



家庭光纤组网技术方案探讨

马智勇

(中国电信股份有限公司上海分公司, 上海 200120)

摘要: 针对“家庭内部组网段”的光纤组网介绍了基于 ITU-T 标准的“G.hn 光组网方案”、参考 PON 接入网技术的“类接入网方案”、基于 IEEE 标准的“光以太网 P2P 方案”, 从技术特点、标准化、产业链发展情况等方面进行了分析、对比和展望。针对“FTTH 入户段”, 阐述了网关位置优化、入户光缆延伸成端的价值和实施建议, 试验数据显示其可以显著提升家庭网关 Wi-Fi 网络覆盖范围和无线接入速率体验。

关键词: 家庭组网; 光纤; G.hn; 光以太网; PON; 入户光缆成端

中图分类号: TN929

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021101

Discussion on technical solutions to fibre-optic home networking

MA Zhiyong

Shanghai Branch of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200120, China

Abstract: Technical solutions for fibre-optic home networking, including ITU-T standard G.hn, PON access networks, and IEEE fibre-optic Ethernet, were introduced, and they were analyzed and compared from the aspects of technical characteristics, standardization, industrial chain, future development, etc. Proposals on home gateway location and drop fibre cable termination were also given, and the experiment results show that the proposed solution can improve the Wi-Fi coverage of the home gateway and the wireless access rate.

Key words: home networking, fibre, G.hn, fibre-optic Ethernet, PON, drop fiber cable termination

1 引言

工业和信息化部《2020 年前三季度通信业经济运行情况》数据显示, 截至 2020 年 9 月国内 FTTH/FTTO (fibre to the home/fibre to the office, 光纤到户/光纤到办公室) 用户数量为 4.45 亿户, 占固定互联网宽带接入用户总数的 93.5%, 1 000 Mbit/s 及以上接入速率的固定互联网宽带接入用户达 4 250 000 户。根据上海市经济和信息化委员会、

市通信管理局《上海“双千兆宽带城市”加速度三年行动计划(2021—2023 年)》要求, 2022 年上海市新增家庭及企业宽带用户套餐原则上 500 Mbit/s 起步, 2023 年上海市新增家庭及企业用户套餐原则上 1 000 Mbit/s 起步, 至 2023 年年底, 千兆用户达到百万级。家庭千兆宽带接入的普及已触手可及, 家庭内部网络亟待能力提升以支持千兆及以上速率传输。

国内 5G 移动通信系统工作在至少 2.1 GHz 频段, 其无线信号室内穿墙衰减大, 在当前的基

站密度下, 5G 还不足以稳定承载家庭千兆接入。Wi-Fi (wireless fidelity, 无线保真) 工作于 ISM (industrial scientific medical, 工业科学医学) 开放频段, 易受穿墙衰减、信道拥挤、邻居干扰等因素影响, 即便是使用 Wi-Fi 6 也无法保证能够稳定实现家庭千兆骨干网。Wi-Fi 更适合用于在家庭骨干网络的末端提供无线高速接入。

家庭内部“有线”网络的承载能力是家庭宽带速率体验的基石。光纤因其线径小(易部署)、寿命长(超 20 年)、成本低(约 0.2 元/m)、高容量(可至少高达 Tbit/s 级)等特点, 使其胜过电话线、电力线、同轴线、以太网线, 成为更优的家庭内部有线组网介质。

本文将家庭内部有线网络划分为“FTTH 入户段”和“家庭内部组网段”分别讨论, 如图 1 所示。“FTTH 入户段”是 FTTH 入户光缆进入用户住宅后, 至家庭网关之间的光缆延伸段。“家庭内部组网段”是家庭网关至用户住宅内各组网终端、各个房间网络接入点或用户终端之间的有线网络延伸段。下文首先针对“家庭内部组网段”的光纤组网分析讨论了基于 ITU-T 标准的“G.hn 光组网方案”、参考 PON (passive optical network, 无源光网络) 接入网技术的“类接入网方案”、基于 IEEE 标准的“光以太网 P2P 方案”, 然后针对“FTTH 入户段”的入户光缆成端位置也给出了优化建议。

