



F5G-A绿色万兆 全光园区白皮书

White Paper for F5G-A Green 10Gbps
All-Optical Campus



F5G-A绿色万兆 全光园区白皮书

White Paper for F5G-A Green 10Gbps
All-Optical Campus

F5G-A 绿色万兆全光 园区白皮书

编写人员：（排名不分先后）

张 军	张锐利	刚轶金	朱岁松	王小安
黎 胤	熊 江	朱立彤	高洪福	向正权
文潇江	赵泽宇	周 岩	朱 强	陈 民
陈 昊	江 魁	贺 松	钟 兵	冯 广
李彭军	李素敏	王卫苹	欧阳杰	杨春勇
杨国良	孟宪宁	张香玲	蔡一闻	李 可
管 军	吕周平	路明春	朱晓波	邓根强
杨 辉	刘义艳	阚德勇	梁锦孟	吉爱国
门家琪	陈杰新	熊 鑫	顾雷鸣	崔晓峰
刘 涛	俞树煜	张桂青	冉晓东	林维波
郜 勇	万 力	陈兴忠	陈 琪	张 旭
安卫华	包顺强	宋海军	查 波	郭红艳
张瑞松	任立全	蔡雄飞	罗德俊	林能影
张胜强	王东林	张 健	吴绍靖	杜文旭
毛海彬	赵艳领	李 涛	鲁 彦	王 觉
魏中钊	何 伟	粟卫权	李尊强	管清宝
王志翔	李东青	张 薇	罗龙涛	郝祥勇
刘 岳	邱 晔	吴闻婧	查贵庭	刘 祺
朱大强	吴文竞	冯 义	张 翔	朱华伟
陶 皓				

编写单位：（排名不分先后）

绿色全光网络专业委员会（ONA）	华为技术有限公司
复旦大学	中南大学
中南财经政法大学	深圳大学
南方医科大学	南京农业大学
北京科技大学	中央民族大学
西北师范大学	河海大学
海南大学	广东工业大学
四川农业大学	上海音乐学院
山东建筑大学	中南民族大学
华中师范大学	长安大学
北京教育学院	广东理工学院
湖北经济学院网络与教育技术中心	徐州市电教与装备发展中心
中国科培教育集团有限公司	宁波城市职业技术学院
哈尔滨工程大学青岛创新发展基地	青岛职业技术学院
青岛理工大学	华中科技大学协和深圳医院
华中科技大学同济医学院附属协和医院	山东大学第二医院
遵义市中医院	贵州省人民医院
武汉市中心医院	深圳大学附属华南医院
重庆市红十字会医院	北京中医药大学房山医院
重庆市九龙坡区人民医院	

中国第一汽车集团

江苏林洋能源股份有限公司

徐州徐工新能源动力科技有限公司

机械工业仪器仪表综合技术经济研究所

华东建筑设计院有限公司

中国建筑设计研究院有限公司

中国机械工业建设集团有限公司

中南建筑设计院股份有限公司

中国中元国际工程有限公司

中国五洲工程设计集团有限公司

北京城建设计发展集团股份有限公司

中国电子工程设计院有限公司

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司

清华大学建筑设计研究院有限公司

合肥工业大学设计院 (集团)有限公司

山东省建筑设计研究院有限公司

湖南省建筑设计院集团股份有限公司

机械工业第六设计院有限公司

中信建筑设计研究总院有限公司

福建省建筑设计研究院有限公司

北京市建筑设计研究院股份有限公司

重庆市设计院有限公司

中国建筑西南设计研究院有限公司

中国建筑西北设计研究院有限公司

安徽省建筑设计研究总院股份有限公司

甘肃省建筑设计研究院有限公司

新疆建筑设计研究院股份有限公司

天津市建筑设计研究院有限公司

华联建筑科技集团（青岛）有限公司

太原市建筑设计研究院

南京市建筑设计研究院有限责任公司

青岛北洋建筑设计有限公司

中衡设计集团股份有限公司

苏中达科智能工程有限公司

上海诺基亚贝尔股份有限公司

长飞光纤光缆股份有限公司

神州数码集团股份有限公司

中建三局智能技术有限公司

烽火通信科技股份有限公司

江苏亨通光电股份有限公司

铭基电子技术（北京）有限公司

PREFACE

前言

过去几年，我们见证了 F5G 全光网络的迅猛发展，F5G 全光网络凭借光纤到末端、ODN 全无源、二层极简架构、带宽/业务灵活扩展、运维简便等优势获得客户的青睐，成为教育、医疗、制造、酒店、政府、交通等千行百业数字化转型的最佳选择。

随着未来园区数智化、融合化和绿色化趋势的演进，高体验 XR、裸眼 3D、虚实结合的元宇宙等业务兴起，对网络基础设施提出了更高的要求。新一代的 F5G-A 全光网络大幅提升了原 F5G 的连接带宽、连接数量和品质体验的性能和体验，并新增了连接可靠性、光纤感知/可视、绿色节能等特征，更好地适配了 XR/裸眼 3D 等新业务的更高带宽，更低时延，更可靠连接的要求，推动未来网络的演进。

F5G-A 绿色万兆全光园区具有智简超宽、泛在智联、绿色节能等特征，以泛在万兆的接入让算力触手可得，联接无处不在的智能，实现千行万业智能化。

CONTENTS

目 录

前 言	4
-----------	---

目 录	5
-----------	---

第一章 园区业务的趋势和挑战	8
----------------------	---

1.1 数智化趋势	9
-----------------	---

1.2 融合化趋势	11
-----------------	----

1.3 绿色化趋势	13
-----------------	----

第二章 F5G-A 绿色万兆全光园区的概念和内涵.....	15
-------------------------------	----

2.1 F5G-A 技术介绍	16
----------------------	----

2.1.1 增强固定带宽	18
--------------------	----

2.1.2 全光联接	20
------------------	----

2.1.3 体验可保障.....	21
------------------	----

2.1.4 绿色敏捷全光网	22
---------------------	----

2.1.5 实时韧性联接	23
--------------------	----

2.1.6 光感知与可视化	24
---------------------	----

2.2 F5G-A 绿色万兆全光园区定义及网络架构	25
---------------------------------	----

2.2.1 F5G-A 绿色万兆全光园区定义	25
------------------------------	----

2.2.2 F5G-A 绿色万兆全光园区网络架构	26
--------------------------------	----

2.3 F5G-A 园区的智简超宽特征.....	28
--------------------------	----

2.3.1 PON 带宽提升	29
----------------------	----

2.3.2	Wi-Fi 带宽提升	33
2.3.3	光纤链路低时延	37
2.3.4	Wi-Fi 低时延	38
2.4	F5G-A 园区的泛在智联特征	39
2.4.1	通感一体	40
2.4.2	光视联动	42
2.4.3	链路可视	44
2.5	F5G-A 园区的绿色节能特征	44
2.5.1	架构绿色	45
2.5.2	介质绿色	46
2.5.3	技术绿色	47
2.5.4	维护绿色	48

第三章 F5G-A 绿色万兆全光园区典型应用.....50

3.1	F5G-A 园区典型应用	51
3.2	教育园区 F5G-A 应用	51
3.2.1	趋势与要求	51
3.2.2	基本组网	52
3.2.3	VR 智慧实验室	54
3.2.4	XR 智慧教室	54
3.3	医疗园区 F5G-A 应用	55
3.3.1	趋势与要求	55
3.3.2	基本组网	56
3.3.3	三维影像阅片	57
3.3.4	全光手术室	59

3.3.5	数字化病理.....	60
3.4	制造园区 F5G-A 应用.....	61
3.4.1	趋势与要求.....	61
3.4.2	基本组网	62
3.4.3	AOI+AI 智能检测.....	64
3.4.4	远程可视化操控	65
3.4.5	智能无人物流系统	66

第四章 产业现状和展望 67

4.1	产业现状	68
4.2	产业展望	69

缩略语 71

声 明 74

ONA 介绍..... 75

第一章

园区业务的趋势和挑战



1.1 数智化趋势

到 2030 年，全球联接总量将突破 2000 亿，完全进入到万兆联接的时代。而原园区基础设施孤立建设、彼此不联通，无法支撑当前园区数字经济产业和低碳可持续发展需要，需依托万兆联接的基础设施网络、数字平台，开启园区超高速互联、全局感知、万物智联的新时代。

园区的数字化、智能化为未来园区的主要趋势之一，未来园区将会逐渐成长为全面感知、有机协同、实时在线的智能化园区，并具备自学习、自诊断、自决策和执行能力。园区网络跟随数字化技术升级，采用更高带宽和更低时延的数字基础设施网络底座，实现园区的万物智联，支撑园区全面数智化。

园区数字基础设施是迈向元宇宙的底座，更强的数字基础设施底座支撑虚拟体验 XR（Extended Reality，扩展现实）在企业中的更多应用，如在教育/医疗/工业制造等涉及到远程培训/实施指导/工艺管理/知识沉淀等场景下应用，且 XR 等还在不断加速渗透到更多的园区应用场景。



图 1-1 XR 等业务在未来园区的应用

XR 通过计算机实现真实与虚拟相结合，打造一个人机交互的虚拟环境，是

VR（Virtual Reality，虚拟现实）、AR（Augmented Reality，增强现实）、MR（Mixed Reality，混合现实）等多种技术的统称。XR 等沉浸式的业务兴起，对园区数字基础设施提出了更高的挑战，要求有更高的带宽和更低的时延等。XR/裸眼 3D 等业务对数字基础设施的挑战如下表所示。

表 1-1 XR/裸眼 3D 对数字基础设施的挑战

指标	XR	裸眼 3D
显示	2K → 8K FOV: 120 → 200 度	1080 → 16K 7 寸小屏 → 70 寸大屏
带宽	80M ~ 1Gbps	10M ~ 10Gbps
时延	5 ~ 20ms	1 ~ 20ms

国家大力支持虚拟现实等新技术的落地。2022 年 11 月，工业和信息化部、教育部、文化和旅游部、国家广播电视总局、国家体育总局印发了《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022—2026 年）》（工信部联电子〔2022〕148 号），提出了虚拟现实（包含增强现实、混合现实）是新一代信息技术的重要前沿方向，是数字经济的重大前瞻领域，将深刻改变人类的生产生活方式。行动计划提到需提升我国虚拟现实产业核心技术创新能力，激发产业服务体系创新活力，加快虚拟现实与行业应用融合发展，构建完善虚拟现实产业创新发展生态。并在网络传输技术部分明确提到“推动 5G、千兆宽带等对虚拟现实的适配，构建全场景实时宽带通信能力，探索面向虚拟现实业务的云网边端算力协同架构，加快研究端到端、精细化、差异化网络传输运维与体验质量评估体系。”

国家政策大力提倡光纤下沉，提升对 XR 等高带宽业务的支撑能力。2022 年 7 月发布的《住房和城乡建设部 国家发展改革委关于印发“十四五”全国城市基础设施建设规划的通知》（建城〔2022〕57 号），提到构建信息通信网络基础

设施系统，建设高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效的信息基础设施，增强数据感知、传输、存储和运算能力，助力智慧城市建设，**推广升级千兆光纤网络设施**。明确提到加快建设“千兆城市”。严格落实新建住宅、商务楼宇及公共建筑配套建设光纤等通信设施的标准要求，促进城市光纤网络全覆盖。**全面开展家庭千兆接入和企业万兆接入升级改造，推动实现光纤到桌面、光纤进车间。**

某些前瞻性较强的省市开始考虑未来园区业务的演进，已不满足于千兆光网的建设，前瞻性提出了万兆光网的要求，如 2023 年 9 月数字北京建设暨 2023（第二十届）北京互联网大会上，北京市通信管理局、北京市经济和信息化局联合发布《“光网之都，万兆之城”行动计划（2023-2025 年）》，在全国率先以政策文件形式推动通信基础设施向“万兆光网”方向演进升级。提出北京将大力推动光通信技术发展应用，在当前千兆网络基础上新增光感知与可视化、实时韧性联接、绿色全光网三方面特性，实现十倍带宽、十倍能效、工业级时延与高可靠性和光通感一体的全面能力提升，有力地支撑各算力枢纽间智能无损调度、超高清视频、扩展现实（XR）、自动驾驶等领域发展。

1.2 融合化趋势

未来园区呈现虚实融合新态势，未来园区由空间融合走向虚实融合，提供园区办公、生活、娱乐虚实融合新场景。未来园区的智能平台需采用 AI 技术赋能，通过运用自动自治 AI、知识计算、生成式 AI 等先进技术，实现对物理空间的智能认知，并基于统一的智能平台实现园区物理空间与数字空间的融合，实现数字孪生。

未来园区具备全局感知能力，通过如光感知、Wi-Fi 感知等新兴的感知技术，结合“无源物联感知、视觉感知”等技术，在园区打造一张精准感知、实时可视、高效运营的数字化感知网，实现对园区中的人、机、物、事、空间环境进行全方位、多角度的感知和识别，实现通感一体融合的目标。

传统园区各网络通常按照业务划分，存在多张网络，导致运营维护复杂，难以适应园区网络自动化和智能化发展的需要。未来园区网络需考虑采用新的网络架构，实现多张网络融合，简化网络，提升运维效率。另随着数字经济的发展，园区从封闭走向开放，由单一迈向融合，对园区安全将提出更高要求，要求融合的多张网络之间实现隔离，以支持多张网络的数据安全。园区的安全管理功能将与人工智能、机器学习等技术深度融合，提升设备分析决策力，实现事前主动风险预判预防。

虚实融合·人工智能



光感融合·光纤传感



网络融合·多网合一



图 1-2 未来园区的多种融合方式

园区网络安全保障为智慧园区建设的核心需求，网络融合带来安全隔离的要求，需要高性能、硬隔离的基础网络来保障。端到端的网络切片等安全隔离技术也将成为未来网络安全的主流技术及组网方式。

园区需基于物理安全、数据安全、网络安全等维度，全面提升立体主动安全的能力。园区网络的主动安全防护需主动感知、实时监测和智能分析网络威胁，并对威胁自动响应及秒级处理。如未来园区可通过 AI 摄像机的多模态图像识别，自动锁定可疑人物或行为，并通过分析算法判断安全风险等级，自动调度相关资源解决问题。

国家近年陆续发布多部数据安全相关的法律法规，将进一步细化数据分类分级、数据安全评估等制度，将进一步完善配套的数据安全规范和标准体系。

1.3 绿色化趋势

气候变化是一项跨越国界的全球性挑战，人类活动产生的二氧化碳气体具有吸热和隔热功能，大量排放二氧化碳将会在地球大气中形成一个无形的气体玻璃罩，阻止太阳辐射到地球上的热量向外层空间发散，形成“温室效应”。全球气候变化治理已成为世界各国密切关注的问题。在《巴黎协定》的指导下，各国达成了将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上 2°C 之内的共同目标，同时寻求将气温升幅控制在 1.5°C 以内的措施。

园区是由政府、企业或者其他组织机构创立的城市基本单元，是最主要的承载经济和社会活动的空间载体，是人类生产生活的主要场所及产业聚集发展的核心单元。园区作为全球碳排放的重要载体，是应对全球气候变化的关键一环，需实现低碳/零碳园区。

低碳/零碳园区建立在数字化全面赋能的智慧园区基础上，采用数字技术促进园区能源结构清洁化、能源管理高效化、生产生活绿色化。低碳/零碳园区全面赋能园区绿色化、低碳化、零碳化转型，实现绿色可持续发展目标。采用绿色低碳的数字信息基础设施也是绿色/节能减排的一个关键措施。



图 1-3 未来园区的绿色要求

2020 年 9 月，中国在第 75 届联合国大会上郑重宣布中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。“碳达峰”和“碳中和”成为我国未来数十年社会经济发展的主基调和基本国策。

2021 年 10 月，国务院发布《2030 年前碳达峰行动方案》（国发〔2021〕23 号），在节能降碳增效行动中明确提出“2. 实施节能降碳重点工程。实施城市节能降碳工程，开展建筑、交通、照明、供热等基础设施节能升级改造，推进先进绿色建筑技术示范应用，推动城市综合能效提升。**实施园区节能降碳工程**，以高耗能高排放项目（以下称“两高”项目）集聚度高的园区为重点，推动能源系统优化和梯级利用，**打造一批达到国际先进水平的节能低碳园区。**”，以及“4. 加强新型基础设施节能降碳。优化新型基础设施空间布局，统筹谋划、科学配置数据中心等新型基础设施，避免低水平重复建设。优化新型基础设施用能结构，采用直流供电、分布式储能、“光伏+储能”等模式，探索多样化能源供应，提高非化石能源消费比重。对标国际先进水平，加快完善通信、运算、存储、传输等设备能效标准，提升准入门槛，淘汰落后设备和技术”。

2022 年 8 月工业和信息化部、国家发展改革委、财政部、生态环境部、住房和城乡建设部、国务院国资委、国家能源局等七部门联合印发《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022-2025 年）》（工信部联通信〔2022〕103 号），在文中的优化基础设施体系架构提到：“**打造绿色低碳信息基础设施。稳步推进网络全光化**，鼓励采用新型超低损耗光纤，规模部署 200G/400G 光传输系统和 1T 以上大容量低功耗网络设备，引导 100G 及以上光传输系统向城域网下沉，减少光电转换能耗。推进网络架构优化，精简网络层级和网络设备节点数量，逐步形成以数据中心为核心的扁平化、云网融合、云边端协同的网络架构和算力设施体系，推动实现异构云集中管理和协同共享”。

第二章

F5G-A 绿色万兆全光园区的概念和内涵



2.1 F5G-A 技术介绍

第五代固定网络 F5G（The 5th Generation Fixed Networks）是由中国提出，欧洲电信标准协会 ETSI（European Telecommunications Standards Institute）接纳，由业界广泛参与的一代固定网络。

2020 年 2 月，ETSI 面向全球宣布成立 F5G 产业标准工作组，提出了从“光纤到户”迈向“光联万物（Fibre to Everywhere）”的产业愿景。2020 年 9 月，ETSI 发布《F5G 代际定义标准》，确定 F5G 三个主要特征：增强固定宽带 eFBB（Enhanced Fixed Broadband）、全光联接 FFC（Full-Fiber Connection）和可保障品质的体验 GRE（Guaranteed Reliable Experience）。F5G 的参与者有诸多机构成员，包括电信运营商（中国电信、中国联通、意大利电信、法国电信等）、设备商（华为、烽火、康普等）、研究机构（中国信通院、英国标准研究所等），ETSI F5G 标准组的会员超过了 100 家。F5G 的特征如下图所示。

