

OPTICAL ACCESS NETWORK
PRACTICAL TECHNOLOGY

光接入网实用技术

· 吴承英 吴 航 张志强◎编著

光接入网



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



OPTICAL ACCESS NETWORK
PRACTICAL TECHNOLOGY

光接入网实用技术

吴承英 吴 航 张志强◎编著

人民邮电出版社
北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

光接入网实用技术 / 吴承英, 吴航, 张志强编著

— 北京: 人民邮电出版社, 2019.1

ISBN 978-7-115-49182-4

I. ①光… II. ①吴… ②吴… ③张… III. ①光接入网 IV. ①TN915.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第211472号

内 容 提 要

本书从业务应用的角度, 介绍目前在光接入网中的实用技术, 采用业务贯穿技术的方式进行论述。第1章介绍光接入网技术发展和在 OSI 协议栈中的位置以及各协议的关系; 第2章和第3章介绍 xPON (EPON/GPON)、NG-PON1 基本架构和原理; 第4章介绍光接入网认证方法和智能 ODN 管理技术; 第5章介绍光纤网测试 (光功率、OTDR 测试)、光模块测试、光谱测试 (WDM、DWDM) 技术; 第6章介绍承载 FTTH 业务各专业的故障处理技术和 H.248 协议等; 第7章介绍 NFV 和 vCPE 技术; 第8章介绍下一代 PON 发展和试商用及 WDM-PON 和 TWDM-PON 的原理, 以及 5G 使用的 NG-PON2 回传技术。

本书具有实用性、新颖性、宽泛性等特点, 面向的读者为大学通信、电子工程、计算机科学等专业的 3~4 年级学生以及职业教育学院毕业生。本书可作为企业入职教育培训教材, 运营商和制造商的工程师、光纤维护和 FTTH 维护安装人员提高技术水平使用的教材。

◆ 编 著 吴承英 吴 航 张志强

责任编辑 李 强

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

涿州市京南印刷厂印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 21.5

字数: 495 千字

2019 年 1 月第 1 版

2019 年 1 月河北第 1 次印刷



定价: 118.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言

当今通信网络正在向“互联网+”演进,目前网络基本具备语音、视频、数据、IPTV(交互式网络电视)承载功能。4G和FTTH接入网商业应用发展迅猛,5G技术已经起步,物联网从2014年起步到2018年进入快速发展期。2017年,天津市联通光接入网FTTH(光纤到户)用户端口带宽达到200Mbit/s,2017年年底,中国4.9亿互联网用户中光纤接入用户占88.9%,光纤用户4.3561亿户^[1]。我国互联网用户、宽带接入用户规模位居全球第一。10G xPON已经广泛用于光接入网,实现了即插即用的自动开通模式。5G基站数据前传的带宽需求为100Gbit/s。密集波分复用(DWDM)技术将在光接入网汇聚层和5G基站数据接入网络中得到大量应用,对光谱特性(波长)和接入网汇聚层的带宽需求迅速增长,为了降低成本、提高带宽,DWDM技术必然会从长途传输网和本地骨干城域网向接入网汇聚层网络演进。所以DWDM技术的广泛应用决定了光谱测试技术的趋势。NFV(网络功能虚拟化)和vCPE(虚拟CPE)技术的发展将引入开源概念、弹性网络和云原生(Cloud Native),未来通信网发展将从硬件网络向SDN(软件定义网络)和NFV转换,引入云原生、弹性资源配置、微服务技术,提供快速开通业务和灵活的客户服务。

正如唐代诗人刘禹锡的《乌衣巷》中所述“旧时王谢堂前燕,飞入寻常百姓家”。随着带宽需求和技术水平的提高,应用于长途传输网和骨干城域网的DWDM技术逐渐向汇聚接入层和用户层演进。NG-PON2和云原生这样的技术也将飞入寻常百姓家了,随之而来的是安装、维护人员的水平需要提高。

在通信系统中,信令和协议是通信系统的控制系统,上述所有技术的发展实际上是信令和协议的演进。本书以信令和协议为主线,通过介绍当代通信的网元、终端、信令、组网技术使读者了解当代网络技术知识。所谓纲举目张,信令和协议就是“纲”,通信系统和通信网就是“目”。本书区别于竖井式方法介绍技术原理的思路,采用横向方式从通信系统的角度介绍信令和协议,了解光接入网系统、测试技术、后台支撑技术。通信分为多个专业,通信管理和研发设备制造需要按专业分工,作为研发工程师,对于本专业进行竖井式挖掘是必要的,但作为网络通信系统工程师,从事安装、测试、集成、维护工作是必要的。应用开发工程师需要了解各专业知识才能实现最优组网和胜任通信网络工程、维护工作,真正实现一专多能。光接入网涉及光学原理、WDM(波分复用)、DWDM、数据专业、语音通信、IPTV、计算机、传输多种专业。本书介绍的技术是以目前国内通信网络在线运行的技术为主,同时介绍后台支撑技术、光纤测试技术、光接入网故障检测和处理技术以及NFV和vCPE技术发展演进测试、POC情况、下一代NG-PON1应用和NG-PON2(WDM-PON、TWDM-PON、TDM-PON)发展趋势。

