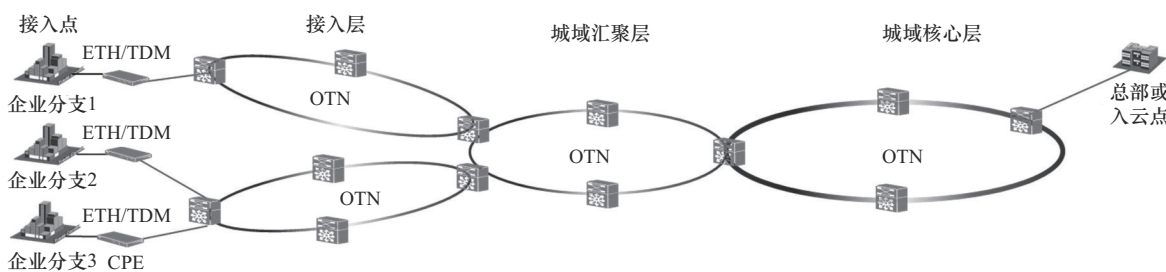


图 11 fgOTN 端到端的承载场景

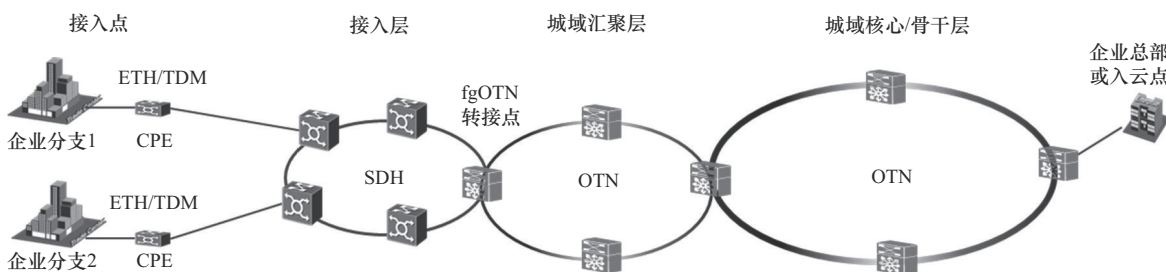


图 12 fgOTN 对接 SDH 场景



视频和5G)的接入,简单的多技术组合将无法低成本支持接入网大规模的网络部署。同时,在电力通信网络中,部分节点设备资源紧张,部分老旧SDH设备面临退网,可以通过fgOTN与SDH核心/汇聚设备的对接,利用现有SDH网络存量资源,快速形成OTN的广泛业务接入能力,并逐步承接SDH设备退网迁转需求。

网络部署过程中,初期通过新增支持fgOTN业务板卡的方式,提供fgOTN业务承载能力。同时充分考虑现网各地区的业务发展需求和网络投资情况,分批次引入fgOTN平面。在fgOTN中可同时提供fgODUflex承载的业务(以太网和SDH业务)和基于SDH的以太网(Ethernet over SDH, EOS)/基于OTN的以太网(Ethernet over OTN, EoO)业务。对于跨现有OTN和fgOTN的业务,则可以考虑采用现有方式(EoS/EoO)提供业务。从网络演进角度看,最终目标是在接入层采用fgOTN逐步取代VC层,由ODU/PKT/VC 3个平面分离承载向ODU/fgODUflex/PKT统一承载演进,简化设备实现和网络管理。fgOTN演进目标如图13所示。

## 5 结束语

本文在介绍fgOTN关键技术的基础上,结合实验数据分析比较了fgOTN的技术优势,并对面向新型电力系统算力网络的fgOTN演进进行了讨论分析。fgOTN技术提高了业务适配的灵活性并能提供业务差异化能力,具有灵活带宽、低时延、开放管控接口等特性,可满足电力通信生产控制和信息管

理类业务的承载需求,且具备未来网络长期演进所需的可扩展性,将在电力通信光网络向城域边缘、配网侧发展与研究过程中扮演重要角色。

## 参考文献:

- [1] 余涛,梁敏航,罗庆全,等.新型电力系统专用传感与边缘智能关键技术及其展望[J].高电压技术,2024,50(8):3324-3338.  
YU T, LIANG M H, LUO Q Q, et al. Key technologies and perspectives of specialized sensing and edge intelligence for new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3324-3338.
- [2] 陈新南,连伟华,马一宁. OTN在电力通信中应用的问题探讨[J]. 电信科学, 2022, 38(6): 181-189.  
CHEN X N, LIAN W H, MA Y L. Discussion on the issues of applying OTN in power grid communications [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(6): 181-189.
- [3] 陈乐贤. 小颗粒政企专线承载技术探讨与应用[J]. 电信科学, 2020, 36(S1): 217-222.  
CHEN L X. Discussion and application of small particle government and enterprise special line bearing technology[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(S1): 217-222.
- [4] 中国通信标准化协会. OTN支持1G以下客户信号技术研究[R]. 2019.  
CCSA. OTN supports signal technology research for customers below 1G[R]. 2019.
- [5] ITU-T. Overview of fine grain OTN: G.709.20[S]. 2024.
- [6] 工业和信息化部. 光传送网(OTN)保护技术要求: YD/T 2713-2014[S]. 2014.  
MIIT. Technical requirements for optical transport network (OTN) protection: YD/T 2713-2014[S]. 2014.
- [7] 工业和信息化部. 接入型光传送网(OTN)设备技术要求: YD/T 3843-2021[S]. 2021.  
MIIT. Technical requirements for access equipment of optical transport network(OTN): YD/T 3843-2021[S]. 2021.
- [8] ITU-T. Hitless adjustment of ODUflex (GFP): G.7044/Y.1347[S]. 2011.

