

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.220065.

专题:下一代超 100 G 光接入关键技术

刘启芳,张宇,周泉.基于 PON 的超低时延技术方案探讨[J].光通信研究,2024(1):220065.

Liu Q F, Zhang Y, Zhou Q. Discussion on Ultra-Low Delay Technology Solutions Based on PON[J]. Study on Optical Communications, 2024(1):220065.

基于 PON 的超低时延技术方案探讨

刘启芳,张宇,周泉

(烽火通信科技股份有限公司 武汉烽火技术服务有限公司,武汉 430074)

摘要:【目的】随着各种互联网新兴业务的崛起以及无源光网络(PON)在行业应用场景的延伸,作为第五代固定网络(F5G)代表技术的 PON,需要不断演进升级才能满足未来网络的需求。其中,PON 的时延是迫切要改善的关键网络性能指标,故文章对 PON 的低时延技术进行了深入研究。【方法】文章首先总结了当下 PON 在低时延方面所面临的挑战,分析了导致 PON 时延较高的主要原因有两个,分别是因光网络单元(ONU)带宽分配机制引入的上行固有时延和因 ONU 注册/测距机制引入的上行随机时延。因此,文章提出了基于单帧多突发技术和独立注册通道技术的两种超低时延技术方案,并进行实验验证分析。【结果】通过验证分析,对于单帧多突发技术的低时延技术方案,结合时延和带宽利用率两个性能指标综合来看,1/4 调度周期表现最优,但会牺牲小部分带宽,比较适合传输对时延敏感而带宽不敏感的业务;对于独立注册通道技术的低时延技术方案,由于引入了额外的波长用于 ONU 注册/测距通道,可以完全消除正常业务通道因注册/测距的静默窗口引入的额外时延和抖动。【结论】综合而言,文章所探讨的基于 PON 的超低时延技术方案,可以有效降低 PON 的时延,有助于促进虚拟现实(VR)类等新兴业务的规模商用和工业互联网的快速发展。

关键词:无源光网络;超低时延技术;虚拟现实;工业互联网

中图分类号:TN915.6 **文献标志码:**A

Discussion on Ultra-Low Delay Technology Solutions Based on PON

LIU Qifang, ZHANG Yu, ZHOU Quan

(Wuhan FiberHome Technical Services Co., Ltd., FiberHome Telecommunication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: 【Objective】With the advent of new internet services and the broader application of Passive Optical Network (PON) in the industry, PON, as the core technology of the 5th Generation Fixed Networks (F5G), needs to evolve and upgrade continuously to meet the needs of the future network. The latency of PON networks is a key network performance indicator that urgently needs improvement. This article conducts in-depth research on the low latency technologies in the PON networks. 【Methods】This article first summarizes the challenges faced by current PON networks in terms of low latency. It identifies two main reasons for high latency: the inherent uplink delay introduced by the Optical Network Unit (ONU) bandwidth allocation mechanism and the random uplink delay introduced by the ONU registration/ranging mechanism. To address these issues, this article proposes two ultra-low latency solutions based on single frame multi burst technology and an independent registration channel, followed by experimental verification and analysis. 【Results】Analysis shows that the single frame multi burst approach optimally balances latency and bandwidth utilization in a quarter scheduling cycle, albeit at the expense of some bandwidth. This method is ideal for latency-sensitive, bandwidth-tolerant services. The independent registration channel solution, by dedicating an extra wavelength for ONU registration/ranging, eliminates the extra delay and jitter from silent periods in standard service channels. 【Conclusion】The ultra-low latency solution for PON discussed in this article can effectively reduce network latency, and help promote the large-scale commercialization of emerging applications such as Virtual Reality (VR) and accelerate the growth of industrial internet.

Key words: PON; ultra-low delay technology; VR; industrial internet

0 引言

近些年,随着各种互联网新兴业务的崛起以及无源光网络(Passive Optical Network, PON)在行业应用场景的延伸,作为第五代固定网络(The 5th

Generation Fixed Networks, F5G)代表技术的 PON^[1],也需要不断演进升级才能满足未来网络的需求^[2]。因此,需梳理主流新兴业务和新的应用场景对网络的新需求,找准 PON 技术发展的立足点,二者才能更好地适配,进一步指导固网投资与建设

收稿日期:2022-11-07; 修回日期:2022-11-25; 纸质出版日期:2024-02-10

作者简介:刘启芳(1987—),女,重庆铜梁人。高级工程师,硕士,主要研究方向为无源光网络技术。

通信作者:刘启芳,高级工程师。E-mail:liuqf@fiberhome.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

的方向。本文主要以网络低时延特性的需求展开分析。

1 PON 发展的低时延需求分析

1.1 新兴业务部署需要超低时延网络

随着技术的发展和人们对极致体验的追求,8K 视频、虚拟现实(Virtual Reality, VR)和云游戏等一批新兴业务正蓬勃发展。相对于传统业务,新兴业务对网络时延非常敏感。比如,VR 类业务体验主要体现为画质和交互体验。其中,画质体验需要有较高的视觉信息质量,避免产生眩晕感;交互体验需要运动和视野延迟时间短,避免产生黑边和滞后感^[3]。因此网络时延对 VR 类业务尤其是强交互 VR 业务非常重要,表 1 所示为 VR 类业务的网络通信指标要求。

表 1 VR 类业务网络通信指标要求^[3]