同时笔者于2010年在天津联通利用现网设备组建了网络实验室,多年参与通信网络的组网、测试试验、建设、维护工作,提炼出相关工作经验,向读者介绍关键光传输网络技术和



原理。2010 年开始在天津联通建立了第一个省级公司的网络实验室，进行光接入网的入围测试，2015 年，联通集团 xPON 解耦合测试在天津网络实验室进行测试。解耦合项目获得中国联通集团科技进步一等奖，并成功地应用于中国联通各分公司。目前，该实验室已经发展为 4G、传输 IP-RAN、xPON、城域网设备的多功能网络实验室，为通信事业发展做出了贡献。该实验室 xPON 测试项目于 2012 年获得中国通信学会科技进步三等奖和中国联通 2012 年科技进步一等奖。实验室的测试项目获得国家发明专利两项，一项正在申请中，在国内一级期刊发表数十篇论文。解决在工程维护中遇到的技术问题，为培训员工和技术竞赛等提供网络环境。

本书以“文章合为时而著，歌诗合为事而作”（白居易《与元九书》）的风格来写作，面对现网业务需求，把握当代技术的发展脉搏，使初学者尽快融入现代通信网络，科学地进行相关研究总结，引用现场和实验室测试报告和相关论文及国标和企业标准与研究报告作为本书的参考，其中，主要介绍测试和实用技术。本书针对信令和协议发展中相关因素进行系统研究。本书是笔者通信职业的经验总结，历时两年，主要反映近些年科技发展现状，主要涉及光接入网、IPTV、FTTX（光纤接入）、4K 电视、视频通信、IMS 核心网、NFV、4G 无线数据通信网、接入网、5G、物联网等多方面的内容。本书可以帮助读者尽快掌握协议的相关知识，胜任工程、研发、维护工作，尽量避免理论推导，以介绍实用技术为宗旨，介绍测试技术和故障处理方法，授读者以渔，达到“知行合一”的目的。

当代通信发展对于智慧城市市民、交通、能源、商业、通信、水和土地资源等关键资源管理需求有以下几点。

客户端：FTTH、高带宽、多业务（VoLTE、智慧家庭业务、绿网等）、视频通信、OTT、4K 高清电视（50~100M）、VR（4K 电视的 10 倍带宽）、企业客户业务（企业专网、企业网关等）。

电信网络：主要为 4G、5G 基站信号回传，5G 无线接入以 GE（吉比特以太网）计算，所以基站回传业务刺激了 NG-PON2 的发展，然而 NG-PON2 仍处于柳暗花明的阶段。

本书在创新方面做了如下介绍。

上述需求有对现有介绍光接入网的通信协议中的创新技术方法，例如，MPCP（多点控制协议）注册使用定时器创新方法、EPON（以太无源光网络）中 LOID 创新、H.248 协议数据收集分析、数图定时器分析等创新的方法。基于 H.248 协议的相关发明专利的创新方法，在实际应用中可以解决很多疑难问题，提高技术创新能力。

本书技术新颖，在介绍 G/EPON 的同时介绍 NG-PON1（10G xEPON）技术和 NG-PON2 下一代 PON 演进技术和 5G 回传应用。本书介绍 NFV 和虚拟 CPE 技术，涉及未来云原生等技术发展。

本书知识架构创新，以电信业务为主线介绍电信网络中各专业的技术，使读者更深更广地掌握电信网络知识。

中国建成世界最大的接入网，应用的设备和服务人口也最多，应用的需求最大。随着时间的推移，光纤老化、传输速率不断提高（目前已达 10Gbit/s，2020 年会达到 100Gbit/s）等问题和维护量越来越多，提高一线维护人员和后台支撑人员的技术水平非常重要。本书就此问题介绍通信网络现状以及提出解决问题的方法，同时介绍通信网络的演进方向。本书由浅入深，按照从终端到承载网，最后到核心网络设备的顺序进行介绍，通过描述客户端与核心网、网络之间的信令、协议，了解网络的工作原理和控制过程。本书通过讲述网络测试方法使读者加深对网络的了解，提高创新、研发、工程设计、维护能力，达到学以致用目的。