2 家庭内部组网段的光纤网络方案

2.1 G.hn 光组网方案

G.hn 是由 ITU-T (ITU Telecommunication

Standardization Sector, 国际电信联盟电信标准化部门) 编制, 利用电话线、同轴线、电力线、光纤等传输介质实现家庭内部组网的国际标准, 包括 G.9960、G.9961 等系列规范书^[1-2]。G.hn 定义了域 (domain) 的概念, 将组网节点分为域主节点 (domain master)、域从节点 (node), 如图 2 所示。域主节点负责从节点准入、传输介质的访问、QoS (quality of service, 服务质量)、域间通信等域管理功能。G.hn 各节点以 TDM (time division multiplexing, 时分复用) 方式, 通过 MAC Cycle (media access control cycle, 介质访问控制周期) 调度实现各节点对传输介质的共享, 如图 3 所示。每个介质访问控制周期都包含多个时隙, 其中至少一个时隙被分配给域主节点用于传输域管理信息和 MAP (medium access plan, 介质访问规划), 其余为 TXOP (transmission opportunity, 数据传输时机), 被分配给各个从节点发送数据。

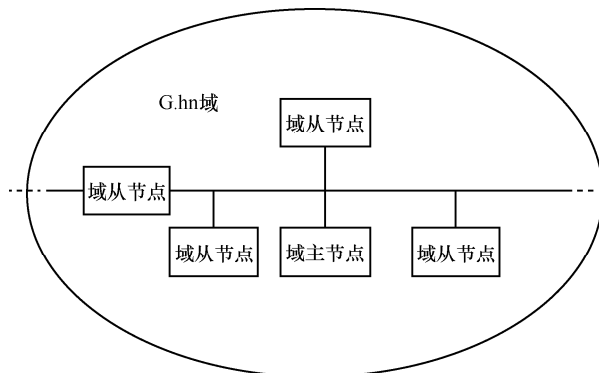


图2 G.hn 网络架构参考模型

在光纤组网方面, G.9960 在 Annex F 中定义了基于塑料光纤的组网技术参数, 包括: 中心波

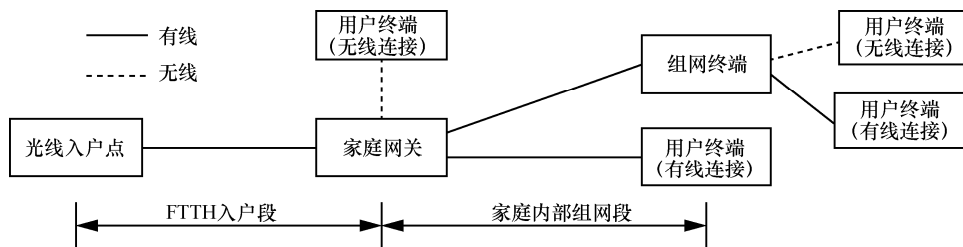


图1 FTTH 场景下家庭内部网络组成示意图

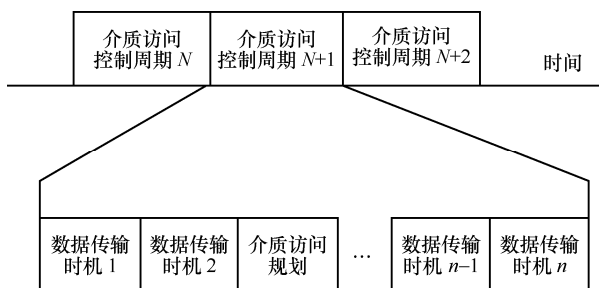


图3 G.hn 介质访问规划控制的示意图

长为 640~660 nm, 最大光发射功率为 0 dBm, 最小接收灵敏度为 -20 dBm, 以及子载波间隔 195.3125 kHz 分别对应 512 个子载波的 100 MHz 带宽、1 024 个子载波的 200 MHz 带宽的两套 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing, 正交频分复用) 传输配置参数等。理论上, G.hn 光纤组网物理层传输速率可超过 1 Gbit/s。

