无源光网络标准发展及关键技术研究

姚琳元,宋 飞,张宏科
(北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044)

摘 要: 无源光网络(Passive Optical Network,PON)作为当今接入网的主要技术解决方案,具有带宽使用效率高、传输距离远、抗干扰能力强等特点.通过研究PON技术的发展动态,本文首先归纳了各种PON技术的产生背景和应用特点,整理出各技术间的连接关系及主要标准;其次介绍了PON技术的帧结构,并对带宽、波长、传输模式等PON技术的主要参数进行了汇总;然后将国内外研究热点进行划分,围绕媒体访问控制协议、帧结构、动态带宽分配算法、节能机制等关键技术,阐述了其研究现状及在PON中的重要作用;最后对PON技术的发展趋势进行了展望.

关键词: 无源光网络; 动态带宽分配; 帧结构; 标准
中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0557-11
电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.022

Development of Standards and Research on Key Technology in Passive Optical Network

YAO Lin-yuan, SONG Fei, ZHANG Hong-ke
(*College of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: Passive optical network(PON), as the major technology solution of the access network, provides higher bandwidth utilization efficiency, supports for farther transmission distance and has the stronger anti-interference capability than the traditional access network technology. According to the development of PONs, this paper firstly summarizes the background and features, sorts out relationship and main standards. Secondly, the frame structures of various PONs are introduced and a noble table containing the main parameters of PONs is presented. Based on the current hot spots of researches at home and abroad, the overview is focused on the media access control protocols, frame structures, dynamic bandwidth allocation algorithms, energy saving, and so on. Finally, we show the idea about the future development trends of PONs.

Key words: PON(Passive Optical Network); DBA(Dynamic Bandwidth Allocation); frame structure; standard

1 引言

20世纪90年代以来,光网络借助光纤通信和互联网技术在全世界获得突飞猛进地发展,一度成为通信领域高新技术的代名词,推动了网络世界前所未有的技术革新.作为光网络的重要组成部分,光接入网具有大带宽、低误码率、高可靠性和强抗干扰能力等优势,逐步成为接入网的主要技术方案[1,2].

经过不断技术变革,光接入网从有源光网络逐步发展到无源光网络(Passive Optical Network,PON).PON历经APON(Asynchronous transfer mode PON)、BPON(Broadband PON)、SuperPON的技术演变,逐步发展到现今使用的EPON(Ethernet PON)、GPON(Gigabit-capable PON),目前下一代PON(Next Generation PON,NG-PON)的标准和实验平台正在讨论中.图1总结了PON相关标准的发展历程.

APON即ATM(Asynchronous Transfer Mode)技术与PON技术的结合,由FSAN(Full Service Access Networks)提出.作为基本的传输技术,APON能够为用户提供更低的开销、更强的鲁棒性以及更加自由的解决方案[1].1998年,为消除大众对APON仅能支持ATM业务的误解,NTT(Nippon Telegraph and Telephone corporation)和BellSouth正式提出BPON概念[3],相应的标准ITU-T G.983.1-5和附属规范也于2005年制定完成.鉴于APON和BPON拥有众多的相同之处,后文把APON和BPON统称为A/BPON.

收稿日期:2013-12-04;修回日期:2014-03-12;责任编辑:覃怀银
基金项目:国家自然科学基金(No.61301081);高等学校博士学科点专项科研基金(No.20120009120005);中央高校基本科研业务费专项资金(No.2014JBM010)

为提高 A/BPON 的性能，EU-funded ACTS（Advanced Communication Technologies and Services）提出了 PLANET（Photonic Local Access NETwork）计划，该计划主要从网络的覆盖范围、光分路器、宽带利用率等三个方面对 A/BPON进行深入研究．在 2000 年，PLANET 计划实现原型系统，被称为 SuperPON[4]．SuperPON 开发出了原型系统，但并没有形成具体的标准．

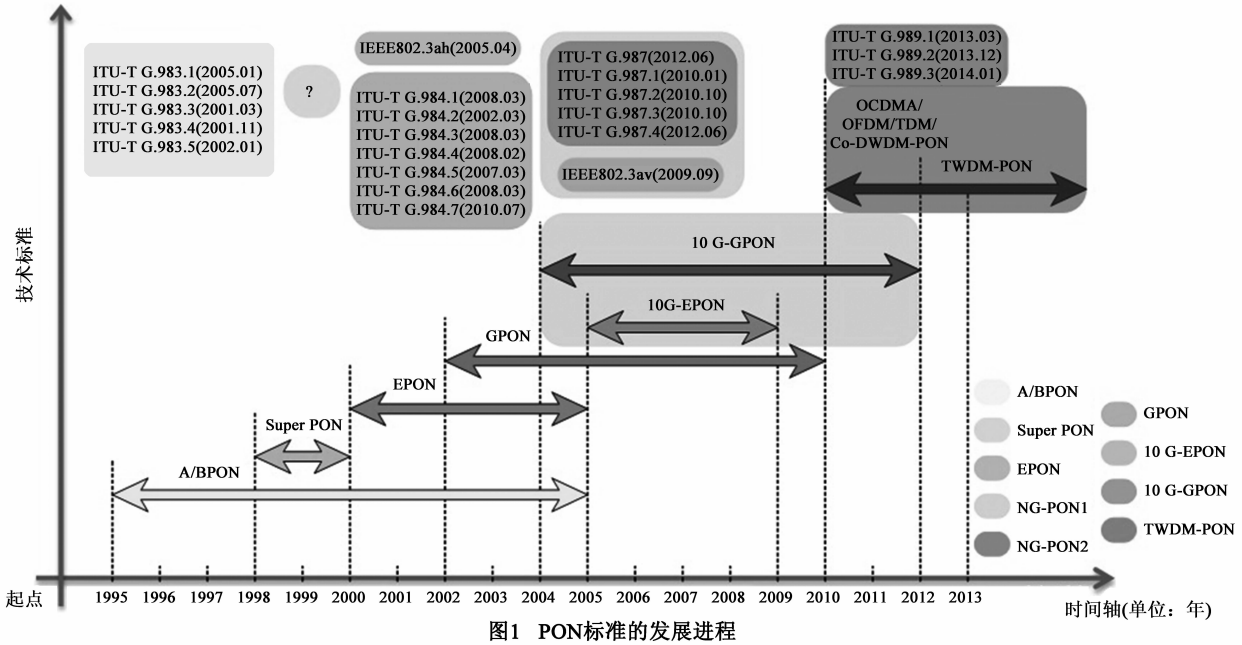


图1 PON标准的发展进程

IETF（Internet Engineering Task Force）定义 EPON，并于 2005 年制定规范 IEEE802.3ah．IEEE802.3ah 是 IEEE802.3 的修正，属于以太网接口规范系列的分支[5]．