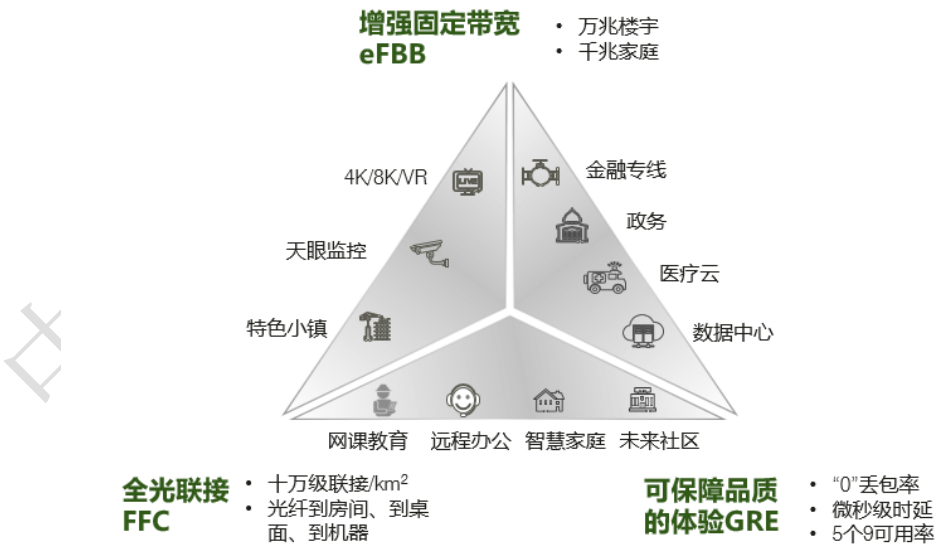


图 2-1 F5G 的特征

F5G 标准发布后，ETSI 开始致力于 F5G 标准升级版本的研讨和制定，并识别出 F5G 向下一代演进的两大主要驱动力：

- **新兴应用驱动：**如数字孪生、元宇宙、垂直行业、应用数字化/云化等；
- **网络基础设施演进驱动：**如更大带宽和更好体验需求、网络运营数字化和自动化、计算与网络融合，无处不在的光纤网络覆盖、绿色网络等。

基于上述驱动力，欧洲电信标准化协会 ETSI 在 2023 年 11 月重磅发布《F5G Advanced 代际标准》（《F5G Advanced Generation Definition》），正式定义了 F5G Advanced（简称 F5G-A）代际，探讨了从 F5G 到 F5G Advanced 的演进路径，并定义 F5G Advanced 的六大特征，阐述其驱动因素及关键技术。《F5G Advanced 代际标准》是固定网络技术标准发展的重要里程碑。F5G-A 的定义如下图所示。

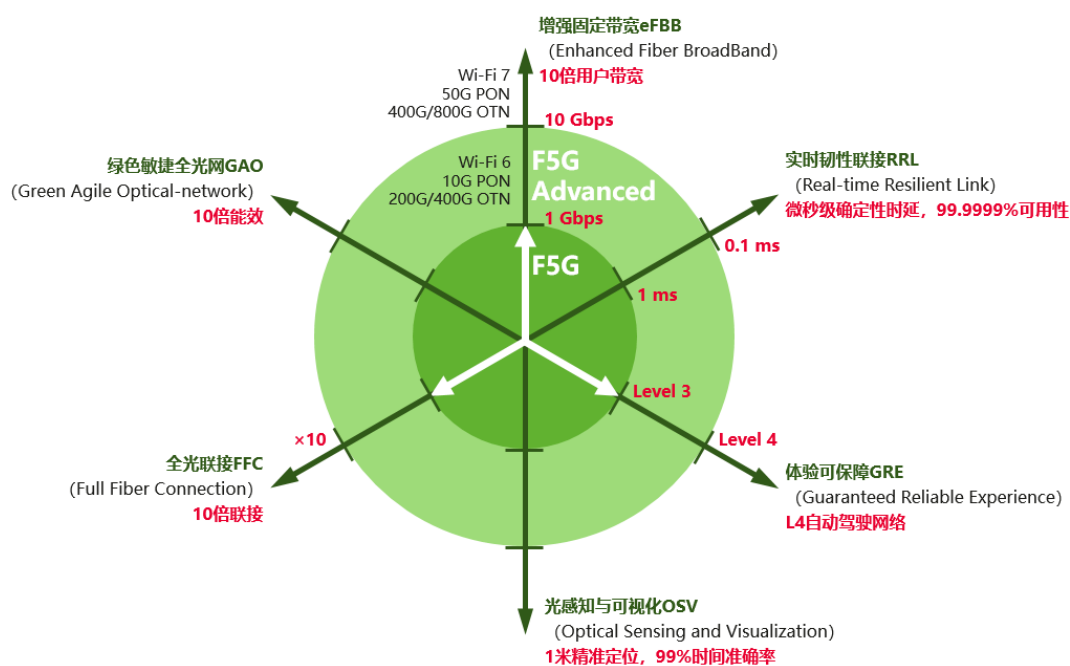


图 2-2 F5G-A 的定义

F5G-A 代际针对 F5G 的三大特征（增强固定带宽 eFBB、全光联接 FFC 和可保障品质的体验 GRE）的性能进行了大幅提升，并新增了三个特征：实时韧性联接 RRL（Real-time Resilient Link），光感知与可视化 OSV（Optical Sensing and Visualization）、绿色敏捷全光网 GAO（Green Agile Optical-network），以适应未来网络的演进诉求。

新定义的 F5G-A 代际相比 F5G 提升了 10 倍用户带宽、10 倍光纤连接密度、10 倍能效，可靠性从 5 个 9 提升到 6 个 9，支持米级精确感知，支持微秒级时延和 L4 级自治网络（参考 TM Forum 通用自治网络分级标准定义）。

F5G-A 将实现光纤覆盖无处不在，为千行百业（如电信、教育、医疗、金融、能源、交通和制造等）数字化和智能化带来新的机遇和助力。F5G 迈向 F5G-A 是固定网络领域的重要飞跃，在扩展行业应用场景的同时，满足绿色高效、优质服务和更高安全性的要求，创造更大的社会价值和经济价值。

F5G Advanced 标准中定义了 F5G 和 F5G-A 的差异点，主要是在带宽、业务种类、接入技术等，具体的差异如下表所示。

表 2-1 F5G-A 和 F5G 的差异

差异点	F5G	F5G-A
代际参考	G bit/s	10G bit/s
每用户下行参考带宽	1~5 Gbps	5~25 Gbps
每用户上行参考带宽	1~5 Gbps	5~25 Gbps
参考业务	VR 视频/云游戏	元宇宙/数字孪生
接入网技术	10G-PON	50G-PON
标准参考	G.9807.x（XGS-PON）	G.9804.x
Wi-Fi 技术	Wi-Fi 6（802.11ax）	Wi-Fi 7（802.11be）
汇聚或核心网络	IP/Eth OTN/ROADM	IP/Eth OTN/fgOTN/fgMTN/OXC
传送网每波长带宽	200/400 Gbps	400/800 Gbps
网络自动驾驶等级	等级 3	等级 4

2.1.1 增强固定带宽

F5G-A 和 F5G 相比，光纤的 PON 技术从 XGS-PON 升级至 50G-PON，Wi-Fi 无线技术从 Wi-Fi 6 升级至 Wi-Fi 7。

光纤部分的 50G-PON 技术可提供更高的光纤接入带宽,可支持 50G 到房间。

XGS-PON 已在全球范围海量部署,支持 10G 到房间,但业务的发展(如医疗阅片/XR 等业务)对带宽提出了更高的诉求。国际电信联盟于 2021 年制定并发布了 50G-PON 标准,成为下一代光接入主流技术。50G-PON 继续沿用点到多点架构和时分复用技术,50G-PON 相比 XGS-PON,光纤速率从 10Gbps 提升至 50Gbps,处理时延从毫秒级优化至微秒级。

50G-PON 技术标准制定时已充分考虑了与 XGS-PON 共存及在现网上平滑升级等因素,在波长选择、光功率预算等进行了明确的规定,确保共存及平滑升级,此外在低时延等能力上也进行了创新,支持更低的时延。50G-PON 的平滑演进主要是考虑如下方面内容:

1) 50G-PON 系统和 GPON、XGS-PON 系统可在一个 ODN 下同时共存,不同的 PON 技术采用不同的波长,通过波分实现共存。OLT PON 端口采用 MPM (multi-PON module,即常说的 Combo)模式,实现在一个 OLT PON 端口内同时支持 50G-PON、XGS-PON、GPON 等,可在一个光分路器下同时联接 50G-PON ONU、XGS-PON ONU 或 GPON ONU;

2) 50G-PON 系统和 XGS-PON、GPON 系统可在一个 ODN 下同时共存,50G-PON 的光功率预算需和当前的 XGS-PON 或 GPON 的光功率预算相同,但由于带宽的提升导致需要更大的发送光功率及更高的接收灵敏度,故 50G-PON 大光功率预算光模块仍面临技术挑战,需进一步研究新材料及结构、更高灵敏度接收器件、新型大功率发光芯片、低复杂度 oDSP 算法等。

F5G-A 的无线部分新增支持 Wi-Fi 7 技术,可提供更高的带宽。

Wi-Fi 已成为当今世界无处不在的技术,为数十亿设备提供连接。Wi-Fi 7 相比 Wi-Fi 6,可提供更高的数据传输速率和更低的时延,Wi-Fi 7 的 Release2 版本在 2024 年底完成标准发布,可满足 8K、XR 等新型应用。

Wi-Fi 7 主要在以下部分进行了技术增强,以提升带宽:

1)引入新的信道带宽模式,Wi-Fi 7 支持非连续信道带宽的聚合(例如 160MHz + 80MHz), 通过扩大信道宽度提升速率, 支撑体验接入速率迈向 N*Gbps;

2) 引入更大的 QAM 调制模式, 支持 4096-QAM 调制, 在相同编码下相比 Wi-Fi 6 的 1024-QAM 速率提升 20%;

3) 支持 Multi-Link 多链路机制, 可在 2.4 GHz、5 GHz 和 6 GHz 上建立新的通道管理、协调和传输机制, 支持多链路聚合提升速率。

2.1.2 全光联接

F5G-A 和 F5G 相比, 光纤连接密度有 10 倍的提升, 支持的网络规模和终端接入数量大幅增加。F5G-A 在光联万物上往前迈进了一大步, 提供无处不在的光联接, 在 FTTO(光纤到办公室)、FTTM(光纤到机器)和 FTTH/FTTR(光纤到家/光纤到房间)场景中支持更大规模的部署。

FTTO 场景: F5G-A 推动光纤延伸到园区办公室和办公桌面。

F5G 时代 FTTO 已实现了光纤到房间, 有部分场景已实现了光纤到桌面。随着园区高带宽等业务的发展, F5G-A 继续推动光纤往末端设备延伸, 除了当前的光纤到房间, 光纤到桌面外, 光纤会继续下沉延伸至末端设备(如采用类似 SFP ONU 等方式, 直接连接至 AP/服务器等高带宽诉求的终端设备, 提供万兆甚至 25G 的带宽能力), 实现园区办公的光纤一纤到底, 光联万物。

FTTM 场景: F5G-A 推动光纤延伸到工业机器。

光纤具有大带宽、长距离、抗电磁干扰等优点, 非常适合在制造等工业场景使用。FTTM 实现了光纤向工业制造等行业延伸, 实现了光纤到机器, 使光纤的优势最大化。F5G-A 网络提供了高可靠性, 引入工业级防爆/防尘/防震/防腐蚀等技术, 并支持环网保护和业务无损倒换零中断; 支持高效对称加密数据传输算法, 确保生产业务 7×24 小时正常运转; F5G-A 网络通过长距离光电复合缆、光纤现场快速成端技术, ONU 免现场取电, 实现光纤分钟级快速部署和灵活扩展; 远端

ONU 尺寸也可做到更小，更易于安装和取电。

FTTR 场景：F5G-A 成为智慧家庭的全光底座。

随着家庭 XR 和全屋智能等高品质业务发展，对家庭和企业内网络的高通量、低时延及多终端并发需求进一步提升，F5G-A 的光纤网络基于极简点对多点无源汇聚架构，透明光纤和光电复合缆的现场快速成端等，将光纤延伸到家庭的每个房间。F5G-A 的 Wi-Fi 网络基于 Wi-Fi 7 技术，通过增强 FTTR 10G 互联，光和 Wi-Fi 深度融合，多用户智能调度和抗干扰算法，实现毫秒级的业务时延和漫游体验，支持全屋 5~10Gbps 覆盖和全屋 512 个以上终端并发连接。F5G-A 支持通过低功耗 Wi-Fi 连接智能家居设备，光纤直接到智慧大屏，实现家庭的全屋光+Wi-Fi 一网覆盖。

2.1.3 体验可保障

为实现网络自动驾驶，电信管理论坛 TMF（TeleManagement Forum）提出了四层三闭环的 AN 架构，通过网元层、网络层、业务层、商业层的配合与协同，实现资源、业务、商业的闭环，为企业和用户提供一张业务使能零等待、业务优化无需现场配置、网络维护无需现场定位的网络，并通过业务意图驱动、体验多维感知、瓶颈智能识别、网络自适应自调整等核心技术实现网络真正自治。自动驾驶网络 ADN（autonomous driving network）的 L4 阶段可根据时间、空间、用户历史等数据智能推理，自动定位到故障问题的根因，极大提升运维效率。

业务层自动驾驶：模型意图驱动实现小时级自动发放，分钟级自动优化。

通过业务体验实时分析，秒级网络状态动态还原，多维模型支持网络瓶颈精准定位等手段，实现光+Wi-Fi 的自适应优化，实现用户级业务体验实时动态保障，保障网络不同层次的“零故障”体验，满足企业业务不断增长的品质诉求。

网络层自动驾驶：通过知识图谱实现智能故障定位和主动优化。

网络层自动驾驶主要包括故障自动发现，智能故障定位，故障恢复，网络级

性能优化等自动化能力。自动驾驶通过数字孪生，知识图谱，机器学习等技术，结合感知/分析/决策/执行闭环流程，实现故障根因自动发现，故障自动快速修复，并大幅优化准确率和故障闭环时间。自动驾驶可构建网络/用户/终端/应用的四维立体地图，端到端体验可视，一键直达问题根因。通过自动驾驶可构筑领先的运维运营能力，先于业务感知网络故障，先于用户修复故障。

网元层自动驾驶：通过光层数字化实现隐患主动预测。

网元层自动驾驶首先要求光层网络数字化，数字化涉及光链路层/光信道/光部件/光业务等 4 层系统的数字化，需将原光系统的模拟信号转变为确定且可视的数字信号。并在数字化之上构筑自动驾驶的资源数据底座（包括资源、业务、数字光缆、网络拓扑等）和性能数据（包括光性能、KQI、单板器件性能等）底座。网元层基于上述数据信息，融合智能预测和感知算法，进一步构筑故障主动预测，自动恢复，传输性能自优，功耗自动控制等自动驾驶能力。

2.1.4 绿色敏捷全光网

F5G-A 采用绿色全光底座，助力承载网络能效 10 倍提升。

F5G-A 持续推动将原铜缆转换为光纤，推动光纤下沉，实现光纤到房间，光纤到桌面，光纤到终端设备；F5G-A 继续保持原来光分路器无源汇聚的优点，无需在弱电间部署有源的汇聚设备，减少了弱电间的设备功耗及降低了弱电间散热空调等配套设施的功耗，实现整个网络的绿色节能。

F5G-A 采用了 50G-PON 技术，带宽相比原 XGS-PON 提升了约 5 倍，但功耗增加不多，50G-PON 每比特的功耗远小于原 XGS-PON 每比特的功耗，50G-PON 也实现了高带宽 PON 技术的绿色及节能减排。

F5G-A 除了在接入层采用 PON 技术实现绿色节能外，在园区间互联的传输网络设备也采用了新的技术支持绿色节能。传输网络设备通过光纤频谱的拓展（从 C 波段到 L 波段）来大幅提升光纤单纤容量，实现单比特的功耗降低，另外

传输网络设备从当前的电交换技术切换到光交换技术，减少电层的能源消耗，提升光层的覆盖延伸，实现网络能效的端到端提升。

2.1.5 实时韧性联接

XR 等交互式沉浸式体验服务及行业数字化转型除了对带宽提出要求外，对网络的时延、抖动等提出更高要求。此外，园区网络多张网合一也要求网络需具备差异化承载能力。F5G-A 的实时韧性联接主要在确定性低时延、端到端的硬切片和体验感知和测量上做了增强。

确定性低时延：时延从 ms 级缩小为 us 级。

生产制造园区的网络包括行业承载网络、园区内工业控制网络和现场工业控制网络，对时延有更严格定义和要求，需要确定性、us 级时延。

Wi-Fi 空口的时延和抖动是影响确定性时延的关键瓶颈，Wi-Fi 7 通过 OFDMA（正交频分多址，Orthogonal Frequency-Division Multiple Access）、多用户资源分配和多链路协同算法等技术，通过空口切片有效降低 Wi-Fi 空口冲突，降低业务转发时延和抖动，实现确定性时延。

光接入网络中通过引入单帧多突发技术、协同动态带宽分配 DBA（dynamic bandwidth assignment）技术等，可实现业务转发层面 us 级的转发时延、us 级的业务抖动，匹配工业远程控制、精密制造等行业数字化诉求。

端到端的硬切片：差异化承载和安全隔离。

端到端的硬切片包括 Wi-Fi 空口切片、PON 网络切片及传输网络的光电调度切片，通过合理组合网络中各个设备切片，精准感知各切片的 SLA 要求，实现切片动态创建和资源按需调度，保证 SLA 可承诺可视可管，支持一网多用，为不同的网络提供差异化承载服务。