目 录

第 1 章 光接入网技术概述	1
1.1 光接入网简述	1
1.1.1 EPON 的技术演进情况	2
1.1.2 GPON 技术的演进情况	4
1.1.3 XG-PON 技术演进	5
1.1.4 NG-PON2 技术演进之路	7
1.2 光接入网技术在通信协议架构中的位置	9
1.2.1 通信协议定义和特性	9
1.2.2 通信协议架构	10
1.3 通信信令和协议的区别与关系	12
1.3.1 通信信令和协议的区别	12
1.3.2 协议和信令的演进结果 IP 化导致融合异途同归	14
1.3.3 针对通信网络架构的发展需求, 信令和协议对比分析	14
1.4 光接入技术在智慧城市通信网络应用简介	15
1.4.1 智慧城市数据流向简介	15
1.4.2 电信运营商语音视频数据流向简介	16
1.4.3 智慧城市对通信网络的需求分析	17
第 2 章 EPON 技术	21
2.1 EPON 参考模型和协议栈	21
2.2 EPON 工作原理	23
2.2.1 单纤双向传输机制	23
2.2.2 单纤两波长传输结构	23
2.2.3 EPON 工作原理	24
2.3 系统工作关键技术	26
2.3.1 仿真子层的功能与特点	26
2.3.2 MPCP	27
2.3.3 自动注册过程	28
2.3.4 自动测距技术	31



- 2.4 EPON 动态带宽分配 (DBA) 技术.....32
 - 2.4.1 动态带宽分配机制原理32
 - 2.4.2 EPON 系统 DBA 机制技术要求.....33
- 2.5 操作维护管理功能34
 - 2.5.1 OLT 的管理功能35
 - 2.5.2 FTTH ONU 远程管理实现方式35
- 2.6 业务 QoS 处理功能36
 - 2.6.1 基本要求36
 - 2.6.2 OLT 的上行业务流分类37
- 2.7 EPON 光纤保护技术.....37
- 2.8 EPON OLT 和 ONU 基本类型.....41
- 2.9 EPON 认证技术.....43
 - 2.9.1 ONU 认证总体流程.....43
 - 2.9.2 基于逻辑标识的 ONU 认证流程44
 - 2.9.3 混合认证模式46
- 2.10 10G EPON 技术简介46
 - 2.10.1 10G EPON 系统参考模型47
 - 2.10.2 10G EPON 主要指标和关键技术介绍51
 - 2.10.3 引入 10G EPON 的需求55
- 2.11 EPON 组网技术介绍56
 - 2.11.1 业务模型和用户带宽需求.....56
 - 2.11.2 EPON 组网的业务规划技术58
 - 2.11.3 EPON 组网方案60
- 2.12 VDSL2 矢量技术测试和商用实践与研究66
 - 2.12.1 测试环境及方法和 VDSL2 并发测试结果67
 - 2.12.2 VDSL2 测试及试商用总结及实验局情况69
 - 2.12.3 VDSL2+BLV 矢量技术测试70
- 2.13 G.fast 技术发展简介73
- 第 3 章 GPON 技术.....79**
 - 3.1 GPON 参考模型80
 - 3.2 GPON 工作原理81
 - 3.2.1 GPON 原理——数据复用.....82
 - 3.2.2 GPON 下行数据发送原理.....82
 - 3.2.3 GPON 上行数据发送原理.....83
 - 3.3 GPON 的协议栈分析83
 - 3.3.1 GPON 协议栈总体架构.....84
 - 3.3.2 GPON 复用结构85
 - 3.3.3 GPON 的帧结构87

3.3.4 GPON 系统管理控制接口规范 (G.984.4 OMCI)	94
3.4 GPON 系统关键技术	97
3.4.1 突发光电技术	97
3.4.2 测距技术	98
3.4.3 加密技术	98
3.5 动态带宽分配技术	99
3.6 业务 QoS 处理功能	104
3.7 GPON 保护技术	105
3.8 GPON 的物理特性	106
3.9 XG-PON1 主要特性	108
3.10 GPON 与 XG-PON 共存要求	110
第 4 章 PON 的后台支撑和操作维护及测试技术	113
4.1 逻辑标识 (LOID) GPON 系统认证的流程	113
4.2 ONU 设备的开通的参考流程	115
4.3 远程管理系统 (RMS) 管理 ONU 流程	116
4.4 LOID (逻辑标识) 开通应用案例	118
4.4.1 LOID 定义和属性	118
4.4.2 GPON 认证 LOID 用户自定义方法介绍	118
4.4.3 工程安装、维修流程介绍	120
4.5 智能光分配网络	125
4.5.1 智能光分配网络系统架构	126
4.5.2 智能光分配网络技术应用实例	132
第 5 章 光通信和光接入网测试技术介绍	138
5.1 FTTx 光纤网络测试技术介绍	138
5.1.1 FTTx 光纤网络测试指标介绍	138
5.1.2 光链路测试技术简介	140
5.2 光接入网光模块测试和维护技术	152
5.2.1 光模块技术参数简介	152
5.2.2 EPON 中光链路测量和诊断功能	161
5.2.3 光模块字监控量接口的多元协议 (SFF-8472 协议)	162
5.3 光通信的光谱测试技术介绍	172
5.3.1 WDM 和 DWDM 技术简介	173
5.3.2 光谱测试技术简介	198
5.3.3 光谱测试技术	202
5.4 光谱分析仪技术性能简介	212
5.4.1 光谱仪基本参数简介	213
5.4.2 光谱仪原理及实际操作参数介绍	215