2012 年, Genexis、Teleconnect 等多方合作, 采用芯径为 1 mm 的 SI-POF (Step Index POF 阶跃折射率塑料光纤), 首次实现了 G.hn 光纤组网^[3]。受限于产业链条件, 实验采用的是 80 MHz 带宽、3 202 个子载波、24.41 kHz 子载波间隔的 G.hn 同轴线 OFDM 传输配置参数。实验中采用有限几个 1:2 光分路器和 G.hn 光处理模组, 通过光分路器正向、反向级联实现了 G.hn 双纤传输、单纤传输, 搭建了 P2P (point to point, 点到点)、P2MP (point to multi-point, 点到多点) 拓扑, 模拟了 1 个主节点、2 个从节点的家庭场景, 以 1 518 byte 分组长度测得 192 Mbit/s 吞吐性能, 首次演示了 G.hn 光纤组网的文件传输和视频承载。

近年, G.hn 产业链关注点集中在电力线、电话线、同轴线传输, 基于这 3 种介质的解决方案目前都已具有规模应用。但在光纤介质方面, 截至 2021 年 2 月, 产业链上仍未推出 AFE (analog front end, 模拟前端) 芯片, 因此该方案在产品化方面暂无进展。

2.2 类接入网方案

类接入网方案是将 FTTH 接入网技术方案下沉应用到家庭内部, 参考了 PON 技术架构, 由主网关、光分路器、从设备组成, 如图 4 所示。其

中, 主网关提供类似 PON 系统中 OLT (optical line terminal, 光线路终端) 的功能, 从设备具备 PON 系统中 ONU (optical network unit, 光网络单元) 功能。类接入网方案以 WDM (wavelength division multiplexing, 波分复用) 方式实现单纤双向传输。以 GPON (gigabit-capable passive optical network, 吉比特无源光网络) 为例: 下行光波长为 1 490 nm、上行光波长为 1 310 nm; GPON class B+ 的最大光发射功率为 5 dBm, 最小接收灵敏度为 -27 dBm。在下行方向上, 主网关以广播方式发送数据, 每个从设备只接收处理自己需接收的报文。在上行方向上, 由主网关统一管理, 各从设备以 TDM 方式将报文发送给主网关。

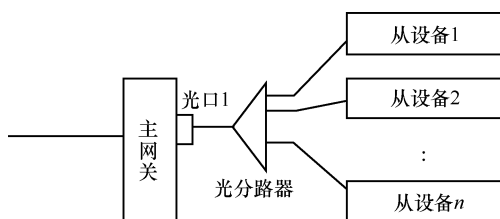


图4 P2MP 光组网示意图

类接入网方案中主网关的一个下联光口通过光分路器与多台从设备实现 P2MP 物理连接。可以根据从设备的数量选择 1:4、1:8、1:16 等不同的分光比。根据实际安装条件, 也可以采用几个光分路器级联方式安装, 此时也可以选择不等比分光, 使级联光口比非级联光口输出更高的功率。

应用 P2MP 方案时需注意如下两点:

(1) 多个从设备接入到主网关的同一个下联光口, 共享该光口的转发带宽。以 GPON 光口为例, 假设一个下联光口连接了 9 个从设备, 那么这 9 个从设备共享该 GPON 光口的下行为 2.5 Gbit/s、上行为 1.25 Gbit/s 的物理层吞吐量。

(2) 光分路器分支数量、级联个数、不等比分光等都会影响主网关下联光口至每个光信息点的插入损耗。为了保证网络中所有光接收机正常工作, 需要核算各光接入点位的光功率预算。

类接入网方案光纤、光缆的选用可参照 FTTH

接入网。G.657A2（最小弯曲半径为 7.5 mm）和 G.657B3（最小弯曲半径为 5 mm）的室内蝶形光缆都可使用。

类接入网方案与 FTTH PON 接入网方案的差异在于：前者只运行在一个家庭网络内，信息点数少，光传输距离在 200 m 以内；后者为多个租户提供电信级有保障的宽带接入，最远光传输距离为 20 km。因此，类接入网方案对于设备准入、密钥安全、网络保护、综合管控以及传输距离等方面的需求会弱化。为了降低实现成本和系统复杂度，必然需要在传统 PON 的基础上进行精简和调整。但目前缺乏标准化的指引，不同的理解、关注点和设计思路会导致不同的精简方案，甚至会增加私有定义。华为在 2020 年推出的家庭光纤组网方案就是类接入网方案的具体实现。

2.3 光以太网 P2P 方案

光以太网 P2P 方案是在主网关和从设备之间构建光纤以太网。不同从设备与主网关的不同光口实现 P2P 光纤直连，采用以太网光模块，从设备独享该光口带宽，如图 5 所示。在从设备数量小于主网关下联光口数量时，不需要增加额外设备既可以组网。在从设备数量大于主网关光口数量时，可按需引入光交换机。