2002 年起，ITU-T（International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector）开始制定 GPON 标准；2010 年，标准 ITU-T G.984.1-7 形成．GPON 使用特有帧封装方法 GEM（GPON Encapsulating Method），成帧更加灵活，支持业务更加广泛，较 A/BPON 不仅从性能上有很大提高，而且支持多种传输方式[6]．

作为 EPON 和 GPON 的技术推进，NG-PON 包括 NG-PON1 和 NG-PON2．NG-PON1 分为 XG-PON1 和 XG-PON2：XG-PON 又名 10-gigabit-capable PON，主要指 10G-GPON，其标准由 ITU-T G.987.x 系列组成，于 2012 年完成[711]；10G-EPON 由 IEEE 任务组负责研究，于 2009 年 9 月形成规范 IEEE802.3av[12]．

NG-PON2 又称为 40-Gigabit-capable PON，可提供 40Gbps 及以上传输速率．2012 年 4 月，TWDM（Time-Wavelength Division Multiplexing）在 FSAN 峰会上被指定为 NG-PON2 主要解决方案[13]；2013 年 3 月，NG-PON2 的标准 ITU-T G.989.1 正式形成[14]，该标准对 NG-PON2 的需求进行了分析和阐述；当前针对 PMD 层规范 ITU-T G.989.2 和 TC 层规范 ITU-T G.989.3 正在探讨中[15,16]．

文章整体结构如下：第二节结合 PON 技术标准，汇总、比较、分析了 PON 技术帧结构及主要参数；第三节从网络协议、网络技术角度对各种 PON 技术在不同发展时期拟解决的关键问题进行描述和分析；第四节对本文进行总结，探讨 PON 技术的发展方向．

2 PON 及帧结构

作为点到多点系统，PON 的物理结构通常为树状，主要包括三种设备：光分路器（Optical Splitter，OS）、光线路终端（Optical Line Terminal，OLT）和光网络单元（Optical Network Unit，ONU）．图 2 为 PON 拓扑图：OLT 位于局端，主要负责管理、控制 ONU；ONU 位于用户端，主要实现用户端的接入；OS 位于 OLT 与 ONU 之间，连接 OLT 和 ONU，完成 1：N 分路功能，实现一个 OLT 与 N 个 ONU 的互连，图中用往返时延（Round-Trip Time，RTT）标注 ONU 到 OLT 的距离[5]．本节将对各种 PON 技术帧结构进行

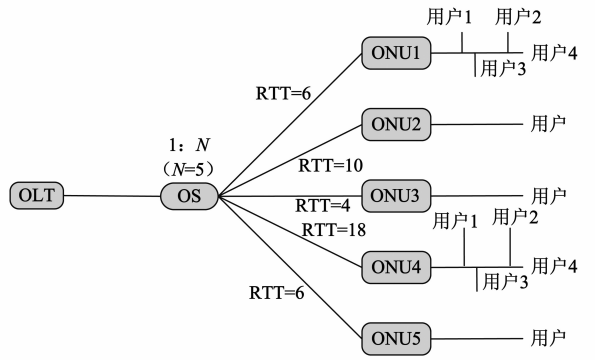


图2 PON拓扑图

说明,并从分光比、传输速率、传输距离等多个方面进行比较.

2.1 A/BPON

在 A/BPON 中,分路比为 1∶8、1∶16 或 1∶32,一个 OLT 最多能接入 32 个 ONU,OLT 和 ONU 之间最大传输距离为 20km.A/BPON 支持对称传输和非对称传输两种模式,在对称传输模式下,上下行速率为 155.52Mbps;在非对称传输模式下,上行速率为 155.52Mbps,下行速率为 622.08Mbps.图 3(a)为 A/BPON 的上行帧(upstream frame)和下行帧(downstream frame)结构[3,17].

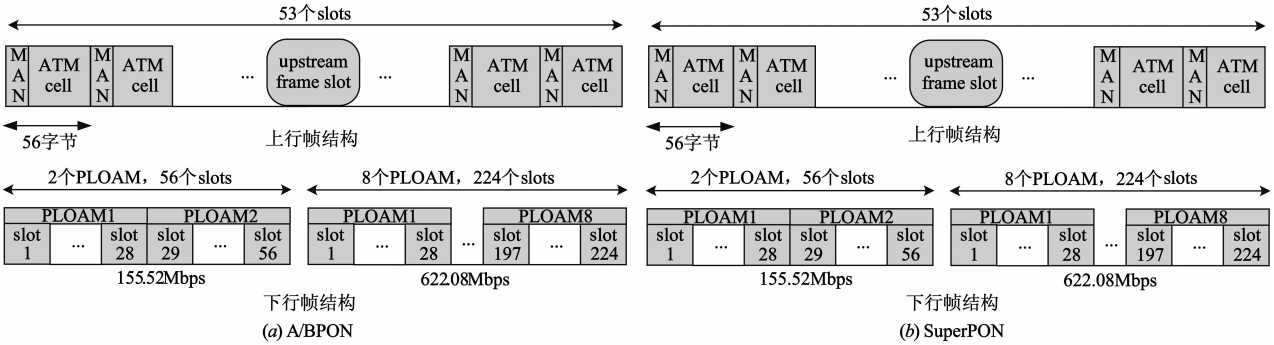


图3　A/BPON和SuPON帧结构

2.2 SuperPON

SuperPON 最多可接入 2048 个 ONU,覆盖范围能达到 100km[4,18].SuperPON 依据传输速率和波长,主要分为两种结构:(1)上行速率为 2.5Gbps,下行速率为 10Gbps,上下行波长为 1550nm;(2)上下行速率为 10Gbps,上行波长为 1530nm,下行波长为 1550nm.图 3(b)表示了 SuperPON 的帧结构[19].

2.3 EPON

按照 OSI(Open System Interconnect)参考模型中数据链路层的封装方式,EPON 帧结构如图 4 所示,分为两部分:LLC(Logical Link Control)子层和 MAC(Media Access Control)子层.LLC 子层由 IEEE802.2SNAP 协议定义,

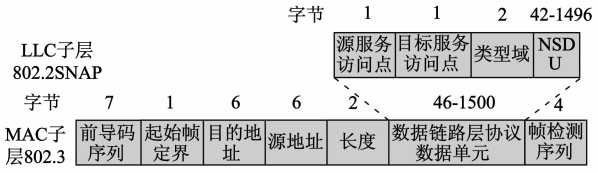


图4　EPON帧结构

MAC 子层由 IEEE802.3 协议定义[20].

2.4 GPON

GPON 的传输方式也分对称传输和非对称传输,上行速率支持 155Mbps、622Mbps、1.2Gbps 和 2.4Gbps,下行速率支持 1.2Gbps 和 2.4Gbps.图 5 为 GPON 帧结构,上下行帧长相同,均为 125μs[1].