第 6 章 光接入网故障处理技术	220
6.1 核心网（语音）故障处理技术	220
6.1.1 软交换核心网号码识别原理	220
6.1.2 H.248 呼叫处理流程	221
6.1.3 数图测试应用举例	227
6.1.4 语音业务故障案例	233
6.2 FTTH 业务 H.248 协议数据采集和信令故障处理技术	236
6.2.1 故障发现和数据采集	236
6.2.2 数据分析和解决方法	237
6.2.3 FTTH 故障处理分类方法	240
6.3 宽带业务故障案例	241
6.4 ONU 和光纤及光器件故障	242
6.4.1 ONU 认证故障部分	243
6.4.2 ONU 注册不稳定	244
第 7 章 网络功能虚拟化之宽带客户网关虚拟化	246
7.1 网络功能虚拟化概述	246
7.1.1 NFV 技术发展历程	246
7.1.2 世界电信运营商 NFV 应用情况	247
7.2 NFV 架构	247
7.2.1 硬件资源组件和虚拟中间件介绍	248
7.2.2 网络功能虚拟化基础设施	248
7.2.3 VNF 模块	251
7.2.4 管理和编排功能	251
7.2.5 接口说明	253
7.3 NFV 目标组网方式	255
7.3.1 全国组网目标架构	255
7.3.2 网络虚拟化组网	256
7.3.3 组网原则	258
7.4 NFV 宽带客户网关虚拟化技术	258
7.4.1 宽带客户网关虚拟化系统架构	259
7.4.2 宽带客户网关虚拟原则和内容	260
7.4.3 虚拟化宽带客户网关的管理功能	264
7.4.4 宽带客户网关虚拟化语音业务虚拟化	265
7.4.5 NFV 架构的宽带客户网关虚拟应用实例	271
7.4.6 NFV 近年的发展形势	274
7.5 NFV 发展遇到的问题和方向	282
7.5.1 NFV 和 vCPE 发展形势	284
7.5.2 NFV 和 vCPE 发展中遇到的问题	287

7.5.3	NFV 和 vCPE 问题的解决方案	289
7.5.4	国内外电信运营商最新 NFV 和 vCPE 的研发进展	292
第 8 章	下一代接入网技术 NG-PON2	298
8.1	NG-PON2 演进简述	298
8.2	WDM-PON 技术原理	299
8.2.1	WDM-PON 实现方案简介	300
8.2.2	下一代宽带光接入网 WDM-PON 工作原理	300
8.2.3	WDM-PON 的主要特点	306
8.2.4	WDM-PON 光源和分光器技术简介	307
8.2.5	下一代宽带光接入网 (WDM-PON) 的优劣整合方法	309
8.3	WDM-PON 业务应用	309
8.3.1	WDM-PON 直接用于 FTTx	309
8.3.2	WDM-PON 与 TDM-PON 构成 HPON	310
8.3.3	WDM-PON 用于本地汇聚传输	310
8.3.4	WDM-PON 承载 5G 应用场景	311
8.4	TWDM-PON 技术	314
参考文献		317
缩略语		320



第 1 章

光接入网技术概述

| 1.1 光接入网简述 |

光接入网由接入光纤、以太网无源光网络（EPON，Ethernet Passive Optical Network）、GPON（Gigabit-Capable Passive Optical Network）局侧的 OLT 光线路终端、用户侧的光网络单元（ONU）、分光器（ODN）和光连接器构成，如图 1-1 所示^[1]。

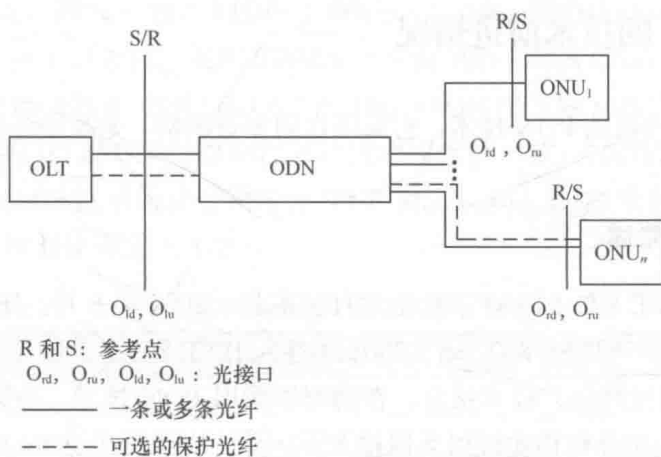


图1-1 光接入网接入设备结构

1G xPON 和 NG-PON 的区别在于 OLT 的 PON 端口 S/R 参考点速率为 1Gbit/s 或 10Gbit/s。

光接入网技术标准发展概况如下。美国电气和电子工程师协会（IEEE）组织发起的 EPON 标准和国际电信联盟电信标准化部门/全业务接入网论坛（ITU-T/FSAN）标准组织发起的 GPON 标准成为 PON 技术的两大主流。2009—2011 年，光纤城市主要以 EPON 技术为主；2011 年下半年 GPON 标准和技术的不断成熟，已开始在联通规模化采购和应用，由于需要考虑后台开通方面的工作，于 2012 年下半年已大规模应用。2017 年之前，电信运营商主要接入设备以 1G EPON 和 1GE GPON 技术为主。中国电信、中国联通以 EPON 技术为主，其中，中国电信对 EPON 技术规范贡献比较大。中国移动主要以 GPON 为主，利用后发优势参加竞争。