体验感知和测量：

为检测网络的运行状态、优化网络连接和性能，提升网络运行稳定性，降低

网络维护成本，F5G-A 网络支持管道级、业务级和应用级的端到端 OAM（操作维护管理，Operation Administration and Maintenance）。

管道级 OAM 提供端到端管道的告警性能、时延测量等功能，可准确提供管道的时延、传输质量等信息。

业务级 OAM 提供精准的 L2/L3 级别 OAM，准确监控以太网业务的实时流量、丢包率、时延及抖动。业务上行方向，设备需对 IP 报文进行丢包和时延染色；业务下行方向，设备针对上游设备发过来的染色报文进行时延和丢包计算，并在网络边缘将染色报文还原成数据报文。

应用级 OAM 基于单个 UDP 或者 TCP 连接进行监控，监控单个 UDP/TCP 连接的丢包、时延和抖动情况。设备利用报文中的序列号进行时延以及丢包计算，且可上报给协同管控平台进行综合测算。

2.1.6 光感知与可视化

F5G-A 和 F5G 相比，新增了光感知与可视化 OSV 特征，支持光纤传感功能及无源光纤网络的可视化功能，实现了通感融合。

无源光纤网络的可视化：

无源光纤网络运用基于先进无源光子学器件和光电探测集成器件的多种光学信号检测技术，结合光谱信号事件识别算法和计算视觉图像识别算法，有效解决了光纤光缆哑资源无法管理的难题，实现了无源光纤网络的主干光缆（从 OLT 到光分路器）、配线光缆（从光分路器到 ONU）以及无源光分路器的端口等的可视化，支持无源光纤资源的资源可视及米级故障定界功能。

光纤传感：

光纤传感包括基于瑞利散射效应的光纤振动传感，基于拉曼散射效应的光纤温度传感，基于布里渊效应的温度和应变监测等，通过实时在线感知光纤及周边环境振动、温度、应力等变化，结合软件算法，实现高精度工业现场环境检测功

能。光纤传感技术以抗电磁干扰、耐腐蚀、易集成、本质安全、距离远、精度高等特点，在大型工程项目中应用优势明显，已被人们广泛关注。近年来，得益于窄线宽光源的成本逐步降低并小型化，信道算法不断优化，人工智能应用于处理光纤传感产生的大数据实现事件自动识别，在各个行业逐渐出现了光纤传感的应用案例（如油气管道安全监测、桥梁大坝等大型土木工程结构安全检测等），并开始快速发展。

Wi-Fi 传感：

Wi-Fi 为弥散在空中的无线电波，是最佳的传感器。Wi-Fi 传感技术主要利用无线信号的多径效应，通过分析接收端多径叠加信号的变化模式实现感知识别。Wi-Fi 传感具有非视距、感知范围广、不受光照条件限制等一系列优势。近年来，Wi-Fi 信号用于非接触式感知（如室内定位、运动检测、呼吸频率检测等）成为研究热点。未来 Wi-Fi 感知可从米级感知精度和分辨率提升上进一步探索：

1) 匹配人体精细化特征的信号波形和序列设计，使得信号能反应人体特征的细微变化；

2) 多 MIMO（multiple-input multiple-output，多输入多输出技术）天线技术，获取更多维的无线信道信息。准确率提升至 95%以上。

2.2 F5G-A 绿色万兆全光园区定义及网络架构

F5G-A 绿色万兆全光园区为采用了 F5G-A 技术的全光园区，其网络架构包括了终端设备、承载网络、数字平台、业务应用平台等各部分。

2.2.1 F5G-A 绿色万兆全光园区定义

F5G-A 绿色万兆全光园区为采用了 F5G-A 技术的全光园区。

F5G-A 绿色万兆全光园区的承载网络设备包含园区出口设备、网络核心层设备、网络管理设备、接入层设备等。网络核心层设备主要部署在核心设备机房内，

设备包括核心交换机和 OLT；园区出口设备包括防火墙、出口路由器等，如存在多个园区互联，也包括支持园区互联的 OTN 等传输设备；数据中心包括各种应用服务器、网管系统、AAA 服务器、软交换等各种设备。F5G-A 全光园区无需有源汇聚设备，仅需采用无源的光分路器（也称分光器）实现光纤的汇聚。接入层的 ONU 设备部署于靠近最终用户终端（如 PC、摄像机、AP、生产装备等）的位置，也有部分 ONU 可提供 Wi-Fi 功能，通过 Wi-Fi 接手机/Pad 等 Wi-Fi 终端。F5G-A 绿色万兆全光园区如下图所示。

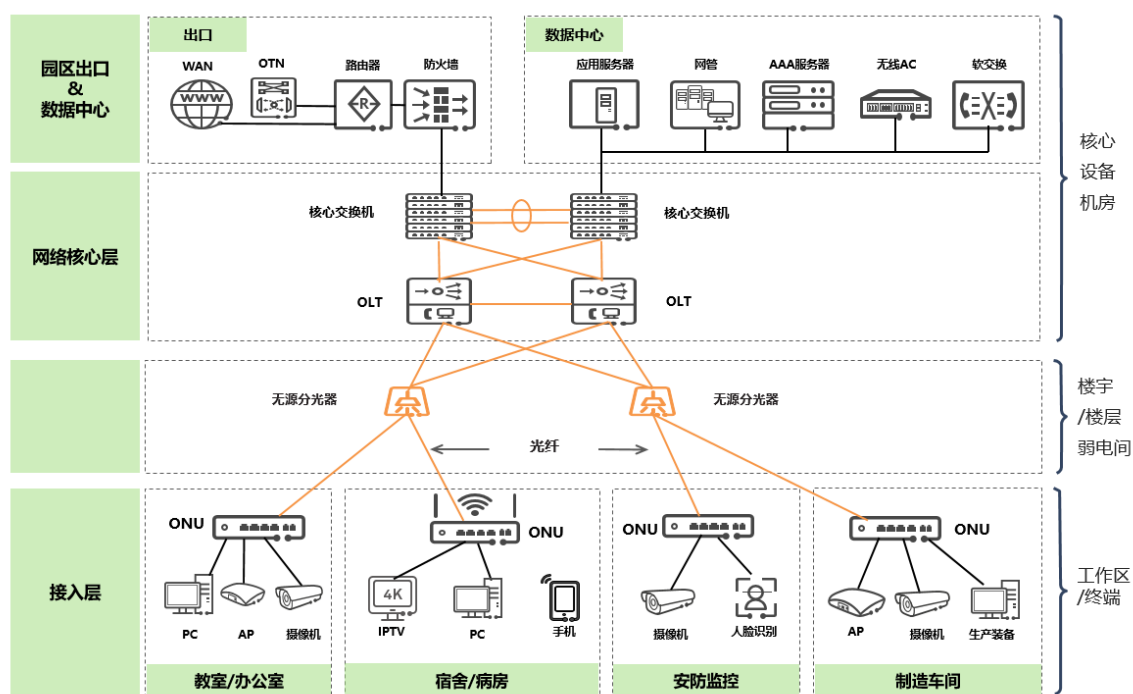


图 2-3 F5G-A 绿色万兆全光园区

2.2.2 F5G-A 绿色万兆全光园区网络架构

F5G-A 绿色万兆全光园区网络架构划分为终端设备、承载网络、数字平台和业务应用等网络层次。从园区的场景和功能划分，可划分为教育园区、医疗园区、办公园区、制造园区和产业园区等。F5G-A 绿色万兆全光园区的网络架构如下图所示。



图 2-4 F5G-A 绿色万兆全光园区网络架构

终端设备：F5G-A 绿色万兆全光园区是一个全连接、全感知的万物数字化园区。园区内存在海量的终端设备，终端设备包括办公网络的计算机、AP、大屏等设备，安防网络的终端设备包括高清视频摄像机、出入口控制设备、周界安防设备等，智能化设备专网中的终端设备包括空调、照明及相应的控制器等。F5G-A 网络需实现终端设备的快速接入，用统一的标准实现交互，且通过自动编排实现海量终端数据的体验式交互。

承载网络：F5G-A 绿色万兆全光园区的承载网络主要采用 F5G-A 技术，实现光纤到房间，光纤到桌面，光纤到设备，也可和其他技术（如 5G 或其他技术）同时组网。相关技术可包括 PON、Wi-Fi 7、OXC、蓝牙、NB-IoT、Ethernet 等。

数字平台：F5G-A 绿色万兆全光园区的数字平台包含业务平台、数据平台、安全平台和维护平台等，也包含园区管理平台、大数据 AI 平台、物联网平台、融合通信平台等，还针对不同的应用场景提供教学平台或医疗平台等。数据平台是

实现数据的互联互通、集成标准化、交互共享和结构化的重要基础。

业务应用：F5G-A 绿色万兆全光园区的业务应用包括园区的智慧运营中心、设备管理、能效管理、资产管理等业务应用，此外也会根据园区场景的不同分别提供柔性制造、XR 教学、远程医疗等各种业务应用，满足园区的生产、生活等的需要。

F5G-A 绿色万兆全光园区按照场景的不同，可分为教育园区、医疗园区、制造园区、办公/政府园区等园区，具有智简超宽、泛在智联、绿色节能等特征。

2.3 F5G-A 园区的智简超宽特征

F5G-A 绿色万兆全光园区采用 XR、AR 辅助和全息投影等新技术，支持全息交互设计、汽车碰撞仿真、生产 AOI 质检等新业务，相比 F5G 园区需要更高的带宽和更低的时延。

F5G 园区可实现千兆到房间，甚至万兆到房间，而 F5G-A 园区采用 50G-PON 之后，可支持超万兆到房间，甚至能支持五万兆到房间。F5G-A 绿色全光万兆园区的智简超宽应用如下图所示。

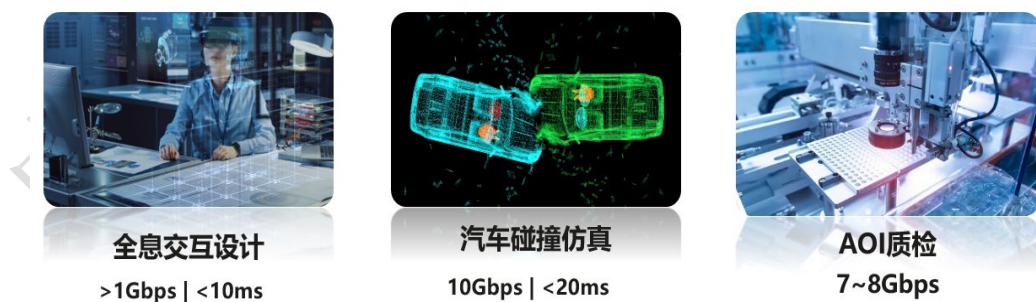


图 2-5 F5G-A 绿色万兆全光园区的智简超宽应用

F5G-A 绿色万兆全光园区的智简超宽包含了高带宽和低时延两方面的升级。高带宽接入包含有线（PON 光纤）的高带宽接入和无线（Wi-Fi）的高带宽接入，F5G-A 园区和以前的 F5G 园区相比，每用户的接入带宽将会有 5~10 倍的提升。

低时延包含了有线接入（PON 光纤）的低时延及无线接入（Wi-Fi）的低时延，F5G-A 相比 F5G 园区，时延由原来的 ms 级降至 us 级。

2.3.1 PON 带宽提升

有线接入的带宽提升包括 ONU 的网络侧接口由 GPON/XGS-PON 升级为 50G-PON，用户侧接口由 GE/2.5GE 升级为 10GE。

50G-PON 是 F5G-A 园区采用的一种主流技术，其和 XGS-PON 的差异如下表所示。

表 2-2 50G-PON 和 XGS-PON 的差异

技术参数	XGS-PON	50G-PON
PON 标准	G.9807.x	G.9804.x
下行线路速率	9.953G bit/s	49.766G bit/s
上行线路速率	9.953G bit/s	49.766G bit/s
下行中心波长	1577nm	1342nm
上行中心波长	1270nm	1286nm
保护方式	Type B/C 双归属	Type B/C 双归属
PON 线路加密	支持	支持
Combo 方式	XGS-PON/GPON 两模 Combo	50G-PON/XGS-PON/GPON 三模 Combo

50G-PON 标准进展。

国际电信联盟 ITU（International Telecommunication Union）制定了 GPON 系列化标准，当前主流使用的是 GPON 和 XGS-PON 技术。随着更高带宽诉求的新业务出现，ITU 牵头制定并发布了 50G-PON 标准，50G-PON 标准的主要参与者为中国的主流电信运营商和英国/意大利等欧洲主流电信运营商，各国主流的运营商已明确表示 GPON/XGS-PON 下一步将会演进至 50G-PON，50G-PON 于 2024

或 2025 年开始批量商用。

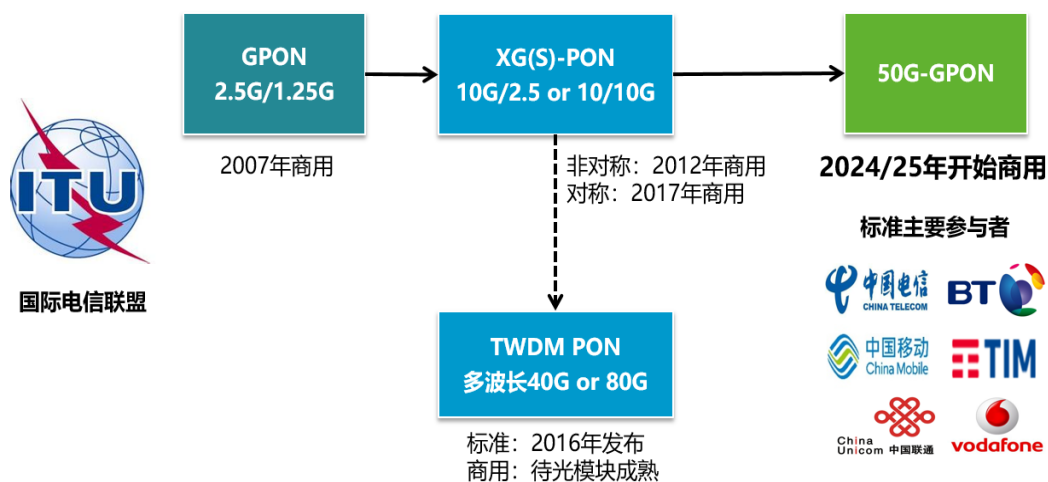


图 2-6 GPON 系列标准演进

ITU-T 在 2019~2021 年陆续发布了 50G-PON 的系列标准，包含 50G-PON 的总体技术要求、50G-PON 的 TC（传输汇聚，Transmission Convergence）层要求和 50G-PON 的 PMD（物理媒质相关，Physical media dependent）层要求；中华人民共和国工业和信息化部也于 2023 年陆续发布了 50G-PON 的系列标准（也定义了 50G-PON 的物理媒质相关层和传输汇聚层的标准），50G-PON 已有标准可依，相关的芯片及产品研发/上市开始走上快车道。

50G-PON的ITU-T国际标准



50G-PON的国内行业标准

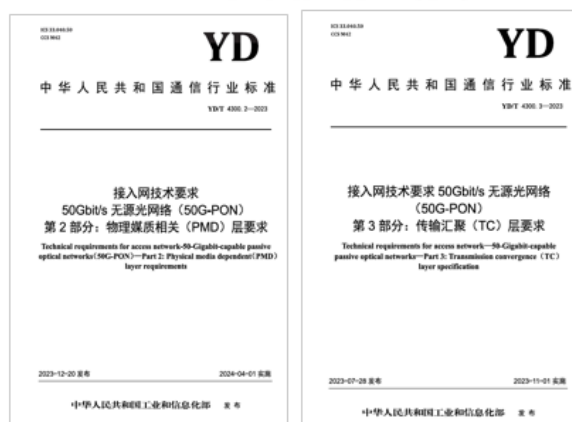


图 2-7 50G-PON 的相关标准

50G-PON 的波长。

50G-PON 可和 XGS-PON 及 GPON 在同一根光纤上波分共存，可通过在现有的 XGS-PON 或 GPON 的光纤网络上叠加 50G-PON 实现扩容，支持更高的业务带宽，而不影响 XGS-PON 及 GPON 已有的业务。

50G-PON 标准制定时已充分考虑多种 PON 技术共存的情况，在波长定义时进行了讨论和规避，50G-PON 选择了下行 1342nm/上行 1286nm 的波长，和 GPON 的下行 1490nm/上行 1310nm、XGS-PON 的下行 1577nm/上行 1270nm 的波长不重叠，在部署时可通过波分实现共存。

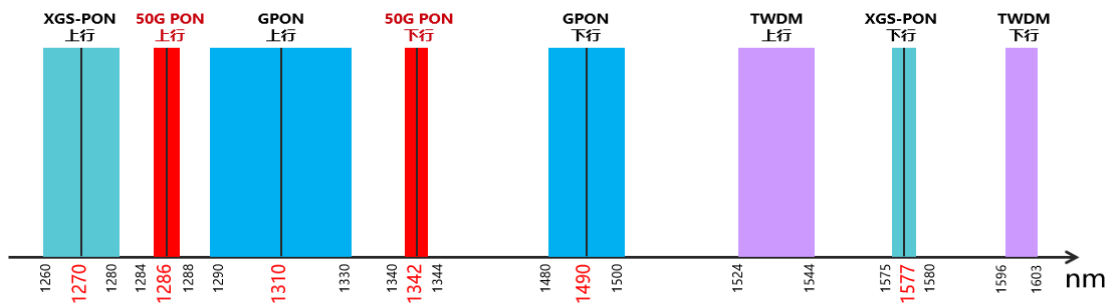


图 2-8 50G-PON 的波长划分

50G-PON 的组网。

50G-PON 支持和 XGS-PON/GPON 实现 Combo 功能（即在同一个物理 OLT PON 端口内同时支持 50G-PON、XGS-PON 或 GPON），OLT 侧的一个 50G-PON Combo 端口可同时接 50G-PON ONU、XGS-PON ONU 或 GPON ONU，3 种 ONU 都可同时正常工作。