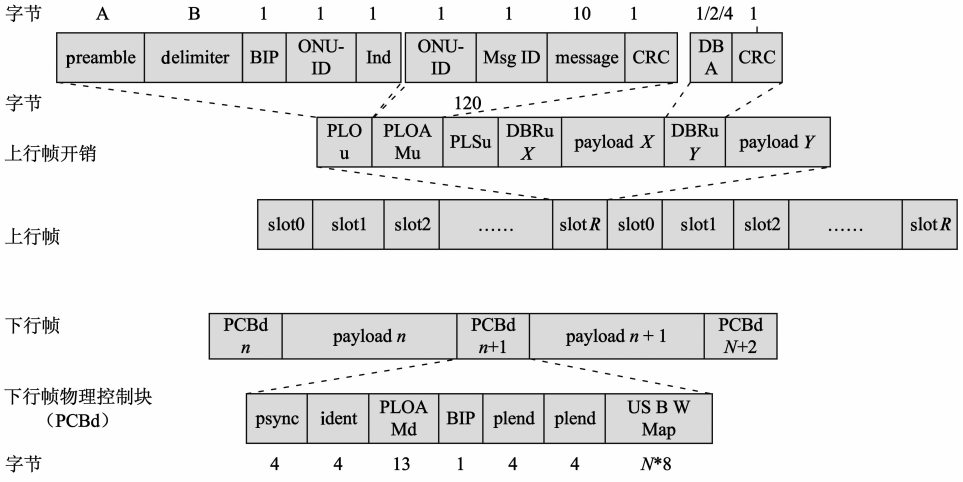


图5　GPON帧结构

2.5 NG-PON

作为 NG-PON1 的代表性技术,10G-EPON 沿袭 E-PON 的帧结构;而 XG-PON 在 GEM 帧的基础上,进行了修改,形成了新的上下行帧结构,如图 6.速率方面,XG-PON1 规定上下行速率为 2.5/10Gbps;10G-EPON 规定上行速率 1/10Gbps,下行速率 10Gbps;XG-PON2 规定上下

行速率都为 10Gbps[7,21].

NG-PON2 标准中,TWDM-PON 要求:(1)支持多种波长信道;(2)具有 4-8 个 TWDM 信道对,在提供一对信道基础上,可随用户需求的增加而增加;(3)信道传输速率满足三种参数要求:上下行 10Gbps,上下行 2.5Gbps 和上行 2.5Gbps、下行 10Gbps;(4)无源光纤传输距离至少达到 40km,差分光纤距离最高可支持 40km,在室外无源环境下,最高可达到 60km;(5)支持至少 256 路分光器[14].

通过上述分析,本文将各 PON 技术的主要参数通过表格的形式汇总,如表 1.

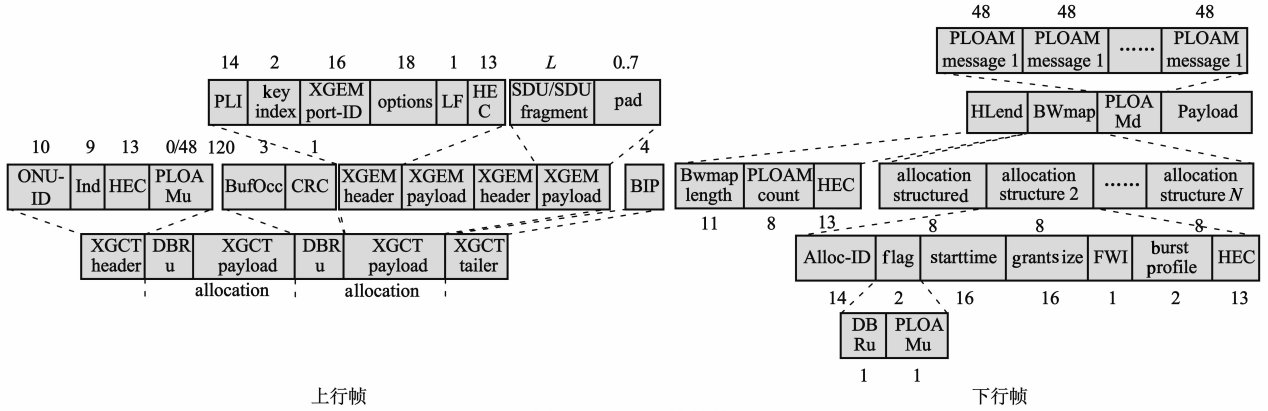


图6 XG-PON帧结构

表 1 A/BPON、SuperPON、EPON、GPON、10G-EPON、XG-PON、NG-PON2 主要参数比较表

		A/BPON	SuperPON	EPON	GPON	10G-EPON	XG-PON	NG-PON2
数据包信元大小(字节)		53[3]	53	64-1518[21]	53-1518[3]	64-1518	53-1518	?
带宽	上行帧	622Mbps 或 155Mbps[3]	10Gbps 或 2.5Gbps[19]	1.25Gbps[21]	155Mbps、622Mbps、1.25Gbps 或 2.5Gbps[1]	10Gbps 或 1Gbps[12]	10Gbps 或 2.5Gbps[8]	不低于 10Gbps[14]
	下行帧	1.2Gbps 或 622Mbps[3]	10Gbps[19]	1.25Gbps[21]	1.2Gbps 或 2.4Gbps[1]	10Gbps[12]	10Gbps[8]	不低于 40Gbps[14]
波长	上行帧	1260-1360nm[3]	1550nm 或 1530nm[19]	1310nm[3]	1260-1360nm[3]	1260-1280 nm[12]	1260-1280nm[8]	多波段可调[13]
	下行帧	1480-1500nm[3]	1550nm[19]	1500nm[3]	1480-1500nm[3]	1575 – 1580 nm[12]	1575 – 1581nm[8]	多波段可调[13]
传输模式		ATM[3]	ATM	以太网[3]	ATM,以太网,TDM[3]	以太网	ATM,以太网,TDM	?
最大分路数		32[3]	2048[4]	16[3]	128[1]	1024[22]	512[8]	不少于 256[14]
最大传输距离		20km[3]	100km[4]	20km	60km	80km[22]	不低于 60km[8]	不低于 40km[14]
带宽分配开销(字节)		5	5	64[21]	2[21]	64	2	?

3 PON 关键技术研究

PON 技术在不同的发展时期,受网络发展速度、软件硬件水平、用户实际需求等诸多条件影响,国内外研究人员对该技术的研究重点也相应发生改变.针对不同时期的具体情况,本节按照图 7 的脉络结构对国内外的热点研究进行分类总结.