由于市场竞争的需要，用户端口带宽已经达到 200Mbit/s，10G EPON 和 10G GPON 技

术已经成熟，价格趋于合理，所以在 2017 年 10G xPON（NG-PON1）已在国内规模应用，从试用阶段进入到大规模商用阶段。应用业务主要面向 FTTH、FTTB（光纤到大楼）。

2016 年三大电信运营商 PON 设备采购情况见表 1-1^[5]。

表 1-1 2016 年三大电信运营商 PON 设备采购情况

电信运营商	时间	招标项目	招标规模
中国移动	2016-5	2016 年 GPON HGU 设备集采	GPON HGU 设备共计 2000 万套
中国移动	2016-8	2017 年 XG-PON 及室外型 ONU 设备集采	机架式 OLT 共计 10 486 块；MDU/MTU 共计 75 783 端
中国联通	2016-5	2015—2016 年 10G PON 集采	10G PON 设备,OLT 端口 3345 台,OLT PON 口 40 886 个，MDU 约 209.6 万线
中国电信	2016-3	2016 年 PON 设备集采	EPON 设备，新建 OLT 端口 10 万个；ONU 宽窄带端口 120 万个；GPON 设备新建 OLT 端口 70 万个；ONU 宽窄带端口 120 万个；10G EPON 设备新建 OLT 端口 10 万个；ONU 宽窄带端口 12 万个

中国移动主要采购 XG-PON 中的 GPON 设备；中国联通主要采购 1/10G EPON 设备；中国电信主要采购 1/10G EPON 设备和 GPON 设备；同时可以看到 10G xPON 已经开始规模使用。

1.1.1 EPON 的技术演进情况

EPON 是基于以太网的 PON 技术，它采用点到多点结构、无源光纤传输，在以太网之上提供多种业务。

1. EPON 原理简述

EPON 技术由 IEEE 802.3 EFM 工作组进行标准化。2004 年 6 月，IEEE 802.3 EFM 工作组发布了 EPON 标准——IEEE 802.3ah（2005 年并入 IEEE 802.3-2005 标准），在该标准中将以太网和 PON（无源光网络）技术结合，在物理层采用 PON 技术，在数据链路层使用以太网协议，利用 PON 的拓扑结构实现以太网接入。因此，它综合了 PON 技术和以太网技术的优点：低成本、高带宽、扩展性强、与现有以太网兼容、方便管理等。

EPON 系统采用 WDM 技术，单纤中采用不同的波长的光传输上下行光信号实现双向传输。

下行方向。OLT（光线路终端）发出的以太网数据报经过一个 1：*n* 的无源光分路器或几级分路器传送到每一个 ONU（光网络单元），*n* 的典型取值是 4~64（由可用的光功率预算所限制）。这种行为特征与共享媒质网络相同。在下行方向，因为以太网具有广播特性，与 EPON 结构匹配：OLT 广播数据分组，目的 ONU 有选择的提取。采用广播的方式发送下行信号，使用多点控制协议（MPCP）把信号从 OLT 发送到不同的 ONU。

上行方向。由于无源光合路器的方向特性，任何一个 ONU 发出的数据分组只能到达 OLT，而不能到达其他的 ONU。EPON 在上行方向上的行为特点与点到点网络相同。但是，不同于一个真正的点到点网络，在 EPON 中，所有的 ONU 都属于同一个冲突域，如果来自不同的

ONU 的数据分组同时传输可能会冲突。因此，在上行方向，EPON 需要采用 TDMA（时分多址）方式传输上行信号，避免在 OLT 上产生数据冲突。具体技术详见第 2 章介绍。

2. EPON 技术 1G 向 10G（XG-PON）共存演进

（1）1G 和 10G EPON 共存。

1G 和 10G EPON 可以实现平滑演进，共存特点如下：

10G EPON 全面兼容原有 EPON ODN，保护了电信运营商光分配网建设投资；

10G EPON 可以兼容原有 EPON MDU，设备主体、电源与用户配线均保持不变，保护了电信运营商终端投资；

EPON 升级到 10G EPON，管理运维一脉相承，可以实现一键式升级，减少电信运营商管理维护的工作量。

OLT 的 10G/1G EPON 接口可同时支持 1G EPON ONU 和 10G/1G EPON ONU 共存，OLT 的 10G/10G EPON 接口同时支持 1G EPON ONU、10G/1G EPON ONU 和 10G/10G EPON ONU 的共存。