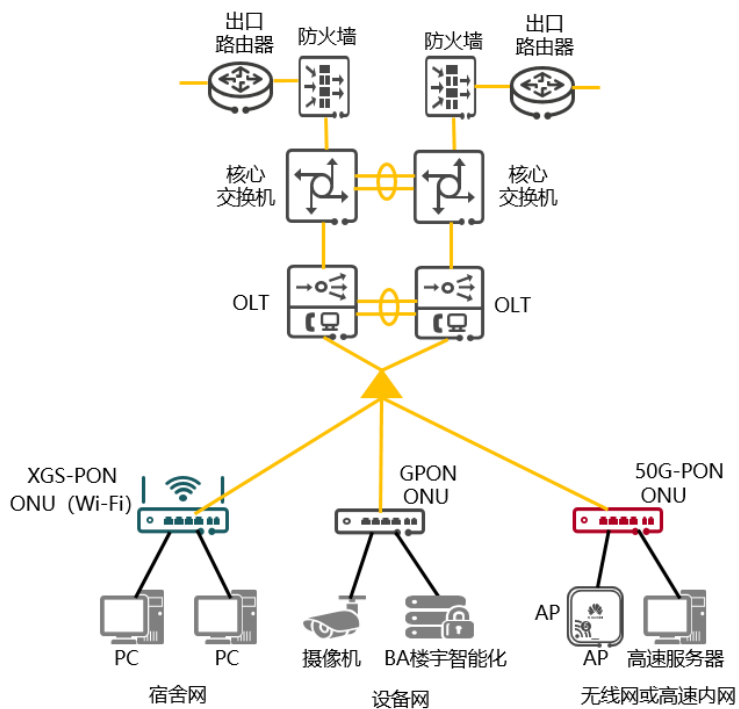


图 2-9 50G-PON 支持 Combo 模式

50G-PON 支持 Combo 模式后可将多张光纤网或多种业务统一到一套 ODN 网络中进行承载，实现多张网合一或多业务合一，减少了网络数量，降低了建设成本和维护成本，同时也实现了绿色节能。

F5G-A 园区中，50G-PON 可支持网络/业务的平滑演进，由于 50G-PON 的波长和 XGS-PON 或 GPON 波长不同，故可直接在原来已建设的 XGS-PON 或 GPON 网络中叠加 50G-PON，只需在 OLT 侧和 ONU 侧有源设备部分进行变更，无需变更中间的分光器和光纤等无源 ODN 网络，实现网络/业务的灵活扩容。

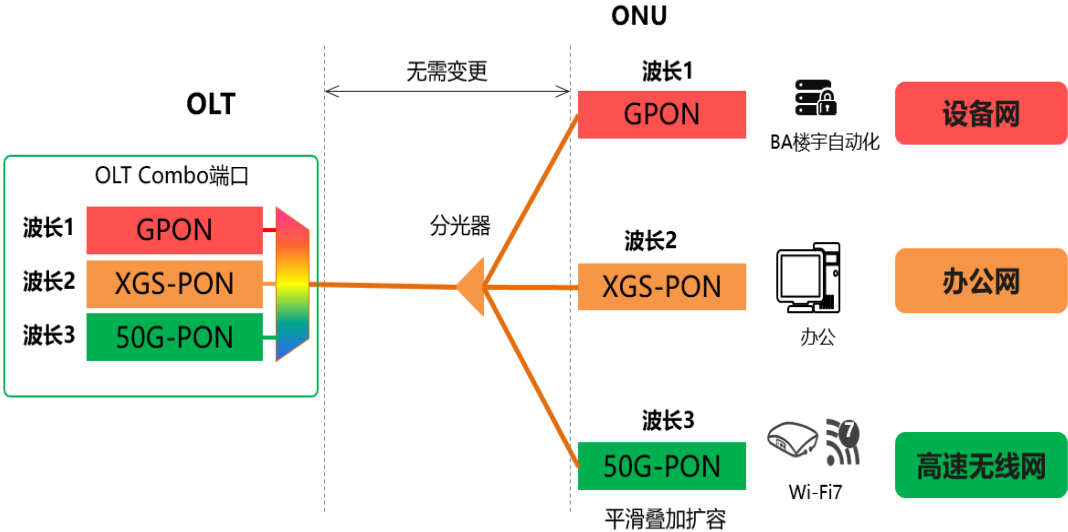


图 2-10 50G-PON 叠加在现有网络实现业务扩容

2.3.2 Wi-Fi 带宽提升

F5G-A 园区的无线 Wi-Fi 带宽提升为从 Wi-Fi 6 升级到 Wi-Fi 7, Wi-Fi 7 和 Wi-Fi 6 的差异如下表所示。

表 2-3 Wi-Fi 7 和 Wi-Fi 6 的差异

参数	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
标准名称	802.11ax	802.11be
标准颁布时间	2019	2023

参数	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
无线频段	2.4GHz, 5GHz	2.4GHz, 5GHz, 6GHz
最大速率/射频	9.6G bit/s (8×8)	23G bit/s (8×8)
MIMO 空间流	8×8	8×8
工作频宽	20/40/80/160 MHz	20/40/80/160/320 MHz
调制方式	1024 QAM	4096 QAM
信道聚合	单链路 Single-Link	双链路 Multi-Link
传输技术	OFDMA	OFDMA

Wi-Fi 7 标准进展。

Wi-Fi 系列标准是由电气电子工程师学会 IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）制定。IEEE 于 1990 年成立了 802.11 工作组并对 WLAN 进行了标准化，经过数十年的发展，802.11 已演进为一个标准的协议族系列。IEEE 在 2019 年正式发布了面向高密高并发场景的 802.11ax 标准（Wi-Fi 6），也称高效无线（High Efficiency Wireless, HEW）标准。

近年来，随着移动互联网、无线办公、VR/AR 沉浸式娱乐等新兴应用的蓬勃发展，用户对无线接入带宽的需求从千兆逐步升级到万兆，为适应带宽发展的需要，IEEE 在 2023 年发布了 802.11be 标准（Wi-Fi 7），也称极高吞吐量（Extremely High Throughput, EHT）标准。

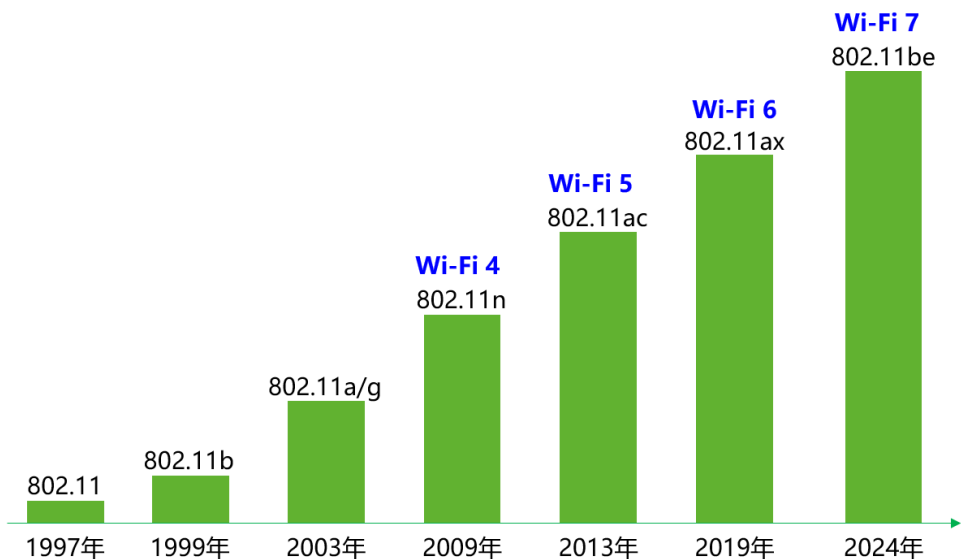


图 2-11 Wi-Fi 系列标准演进

Wi-Fi 的频谱

Wi-Fi 6 及以前的 Wi-Fi 代际使用的是 2.4GHz (2400MHz~2483MHz)、5GHz (5150MHz~5850MHz) 的频谱，Wi-Fi 6e 和 Wi-Fi 7 后增加了 6GHz (5925MHz~7125MHz) 的频段，更多的频谱可提升更高的带宽。Wi-Fi 的频谱使用情况如下图所示。

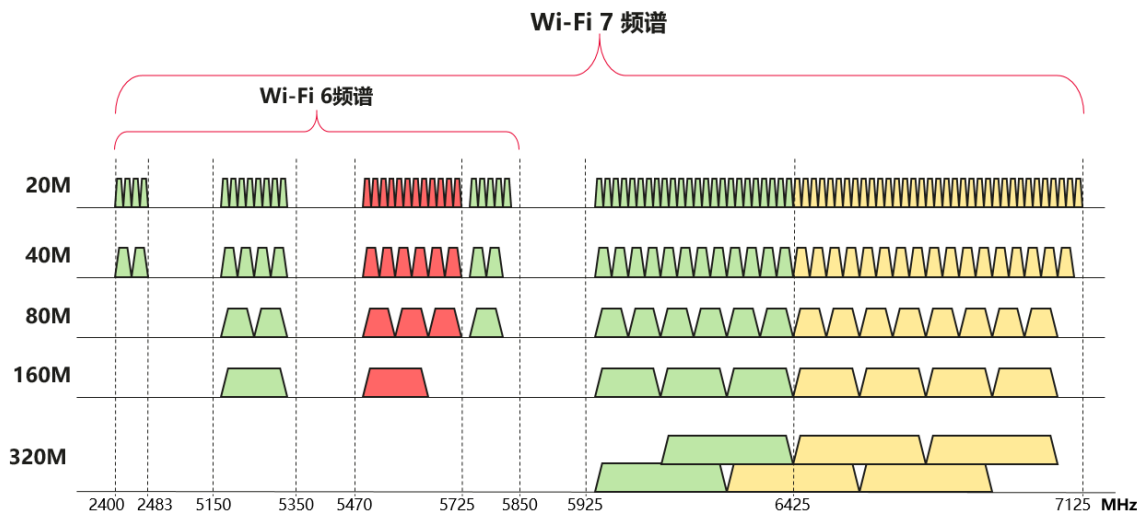


图 2-12 Wi-Fi 频谱

当前各个国家/地区开放的 Wi-Fi 频谱各不相同，如中国只开放了 2.4GHz 和 5GHz，暂未开放 6GHz 频谱，海外部分国家开放了低 6GHz 频谱，部分国家开放了低 6GHz 和高 6GHz 频谱，开放的频谱越多，用户可享受的带宽越高，各国家/地区当前 Wi-Fi 频谱开放情况如下表所示。

表 2-4 各个国家或地区 Wi-Fi 频谱开放情况

国家/地区	2.4GHz	5GHz	低 6GHz (5925~6425MHz)	高 6GHz (6425~7125MHz)
中国	可用	可用	未开放	未开放
英国、欧盟、日本、马来西亚、 阿联酋、卡塔尔、俄罗斯、智利、 新加坡、新西兰等	可用	可用	可用	未开放
美国、加拿大、韩国、巴西、阿 根廷、哥伦比亚、沙特阿拉伯、 秘鲁、哥斯达黎加、危地马拉等	可用	可用	可用	可用

Wi-Fi 的编码方式。

Wi-Fi 采用的是正交幅度调制 QAM（Quadrature Amplitude Modulation）的编码方式，该编码方式是以无线电波的不同幅度、相位的组合来表示数据信息。不同的 QAM 调制编码方式决定了在一个符号（Symbol）里所能承载的比特数量，一个符号（Symbol）内承载的比特数量越多，Wi-Fi 所能承载的带宽就越高。

Wi-Fi 6 采用最高 1024-QAM 调制，每个 Symbol 承载 10 比特信息。Wi-Fi 7 采用最高 4096-QAM 调制，每个 Symbol 承载 12 比特信息，Wi-Fi 7 的 QAM 调制编码能力是 Wi-Fi 6 QAM 调制编码能力的 1.2 倍。同等频谱下 Wi-Fi 7 的带宽是 Wi-Fi 6 的 1.2 倍。

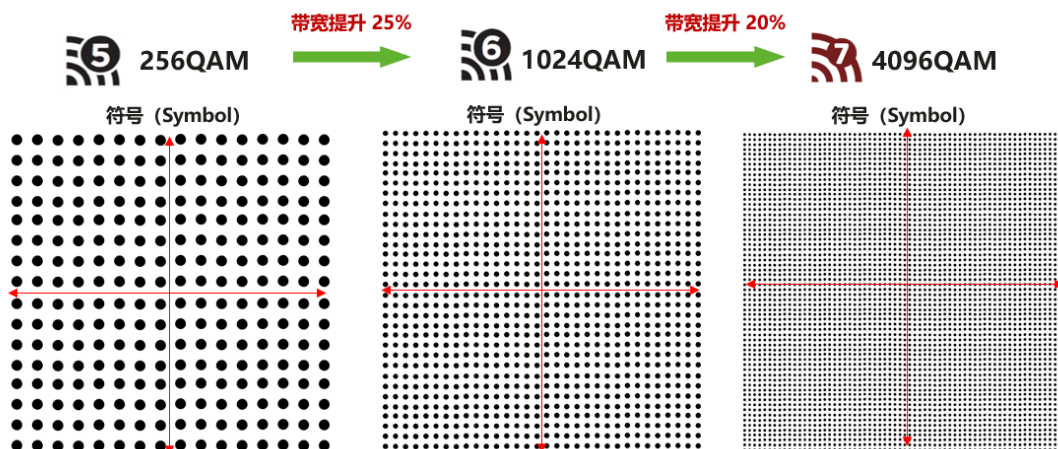


图 2-13 Wi-Fi 的编码方式

2.3.3 光纤链路低时延

F5G 园区 XGS-PON 和 GPON 技术的时延为 ms 级，为适应 XR 业务和工业生产 OT 网的需求，F5G-A 的 50G-PON 引入了单帧多突发等技术，时延从 ms 级缩短为 us 级，极大缩短了 PON 光纤线路上的时延。

GPON 技术是单帧单发技术（每帧 125us 的时间窗口内只发送数据一次），若错过第一帧的发送周期后需等 125us，等到第二帧的发送周期才能发送，故发送的最大时延将近 125us。而 50G-PON 支持了单帧多突发技术，在每帧 125us 的时间窗口内支持多次的发送数据机会，若错过第一帧的第一次发送机会，只需在第一帧的其他发送机会中发送数据即可，无需等到第二帧发送机会。50G-PON 在同一帧内可支持 32 次发送机会，即约每 4us 就有一次发送机会，故 PON 光纤线路上的最大时延可从原 125us 缩短至 4us。

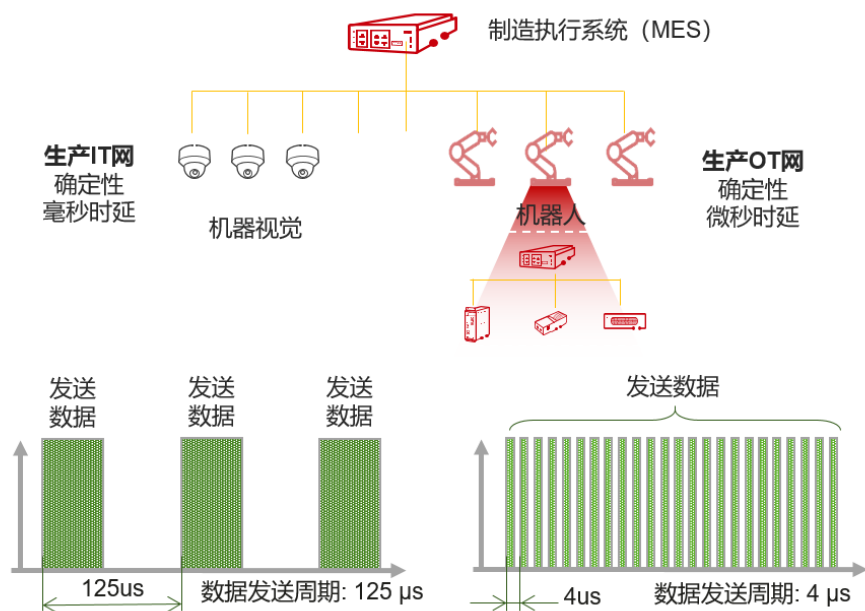


图 2-14 光纤链路上的低时延方式

2.3.4 Wi-Fi 低时延

Wi-Fi 7 技术和 Wi-Fi 6 技术相比，在低时延上进行了创新（如支持多链路 Multi-Link 功能），以降低 Wi-Fi 的传输时延。

Wi-Fi 7 相比 Wi-Fi 6 增加了多链路 Multi-Link 功能。Wi-Fi 6 只支持单链路 Single-Link 功能，ONU/AP 和手机终端之间只能建立一条 2.4G 或 5G 的链路；Wi-Fi 7 新增支持多链路 Multi-Link 功能，ONU/AP 和手机终端之间可同时建立多条链路（如一条 2.4G 链路和一条 5G 链路），两条链路可同时传输数据。

Wi-Fi 7 的多链路 Multi-Link 功能可提升 Wi-Fi 7 的空口带宽或降低 Wi-Fi 7 的空口时延。

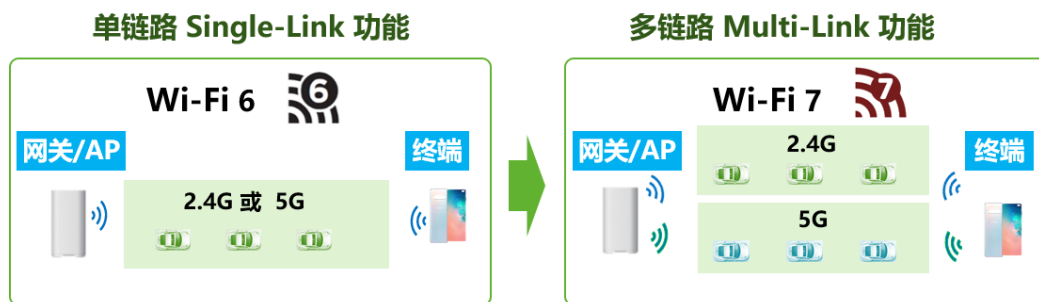


图 2-15 Wi-Fi 7 的 Multi-Link 功能

Wi-Fi 7 的多链路 Multi-Link 功能也有两种不同的模式来降低时延。多链路模式 1 为 2 条链路同时发送相同的数据，终端合并 2 条链路的数据，若某条链路出现丢包也可纠正，提升数据传输的可靠性，减少链路上的丢包重传，降低传输时延；多链路模式 2 为 2 条链路同时发送不同的数据，终端合并 2 条链路的数据，带宽相当于 2 条链路的带宽之和，提升传输带宽，降低传输时延。