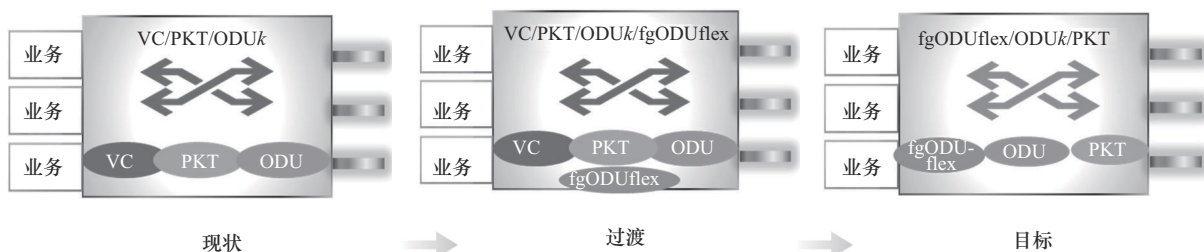


图13 fgOTN演进目标

[9] 工业和信息化部. 光传送网(OTN)带宽无损调整技术要求: YD/T 3119-2016[S]. 2016.  
MIIT. Technical requirements for bandwidth hitless adjustment of optical transport network(OTN): YD/T 3119-2016[S]. 2016.

[10] 工业和信息化部. 细颗粒光传送网(fgOTN)技术要求[S]. 2024.  
MIIT. Technical requirements for fine grain optical transport network(OTN) [S]. 2024.

[11] 荆瑞泉, 霍晓莉, 李俊杰, 等. 以 OSU 为核心的 M-OTN 技术创新与验证[J]. 电信科学, 2021, 37(4): 116-124.  
JING R Q, HUO X L, LI J J, et al. OSU based M-OTN technology innovation and verification[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(4): 116-124.

[12] ITU-T. Interfaces for the optical transport network Amendment 3: G.709 Amd.3[S]. 2024.

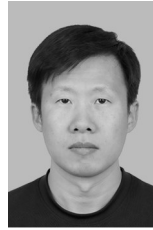
[13] 晁夫君, 荆瑞泉. 基于 OSU 技术的政企 OTN 网络架构与业务模型研究[J]. 光通信研究, 2024: 1-10.  
CHAO F J, JING R Q. Research on the architecture and business model of government enterprise OTN network based on OSU technology[J]. Study on Optical Communications, 2024: 1-10.

[14] 孙良. 城域高品质专线 OTN 承载网络与 SDH 融合组网研究[J]. 数字通信世界, 2021(6): 103-105.  
SUN L. Research on integration of high-quality private line OTN and SDH bearer network[J]. Digital Communication World, 2021(6): 103-105

[15] 李文霄, 樊会丛, 邵华, 等. 基于分组增强型 OTN 技术的电力传输网演进策略研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(9): 64-69.  
LI W X, FAN H C, SHAO H, et al. Research on transmission evolution strategy based on packet enhanced OTN in power communication network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(9): 64-69.

[16] 彭登, 许付才. 基于 VC-OTN 高品质专线承载网建设方案探讨[J]. 通信与信息技术, 2022(4): 78-80, 84.  
PENG D, XU F C. Discussion on construction scheme of high quality dedicated line bearing network based on VC-OTN[J]. Communication & Information Technology, 2022(4): 78-80, 84.

[作者简介]



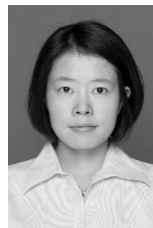
汤瑞 (1984- ), 男, 中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师, 主要从事光传输 OTN/WDM 等技术及其应用方面的研究工作。



广泽晶 (1986- ), 女, 国网信息通信有限公司高级工程师, 主要从事电力通信网络运行管理及规划设计工作。



唐佳 (1985- ), 女, 国网信息通信有限公司高级工程师, 主要从事电力通信网络运行管理及规划设计工作。



郭小溪 (1988- ), 女, 国网信息通信有限公司高级工程师, 主要从事电力通信网络运行管理及规划设计工作。



赵俊峰 (1979- ), 男, 中国信息通信研究院技术与标准研究所高级工程师, 主要从事算力网络、确定性承载等技术和应用方面的研究工作。