（2）1G 和 10G EPON 技术参数对比。

在下行方向，EPON 技术启用了 1577nm 新波长用于 10G 下行通道。10G EPON 口通过不同的波长（10Gbit/s 通道的中心波长为 1577nm，波长范围为 1575~1580nm；1Gbit/s 通道的中心波长为 1490nm，波长范围为 1480~1500nm）使 10G EPON ONU 和 1G EPON ONU 可以同时接收数据。在上行方向，采用 TDMA 方式对 10G EPON ONU 和 1G EPON ONU 的数据发送进行制约。1G EPON ONU 在 OLT 的 10G EPON 口下的 MPCP 注册协议需要与 1G EPON ONU 在 OLT 的 1G EPON 口的 MPCP 注册协议保持一致。10G EPON ONU 在 OLT 的 10G EPON 口下的 MPCP 注册协议必须符合 IEEE 802.3-2012 第 77 章的规定。1G EPON 和 10G EPON 的技术参数对比参见表 1-2^[1]。

表 1-2 1G EPON 和 10G EPON 的技术参数

对比项	1G EPON	10G EPON
下行波长（nm）	1490±10	1577 -2/+3
上行波长（nm）	1577 -2/+3	1270±10
线路编码	8B/10B	64B/66B
FEC	FEC 功能可选实现	FEC 功能必须实现
遵循标准	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av
模式	上下行对称模式	对称模式/非对称模式

在波长规划方面，为了实现与 1G EPON 的兼容，10G EPON 没有使用 1G EPON 系统所使用的 1490nm 的下行波长，同时考虑避开模拟视频波长（1550nm）和 OTDR（光时域反射仪）测试波长（1600~1650nm），IEEE 802.3av 标准选择 1577nm 作为 10Gbit/s 下行信号的波长（波长范围为 1574~1580nm）。因此，在下行方向，10Gbit/s 信号与 1Gbit/s 信号为 WDM 方式。而上行方向，1Gbit/s 信号的波长是 1310nm（1260~1360nm），IEEE 802.3av 标准规定 10Gbit/s 信号的上行波长是 1270nm（1260~1280nm），二者有重叠，因此不能采用 WDM 方式，只能采用双速率 TDMA 方式。^[2]



(3) 1G EPON 和 10G EPON 标准关系。

IEEE 802.3av 标准专注于物理层技术的研究,最大限度沿用 EPON 的 IEEE 802.3ah 的 MPCP,该标准具有很好的继承性。IEEE 802.3av 标准不是取代 IEEE 802.3ah,而是对 IEEE 802.3ah 的扩展。

IEEE 802.3av 标准的核心有两点:一是扩大 IEEE 802.3ah 标准的上下行带宽,达到 10Gbit/s 的速率;二是 10G EPON 标准有很好的兼容性,10G EPON ONU 和 1G EPON ONU 可以实现共存。

IEEE 802.3av 标准大部分和 IEEE 802.3ah 标准保持一致。

1.1.2 GPON 技术的演进情况

GPON 技术基于 ITU-TG.984.x 标准,最早由 FSAN(全业务接入网论坛)组织于 2002 年 9 月提出,在此基础上 ITU-T 于 2003 年 3 月完成了 ITU-T G.984.1 和 G.984.2 的制定,2004 年 2 月和 6 月完成了 G.984.3 的标准化,最终完成了 GPON 标准。基于 GPON 技术的设备基本结构与已有的 PON 类似,也是由局端的 OLT、用户端的 ONT/ONU(光网络终端或称作光网络单元),连接前两种设备由单模光纤(SM Fiber)和无源分光器(Splitter)组成的 ODN 以及网管系统组成。

1. GPON 的技术特点

GPON 借鉴了 ITU-T 定义的通用成帧规程(GFP, Generic Framing Procedure)技术,扩展支持 GEM(General Encapsulation Method)封装格式,将不同类型和速率的业务重组后由 PON 传输,而且 GEM 帧头包含帧长度指示字节,用于可变长度数据分组的传递,提高了传输效率,因此,能更简单、通用、高效地支持全业务。

(1) GPON 速率。GPON(1G GPON)系统应支持上行 1.244Gbit/s、下行 2.488Gbit/s 的线路速率,比 EPON 速率高 1.5 倍。

XG-PON(10G GPON)系统应支持上行 2.488 32Gbit/s、下行 9.953 28Gbit/s 的线路速率。

(2) QoS 保证的全业务接入。GPON 能够同时承载 ATM 信元和/或 GEM 帧,具有提供服务等级、支持 QoS 保证和全业务接入的能力。目前,ATM 承载语音、PDH、Ethernet 等多业务的技术已经非常成熟,使用 GEM 承载各种用户业务的技术也得到一致认可,并已经开始广泛应用和发展。那么 GPON 的数据封装具体是如何实现的?ONU 从用户网络接口(UNI, User Network Interface)接收到上行的 ETH、TDM 或 SDH 数据,把上行数据封装为 GEM 帧发送给 OLT。OLT 把 GEM 帧解封装为 ETH、TDM 或 SDH 数据,通过上联口发送出去。