3.1 A/BPON

ITU-T G.983.1 规定了 A/BPON 帧结构和 MAC 协议,在帧长、信元延时(Cell Delay,CD)和带宽分配等诸多方面存在不足之处.为减少网络时延和增加用户带宽,提高网络带宽利用率,A/BPON 的研究主要集中在 MAC 协议.

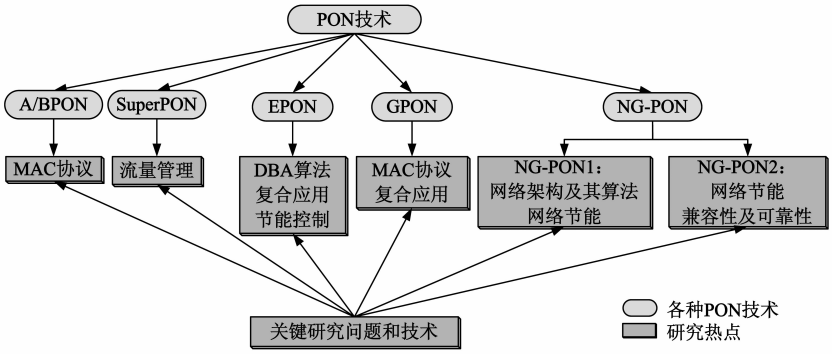


图7　PON关键技术和研究问题框

作为上世纪九十年代的主要传输模式,STM(Synchronous Transfer Module)承载的语音业务周期为 125μs,而A/BPON标准帧长为 152.7μs,二者不相匹配,为实现A/BPON中 STM 语音业务传输,文献[17]重新设计 MAC 协议,提出了周期为 125μs 的新型架构.该协议为A/BPON实现了 STM 传输,提高了带宽效率,降低了 CD 和 CDV(CD Variation).文献[23]提出以信元到达时间信息和业务优先级为基础的新 MAC 结构,在兼容传统A/BPON协议的基础上,从域格式、最小间隙格式和DBA 算法三个方面进行了研究[24].文献[25]提出了一种动态 MAC 协议,该协议在 OLT 端增加 MAC 控制模块,在 ONU 端增加 ATM 信元路由和适配模块.

3.2　SuperPON

SuperPON 较 A/BPON 在三个方面比较突出:覆盖范围更大、光分路器可放大和宽带使用效率更高.覆盖范围和光分路器主要与硬件发展水平相关,宽带使用效率主要面向算法的研究与分析,实现流量管理,为用户提供更高的服务质量.本节从流量管理对 SuperPON 的研究进行总结.

文献[25]提出了一个基于 SuperPON 传输系统的动态 MAC 协议,该协议也适用于 A/BPON.文献[26]利用请求允许机制实现上行帧的传输,提出了一种在家庭网络环境中的 SuperPON 动态 MAC 资源分配算法,即多队列 FIFO(First In First Out).文献[27]提出了 ATM 信元与 TDMA(Time Division Multiple Access)相结合的复用方案,该方案充分考虑每一次流量惯性,实现流量仲裁.文献[28]利用多个轮询进程可同时工作这一特点提出了一种多线程轮询算法:在接收到局端的确认消息之前,用户完成带宽发送请求,较传统的 DBA 算法,该算法降低了网络延时,提高了网络吞吐量,能够有效、公平地动态分布上行帧带宽.

3.3　EPON

EPON 作为 IEEE 技术,在协议、帧结构方面与A/BPON、SuperPON有着诸多不同.EPON 研究范围较广,包括测距、点到点通信、算法和节能等多个方面,通过对大量研究工作的分析、总结,本文从纷繁的研究工作中提取了 DBA 算法、复合应用和节能控制三个重点研究点进行阐述.

3.3.1　DBA 算法

按照 DBA 算法是否支持 QoS,文献[29]整理和总结了 2009 年之前有关 EPON 的 DBA 算法,将 DBA 算法的研究分为两类,并对每种算法的特点进行了分析.本文重点归纳了文献[29]后出现的新方法,并按实现方式归结为四类:(1)SLA 分级;(1)Report 信息;(3)空闲期;(4)其他方法.

(1)SLA 分级

文献[30]提出了一种应用于 EPON 的在线 DBA 算法,该算法可以降低快速转发流量引起的窗口间抖动,有效控制时延.当网络吞吐量较高时,该算法能够为中等优先级业务提供一个定长的时延和抖动,测试结果显示整体的吞吐量能达到带宽的 95.5%.文献[31]提出一个新的带宽保证轮询机制,该机制依据 SLA,允许用户和运营商共享上行带宽,在保证付费用户宽带的同时,为其他用户提供尽力传输服务.

(2)Report 信息

文献[32]提出差异化 DBA 算法,首先辨别 REPORT 信息,然后依据信息类型为 ONU 分配带宽,提高 EPON 协同工作能力.为实现 100km 的远距离 EPON 传输,文献[33]提出低延时 DBA 算法,OLT 通过 REPORT 和 GATE 为近距离 ONU 分配许可,通过可预测 DBA 算法为远距离 ONU 分配许可.

文献[34]提出离线时序分配框架和最短传播延时时序分配策略,OLT 为 ONU 分配上行带宽之前,收集ONU的请求信息,保证用户 QoS.文献[35]提出 FRPS(Fitting Report Position Schemes),该体系中,报告消息位置可以进行动态调整,OLT 利用启发式算法通过报告消息来估算 ONU 的负荷,实现数据包平均时延的最小化.

(3)空闲期

为解决空闲期问题,实现差异化业务,文献[36]提出了 QA-IDBA(QoS-Aware Interleaved Dynamic Bandwidth

Allocation)算法,利用 QP-LBA(QoS-based Predictive Limit Bandwidth Allocation)实现双分区交叉调度,利用带宽补偿机制对超出带宽进行重新分配.文献[37]提出了 E-FLDBA(Intelligent DBA Algorithm Based on Fuzzy Logic Principles)算法,利用模糊逻辑对 ONU 进行带宽分配,降低空闲时间,提高间隙使用效率.文献[38]提出了 FST-EWG(Fitting Scheduling Timing-Elastic Weighted Granting)算法,解决单信道下 EPON 系统的空闲时间开销和带宽利用率问题.

(4)其他方法

文献[39]提出了 CDMA-DBA(Code Division Multiple Access DBA)算法,依据 QoS 为用户提供并行传输容量,并通过使用循环方法实现时序分配.文献[40]提出 LTP-DBA(Local-Traffic-Prediction-based DBA)算法,较 SBA(Static Bandwidth Assignment)和 IPACT(Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time)在带宽利用率和数据包的平均时延等方面效果更好.