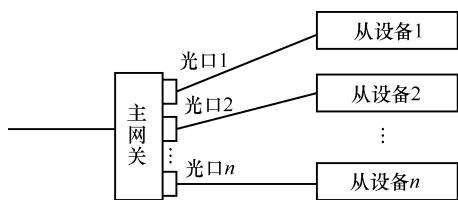


图 5 点到点光组网示意图

家庭内光以太组网的传输距离短，发送端和接收端光口直连，光功率衰减很小，应降低光模块发光功率以满足光模块的最小接收灵敏度和最大饱和光功率的参数要求。通常千兆以太网光口最大光发射功率为-3 dBm，最小接收灵敏度为-19 dBm。

家庭光以太网 P2P 方案遵循 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers，电气电子工程

师学会) 802.3z、IEEE 802.3ah 等标准^[4-5]。可供选择的千兆光模块有 1 000 BASE-LX、1 000 BASE-SX、1 000 BASE-BX 等规格。其中，1 000 BASE-LX、1 000 BASE-SX 需通过两根光纤分别进行接收和发送，而 1 000 BASE-BX 采用 2 个波长可通过 WDM 方式在一根光纤中进行数据双向传输。

可供光以太网 P2P 方案选择的光纤包括单模石英光纤（中心波长为 1 310 nm、1 490 nm、1 550 nm）、多模石英光纤（中心波长为 850 nm、1 300 nm）、塑料光纤（中心波长为 850 nm、1 300 nm）（注：塑料光纤也可工作在 650 nm 波长，但 IEEE 并未定义在千兆以太网中使用该波长）。这 3 类光纤在传输距离、最高带宽、弯曲半径、接续技术、发光光源、成缆尺寸等方面存在差异。在远距离、高速传输时采用单模光纤；在短距离较多节点本地互连时可采用多模光纤；在注重柔韧性好、重量轻、易接续、耐震动等场景中会使用塑料光纤，例如传感器、飞机、汽车应用等。这 3 类光纤都可适用于家庭光以太网。考虑家庭内部节点数规模、墙内穿管布放光缆的数量等因素，并且为了给传输能力预留更大的提升空间，笔者更倾向于推荐单模、单纤双向、光缆尺寸小的 1 000 BASE-BX 方案来构建家庭光以太网。

2020 年中国电信上海公司与中兴联合研制发布了家庭光以太网 P2P 方案产品^[6]。

2.4 “家庭内部组网段”的光网方案展望

G.hn 光组网方案产业链推进相对滞后，但作为 ITU-T 的家庭组网标准，其影响力和接受度具有独特优势，其在电话线、电力线、同轴线方面的产业化积累也有助于光组网产品的启动和推广。因此，在后续家庭全光纤组网应用和标准化的过程中，G.hn 必然是一个重要的备选方案，至少在 ITU-T 层面讨论家庭光纤组网时是无法绕过 G.hn 的。

光以太网经过多年的应用和技术积累，基带芯片和光模块成熟，产业链资源丰富，有助于光以太网向家庭光组网拓展，为家庭网关、家用组网 AP、



智能家电、家用交换机等产品集成以太网技术提供了便利条件。基于 IEEE 以太网标准, 以太网 P2P 组网方案也比较容易实现产品之间的兼容、互通, 进而打造完整的家庭以太网网络设备生态。

目前仅有单厂商提供类接入网方案产品。虽然参照了既有的 PON 接入网技术, 但也涉及私有化裁剪和自定义。那么, A 厂商的主网关和 B 厂商的从设备无法共同组网。在相当长的一段时间内, 将形成主网关和从设备的单供应商绑定局面。因为多数电信行业外的厂商(例如家用 AP、家电、家庭物联网等)不熟悉 PON 接入网的 OLT、ONU 技术, 一定时间内, 类接入网方案供应商范围可能只局限在电信行业内的少数厂商。在当前国际上动辄对个别厂商封锁、打压, 以及全球芯片紧缺的大背景下, 类接入网方案的可选供应商范围狭窄、设备不互通、单供应商绑定会增加设备采购、供货环节的不确定性, 提高运维、用户服务的风险和成本。因此, 标准化及在此基础上的互通性是类接入网方案亟待解决的问题。这也提醒