(3) TDM 业务。TDM 业务映射到 GEM 帧中,由于 GPON TC 帧帧长为 125μs,能够直接支持 TDM 业务。TDM 业务也可映射到 ATM 信元中,提供有 QoS 保证的实时传输。

(4) 简单、高效的适配封装。采用 GEM 对多业务流实现简单、高效的适配封装。

(5) OAM 能力。针对以太网系统在网络管理和性能监测的不足,GPON 从消费者需求和电信运营商运行维护管理的角度,提供了 3 种 OAM 通道:嵌入的 OAM 通道、PLOAM 和 OMCI。它们承担不同的 OAM 任务,形成 C/M Plane(控制/管理平面),平面中的不同信息

对各自的 OAM 功能进行管理。GPON 还继承了 G.983 中规定的 OAM 相关要求,具有丰富的业务管理和电信级的网络监测能力。

(6) 技术相对复杂,设备成本较高。GPON 承载有 QoS 保证的多业务和强大的 OAM 能力等优势很大程度上是以牺牲技术和设备的复杂性得来的,从而使相关设备成本较高。但随着 GPON 技术的发展和大规模应用,GPON 设备的成本可能会有相应的下降。自 2009 年以来,EPON 应用速度高于 GPON,目前已基本持平。

2. GPON 系统构成

GPON 系统通常由局侧的 OLT、用户侧的 ONU 和 ODN 组成,采用点到多点的网络结构。ODN 由单模光纤和光分路器、光连接器等无源光器件组成,为 OLT 和 ONU 之间的物理连接提供光传输媒质。当采用第三波长提供 CATV 等业务时,ODN 中也包括用于分波合波的 WDM 器件。

应用场景。GPON 系统的 ONU/ONT 可放置在交接箱、楼宇/分线盒、公司/办公室和家庭等不同的位置,形成 FTTCab、FTTB/C、FTTO 和 FTTH 等不同的网络结构。ONT 是指 FTTH 网络结构中包括用户端口功能的 ONU。

GPON 在欧美应用比较多,在技术规范方面欧美占优势,而技术成熟和商品化程度比 EPON 略差,所以 GPON 大规模商用时间比 EPON 晚。中国的光接入速度快于欧美,通过对 EPON 做出多项改进,EPON 技术才有更多的话语权。例如,LOID 认证是经过改进后在 EPON 中增加的。发展到 10G xPON 后,GPON 和 EPON 技术优势已不分伯仲。

1.1.3 XG-PON 技术演进

2011 年以来,影响 10G xPON 推广的主要因素为技术成熟度和 10G xPON 模块组、光模块的价格高于 1G xPON。在业务需求上,用户带宽需求不大于 30M。

技术成熟度应用举例,例如,2011 年测试某厂商 10G EPON 其速率最大可达 800Mbit/s,速率高于此值则出现分组丢失现象,技术只限于数据业务,其他操作维护功能尚需改进,语音功能未完善。

2015 年再次测试其速率最大可达 900Mbit/s 的标称值,操作维护和语音操作功能已经完善,基本具备规模应用能力。

早期 10G xPON 模块组、光模块的价格高于 1G xPON,如图 1-2 所示。

由于市场竞争,天津联通 2015 年用户端口带宽达到 100Mbit/s,2017 年用户端口带宽达到 200Mbit/s,促进了 10G EPON 在天津规模应用。天津联通用户端口实际带宽分配如下。

IPTV: 4K 电视 50M, 高清电视 10M (限制于本地城域网)。

互联网: 200M 端口实测, ONU FE 1GE 端口测速可达 200Mbit/s。

语音、视频电话不大于 8Mbit/s 带宽。

1. 10G xPON 模块组、光模块价格发展趋势回顾

过去,10G xPON 模块组、光模块的价格高于 1G xPON。2011 年 Qualcomm Atheros 10G



EPON 模组价格仍高于 50 美元，若要大规模布建，庞大的成本将造成电信运营商的压力。以 10G EPON 光模块价格与 1G FPON 光模块对比（以 OLT 为例），从图 1-2^[3]中可知，它们相差数十倍。到 2015 年变为原来的 1/6。电信运营商一般推荐使用非对称模式，成本会进一步下降，用户模型为上下行流量不对称模式。10G xPON 模块组、光模块价格发展趋势参见图 1-2。



图1-2 光模块价格发展趋势

目前，10G PON 技术已经成熟，最大的制约因素在于成本，一个 10G ONU 成本为 800~1000 元，电信运营商难以接受。10G PON 设备的成本包含光模块、芯片组、PCD 封装等方面的费用，而光模块和芯片组的成本是目前 10G PON 成本过高的根本原因。虽然目前 10G PON 成本较高，但在规模效益的拉动下，10G PON 成本有望大幅下降。

10G GPON/10G EPON（非对称）的 OLT/ONU 光模块的长期价格趋同，如 2015 年在市场竞争、4K 电视、VR、5G 等用户带宽需求的情况下，10G PON 可用于 FTTH 组网和 FTTB/C 组网场景。光模块成本摊薄后将不是 10G PON 成本过高的主要因素，FTTB/C/H 会是 10G PON 可能应用的主要场景。