为提高网络性能,克服高分路比带来的带宽限制,文献[41]在原 EPON 机制中增加了具有 MAC 转发功能的 RN(Remote Node),RN 通过侦听数据帧包头,获取 MAC 信息,形成含有 MAC 地址和 LLID 的转发表,实现对数据帧的重定向.文献[42]提出 CSMRP(Centralized Selective Multicast Retransmission Policy),能有效转发组播数据,减少转发带宽开销,避免重复转发,能更好支持包括 IPTV 在内的组播应用.

3.3.2 复合应用

作为接入网,EPON 具有很高效用,可以支持多种业务.在众多的结合方案中,EPON 与 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)的结合最受关注,另外 EPON 与 DOCSIS(Data Over Cable Service Interface Specification)、P2P(Peer to Peer)、VOD(Video On Demand)等技术的结合方案也在研究之中.本节将 EPON 的复合应用分为两部分:(1)EPON 与 WiMAX;(2)EPON 与其他技术.

(1)EPON 与 WiMAX

文献[43]提出了基于延时的准入控制体系,可实现不同业务群类间上行网络带宽的公平分配和不同业务群类间的统计复用.文献[44]提出两个机制提高 OLT 端数据包按序发送效率:(1)在 OLT 端提出时序分配算法,确保数据包按需到达目的端;(2)设计 DBA 架构,为可能触发快速重发和需要快速回复的上行带宽数据流提供更高优先级.文献[45]提出一个基于分布式天线环境的 EPON-WiMAX 结合方案,固定基站为移动基站实时传递相同的信号,并提出效用小区计划,优化重叠小区的大小.

(2)EPON 与其他技术

EPON 与 DOCSIS 技术的结合是支持以太网业务的主要方案,DPoE(DOCSIS® Provisioning of EPON)随之产生.CableLabs 发布了 DPoE 规范,康卡斯特、Bright House 网络和 Time Warner Cable 对 DPoE 进行了联合开发.

文献[46]提出了 EPON 和 P2P 的网络融合架构,实现 ONU 端数据缓存、流量重定向等功能,可有效减少资源消耗,增加额外下行带宽,为用户提供多媒体业务的同时,提高 QoS.文献[47]提出了可扩展 EPON 体系,利用下行单拷贝广播和特殊缓存机制实现 VOD 业务,并为每个视频数据包设置广播逻辑链路标识,在 ONU 内增加互联存储单元,当用户请求数据时,OLT 向 ONU 发送视频信号,ONU 收到数据后将数据存储到自身存储单元中,方便用户使用.文献[48]提出一种应对批量传输的间隔策略 EIBT(Exclusive Interval for Bulk Transfer),要求 EPON 轮询周期为文件传输预留一个 EIBT.

3.3.3 节能控制

EPON 系统的节能控制主要分为两个方面:ONU 节能和 OLT 节能.

在 IEEE802.3ah 标准框架下,文献[49]提出了节能机制 EMM(Energy Management Mechanism),实现 ONU 节能,首先将 ONU 切换到睡眠模式;其次由 OLT 确定一个合适的唤醒时间表.文献[50]从 OLT 下行帧流量分配规则和 ONU 休眠控制规则两个方面进行综合考虑,在不扩充标准的 EPON MAC 协议基础上,通过设定恰当的休眠控制参数,提高 ONU 端能效.

文献[51]提出一种基于 SLA 的体系结构.该体系中,OLT 可调整休眠时间,通过发送高优先级数据包唤醒 ONU,实现从活动模式到休眠模式的快速切换,完成快速恢复和同步,实现 ONU 的高效、节能.文献[52]提出将 ONU 和 OLT 的流量纳入参考范围,利用数学分类讨论方法依据原始结构对 ONU 上行时隙进行分布,保证用户 QoS 需求的情况下,实现系统休眠时间的合理分配,提高网络效能.

3.4 GPON

作为 A/BPON 和 SuperPON 技术的延续,GPON 无论在应用领域还是研究领域也同样受到国内外研究人员的关注.综合来看,GPON 的研究主要集中在两个方面:MAC 协议和复合应用.

3.4.1 MAC 协议

GPON 的标准没有明确规定上行帧时隙分配的 DBA 算法,只定义了一个整体的 DBA 流程[1].文献[53]将 OLT 端数据包发送周期的空闲时隙与虚拟轮询周期重叠,提出了一个适用于远距离 GPON 的 MAC 协议和 DBA 算法,可提高有效传输带宽.文献[54]提出一个应用于 GPON 的新 DBA 架构.新架构基于偏移的时序安排,利用 OSFI(Offset-based Scheduling with Flexible Inter-

vals)概念,实现带宽公平分配和网络高效利用,依据不同用户的业务需求,实现 QoS 的鲜明化区分.

3.4.2 复合应用

GPON 的复合应用主要指依靠 GPON 的软硬件平台实现具体业务.这些功能涉及到普通有线网络、传感网络和 WiMAX 等诸多领域.本节将 GPON 的复合应用分为两个方面:(1)VOD 业务的实现;(2)GPON 与其他技术的结合.

(1)VOD 业务的实现

借助 GPON 平台,文献[55]提出 VAST(Video Adaptive STreaming)算法.该算法使用补丁结构为视频帧节省网络带宽,提高网络效率,可以在速率为 2.488Gbps 的 GPON 中为 512 个用户提供 VOD 业务.为保证 VOD 的 QoS,文献[56]首次提出 WPD(Worst-case Playback Delay)问题,建立 GPON 与 WDM-PON 相结合的网络架构对该问题进行研究.新架构下,OLT 通过 GPON 广播普通视频信号,通过 WDM-PON 发送其他视频信号,保证 VOD 业务的 QoS.

(2)GPON 与其他技术的结合

文献[57]提出在 GPON 上利用独立信道实现传感器数据的可靠传输.该信道充分利用拉伸脉冲携带低速率的传感数据在普通数据信道中不被发现这一特性,借助超低的信号振幅,实现传感数据地安全传输.文献[58]提出了 DWDM-PON.较 GPON,在链路预算和链路容量方面有所提高.DWDM-PON 的每个 WDM 波长可实现 128 分路,覆盖范围达到 40km.

在 GPON 平台开发新技术的同时,GPON 技术与新技术之间的融合,实现彼此的兼容也尤其重要.文献[59]从网络体系的角度验证了 GPON 与 XG-PON1 兼容性.文献[60]使用相同 ODN,最先实现了 GPON 与 CDM-GPON(Code Division Multiplexing GPON)的兼容性演示.在不影响现存 GPON 性能的基础上,CDM-GPON 支持 IPTV 等新型网络业务,其最大功率与最小功率比分别为 22dB 和 7dB,该比率低于 WDM-PON 和 G/10G-PONs 的功率.

3.5 NG-PON

NG-PON 包括 NG-PON1 和 NG-PON2.作为 NG-PON1 的代表性技术,10G-EPON 和 XG-PON 的理论研究主要集中在两个方面:网络架构及其算法和网络节能.NG-PON2 作为最新 PON 技术,详细标准尚在研究,研究重点主要集中在节能和兼容性方面.本节将从上述三个方向进行详细讨论.