运营商和已获得先发优势的厂商, 应在以技术封闭获取市场主导和以技术开放繁荣生态之间权衡利弊, 恰当地做出选择。

从成本角度对比以太网 P2P 方案和类接入网方案, 在千兆速率级的家庭光纤组网场景下, 前者的光模块价格低于后者, 前者的光模数量需求略多于后者, 后者需引入光分路器。以 1 主网关+2 从设备组网为例, 当采用 BOB(bi-directional optical sub-assembly on board, 双向光模组在板)设计时, 以太网 P2P 方案、类接入网方案的设备成本相当, 市场应用初期设备成本在 2 000 元数量级, 后续随着产业链的陆续跟进和生产规模的扩大, 价格将逐步降低。

未来, 上述 3 个方案都将是家庭内部组网段光网方案的强有力竞争者。方案共存, 互相借鉴, 彼此竞争也有利于推动方案完善、产业链发展和成本下降。政府部门、运营商、设备厂商、配件厂商也将合作推进方案的试验、完善、标准化探索和技术成果转化。表 1 汇总了本文对上述 3 个方案的对比。

表 1 “家庭内部组网段”的光网方案对比

对比项	类接入网方案	以太网 P2P 方案	Ghn 光组网方案
遵循标准	暂无, PON 的自定义裁剪版	IEEE 802.3z、IEEE 802.3ah 等	ITU-T G.9960、G.9961 等
组网模式	P2MP	P2P	P2MP
信息点数量扩展方式	光分路器	光交换机(按需)	光分路器
光模块	PON 光模块	以太网光模块	Ghn 光模块
纤数和方向	单纤双向	1 000 BASE-SX: 双纤双向; 1 000 BASE-LX: 双纤双向; 1 000 BASE-BX: 单纤双向	双纤双向或单纤双向
复用方式	WDM+上行 TDM	双纤或单纤 WDM	TDM
中心波长	下行 1 490 nm; 上行 1 310 nm	1 000 BASE-SX: 850 nm; 1 000 BASE-LX: 1 300 nm(多模光纤)、1 310 nm(单模光纤); 1 000 BASE-BX: 1 310 nm、1 490 nm、1 550 nm	650 nm
光纤	单模石英光纤	1 000 BASE-SX: 多模石英光纤、塑料光纤; 1 000 BASE-LX: 单模石英光纤、多模石英 光纤; 1 000 BASE-BX: 单模石英光纤	塑料光纤
最大发光功率	以 GPON Class B+光模块为例, 5 dBm	-3 dBm	0 dBm
接收灵敏度	以 GPON Class B+光模块为例, -27 dBm	-19 dBm	-20 dBm
物理层理论速率(以 4 个从设备为例)	以 GPON 光口为例: 上行 1.25 Gbit/s, 下行 2.5 Gbit/s (由 4 个从设备共享)。	上行 1.25 Gbit/s、下行 1.25 Gbit/s(4 个从 设备互不影响)	1 Gbit/s(由 4 个从设备共享)
产业链	目前为单厂商封闭方案	有成熟的基带芯片和光电模块, 产业链推 广容易	缺乏基带和模拟前端芯片, 无成熟的商用产品

3 “FTTH 入户段”的光网优化

家庭网关是“FTTH 入户段”和“家庭内部组网段”之间的连接点,如图 1 所示。家庭网关不仅具备较高的有线网络转发能力,也内置了 Wi-Fi 接入点功能。理想环境下 Wi-Fi 5 在 5G 频段、80 MHz 频宽、2 发 2 收配置时的应用层吞吐可以达到数百兆比特每秒。最新一代家庭网关已经集成了 2.4 GHz/5 GHz 双频、160 MHz 频宽的 Wi-Fi 6 模块,理想环境下应用层吞吐可超过 1 Gbit/s。通常情况下,入户光缆成端于家庭信息箱,家庭网关被放置在家庭信息箱内。没有家庭信息箱的用户对入户光缆成端和网关摆放位置的选择因为缺乏指导往往会比较随意。对于入户光缆成端在何处,很多用户都忽略了一点,那就是家庭网关位置会影响其无线性能的发挥。