图 2-16 Wi-Fi 7 的 Multi-Link 多种模式

2.4 F5G-A 园区的泛在智联特征

F5G-A 园区具有泛在智联的特征。F5G-A 的泛在智联特征包括万物互联、万物感知和万物智能。对外的体现为通感一体、光视联动和链路可视。

通感一体为光纤通信和光纤感知融合为一体，光视联动为光纤传感和视频监控融合为一体，链路可视视为无源的光纤网络可视化。



图 2-17 F5G-A 园区泛在智联特征

2.4.1 通感一体

F5G-A 绿色万兆全光园区支持光纤传感的功能，也支持通感一体的功能。

光纤传感器是光通过入射光纤送入调制区域，光波与调制区域内和外部的测量参数相互作用，将光波的光学特性变为调制信号，并送入光探测器获得测量参数用于感知测量。

分布式光纤传感系统将光纤作为传感器，基于瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射的产生机制，利用光时域反射（Optical Time Domain Reflectometer, OTDR）技术实现对光纤周边物理量（如温度、振动或应力等）进行测量、分析、监控和定位。

- 瑞利散射：因光纤介质折射率不均匀而产生的弹性散射，散射光与入射光中心频率相同，散射光随光纤产生散射处因受振动产生的形变量而周期性变化。常用于检测震动。

- 布里渊散射：入射光与光纤中的声学声子相互作用而产生的非弹性散射，散射光频率位于入射光中心频率两侧约 10~11GHz 位置，频率位置变化量与产生

散射处光纤的温度和应变的变化量相关，可用于检测气体等。

- 拉曼散射：入射光与光纤中的光学声子相互作用而产生的非弹性散射，散射光频率位于入射光中心频率两侧约 13THz 附近，散射强度变化量与产生散射处光纤的温度变化量相关，常用于检测温度。

光在光纤中传播时，由于玻璃晶格的瑕疵而产生部分背向散射，通过持续采样测量可形成背向散射光的强度和频率位置基线。当光纤某点的环境发生温度、振动或应力等变化时，会导致该点产生的背向散射光在强度和频率位置上发生比例性变化，通过对这些变化量的实时监控与定量测量，即可实现对光纤周边的温度、振动或应力等物理量的监控与测量。周期性向光纤中注入探测光脉冲，依据采样时间与发射探测光之间的时间差，即可定位出当前散射光在光纤中产生的位置，从而实现位置的准确定位。光纤传感如下图所示。

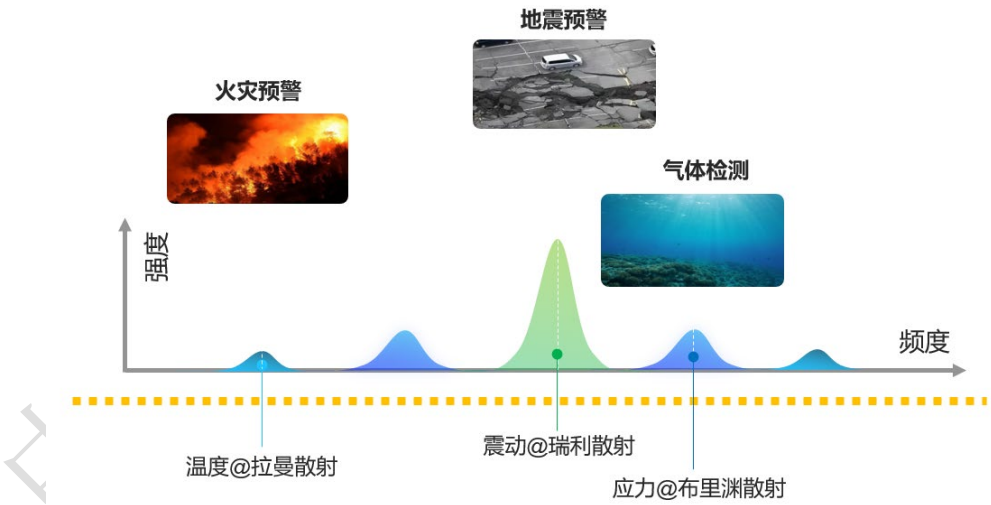


图 2-18 光纤传感

F5G-A 绿色万兆全光园区也支持 Wi-Fi 传感技术。

弥散在空中的无线电波是最佳的传感器。基于 Wi-Fi 的感知功能有着低成本、不间断、不侵犯用户隐私的优势，可支持室内定位、运动检测、呼吸频率检测等

价值应用。Wi-Fi 感知技术通常利用信号到达时间（例如 IEEE 802.11za）、信号传播路径的信道状态信息（例如 IEEE 802.11bf）变化模式来实现感知覆盖范围内人或物体的存在或运动信息。

受使用环境的影响，Wi-Fi 信号在传输过程中存在干扰、衰落、多径等效应，从而限制了 Wi-Fi 传感识别的精度和准确率。当前持续提升 Wi-Fi 感知的精度和准确率成为业界研究的热点。为提升 Wi-Fi 感知的精度，可通过匹配人体精细化特征的信号波形和序列设计，使得信号能反应人体特征的细微变化；也可使用多 MIMO 天线技术获取更多维的无线信道信息；或采用更短波长的毫米波来实现感知。为提升 Wi-Fi 感知准确率，可探索增强环境抗干扰技术以避免统计特征被干扰淹没，或探索多 AP 节点间同步与协调技术以获取整网更准确和丰富的信息，以支持更准确的光纤传感。

2.4.2 光视联动

F5G-A 绿色万兆全光园区可支持光视联动功能。对于大型高安全要求园区（如机场等）的周界安防应用，单一种类的周界检测技术难以同时满足全天候、零漏报、低误报的要求，需将多种感知技术融合，取长补短，更好提升周界防护水平。光视联动技术（光纤感知 + 视频监控）融合了光纤传感与智能视频监控功能，给周界防护带来多维感知、多维复核、精准定位等组合优势，为各种复杂周界场景提供了“零漏报、低误报、全天候、全覆盖”的防护检测能力，是构筑大型园区（如机场园区等）周界防护安全可靠的主要关键技术。

F5G-A 园区的光视联动如下图所示。

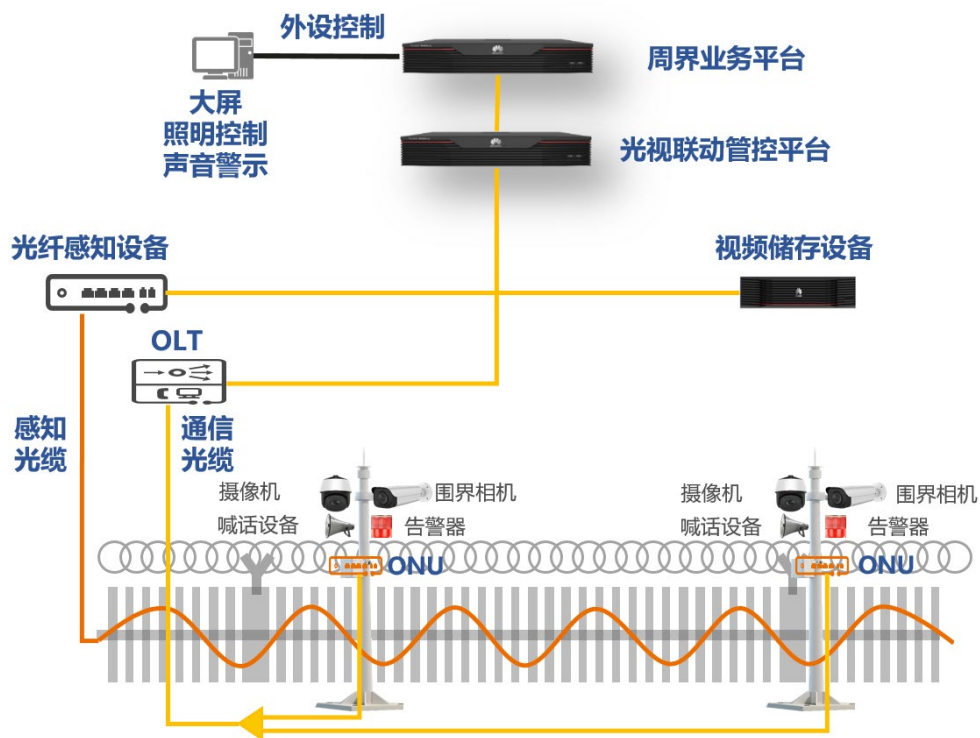


图 2-19 F5G-A 园区的光视联动

以机场的周界安防为例，在机场的围栏上挂网安装防区型或定位型的振动光纤传感光纤，对围栏进行监控；同时隔一段距离部署安装杆，在杆上安装摄像机、喊话设备、告警器和 ONU 等设备，配合光纤传感提升防护检测能力。光纤传感会对周界进行不间断实时检测，若检测到周界出现异常，通过上层的管控平台，通知摄像机实施进一步的视频采集，通过光纤传感和摄像机联动感知提升周界安防的能力。

光纤感知设备主要是发送和接收光纤信号，通过检测光纤信号变化，实现周界入侵检测功能。该设备需具备信号收发、采样、分析、判断能力。

OLT/ONU 设备：提供通信功能，实现摄像机的方向调整控制、视频信号回传。

视频存储设备：具备视频接收和存储、调阅功能，存储容量可根据业务要求的存储时长灵活配置；可根据管控平台对摄像机进行控制，进行云台转动、图片抓拍；能接收摄像机周界入侵告警，分发到管控平台。

光视联动管控平台实现光纤传感与智能视频监控功能的关联映射及协同动作，并对光纤传感和视频监控结果进行关联融合碰撞分析，输出最终光视联动检测结果。光视联动管控平台需提供光视联动一张图可视化应用；需提供震动光纤与摄像机预置位置关联配置，实现震动位置精准视频定位；需支持光纤入侵报警与视频入侵智能报警复核及上报；需支持光视联动综合告警事件闭环处理；需提供光视联动信息的存储、查询、检索以及趋势分析；需提供开放接口，实现北向数据共享能力。

周界业务平台（上层行业业务应用平台）可针对机场园区等不同业务场景，对接光视联动管控平台，调用光视联动管控平台输出的周界防护结果，提供满足客户需求的周界应用功能。

2.4.3 链路可视

F5G-A 绿色万兆全光园区可支持无源光纤链路的数据化和可视化。

F5G-A 园区可通过图像识别，实现无源光纤资源的百分之百精准录入。可通过手机扫码和 AI 图像识别算法，自动生成光纤、光分路器端口等各个部件/接口的连接关系，并可将相应的连接关系/对应关系送至管理系统中存储，且可通过图形化界面对外呈现。

F5G-A 园区也可通过光纤可视技术解决 ODN 资源管理不准和故障定位难的困难，实现资源管理数据准确和故障定位准确，提升 ODN 网络的建设、安装放号和维护的效率。

2.5 F5G-A 园区的绿色节能特征

绿色低碳是 F5G-A 绿色万兆全光园区的一个关键特征，F5G-A 绿色万兆全光园区相比 F5G 全光园区更节能，每比特的能耗更低。

F5G-A 绿色万兆全光园区的网络架构、所采用的光纤介质，所采用的 PON 技

术，以及运维模式都支撑了园区更绿色、更低碳。



图 2-20 F5G-A 园区的绿色节能特征

2.5.1 架构绿色

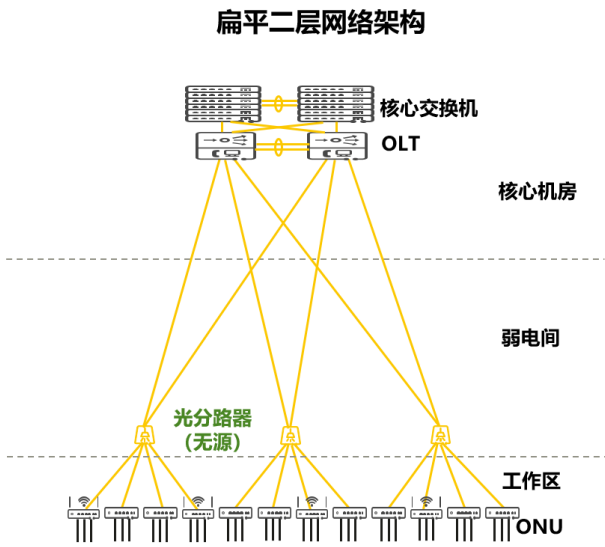
F5G-A 绿色万兆全光网园区具有网络架构绿色的特点,F5G-A 采用的 POL 无源光局域网为二层网络架构,简化了网络,减少了有源的汇聚网络设备,减少了网络层次,实现了架构绿色。

F5G-A 采用的 PON 网络,采用无源的光分路器替代有源的汇聚交换机,减少了有源汇聚层,减少了原汇聚层内的光-电-光转换功能,通过架构优化实现了节能减排。

F5G-A 绿色万兆全光网二层架构分别为 OLT 设备和 ONU 设备,F5G-A 无源光局域网中,OLT 设备和核心交换机一起部署于核心机房;ONU 部署于靠近最终的用户终端;中间采用纯无源的光纤和光分路器来进行连接,实现了网络扁平化。

网络架构的二层扁平化的好处为减少了中间有源的汇聚交换机设备,减少了

汇聚交换机的热耗及相应的空调等散热设备（或降低了所需空调的功率），从网络架构上优化了节能减排。



2.5.2 介质绿色

F5G-A 绿色万兆全光园区的水平布线采用光纤替代网线（又称 4 对对绞电缆），实现了光纤下沉。

F5G-A 绿色全光园区除了采用更绿色的架构外，还采用了更绿色的光纤传输介质。原来传统网络中从弱电间到工作区主要采用 Cat5e、Cat6、Cat6A 等网线，而 F5G-A 网络从弱电间到工作区的水平布线采用了光纤，待后续服务器、计算机、AP、摄像机都终端设备支持光接口后，可通过 SFP ONU 支持光纤直接到终端设备，实现一光到底。

光纤具有更绿色节能，更环保的特点。企业通信用光纤的主要原料为石英，而网线的信号传输介质主要原料为铜，铜矿开采和铜制品冶炼均需要消耗大量的自然资源和能源，产生大量碳排放，生产过程中也会对环境造成较严重的污染。采用光纤，有助于实现碳达峰、碳中和的“3060”双碳目标。



数据来源《中国铜冶炼节能减排现状与发展》

图 2-22 F5G-A 绿色万兆全光园区介质绿色

2.5.3 技术绿色

F5G-A 绿色万兆全光园区采用点对多点的 PON 技术，该技术和以前的点对点技术相比，存在绿色节能的优势。

F5G-A 绿色万兆全光园区采用的 PON 技术已在光纤到家庭场景中得到广泛使用，德国曾针对 FTTH（光纤）、铜线（VDSL）、无线（5G）等各种接入技术的功耗情况进行了比较，比较结果为采用光纤入户（FTTH）技术的功耗最低，碳排放最小，PON 光纤入户的平均每户功耗相比采用 VDSL 铜线接入有约 50% 左右的降低。F5G-A 全光网是碳排放最低、最环保的网络。

F5G-A 绿色万兆全光园区的一个 OLT PON 端口可通过无源光分路器接到多个 ONU 的 PON 端口（一个 OLT PON 端口可接 32 个甚至 64 个 ONU 的 PON 端口），PON 网络支持整网时钟同步，OLT 要求 ONU 在规定的时间内按需发送数据，实现整网业务数据的有效管理，以达到整个网络绿色节能的目的。例如在 1:32 分光的情况下，相比以前的点对点方案，OLT 侧的 PON 光接口减少了 31 个光接口及光模块，实现了更高效的绿色节能。

F5G-A 绿色万兆全光园区采用 50G-PON，50G-PON 带宽比 XGS-PON 提升 5 倍，而功耗增加不大，每比特功耗大幅降低。

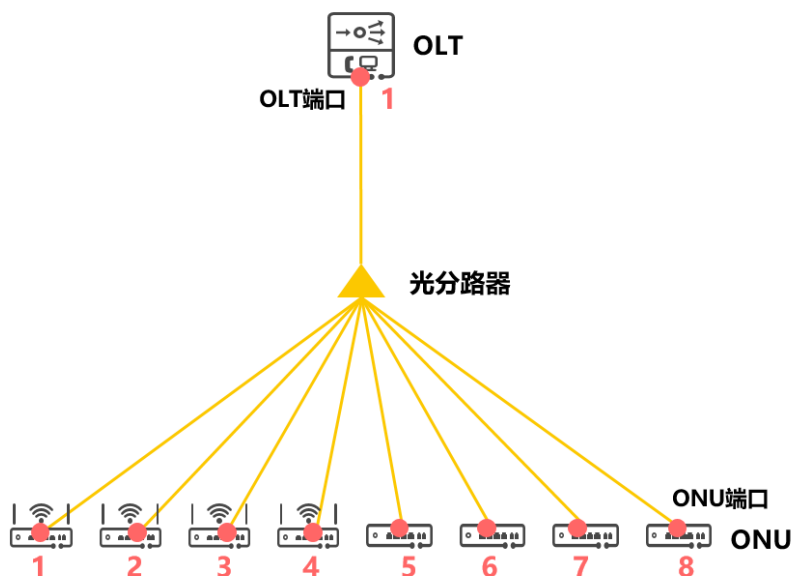


图 2-23 F5G-A 绿色万兆全光园区技术绿色

2.5.4 维护绿色

F5G-A 绿色万兆全光园区采用点对多点的 PON 技术，简化了末端 ONU 设备的管理，减少了管理维护节点，减少了维护工作量，实现绿色维护。

F5G-A 绿色万兆全光园区的 OLT 设备是整个 PON 网络的管理中枢，通过 OMCI(光网络终端管理控制接口, Optical network terminal Management and Control Interface) 协议对整个 PON 网络的 ONU 设备进行管理和配置；无需在 ONU 设备进行本地业务和数据配置，ONU 设备也无需配置独立的管理 IP 地址。