3.5.1 NG-PON1

(1)网络架构及其算法

文献[61]提出并设计了一种字符混合树/环行 10G-EPON 架构.该架构以分布式控制平台为基础,支持 ONU 间的相互通信,支持 LTE(Long Term Evolution)接入,支持 LTE 业务的网络传输以及商用和民用业务在移动和有线环境之间的无缝传输.文献[62]提出了一种用于实现 10G-EPON 与 1G WDM-PON 兼容的网络架构,并提出 ILP 模型,当 ONU 掉线时,进行时序安排和带宽分配.文献[63]提出并实验了两个复用 PON 系统:TDM-OCDM-PON(Optical Code Division Multiplexing, OCDM)系统、GE-PON 和 10G-EPON 混合系统,结果显示 GE-PON 与 10G-EPON 间可以实现平滑过渡.

文献[64]采用分布式动态时序分配方法完成分布式算法,在满足用户 QoS 需求的同时,可实现 1G-EPON 到 10G-EPON 的平滑过渡.文献[65]提出并验证了 DBA-APC(DBA with an Adaptive Polling Cycle)算法.该算法可以克服上下行传输过程中 TCP(Transmission Control Protocol)吞吐量的受限问题,提高 10G-EPON 的网络吞吐量.

(2)网络节能

针对 10G-EPON 的节能机制,文献[66,67]提出睡眠控制方法和自适应链路速率(Adaptive Link Rate, ALR)控制方法.前者通过流量信息控制 ONU 进入工作模式或睡眠模式;后者依靠流量,完成 OLT 和 ONU 间链路速率 1Gbps 和 10Gbps 之间的切换.同时,文献[67]还提出基于 NC(Network Coding)[68]的 EMM,从 OLT 和 ONU 两端实现节能.

睡眠周期会影响能耗和状态转换延时.文献[69]依据四种能耗状态,建立周期睡眠模式;利用流量到达情况确定状态概率;通过数学分析,设计睡眠周期,实现能耗和状态转换时延的平衡.结合 ONU 的休眠模式,文献[70]利用批量传输机制以及 ONU 休眠功能,完成任意 ONU 休眠计算结构协同工作,实现 ONU 端高效节能.

3.5.2 NG-PON2

NG-PON2 主要包括网络节能、兼容性及可靠性问题两部分.

(1)网络节能

在节能方面,文献[71]提出利用网络流量动态激活 OLT.在该架构中,OLT 之间相互连接,不同 OLT 使用不同波长,这些波长复用到同一光纤中;同一 OLT 下的 ONU 通过 OCDM 使用相同波长.当网络流量较低时,部分 OLT 休眠,工作 OLT 负责管理休眠 OLT 下的 ONU;当网络流量增加,OLT 被激活.文献[72]提出利用收发器模块实现不同 ONU 间的负载均衡,进而实现 OLT 端节能.文献[73,74]提出利用辅助的 WDM 实现 TWDM 架构.该架构在 OLT 前增设无源波长路由器,在 ONU 端增加隧道收发器,通过选择上行波长完成流量传输,实现与 OLT 的通信.流量较低时,ONU 通过选择波长与不同

的 OLT 进行通信,保证其他 OLT 休眠.文献[75]在远程节点中增加了信道组合/分离模块(Channel Combine/Split,CCS),每个 CCS 模块配置一个光放大器,提出动态电源管理机制来提高效能.

(2)兼容性及可靠性

在兼容性及可靠性方面,文献[76]提出将节点分为两层:第一层节点位于支线光纤和分布光纤之间;第二层节点位于分布光纤和最后一英里光纤之间.OLT 利用收发器接收和发送速率 10Gbps 频率 50GHz 的 DWDM 信道.文献[77~79]三篇文章对 TWDM-PON 的兼容性进行了研究,主要包括如何避免波长之间的干扰,实现 TWDM-PON 和现有 PON 技术正常工作.

4 总结

通过研究 PON 的发展动态,前文归纳了 A/BPON、SuperPON、EPON、GPON 以及 NG-PON 的技术特征;介绍了 PON 技术的主要标准及帧结构,汇总了 PON 技术的主要参数;然后将国内外研究热点进行划分,围绕 MAC 协议、帧结构、DBA 算法和节能机制等关键技术,阐述了其研究现状及在 PON 中的重要作用.

NG-PON 作为未来发展的主要方向,需主要考虑以下四个方面的内容:(1)速率方面:在保证 2.5Gbps、10Gbps 对称与非对称速率的基础上,将传输速率提升至 40Gbps 甚至 100Gbps;(2)覆盖范围方面:在保证速率的基础上,实现无源环境下的远距离覆盖,达到 60km 或更远距离;(3)信道利用率方面:需充分考虑 PON 技术与 TDM、WDM、OCDM、FDM 及 TWDM 等技术的融合,提高信道利用空间,在物理媒介一定的前提下,为更多用户提供高带宽服务;(4)兼容性方面:保证与 GPON、EPON 等技术的兼容,实现技术的平稳过渡.

参考文献

[1] C F Lam. Passive Optical Networks: Principles and Practice [M]. San Diego: Academic Press, 2007. 19 – 87.

[2] 王磊,张汉一,郑小平.一种基于 OBGP 协议的光网络域间路由的新型机制[J].电子学报,2004,32(5):718 – 722. WANG Lei, ZHANG Han-yi, ZHENG Xiao-ping. An OBGP-based mechanism for inter-domain routing in optical networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 718 – 722. (in Chinese)

[3] Abrams M, Becker P C, Fujimoto Y, et al. FTTP deployments in the United States and Japan-equipment choices and service provider imperatives [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 236 – 246.

[4] Van de Voorde I, Martin C M, Vandewege J, et al. The super-PON demonstrator: an exploration of possible evolution paths for optical access networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(2): 74 – 82.

[5] Mcgarry M, Reisslein M, Maier M. Ethernet passive optical network architectures and dynamic bandwidth allocation algorithms [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008, 10(3): 46 – 60.

[6] Cale I, Salihovic A, Ivekovic M. Gigabit passive optical network-GPON [A]. 29th International Conference on ITI, 2007 [C]. Cavtat, Croatia: IEEE, 2007. 679 – 684.

[7] I-TUT Recommendation G. 987, 10-gigabit-capable Passive Optical Network (XG-PON) Systems: Definitions, Abbreviations and Acronyms [S].

[8] I-TUT Recommendation G. 987. 1, 10-gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON): General Requirements [S].

[9] I-TUT Recommendation G. 987. 2, 10-gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification [S].