2. NG-PON 演进概述

从 2004 年起，ITU-T SG15/Q2 开始同步研究和分析从 GPON 向下一代 PON（统称为 NG-PON）演进的可能性。2007 年 11 月，Q2 正式确定 NG-PON 的标准化路标，并以“低成本、高容量、广覆盖、全业务、高互通”为目标，迅速推进下一代 PON 技术标准的研究和制订。根据 Q2 制订的工作计划，NG-PON 标准化参见所示路标。

如图 1-3 所示^[3]，NG-PON 将经历两个标准阶段。

一个是与 GPON 共存、重利用 GPON ODN 的 NG-PON1。（注：目前 NG-PON1 均支持重利用现网 ODN，可以大大降低建设和维护成本，包括 10G EPON。）

另一个是完全新建 ODN 的 NG-PON2，不兼容 ODN。我们通常说的 10G GPON 属于 NG-PON1 阶段，标准号为 G.987 系列，又称为 XG-PON。其中，非对称系统（上行 2.5Gbit/s，下行 10Gbit/s）称为 XG-PON1，对称系统（上行 10Gbit/s，下行 10Gbit/s）称为 XG-PON2。另外，ITU-T 以 GPON OMCI 为基础进行扩展，形成新的标准 G.988（G.omci），其核心概念是整合所有 OMCI 相关文档，作为 ITU-T 研究光接入系统的终端管理基础标准。目前，ITU-T



只在 XG-PON1 上取得实质性进展。

NG-PON1 中的 XG-PON2 正在演进,而对于 NG-PON2、ITU-T SG15/Q2 正在计划对 NG-PON2 进行技术选型(目前,可选的技术有 WDM、更高速 TDM、TWDM-PON、OFDM),OFDM PON 目前未列入发展项目,目前已确定把 WDM、更高速 TDM 和 TWDM-PON 作为 NG-PON2 的工作方向,并启动标准化工作。总的来看,目前的市场需求推动力不足,技术发展中 NG-PON2 WDM 和 TWDM-PON 不考虑共存将会提高部署成本。TDM PON 考虑共存和单波长,成本将会低一些。

G.987 和 G.988 系列标准的进展如下:

- G.987 Definitions、Abbreviations、Acronyms 于 2010 年 1 月发布;
- G.987.1 General Requirements 于 2010 年 1 月发布;
- G.987.2 Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification 于 2010 年 1 月发布;
- ITU-T G.988-2012 《ONU Management and Control Interface Specification (OMCI)》;
- G.987.3 Transmission Convergence (TC) Layer Specification 于 2014 正式发布;
- G.988 ONU Management and Control Interface Specification (OMCI) 于 2010 年 6 月通过,正式发布。

中国联通 GPON 技术规范^[4]采用 ITUT G.988 系列 2012 版。

1.1.4 NG-PON2 技术演进之路

PON 技术主要分为两大类:基于时分复用无源光网络(TDM-PON)和基于波分复用无源光网络(WDM-PON)。WDM-PON 的技术构想最先是由贝尔实验室在 1994 年的 RiteNet 项目中提出的,但是当时由于光纤和光器件的成本原因而没有获得推广。

1. 2014 年以来光纤演进路标

2014 年以来光纤演进路标参见图 1-3,FSAN 和 ITU 将光纤网络未来演进定义为两个阶段:NG-PON1(中期)和 NG-PON2(长期)。NG-PON1 是基于 XG-PON1 的技术实现,可提供 10Gbit/s 下行速率和 2.5Gbit/s 上行速率。然而当 XG-PON1 可实际商用投入市场后却遇到一定的阻碍,在中短期时间内市场对于 10Gbit/s 速率的接入业务需求并不明显,2016 年由于市场竞争,用户端口带宽从 30Mbit/s 扩展到 100Mbit/s,2017 年扩展到 200Mbit/s,在中国开始了规模部署 XG-PON1。随着更新技术的出现,市场也逐步将注意力转移到了 NG-PON2。

注:全业务接入网论坛(FSAN)于 1995 年在全球 7 个主要网络电信运营商的发起下宣布成立。联盟的宗旨是希望能提出一种光接入解决方案并制订光接入网设备标准,根据该标准制订的设备应能够同时提供语音、数据和图像等业务能力。

对于 NG-PON2 的发展,FSAN 做了几个评估方案,认为可能会出现以下 3 个主要竞争技术:TDM-PON、DWDM-PON、TWDM-PON 技术(不包含 OFDM-PON)。

(1) TDM-PON 演进方案在概念上与当前的 PON 系统非常接近,采用了更高速率的光电子,可以为用户提供非常高效的共享带宽,但该技术需要每个 ONT 在 40Gbit/s 的线速下运作,该速率已远超市场对个人用户需求的预测。基于高成本、色散问题无法解决的角度考