家庭网关放在信息箱内外 Wi-Fi 信号强度的实验室测得值对比见表 2。数据显示,将家庭网关放置信息箱外,手机接收的 Wi-Fi 信号强度提升 13 dB (金属门信息箱)。笔者也针对用户住宅内不同家庭网关摆放位置对其 Wi-Fi 接入速率的影响进行了测试,如图 6 所示,家庭网关置于金属门信息箱内(位置 1)、家庭网关就近置于信息箱外(位置 2)、家庭网关置于客厅电视柜(位置 3),各房间的 5G 频段、80 MHz 频宽、2 发 2 收、Wi-Fi 5 应用层吞吐量测试结果如图 7 所示。数据显示,将家庭网关由信息箱内改放到客厅电视柜上,客厅、饭厅等用户主要活动区域的 Wi-Fi 网速基本能提升百兆以上。

表 2 家庭网关位于信息箱内外 Wi-Fi 信号强度测得值

对比项	信息箱外	塑料门信息箱	金属门信息箱
信号强度/dBm	-42	-49	-55

由此可见,在“FTTH 入户段”适当延伸入户光缆,将家庭网关布放在客厅理想位置,基本可实现对中小房型用户主要活动区域内的较好 Wi-Fi

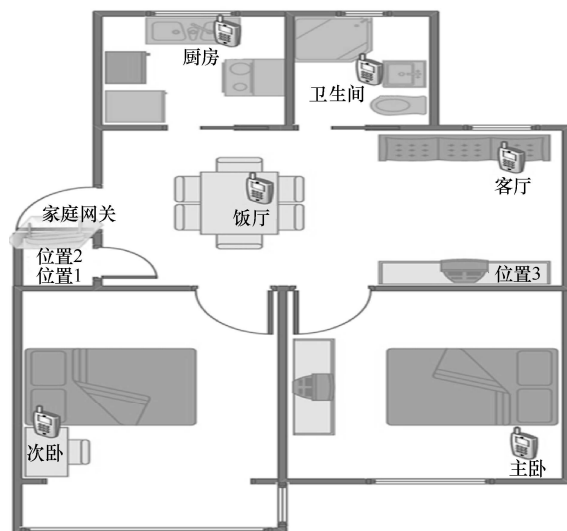


图 6 家庭网关不同摆放位置示意图

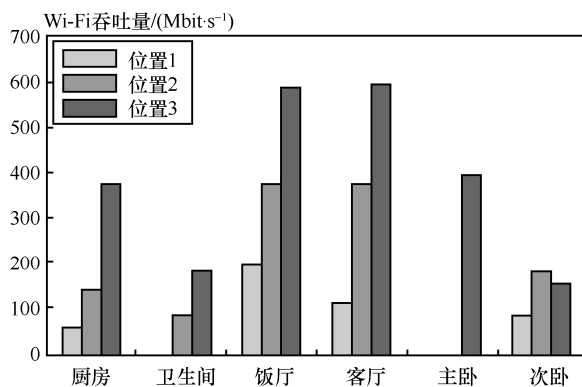


图 7 家庭网关不同摆放位置的 Wi-Fi 吞吐量

覆盖,其覆盖效果与单个组网 AP 可比;对于需要多个组网 AP 实现 Wi-Fi 全覆盖的大房型,也有助于减少 1 个组网 AP 的需求。

因此,针对“FTTH 入户段”,笔者建议的实施方案为:将入户光缆进行适当延伸,入户光缆的端接以及家庭网关的安装位置宜选择住宅建筑户内中心区域,一般为客厅;入户光缆宜就近端接于家庭网关安装位置附近,终结于墙面的光纤面板上,通过光跳线连接至家庭网关;同时,为了实现住宅内其他有线联网终端接入家庭网关,可由客厅入户光缆成端位置回拉线缆至信息箱或住宅其他房间。2019 年至今,中国电信上海公司已开展了数千用户的“FTTH 入户段”的光网优化试点,对用户无线接入速率感知的提升效果显著,