[10] I-TUT Recommendation G. 987. 3, 10-gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON): Transmission Convergence (TC) Layer Specification [S].

[11] I-TUT Recommendation G. 987. 4, 10-gigabit-capable Passive Optical Networks (XG-PON): Reach Extension [S].

[12] Hajduczenia M, da Silva H J A. Next generation PON systems-current status [A]. 11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2009) [C]. Melbourne: IEEE, 2009. 1-8.

[13] Luo Y, Zhou X, Effenberger F, et al. Time-and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 587 – 593.

[14] I-TUT Recommendation G. 989. 1, 40-gigabit-capable Passive Optical Networks (NG-PON2): General Requirements [S].

[15] I-TUT Recommendation G. 989. 2, 40-gigabit-capable Passive Optical Networks (NG-PON2): Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification [S].

[16] I-TUT Recommendation G. 989. 3, 40-gigabit-capable Passive Optical Networks (NG-PON2): Transmission Convergence (TC) Layer Specification Framework [S].

[17] Qiao Yaojun, Yu Xiaoying, Sun Shuhe, et al. Frame structure and MAC protocol of ATM-based PON system [A]. APCC/OECC '99 [C]. Beijing, China: IEEE, 1999. 50 – 52.

[18] Coene C, Stubbe B, Codenie J, et al. Uplink performance evaluation of super optical access networks [A]. Proceedings of the 25th European Conference on Optical Communication [C]. Nice, France: IEEE, 1999. 138 – 139.

[19] Jabar S A. Alternative architectures for bidirectional single mode fiber SuperPON 512 ONU, 100 km [A]. TENCON 05. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference [C]. Melbourne, Qld: IEEE, 2005. 1 – 5.

[20] IEEE 802. 3 [S/OL]: http://standards.ieee.org/gefieee802/

download/802.3-2001.pdf,2013-05-19.

[21] Skubic Bjorn, Jiajia Chen, Jawwad Ahmed, et al. A comparison of dynamic bandwidth allocation for EPON, GPON, and next-generation TDM PON[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(3): 40-48.

[22] Suzuki K I, Fujiwara M, Taguchi K, et al. 128 x 8 split and 80 km long-reach dual-rate 10G-EPON transmission using ALC hybrid burst-mode optical fiber amplifier and SOA pre-amplifier[A]. European Conference and Exposition on Optical Communications[C]. Geneva Switzerland: Optical Society of America, 2011.

[23] Moon Y, Oh C, Ko Y, et al. A MAC scheme for multimedia services over ATM-based PON[A]. TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference[C]. Cheju Island: IEEE, 1999. 1383-1386.

[24] 单广军,朱光喜,刘德明.基于关键链路预测的动态路由和波长分配算法[J].电子学报,2010,38(7):1673-1677. SHAN Guang-jun, ZHU Guang-xi, LIU De-ming. An dynamic routing and wavelength assignment algorithm based on key links forecasting[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1673-1677. (in Chinese)

[25] Ringoot E, Janssens N, Tassent A, et al. Demonstration of dynamic medium access control for APON and SuperPON[A]. Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM' 01[C]. San Antonio, TX: IEEE, 2001. 1570-1574.

[26] Jang J, Park E K. Dynamic resource allocation for quality of service on a PON with home networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(6): 184-190.

[27] Angelopoulos J D, Lepidas N I, Fragoulopoulos E K, et al. TDMA multiplexing of ATM cells in a residential access SuperPON[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(7): 1123-1133.

[28] Song H, Kim B W, Mukherjee B. Multi-thread polling: a dynamic bandwidth distribution scheme in long-reach PON[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(2): 134-142.

[29] Zheng J, Mouftah H T. A survey of dynamic bandwidth allocation algorithms forethernet passive optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2009, 6(3): 151-162.

[30] Dixit A, Das G, Lannoo B, et al. Jitter performance for QoS inethernet passive optical networks[A]. 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2011)[C]. Geneva: IEEE, 2011. 1-3.

[31] Choi S, Park J. SLA-aware dynamic bandwidth allocation for QoS in EPONs[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(9): 773-781.

[32] Murayama D, Oota N, Suzuki K I, et al. Diversity DBA technique for fairly handling various types of EPON ONU[A]. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Kyoto: IEEE, 2011. 1-6.

[33] Murayama D, Oota N, Suzuki K I, et al. Low-latency dynamic bandwidth allocation for100 km long-reach EPONs[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(1): 48-55.

[34] Mc Garry M, Reisslein M, Aurzada F, et al. Shortest propagation delay (SPD) first scheduling for EPONs with heterogeneous propagation delays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(6): 849-862.

[35] Sue C C, Cheng H W. A fitting report position scheme for the gated IPACT dynamic bandwidth algorithm in EPONs[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(2): 624-637.

[36] Hwang I, Lee J Y, Lai K R, et al. Generic QoS-aware interleaved dynamic bandwidth allocation in scalable EPONs[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(2): 99-107.

[37] Radzi N A M, Din N M, Al-Mansoori M H, et al. Intelligent dynamic bandwidth allocation algorithm in upstream EPONs[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(3): 148-158.

[38] Sue C C, Sung W N. Fittingscheduling timing elastic weighted granting (FST-EWG): an EPON DBA algorithm[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(6): 468-479.

[39] Inaty E, Raad R, Fortier P, et al. Codedivision multiple access enabled dynamic bandwidth allocation (CDBA) scheme for E-PON[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(3): 271-281.

[40] Aun Chan C, Attygalle M, Nirmalathas A. Local-traffic-redirection-based dynamic bandwidth assignment scheme for E-PON with active forwarding remote repeater node[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3): 245-253.

[41] Chan C A, Attygalle M, Nirmalathas A. Remote repeater-based EPON with MAC forwarding for long-reach and high-split-ratio passive optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(1): 28-37.

[42] Kwon Y H, Kim M G, Choi S G, et al. Centralized selective multicast retransmission policy for enhanced resource efficiency in EPON-based access networks[J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(9): 1013-1015.

[43] Dhaini A R, Ho P H, Jiang X. QoS control for guaranteed service bundles over fiber-wireless (FiWi) broadband access networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1500-1513.

[44] Li S, Wang J, Qiao C, et al. Mitigating packet reordering in FiWi networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(2): 134-144.

[45] Kim M G, Shen G, Choi J Y, et al. Distributed antenna-based EPON-WiMax integration and its cost-efficient cell planning [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(6): 808 – 817.

[46] Hwang I, Liem A T. A hybrid scalablepeer-to-peer IP-based multimedia services architecture in ethernet passive optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(2): 213 – 222.

[47] Hwang I, Nikoukar A A, Teng C H, et al. Scalablearchitecture for VOD service enhancement based on a cache scheme in an ethernet passive optical network[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(4): 271 – 282.