由于 OLT 设备采用了 ONU 设备的集中管理机制，所以 F5G-A 绿色万兆全光园区可极大减少网络的管理节点数量。所有 ONU 的数据配置统一由 OLT 设备进行管理，OLT 完成 ONU 设备配置数据的保存和下发，F5G-A 绿色万兆全光园区

支持 ONU 的即插即用和即换即通的功能。

OLT 设备实现了对 ONU 设备的集中管理，OLT 设备或者网络管理设备上都可支持整个网络数据的快速收集和处理，可在网络管理设备上支持对整个网络的部署、告警、健康度等各种报表进行收集、显示和快速处理。实现整个园区网络的故障实时感知，高效管理，保障业务实时在线。

F5G-A 绿色万兆全光园区极大提升了网络的部署和管理维护的效率，减少了现场的维护工作量，减少了相关的碳排放，达成了绿色节能的目的。

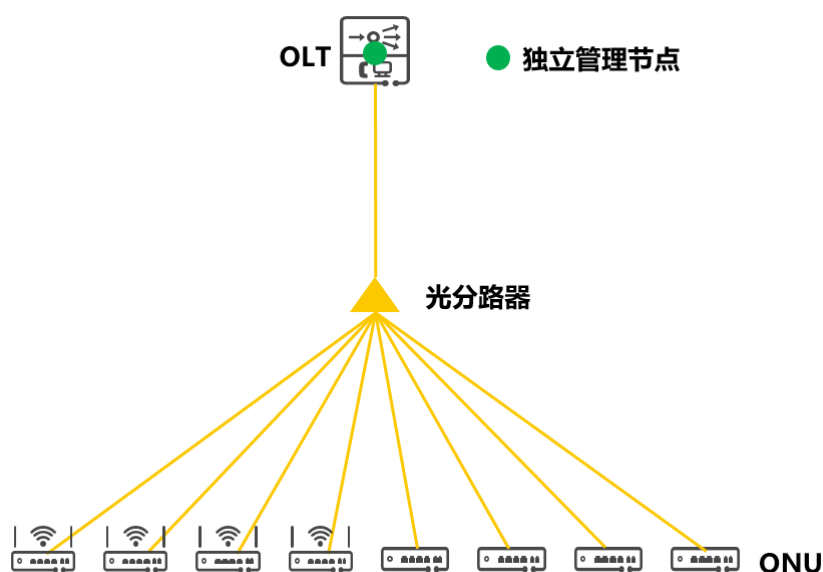


图 2-24 F5G-A 绿色万兆全光园区技术绿色

第三章

F5G-A 绿色万兆全光园区典型应用



3.1 F5G-A 园区典型应用

F5G 技术凭借光进铜退、扁平架构、ODN 无源汇聚等优势已在各个园区场景中广泛应用，且在教育园区、医疗园区和制造园区应用最为广泛，用户对 F5G 也提出了更高的创新要求。

F5G-A 技术相比 F5G 技术，在增强固定带宽、全光联接、体验可保障、绿色敏捷全光网、实时韧性联接、光感知和可视化等特征上进行了增强，满足更多客户的诉求，提升客户的体验，适用范围更广。本章节以应用最广泛的教育/医疗/制造园区为例，针对 F5G-A 的典型应用进行详述。

3.2 教育园区 F5G-A 应用

3.2.1 趋势与要求

随着互联网的发展，云计算，大数据，人工智能的逐步应用，教育逐步从传统教育向智慧教育变革，智慧教育在全面关注“人、教育”的基础上，依托云计算、大数据、人工智能、全光网络、VR/AR、物联网等新一代信息技术打造智能化、感知化、泛在化的教育新模式，通过个性化、精细化、沉浸式学习教学，提升课堂教学效果，增强学生学习兴趣，提升学习效率。

智慧教育是教育信息化发展的新阶段，智慧教育发展需要具有智慧的学习时空环境。近十年来，智慧校园信息化建设飞速发展，当前全国各级各类约 54 万余所学校的网络多媒体教室数量已超过了 580 万间，实现信息技术与教育教学（包括智慧教学、智慧管理、智慧评价、智慧科研和智慧服务）的深度融合。此外以虚拟现实（VR）、人工智能（AI）为代表的新一代信息技术也为加快推进教育数字化转型和智能升级提供了重要支撑。

随着 VR 产业的成熟，世界各国针对教育领域的 VR 应用进行了战略布局，推进 VR 技术在教育领域的应用。

2022 年 11 月中国工信部、教育部等五部委发布了《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划(2022-2026 年)》，明确指出要深化 VR 在教育行业的深度融合，推进构建虚拟教室、虚拟实验室等教育教学环境。

美国教育部推出了国家科技教育计划 NETP，并陆续发布相关文件推动 VR 技术在教育领域的应用，旨在解决教育公平问题。

英国同样关注 VR/AR 技术在职业教育中的前景，提倡使用 VR 相关技术为学生提供学习体验和技能培训。

韩国政府发布的 VR 相关政策主要聚焦于建构产学研合作体系，以期使用 VR/AR 技术推进职业教育与产业融合发展。

但 VR 技术的大规模应用还存在不少挑战，需要推动技术架构的创新，以促进 VR 教育教学常态化应用，如推动云控网联技术架构简化时空限制，推动算网协同保障大宽带/低时延的网络传输，推动云-管-边-端分层协同，将 VR 教学带入每一间教室，推动虚拟实验教学和虚拟仿真实训从小规模试点走向大规模常态化应用。

3.2.2 基本组网

教育 F5G-A 绿色万兆全光园区按照学校的场景要求，可划分为智慧教室，智慧办公室、全光宿舍、智能安防系统等几大部分。智慧教室所接入的终端设备主要包括教学大屏、VR 头盔、摄像机等；智慧办公室所接入的终端设备主要包括办公计算机、打印机和通过 AP/ONU 接入各种 Wi-Fi 终端等；全光宿舍所接入的终端设备主要包括个人计算机、手机/Pad 等移动终端。

教育 F5G-A 园区需考虑 VR、云教学和裸眼 3D 等新业务，满足新业务的带宽和时延要求。教育 F5G-A 园区组网方案如下图所示。

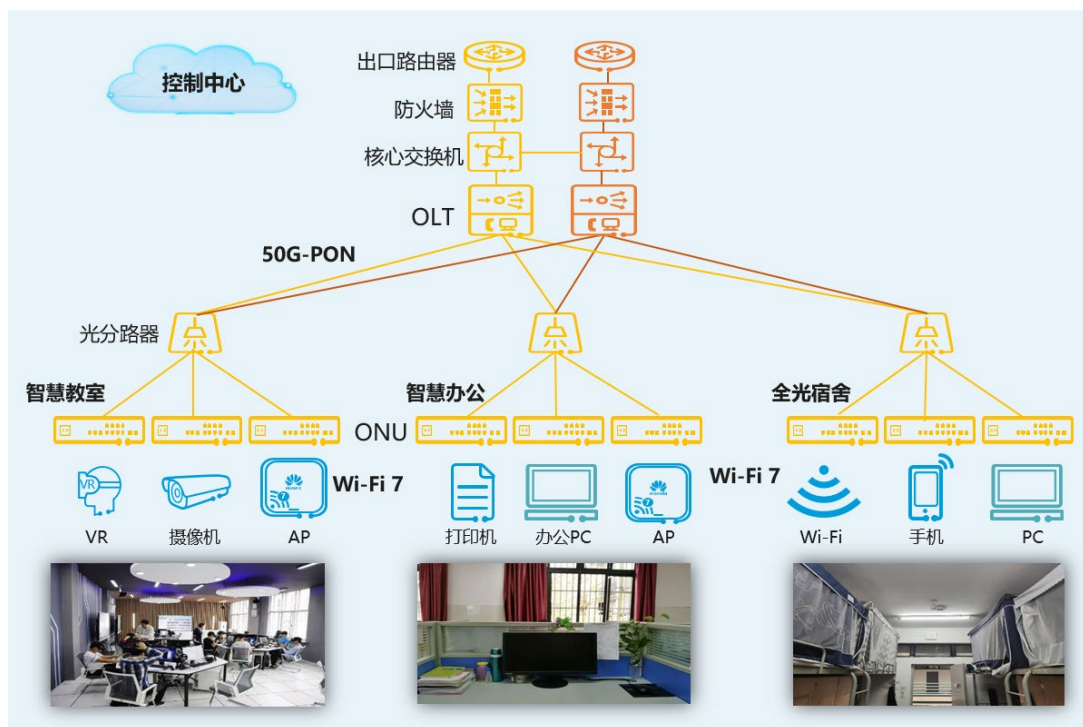


图 3-1 教育 F5G-A 园区组网方案

VR、云教学、裸眼 3D 等业务对承载网的带宽及时延要求较高，需根据应用场景的带宽要求采用 50G-PON 等技术进行承载。

表 3-1 XR、裸眼 3D、云教学的理论计算码率

业务	单视点分辨率	帧率	压缩比	码率
XR 直播 (FoV 180°)	单目 4K (3840×3840) 双目 8K (7680×3840)	30~60fps	1:300	68-135Mbps
裸眼 3D 小屏 (Pad/手机)	2K (2560×1440)	60fps	1:350	29Mbps
裸眼 3D 电视大屏 (16k)	2K (2560×1440)	60fps	1:350	868Mbps
传统云教学	4K (3840×2160)	60fps	1:300	~38Mbps
极速云教学/沉浸式 XR 云教学	4K (3840×2160)	60fps	1:40 (极速编码)	~300Mbps
深度沉浸式 XR 3D 云教学	超 4K (3680×3140)	60fps	1:40 (极速编码)	~800Mbps

3.2.3 VR 智慧实验室

VR 智慧实验室是教育 F5G-A 绿色万兆全光园区的一个典型应用场景。

在普教的初中实验教学课堂，学生们学习化学、物理、生物等课程，开始进行各种操作实验，但某些实验操作存在危险性（如某些化学品易燃易爆，某些化学品有强腐蚀性，某些化学品有毒，某些实验需要使用高压强电等），故学校已开始采用 VR 实验来替代传统的实验教学，以降低操作的危险性。

在高教的实训课堂，学生们在进行数控机床或医学手术等模拟训练教学时需使用专业的仪器设备或实训材料等，但专业仪器设备或实训材料数量有限，为增加学生的操作频度，提升学生的熟练度，学校已开始采用 VR 实训来代替传统的实训教学，提高教学质量。

VR 智慧实验室采用 F5G-A 的 50G-PON 进行承载，ONU 安装于教室内，甚至下沉至实验桌，实现光纤到桌面，提供高带宽、低时延，高可靠的回传通道。

VR实验，F5G-A高速承载

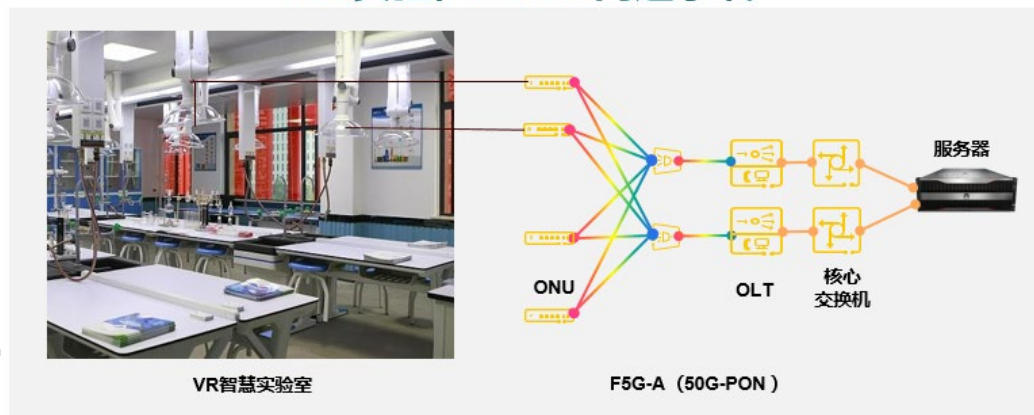


图 3-2 VR 实验典型场景

3.2.4 XR 智慧教室

XR 智慧教室是教育 F5G-A 绿色万兆全光园区的另一个典型应用场景。

随着教学方式的演进，在某些科目（如宏观上的宇宙知识、微观上的原子构

筑、以及史前远古生物的教学等）采用传统的 PPT 展示等模式已逐渐不能满足学生的要求，需要采用更身历其境的教学方式。XR 智慧教室应运而生，在教室中可通过 VR 教学进行例如宇宙知识等的授课，可采用 AR 教学进行汽车内部结构等的授课等，另也存在跨教室或跨地域的互动教学，传统的大屏互动已逐渐不能满足沉浸式体验教学的要求，需通过 XR 等虚拟出可远程感知的互动教学，提高教学效果。

XR 教室所需的带宽高（大于千兆），时延低（小于 1ms），故需采用新一代 F5G-A 的 50G-PON 进行承载。

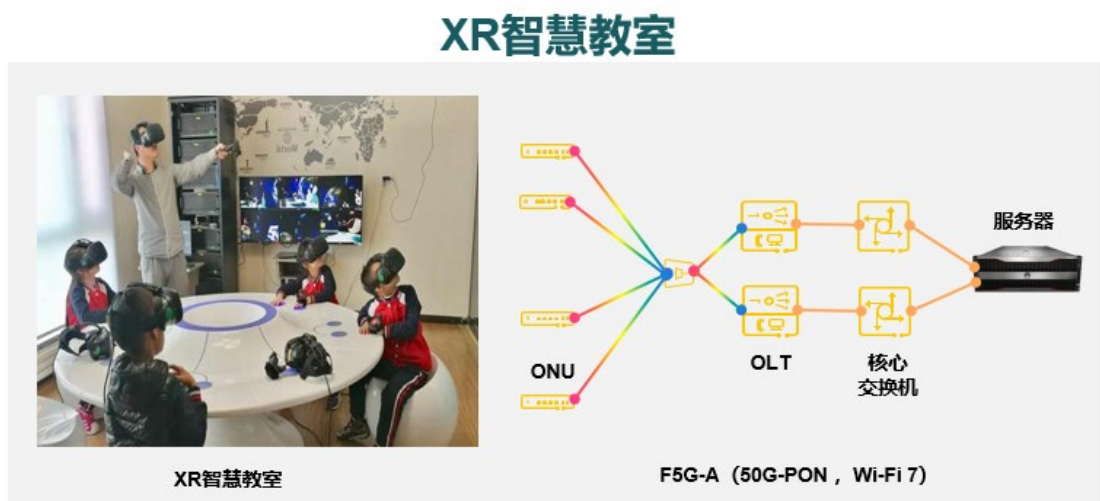


图 3-3 XR 智慧教室场景

3.3 医疗园区 F5G-A 应用

3.3.1 趋势与要求

健康是人民的基本需求，也是社会经济发展的基础。随着我国社会经济的飞速发展和人民生活水平的提高，人类疾病谱和生态环境等逐渐改变，对医院医疗服务水平的要求也越来越高，要求尽快提升就诊效率及信息化水平，实现居家康养。故需进一步强化全民健康信息联通应用、提升医疗业务的信息化水平、发展“互联网+医疗健康”服务、推进医院的智慧化管理等卫生健康业务的“数字化”

转型，同时也对医院信息网络基础设施的支持能力提出了更高的要求。

近年来我国医院信息化行业迅猛发展，中共中央、国务院以及国家卫生健康委员会等相关主管部门陆续出台了多项政策性文件，成为促进我国智慧医院建设发展的催化剂。《“健康中国 2030”规划纲要》中明确提出了要建设医疗健康信息化服务体系，促使医疗质量管理与控制信息化平台能够实现全行业全方位精准、实时管理与控制，持续协助医院改进医疗质量和医疗安全。伴随着频发的政策红利带来了业务软件功能的爆炸式发展和医院万物互联的管理趋势都将对网络基础设施提出更高的要求。随着医疗 3D 高清阅片、远程手术 VR 示教、远程监护、远程会诊等要求的提升，原来的带宽网络需考虑升级到更高带宽、更低时延的光纤网络。

以 F5G/F5G-A 为代表的光纤网络通信技术具有发展速度快、技术更新迭代周期短、对业务应用支撑显著等特点。我国政府高度重视光纤网络技术的发展，在《“双千兆”网络协同发展行动计划（2021-2023 年）》中更是明确提出要加强核心技术研发和标准研制，鼓励龙头企业、科研机构等加大超高速光纤传输、下一代光网络技术等的研发投入，深入参与国际标准化工作，加强团体标准研制，形成我国“双千兆”网络技术核心竞争力。

3.3.2 基本组网

医疗 F5G-A 绿色万兆全光园区采用 F5G-A 技术进行建设，按照医院的场景要求，医院可以考虑设置院级会诊中心，使用端可划分为诊室/医技科室（含医疗影像室、阅片室等），智慧病房和手术室等几大部分。诊室所接入的终端设备主要包括 PC 和 AP 等，医技科室所接入的终端设备主要包括 PC 和放射仪器，智慧病房所接入的终端设备主要包括 Wi-Fi 接入终端、医疗仪器和输液治疗(IoT)等，手术室所接入的终端设备主要包括医疗仪器、AP 和远程示教设备等。