相关技术方案已于2020年纳入上海市信息家电行业协会团体标准^[7]。后续将扩大此方案在家庭光纤组网中的应用。

4 结束语

家庭上网、办公、信息化推动了对家庭网络高带宽承载能力提出了更高的需求,家庭千兆宽带接入即将普及。家庭光纤组网成为智慧家庭组网演进重要方向。本文将家庭内部有线网络分为“FTTH入户段”和“家庭内部组网段”分别讨论。针对“家庭内部组网段”的光纤组网,本文介绍了基于ITU-T标准的“Ghn光组网方案”、参考PON接入网技术的“类接入网方案”、基于IEEE标准的“光以太网P2P方案”等家庭光纤组网方案,从技术特点、标准化、产业链发展情况等进行了分析、对比和展望,后续将多方合作推进家庭光纤组网方案的试验、完善、标准化探索和技术成果转化。针对“FTTH入户段”,本文阐述了网关位置优化、入户光缆延伸成端的价值和实施建议,试验数据证明通过“FTTH入户段”光缆延伸成端到客厅,可以显著提升家庭网关Wi-Fi网络覆盖范围和接入速率体验,值得在家庭光纤组网中扩大应用。

参考文献:

- [1] ITU-T. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – system architecture and physical layer specification: G.9960[S]. 2018.
- [2] ITU-T. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers –data link layer specification:G.9961[S]. 2018.
- [3] GENEXIS B V. Teleconnect GmbH, Telefonica I+D, Technical Report, World's first service trial of ITU-T G.hn over plastic optical fibre(POF)[R]. 2012.
- [4] IEEE. Media access control parameters, physical layers, repeater and management parameters for 1,000 Mb/s operation, supplement to information technology - local and metropolitan area networks - part 3: carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications: IEEE 802.3z[S]. 1998.
- [5] IEEE. Local and metropolitan area networks- part 3: CSMA/CD access method and physical layer specifications amendment: media access control parameters, physical layers, and management parameters for subscriber access networks: IEEE 802.3ah[S]. 2004.
- [6] 翁健. 上海电信与中兴通讯成功试点全屋光纤组网 HOL 方案[Z]. 证券时报网, 2020(5).
WENG J. China Telecom Co., Ltd., Shanghai Branch and ZTE successfully piloted the HOL scheme of whole-house optical fiber networking[Z]. STCN, 2020(5).
- [7] 上海市信息家电行业协会. 住宅入户光缆端接及户内布线技术指南: T/SIAA000006—2020[S]. 2020.
Shanghai Information Appliance Industry Association. Technical guide for drop fibre cable termination and indoor cables wiring: T/SIAA000006—2020[S]. 2020.

[作者简介]



马智勇(1976—),男,中国电信股份有限公司上海分公司高级工程师,主要从事光接入网、家庭网络与终端方面的技术研究工作。

中科曙光
因为 Sugon
所以 S.A.F.E.

曙光安全可信城市云
构建融合共生的智慧城市体系



Security
技术平台
安全可信

All-stack
云产品栈
完整全面

Fast-delivery
迁移交付
高效无忧

Eco-system
应用生态
丰富成熟

《电信科学》第六届编辑委员会

顾 问：

邬贺铨	邬江兴	刘韵洁	何 友
余少华	张 平	韦乐平	蒋林涛

主 任 委 员：

陈山枝

副主任委员：

滕 伟	刘华鲁	彭木根
赵慧玲	高 鹏	孙智立

编 委：（按姓氏笔画排序）

马 炬	王卫红	王 桐	王继业	方景龙
艾 渤	卢光跃	曲 桦	刘永祥	刘建明
刘 瑜	江 涛	安建平	孙晓颖	孙爱晶
孙鹏飞	孙韶辉	阳小龙	纪越峰	李长海
李玉峰	李 赞	杨婷婷	吴大鹏	吴 巍
冷甦鹏	汪春霆	沈连丰	宋令阳	张云勇
张成良	张同须	张建军	陈芳炯	陈章渊
易东山	金 石	金耀初	周一青	周华春
周 亮	孟维晓	赵军辉	赵 楠	胡卫生
胡宇翔	段向阳	段晓东	敖 立	徐文渊
唐雄燕	黄永明	曹卫平	曹先彬	崔 勇
章坚武	梁宏斌	梁海滨	董振江	蒋 力
程 方	谢高岗	窦 笠	蔡 康	戴凌龙

电信科学

Telecommunications Science



邮发代号: 2-397 国外代号: M841 定价: 68.00元

ISSN 1000-0801



9 771000 080217

05

电
信
科
学

第
三
十
七
卷
第
五
期

二
〇
二
一
年
五
月