[48] Wei X, Aurzada F, Mc Garry M P, et al. EIBT: exclusive intervals for bulk transfers on EPONs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 99 – 110.

[49] Yan Y, Wong S W, Valcarenghi L, et al. Energy management mechanism for ethernet passive optical networks (EPONs) [A]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. Cape Town: IEEE, 2010. 1 – 5.

[50] Zhang J, Hosseinabadi M T, Ansari N. Standards-compliant E-PON sleep control for energy efficiency: design and analysis [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(7): 677 – 685.

[51] Shi L, Mukherjee B, Lee S S. Energy-efficient PON with sleep-mode ONU: progress, challenges, and solutions [J]. IEEE Network, 2012, 26(2): 36 – 41.

[52] Zhou Y, Gu R, Ji Y. An energy-efficient mechanism of passive optical access network based onethernet[A]. 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN)[C]. Chengdu, China: IEEE, 2013. 1 – 4.

[53] Chang C H, Alvarez N M, Kourtessis P, et al. Full-service MAC protocol for metro-reach GPONs[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(7): 1016 – 1022.

[54] Kanonakis K, Tomkos I. Offset-based scheduling with flexible intervals for evolving GPON networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3259 – 3268.

[55] Choi J, Yoo M, Mukherjee B. Efficient VoD streaming for broadband access networks [A]. IEEE GLOBECOM 2008 [C]. New Orleans, LO: IEEE, 2008. 1 – 6.

[56] Wang J, Qiao C, Li Y, et al. On guaranteed VoD services in next generation optical access networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(6): 875 – 888.

[57] Wang Z, Kravtsov K, Chang J, et al. Sensor data transmission overlay on gigabit passive optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(7): 553 – 558.

[58] Kim K O K, Doo K H, Lee S S. Design of a hybrid PON system for GPON reach extension on the basis of colorless DWDM-PON and 3R regenerator [A]. IEEE GLOBECOM 2010[C]. Miami, FL: IEEE, 2010. 1 – 4.

[59] Milosavljevic M, Thakur M P, Kourtessis P, et al. A multi-wavelength access network featuring WiMAX transmission over GPON links[A]. 2010 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2010) [C]. Torino: IEEE, 2010. 1 – 3.

[60] Tamai H, Sarashina M, Iwamura H, et al. First demonstration of coexistence of standard gigabit TDM-PON and code division multiplexed PON architectures toward next generation access network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27 (3): 292 – 298.

[61] Madamopoulos N, Peiris S, Antoniades N, et al. A fully distributed10G-EPON-based converged fixed-mobile networking transport infrastructure for next generation broadband access [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(5): 366 – 377.

[62] Kiaei M S, Assi C, Meng L, et al. On the co-existence of 10G-EPONs and WDM-PONs: a scheduling and bandwidth allocation approach [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1417 – 1426.

[63] Kodama T, Tanaka Y, Yoshima S, et al. Scaling the system capacity and reach of a 10G-TDM-OCDM-PON system without an en/decoder at an ONU[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(2): 134 – 143.

[64] Garfias P, Gutiérrez L, Sallent S. Enhanced DBA to provide QoS to coexistent EPON and 10G-EPON networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(12): 978 – 988.

[65] Ikeda H, Kitayama K. Dynamic bandwidth allocation with adaptive polling cycle for maximized TCP throughput in 10G-EPON[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(23): 5508 – 5516.

[66] Kubo R, Kani J, Ujikawa H, et al. Study and demonstration of sleep and adaptive link rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(9): 716 – 729.

[67] Liu X, Fouli K, Kang R, et al. Network-coding-based energy management for next-generation passive optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(6): 864 – 875.

[68] 曲志坚,柏琳,刘晓红.基于逻辑运算的光域网络编码节点模型[J].电子学报,2012,40(7):1304 – 1308.
Qu Zhijian, Bo Lin, Liu Xiaohong. Logic-calculations-based optical network coding mode [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(7): 1304 – 1308. (in Chinese)

[69] Bang H, Kim J, Lee S S, et al. Determination of sleep period for cyclic sleep mode in XG-PON power management[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(1): 98 – 100.

[70] Dhaini A R, Ho P H, Shen G. Toward green next-generation passive optical networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(11): 94 – 101.

[71] Saito H, Iwamura H, Minato N, et al. Fieldtrial and simulation of bandwidth allocation for efficient OLT operation on virtualized PON[A]. European Conference and Exhibition on Optical Communication[C]. Amsterdam: IEEE, 2012.

[72] Cheng N, Wang L, Liu D, et al. Flexible TWDM PON with load balancing and power saving[A]. 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication(ECOC 2013)[C]. London: IET, 2013. 1 – 3.

[73] Kani J. Powersaving techniques and mechanisms for optical access networks systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(4): 563 – 570.

[74] Kani J, Shimazu S, Yoshimoto N, et al. Energy-efficient optical access networks: issues and technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2): S22 – S26.

[75] Feng H, Chae C J, Tran A V, et al. Cost-effective introduction and energy-efficient operation of long-reach WDM/TDM PON systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(21): 3135 – 3143.

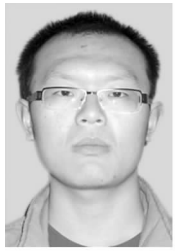
[76] Dixit A, Lannoo B, Colle D, et al. Wavelength switched hybrid TDMA/WDM(TWDM)PON: a flexible next-generation optical access solution[A]. 14th International Conference on Transparent Optical Network(ICTON 2012)[C]. Coventry: IEEE, 2012. 1 – 5.

[77] Straullu S, Forghieri F, Bosco G, et al. Coherent reflective PON architecture: can it be made compatible with TWDM-PON[A]. 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication(ECOC 2013)[C]. London: IET, 2013. 1 – 3.

[78] Gaudino R, Curri V, Capriata S. Propagation impairments due toraman effect on the coexistence of GPON, XG-PON, RF-video and TWDM-PON[A]. 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication(ECOC 2013)[C]. London: IET, 2013. 1 – 3.

[79] Korcek D, Mullerova J. Wavelengthprotection within coexistence of current and next-generation PON networks next-generation PON networks[A]. 2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks(ICTON 2013)[C]. Annecy, French: IEEE, 2013. 1 – 5.

作者简介



姚琳元(通信作者)　男,1988 年 11 月生于天津静海,博士研究生,北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室.主要从事下一代互联网接入网关键技术研究.
E-mail: 11111020@bjtu.edu.cn

宋　飞　男,1983 年 4 月出生于河北,北京交通大学电子信息工程学院博士,下一代互联网互联设备国家工程实验室副教授,硕士研究生导师,主要研究方向:下一代互联网体系结构,无线通信及云计算.
E-mail: fsong@bjtu.edu.cn