医疗 F5G-A 园区需考虑三维影像阅片、全光手术室和数字化病理等新业务/

新场景，医疗 F5G-A 园区组网方案如下图所示。

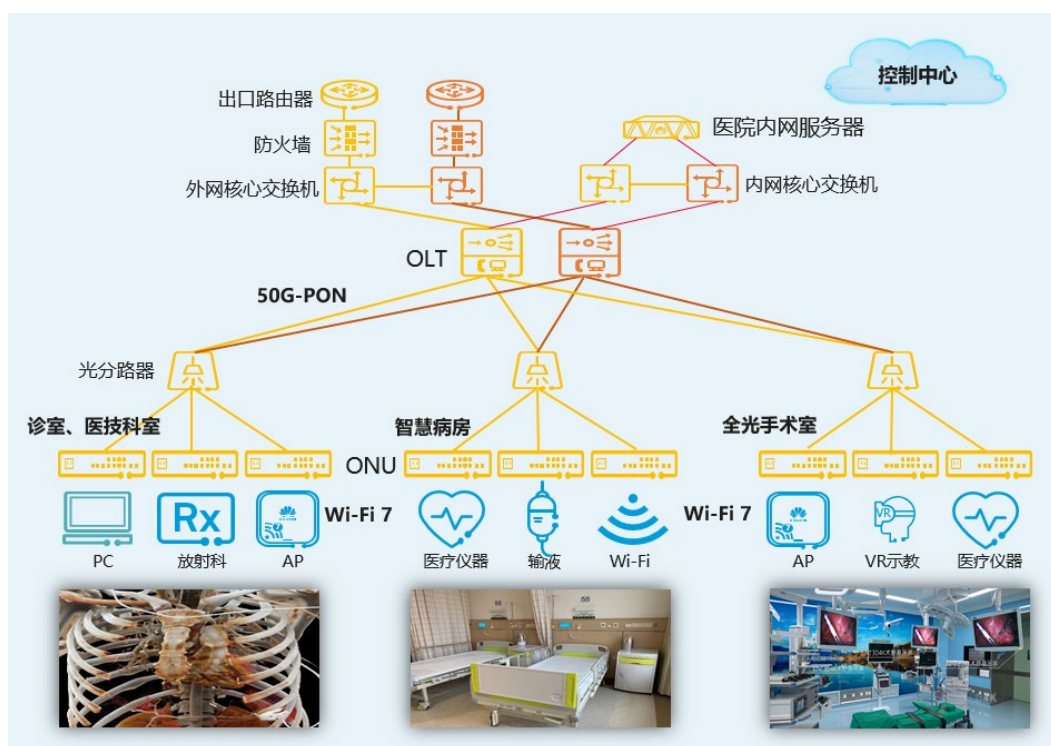


图 3-4 医疗 F5G-A 园区组网方案

三维影像阅片、手术示教等业务对带宽的时延的要求较高，平均带宽已超过 2Gbps，最大带宽可达 10Gbps，需根据场景所需带宽考虑采用 50G-PON 等技术进行承载。

3.3.3 三维影像阅片

智慧医院三维影像阅片是医疗 F5G-A 园区的一个典型应用场景。

随着医疗影像技术向更清晰，更智能化方向发展，医疗影像数据越来越大，三维医疗影像因为更清晰，更容易诊断病灶，更容易和病患沟通病情，已逐渐成为医疗影像发展的趋势。一次高端 CT 检查影像数量会达到 2000~5000 张，影像大小达到 1G Bytes~2.5G Bytes，MRI 检查的影像数量达到 500~2000 张，影像大小也高达 2.5G Bytes，当期部分医院存在医疗影像数据上传影像系统慢、医生阅片速度慢（几十秒到几分钟）、影像设备三维信息不能直接应用于临床诊疗等问

题，特别是三维影像的生成依赖于病人影像数据全部下载完成才能进行重建，极大影响医生看病效率和病人等候时间。

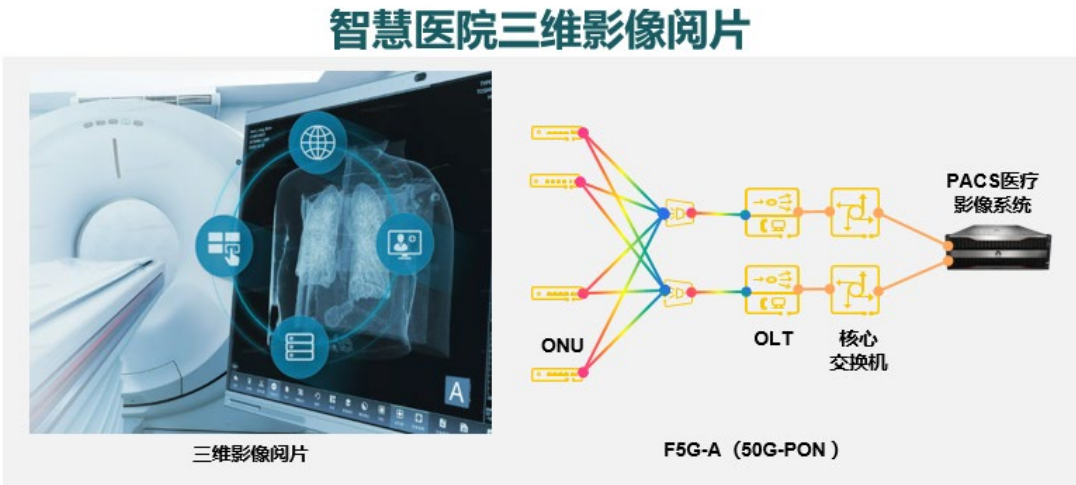


图 3-5 智慧医院三维影像阅片

F5G-A 全光三维影像阅片方案基于 F5G-A 全光网络和高性能存储等技术，采用超万兆专线网络技术一跳直达数据中心，具有超高带宽和极低时延，一套数百张组图的医疗影像文件秒级加载，实现秒级阅片；依托人工智能算法和三维影像快速重建技术，可将 CT/MR 等数据进行实时的智能三维重建，可随时发起音视频会议，影像阅片双向标注同步进行，在医生诊断阅片、医患沟通、教学讨论、远程会诊等方面有较为广泛的应用。

表 3-2 F5G-A 全光网络三维影像阅片传输时延

分类	医疗影像技术	单张图像大小	图像数量	图像大小	F5G-A 传输时延
X 射线	DR	20~30MB	1	20~30MB	0.02s
	普通 CT	512KB	500~800	300~400MB	0.32s
	高端 CT	512KB	2000	1GB	0.8s
	心脏加强 CT	512KB	2000~5000	1GB~2.5GB	2s
	导管 DSA	20~50MB	15~30	1GB~1.5GB	1.2s

分类	医疗影像技术	单张图像大小	图像数量	图像大小	F5G-A 传输时延
超声成像	B 超	0.1MB	20	2MB	0.0016s
磁共振成像	MRI	512KB	500~2000	1GB~2.5GB	2s
核医学成像	PET-CT	1MB	100~200	200MB	0.16s
光成像	光导纤维内镜	0.2MB	50~100	10~20MB	0.016s

3.3.4 全光手术室

智慧医院全光手术室是医疗 F5G-A 园区的另一个典型应用场景。

随着医疗技术数字化的快速发展，数字化手术室、手术示教、手术直播、手术转播等已逐渐成为趋势，手术室中 4K/8K 术野摄像机拍摄的超高清手术影像视频需要无损传输，手术示教/手术直播/手术转播等场景需超高的网络带宽和超低时延。

F5G-A 全光手术室方案基于 F5G-A 的 50G-PON 技术，支持 10GE 或更高速率接入术野摄像机，可满足 4K/8K 术野摄像机的超高清视频的无损传输，满足院内/院外的手术示教/手术直播等应用。

智慧医院全光手术室

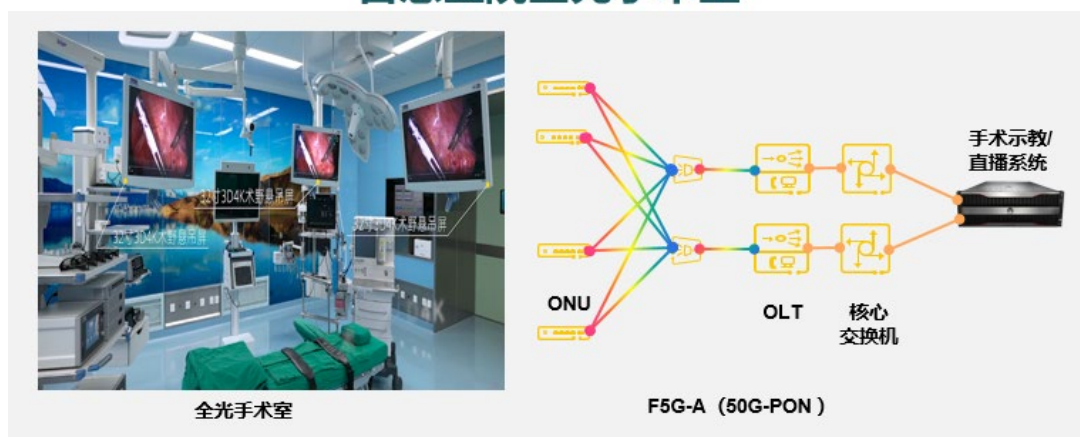


图 3-6 智慧医院全光手术室

4k 和 8k 术野摄像机对影像传输的带宽和传输时延要求较高，需要采用 F5G-

A 技术进行承载，4k/8k 术野摄像机的带宽及时延要求如下表所示。

表 3-3 术野摄像机带宽及时延要求

分类	影像带宽要求	传输时延要求
4K 术野摄像机	2Gbps	< 1ms
8K 术野摄像机	10Gbps	< 1ms

3.3.5 数字化病理

病理学是医学之本，病理学是研究疾病的病因、发病机制、病理变化、结局和转归的医学基础学科，是连接临床学科的桥梁型学科。病理学诊断已成为疾病诊断的金标准。数字化病理（Digital Pathology，DP）是数字成像技术与病理学的结合应用，是一种基于图像的动态环境，能够采集、管理和解释从数字化切片生成的病理信息。数字化病理从诞生到走向临床，是对病理诊断的一次全面数字化重塑，改变了百年来以显微镜为基本观察工具的病理学工作模式，广泛应用于数字化智能诊断、病理远程会诊、多学科会诊、AI 辅助诊断、远程教学等，它在解决病理资源匮乏和病理医生不足、提高病理诊断能力、促进医疗质量提升等方面发挥巨大作用。数字化病理为病理诊断方式带来颠覆性变革的同时，也存在着调阅速度慢、存储成本高、数据共享难等亟需解决的痛点。

病人单次数字化病理检查会产生 6~10 个切片，每个切片扫描文件 1~3GB，病理扫描文件总大小约 6~30GB。传统方案病理检查阅片速度慢，阅片卡顿，经常出现马赛克以及几十秒时延卡顿，严重阻碍医生的病理检查效率。

采用 F5G-A 的超万兆入室、万兆到医疗仪器的方案，可以实现病理切片扫描文件的秒级上传，医生秒级病理阅片，及病理的远程会诊、远程教学等应用场景，大大提升医院的病理科效率，促进医院数字化进程。

数字化病理

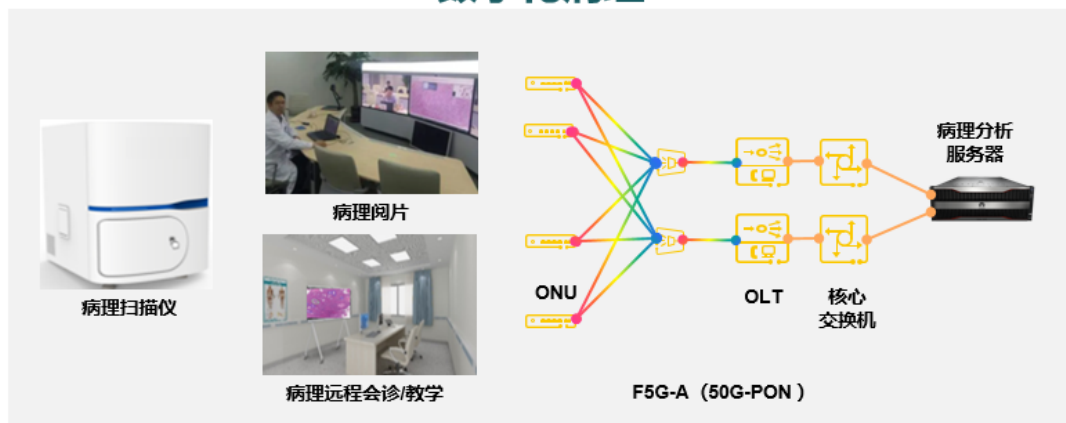


图 3-7 数字化病理

3.4 制造园区 F5G-A 应用

3.4.1 趋势与要求

随着全球新一轮科技革命和产业变革突飞猛进，新一代信息通信、生物、新材料、新能源等技术不断突破，并与先进制造技术加速融合，为制造业高端化、智能化、绿色化发展提供了历史机遇。同时，全球科技和产业竞争更趋激烈，大国战略博弈进一步聚焦制造业，美国“先进制造业领导力战略”、德国“国家工业战略 2030”、日本“社会 5.0”等以重振制造业为核心的发展战略，均以智能制造为主要抓手，力图抢占全球制造业新一轮竞争制高点。

我国的智能制造已转向高质量发展阶段，正在推动产业技术变革和优化升级，推动制造业产业模式和企业形态根本性转变，以“鼎新”带动“革故”，提质增效，减少资源能源消耗，畅通产业供应链，实现“碳达峰”和“碳中和”，力求迈向全球价值链中高端。智能制造园区是指生产过程采取智能制造模式的园区，其以“园区+互联网”为理念，将新一代信息技术（物联网、全光网、大数据、云计算等）与制造活动各个环节（设计、生产、管理、服务等）相融合，对各项设施、服务进行升级，其发展趋势包括设备数字化、互联互通、生产作业可视化等。

规划制造业园区应注重绿色发展、智能产业集群和信息基础设施建设，大力发展支持园区各项数字化、信息化业务的 F5G-A 全光通信网络。

3.4.2 基本组网

制造 F5G-A 绿色万兆全光园区采用 F5G-A 技术进行建设，可根据网络要求按生产网络、视频监控网络、办公网络等进行建设。制造 F5G-A 园区组网方案如下图所示。

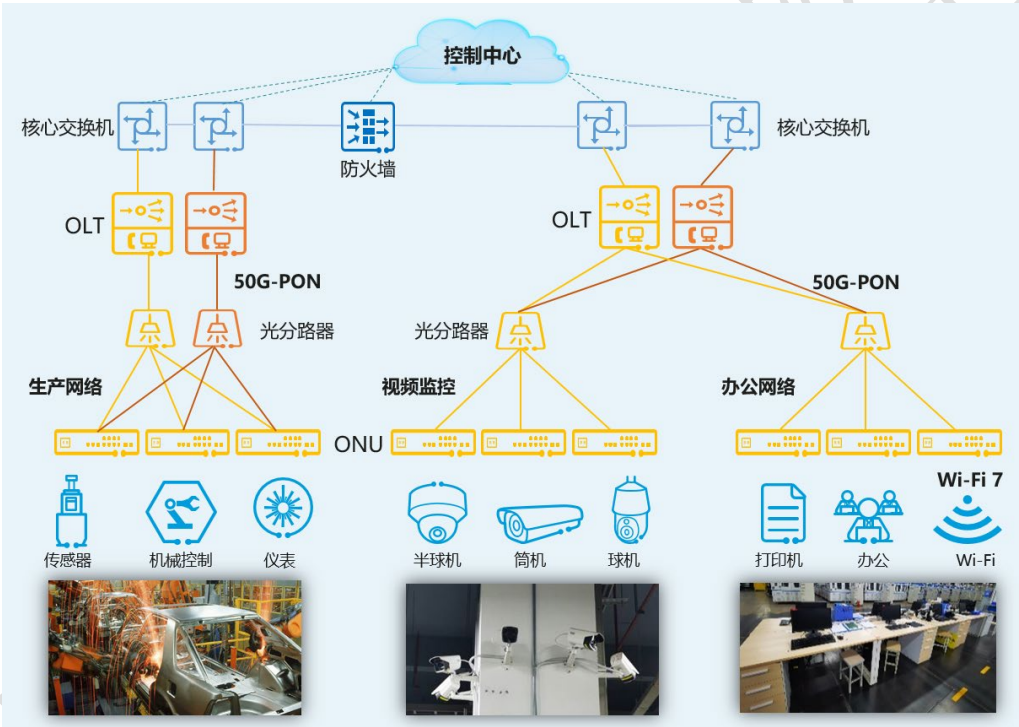


图 3-8 制造 F5G-A 园区组网方案

F5G-A 全光通信网络具有高带宽、低延时、安全性能好等特点，可很好支持智能工厂数字化信息化业务，通用的智能工厂数字化信息化业务如下表所示。

表 3-4 通用的智能工厂数字化信息化系统

主系统名称	子系统代表
智能生产类系统	制造执行系统（MES）、先进规划排程系统（APS）

主系统名称	子系统代表
智能物流类系统	仓储管理系统（WMS）、物流执行系统（LES）
智能设计类系统	产品数据管理系统（PDM）、产品全生命周期管理系统（PLM）
智能管理类系统	企业资源计划系统（ERP）、供应链管理系统（SCM）
智能服务类软件	个性化定制平台、远程运维平台
集成优化类系统	信息化集成平台（系统）

国家针对智能制造领域也制定了详细的智能制造标准体系，工业网络是支撑各种行业应用的关键基础设施，智能制造标准体系结构如下图所示。

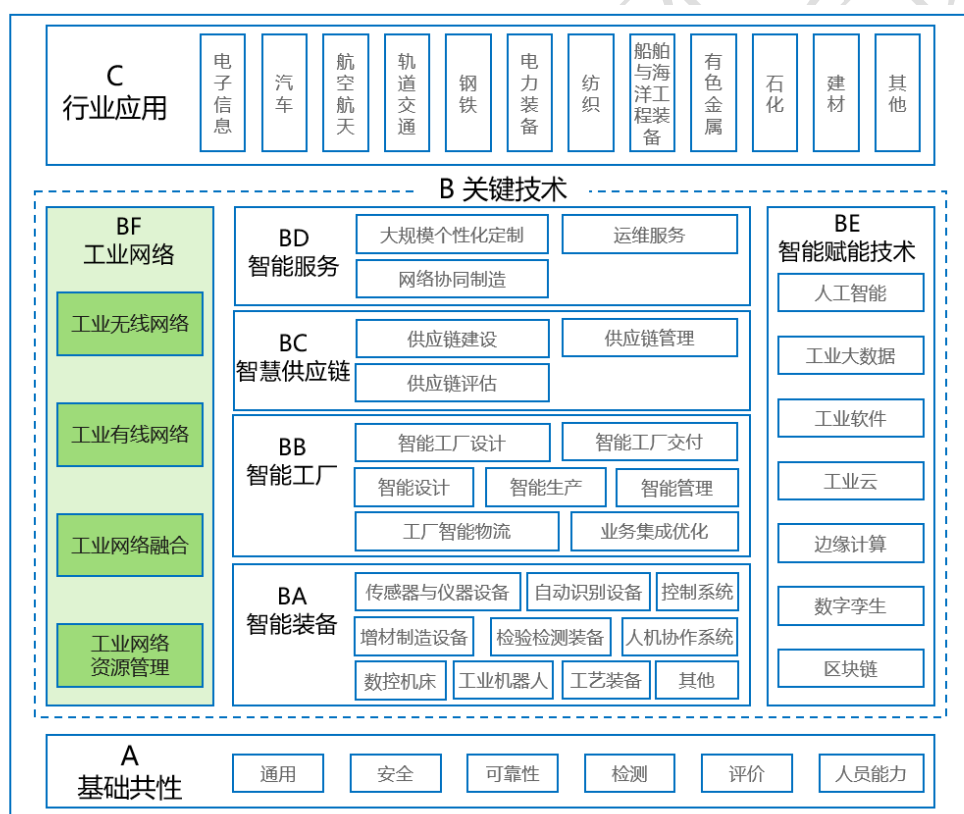


图 3-9 智能制造标准体系结构图

工业网络主要包括工业无线网络、工业有线网络、工业网络融合和工业网络资源管理等 4 个部分，主要用于满足工厂不同系统层级内部及之间的低时延、高可靠等需求，实现工业网络架构下不同层级和异构网络之间的组网，规范网络地

址、服务质量、无线电频率等资源使用技术要求及网络运行管理。F5G-A 可很好匹配工业网络的要求。

3.4.3 AOI+AI 智能检测

AOI + AI 智能检测是制造 F5G-A 绿色万兆全光园区的一个典型应用场景。

自动光学检测 AOI（Automatic Optic Inspection）是基于光学原理来对焊接生产中遇到的常见缺陷进行检测的技术,AOI通过摄像机自动扫描PCB,采集图像,测试的焊点与数据库中合格的参数进行比较,经过图像处理,检查出PCB的缺陷,并通过显示器或自动标志把缺陷显示/标示出来,供维修人员维修。但传统AOI存在准确率不高（约80%）、开发适配难/适应性弱、经验无积累/大规模推广难等问题,引入AI后,可依托AI积累专家经验,提升检测能力,检测准确率可提升至99%以上。

AOI 采图设备（如超高清工业相机）获取到的图像需通过网络传输至 AI 推理服务器,由于其带宽要求很高（通常要求提供 1280×1024 像素×24 比特,60 帧的动态视频,单产线需多台工业相机,总带宽大于 5Gbps），所以需采用 F5G-A 的 50G-PON 技术进行承载。

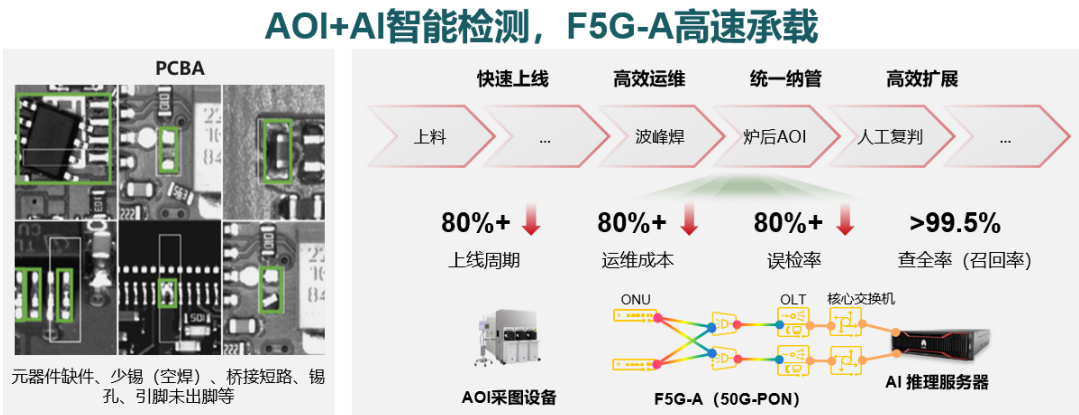


图 3-10 AOI+AI 智能检测，F5G-A 高速承载

3.4.4 远程可视化操控

随着经济的发展，制造工厂的规模、自动化程度、材料与工艺的革新都会导致危险源和隐患的多样性与复杂性，导致灾害规模不断扩大，事故灾难性后果日益严重。如制造工厂重型机器多，货物繁多，生产环境复杂，若要安全生产需部署先进、可靠、全方位的安全监控预警技术设施。视频监控成为必不可少的科技辅助手段，前端摄像机对视频信号进行采集，并将高清视频帧实时传输至边缘计算侧进行巡检分析或进行二次分析复检，边缘计算采用端边协同的大模型智能分析算法，及时预测/发现问题。使用 F5G-A 全光网络能提供高带宽，低时延，稳定传输的特性，可在智能安防分析系统中保证算法分析的快速和准确性。

对需远程操作的大型工厂或仓库（如钢铁厂中的吊运天车），操作员需根据传输回来的视频数据信号进行远程的吊运货物、装槽、卸车、配合检修等作业，对基础设施的传输带宽和传输时延要求很高。高清摄像机配合 F5G-A 网络可有效保障摄像机视频传输的稳定性以及实时性，实现回传视频及时/画质流畅，为天车操作员提供第一视角的实时高清视频，保障了远程操控精准、实时操控性，提升安全性及作业效率。

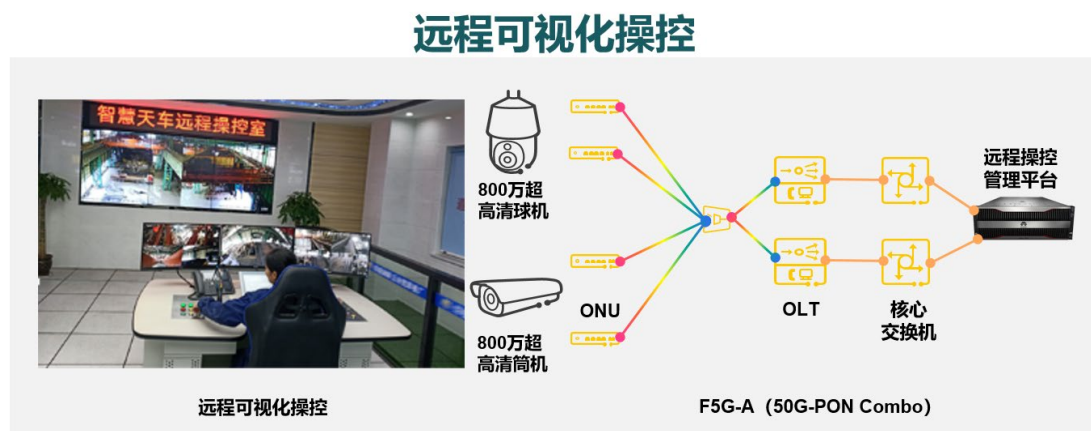


图 3-11 远程可视化操控

3.4.5 智能无人物流系统

智能无人物流系统是制造 F5G-A 绿色万兆全光园区的另一个典型应用场景。

当前制造园区开始大量使用自动导向车 AGV（Automated Guided Vehicle，也称为自动导向搬运车、自动引导搬运车），AGV 通常采用自动或人工方式装载货物，按设定的路线自动行驶或牵引着载货台车至指定地点，再用自动或人工方式装卸货物。AGV 经历了轨道式导引技术、地标技术、自主移动技术等多个代际，对管理调度、多机协同、可靠性和定位精度上有更高更复杂的要求。

当前智能无人物流系统中采用的 AGV 可采用 F5G-A 的 50G-PON + Wi-Fi 7 网络实现控制，依托 Wi-Fi 7 的高带宽、低时延、双发选收高可靠等技术，更好支持智能工厂的业务。



图 3-12 智能无人物流系统，F5G-A (50G-PON + Wi-Fi 7)

第四章

产业现状和展望



4.1 产业现状

以 F5G/F5G-A 为代表的全光网络带来了介质的革命，发展迅速，国家发改委、工信部等也在发文推动“千兆光网”的光纤宽带网络升级。2020 年 4 月，国家发改委首次明确新型基础设施的范围，提出推动新型基础设施发展，促进光纤宽带网络的优化升级。2020 年 6 月，由国务院参事、国家发改委原副主任徐宪平领衔，四位院士加盟，10 余家著名研究机构和 20 余家企业共同参与编纂的《新基建：数字时代的新结构性力量》一书正式发行，系统阐释 F5G 新基建的内涵及战略意义。

2021 年开始，国家的十四五规划和政府报告都在强调加大以 10G PON 为主的千兆光网和 5G 网络的建设力度，促进城市光纤网络全覆盖，加速光纤网络扩容提速，积极推进光纤接入技术演进，建设高速信息通信网络。并提出加快万兆无源光网络（10G-PON）在产业园区、商务楼宇和医疗卫生机构等重点场所的规模部署，推动全光接入网进一步向用户终端延伸，推动实现光纤到桌面、光纤进车间。

F5G 自 2020 年发布以来，受到企业客户、设计院客户、集成商、设备供应商等上下游环节的青睐和好评，F5G 技术在教育、医疗、办公、酒店、制造等各行各业中批量部署。F5G 在长距离，大范围空间，高密度、大规模信息点接入、运维与环境要求严格的园区中逐渐采用并取得了良好的应用效果。在重点场景形成突破的同时，F5G 全光园区凭借高网速、无死角、广覆盖、易维护、易扩容等多种优势，形成了新的产业思考，开始凝聚为产业级别的价值选择。

F5G 全光园区在推广应用的过程中，聚集了一批业内的头部产品供应商和集成商，并引领行业向纵深发展。例如以中海地产等为代表的地产商是智慧园区与楼宇领域重要的技术集成商和运营商；以华为和诺基亚贝尔为代表的通信企业是光网络产业中主要的设备和解决方案提供商；以长飞光缆光纤为代表的园区布线厂商；此外以神州数码集团等为代表的集成商/服务商为全光园区的业务融合提供

系统集成服务。

F5G 全光网推广时间还不长,前期还存在着缺乏统一的工程标准和交互规范,各厂家解决方案存在差异,无法互补等问题,给产业大规模发展形成根本阻碍。在此背景下,2019 年华为、上海诺基亚贝尔、长飞光纤光缆、神州数码集团、中海物业集团以创始成员身份联合发起成立“绿色全光网络专业委员会 (Optical Network Alliance, 简称: ONA)”。ONA 的成立,标志着全光网产业链龙头企业从以前的松散的联合发展,转向紧密的联盟合作关系。

绿色全光网络专业委员会 (ONA) 旨在汇聚产业力量,全面促进全光网络产业的深度协同、繁荣产业生态、推广行业示范应用、培育产业人才,持续汇聚产业力量,引领全光网络产业快速、健康、可持续的向前发展。ONA 由华为担任第一届理事长单位,邀请产业链各环节的顶尖企业参加,以推动行业标准和技術合作、拓展联盟伙伴、打造人才培育和认证平台为主要目标。快速扩大组织生态,积极吸纳在全光网领域各环节具有影响力的企业加入。

4.2 产业展望

F5G 全光网已成为未来园区发展的一个关键路线与方案,并跟随着园区需求的演进而持续演进。2023 年 11 月 ETSI 重磅发布《F5G Advanced 代际标准》(《F5G Advanced Generation Definition》),正式定义了 F5G Advanced (简称 F5G-A) 的代际标准,探讨了从 F5G 到 F5G Advanced 的演进路径。《F5G Advanced 代际标准》是固定网络技术代际标准发展的重要里程碑。

在体验方面,随着 XR 技术的快速发展、XR 终端成熟度提升及千兆网络规模部署, XR 产品的部署和体验不断提升。F5G-A 持续在带宽和时延上进行创新,持续增大带宽和降低时延,更好地提升了 XR 等业务的体验。

在应用场景方面,随着全光网络在教育、医疗、办公、制造、公路、航空等各种场景上的逐渐推广使用, F5G-A 也在满足各场景应用上进行了持续的创新和

扩展，包括在 PON 和 Wi-Fi 上进行了创新，提升网络的韧性和可靠性。此外，随着用户的增加，F5G-A/F5G 全光网络也在易用性（例如在网络的可视化和网络的自动化）上进行持续创新，降低使用人员的技术要求，促进 F5G-A/F5G 在各行各业的快速推广应用。

在产业的参与者方面，除了前面提到的产业链 Top 企业外，越来越多的学校、医院、制造工厂等企事业单位已大力投入到 F5G-A/F5G 全光网的应用和推动上，群策群力，让 F5G-A/F5G 全光网越来越完善，繁荣产业。

在行业政策方面，我国已开始开启“十五五”的相关规划，启动了数字化发展新征程，F5G-A 全光园区建设也将进入新阶段。F5G-A 绿色万兆全光园区将沿着数智化、融合化、绿色化的路线持续发展演进。F5G-A 全光网络可在智慧园区建设中发挥着积极作用。

F5G-A 全光网络将成为数字经济的网络底座，融合创新，赋能千行百业，繁荣产业生态，更好地满足人民群众对美好生活的期待，赋能千行百业数字化转型发展。

缩略语

缩略语	英文全称	中文全称
3D	3 Dimensions	三维
50G-PON	50-Gigabit-capable Passive Optical Network	50Gbit/s 无源光网络
AAA	Authentication-Authorisation-Accounting	鉴权、授权、计费
ADN	Autonomous Driving Network	自动驾驶网络
AGV	Automated Guided Vehicle	自动导向搬运车
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AOI	Automatic Optic Inspection	自动光学检测
AP	Access Point	接入点
APS	Advanced Planning and Scheduling	先进规划排程系统
AR	Augmented Reality	增强现实
CT	Computerized Tomography	计算机断层扫描
DBA	Dynamic Bandwidth Assignment	动态带宽分配
DP	Digital Pathology	数字化病理
DSA	Digital Subtraction Angiography	数字减影血管造影
eFBB	Enhanced Fixed Broadband	增强固定宽带
EHT	Extremely High Throughput	极高吞吐量
ERP	Enterprise Resource Planning system	企业资源计划系统
Ethernet	Ethernet	以太网
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准协会
F5G	The 5th Generation Fixed Networks	第五代固定网络
F5G-A	F5G Advanced	第五代增强固定网络
FFC	Full-Fiber Connection	全光联接
FOV	Field Of View	视场角
FTTH	Fibre To The Home	光纤到家

FTTM	Fiber To The Machine	光纤到机器
FTTO	Fiber To The Office	光纤到办公室
FTTR	Fibre To The Room	光纤到房间
GAO	Green Agile Optical-network	绿色敏捷全光网
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network	吉比特无源光网络
GRE	Guaranteed Reliable Experience	可保障品质的体验
HEW	High Efficiency Wireless	高效无线
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气电子工程师学会
IoT	Internet of Things	物联网
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟
KQI	Key Quality Indicator	关键质量指标
LES	Logistics Execution System	物流执行系统
MES	Manufacturing Execution System	制造执行系统
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	多输入多输出
MPM	Multi-PON Module	多模 PON 模块
MR	Mixed Reality	混合现实
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	窄带物联网
OAM	Operation Administration and Maintenance	操作维护管理
ODN	Optical Distribution Network	光分配网络
oDSP	Optical Digital Signal Processing	光数字信号处理
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	正交频分多址
OLT	Optical Line Terminal	光线路终端
OMCI	Optical network terminal Management and Control Interface	光网络终端管理控制接口
ONA	Optical Network Alliance	绿色全光网络专业委员会
ONU	Optical Network Unit	光网络单元
OSV	Optical Sensing and Visualization	光感知与可视化
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	光时域反射
OTN	Optical Transport Network	光传送网
OXC	Optical Cross-connect	光交叉连接
PC	Personal Computer	个人计算机

PCB	Printed Circuit Board	印制电路板
PDM	Product Data Management	产品数据管理系统
PLM	Product Life cycle Management	产品全生命周期管理系统
PMD	Physical Media Dependent	物理媒质相关
POL	Passive Optical Local Area Network	无源光局域网
PON	Passive Optical Network	无源光网络
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
RRL	Real-time Resilient Link	实时韧性联接
SCM	Supply Chain Management	供应链管理系统
SFP	Small Form-factor Pluggable	小型可插拔
SLA	Service-Level Agreement	服务等级协议
TC	Transmission Convergence	传输汇聚
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
TMF	TeleManagement Forum	电信管理论坛
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议
VDSL	Very-high-data-rate Digital Subscriber Line	超高速数字用户线路
VR	Virtual Reality	虚拟现实
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线保真
WMS	Warehousing Management Service	仓储管理系统
XGS-PON	10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network	10Gbit/s 对称无源光网络
XR	Extended Reality	扩展现实

声 明

本白皮书著作权属于ONA（中国电子节能技术协会绿色全光网络专业委员会）所有。转载、摘编或以其他方式使用本设计说明的全部或部分内容的，应注明来源，违反上述声明者，著作权方将追究其相关法律责任。

ONA 介绍

ONA 于 2019 年 10 月 22 日正式成立，中文名称中国电子节能技术协会绿色全光网络专业委员会，旨在搭建全光网络产业的沟通协同平台，繁荣产业生态、消除产业瓶颈、推动行业标准落地、推广行业示范应用、培育产业人才，**打造无处不在的光联接（OPTICAL NETWORK ANYWHERE）**，做大全光网络产业空间，推动产业快速、健康、持续发展。ONA 成立后获得产业上下游生态伙伴大力支持，产业头部企业、顶级设计院、优质集成商及典型行业客户纷纷加盟，目前价值会员超过 200 家。ONA 推动《无源光局域网工程技术标准》、《智慧医院无源光局域网工程技术规程》等 10 个标准发布，推动将无源光局域网首次纳入国家标准设计图集，参与 20+国家/行业/团体标准制定；发布《F5G 全光园区技术应用白皮书》、《智慧医院 F5G 全光网应用产业白皮书》、《智慧医院 F5G 全光网设计指南》、《智慧教育 F5G 全光网设计指南》、《F5G 全光网络精品案例集》等多项产业成果，打造 24 家全光网络示范点，快速提升了 F5G 全光网络产业影响力。

新时代、新发展、新网络，ONA 积极推动 F5G 普及，推进 F5G-A 绿色万兆全光园区启航，携手产业力量为政府、企业数字化转型和高质量发展做出贡献！

ONA 官网：www.onalliance.org



中国电子节能技术协会
绿色全光网络专业委员会