Table 1 Requirements of VR services on network communication indicators

场景		端到端 时延/ms	带宽/Mbit/s
强交互	起步阶段(4K)	≤20	≥80
VR 业务	舒适体验(8K)	≤20	≥130
(游戏类)	理想体验(≥12K)	≤10	≥540
弱交互 VR 业务	起步阶段(4K)	≤20	≥60
	舒适体验(8K)	≤20	≥180
	(全景视频类)	理想体验(≥12K)	≤20

近些年,虽然这些新兴业务陆续都有了商用的模型,但要实现大规模商用部署,走进千家万户,除了大带宽的需求以外,对网络的低时延特性也提出了较高的要求。

1.2 工业互联网发展依赖超低时延技术

随着 PON 技术在电信光接入网中的广泛部署及成熟应用,近些年,PON 技术逐渐向行业网扩展融合。在众多行业应用的延伸场景中,以工业 PON 为代表的工业互联网最为典型。工业 PON 是将 PON 技术与工业场景的业务和技术特点相结合,形成的一套全新的安全、可靠、融合和先进的工业网络综合解决方案,已广泛应用于工业园区、工厂和现场^[4]。

相对于电信级光接入网的应用场景,工业 PON 的应用场景对可靠性、倒换时延、工业协议转换和工业环境指标等方面要求更为严苛。因此,工业 PON 并不是简单地将 PON 技术和工业场景进行绑定,而是需要进行深度融合。工业 PON 系统已从 1.0 发展到 2.0,正在向 3.0 演进,在新的工业应用场景中,对 PON 的超低时延提出了新的要求,表 2 所示

为部分典型工业网络通信指标要求。

表 2 典型工业网络通信指标要求

Table 2 Typical requirements of industrial network communication

场景	端到端 时延/ms	抖动/ms	可靠性(%)	连接密度/ 设备/km ²
触觉反馈交互	0.5	—	99.999 0	低
离散自动化 (运动控制)	1.0	1 000	99.999 9	100 000
高压配电	5.0	1	99.999 9	1 000
智能交通系统	10.0	2	99.999 9	1 000
远程控制	5.0	—	99.999 0	低
离散自动化	10.0	1	99.990 0	100 000
中压配电	25.0	25	99.900 0	1 000
过程自动化	50.0	20	99.999 9	1 000
远程控制	50.0	20	99.900 0	10 000
过程自动化监控	50.0	20	99.900 0	10 000

从新兴业务部署和工业互联网发展两个方面的需求分析可以看到,网络的低时延特性是刚需,对现有的 PON 在低时延方面提出了较高的要求。

2 现有 PON 技术低时延困境剖析

由于 PON 是点到多点(Point To Multiple Point, P2MP)架构,为了实现光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)与光网络单元(Optical Network Unit, ONU)之间正常有序的数据传输,现有主流时分复用(Time Division Multiplexing, TDM) PON 技术标准制定了相关的技术要求。其中,ONU 带宽分配和 ONU 注册/测距机制是导致 PON 时延较高的最主要原因。

2.1 ONU 带宽分配机制导致上行固有时延

在 TDM PON 系统中,上行采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的复用机制。OLT 负责为下挂的多个 ONU 分配上行时隙,而每个 ONU 只能在 OLT 分配的时隙内发送数据,这也是 ONU 的带宽分配机制^[5]。对于某个特定的 ONU,其上行时隙窗口是有限的,从某个上行时隙结束到下一个时隙开始的这段窗口是属于其他 ONU 的,该 ONU 不能占用。而在此窗口期,ONU 如有要发送的数据将会进行本地缓存,等待 OLT 为其分配下一个时隙。

如图 1 所示,以千兆无源光网络(Gigabit Passive Optical Networks, GPON)技术为例,OLT 借助下行帧中的 BWmap 字段,以 125 μs 的周期为下挂 ONU 分配上行时隙(GPON 采用定长帧,帧长为 125 μs)。每个 125 μs 周期中,ONU_i只获得 1 个上行时隙时,获得下 1 个上行时隙需再等 125 μs。因此,

可总结出 ONU 带宽分配机制对 ONU 的上行时延有较大影响,最大时延为 $125\ \mu\text{s}$,属于固有时延。

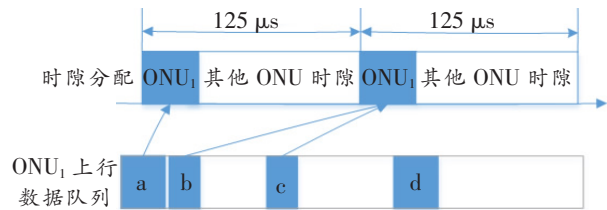


图1 PON系统中ONU上行时隙划分示意
Figure 1 Schematic diagram of ONU uplink timeslot division in PON system

2.2 ONU注册/测距机制引入上行随机时延

在TDM PON系统中,ONU注册/测距机制是引入时延的另一个原因。为保证新ONU的注册接入,OLT会定期开启静默窗口,在此窗口期,会暂停对已上线ONU划分上行时隙^[5]。在ONU注册阶段,静默窗口一般设置为 $250\ \mu\text{s}$,其中 $200\ \mu\text{s}$ 为不同距离ONU到达OLT的往返时延差(典型PON系统覆盖半径为 $0\sim 20\ \text{km}$,故在光纤传输往返时延差达 $200\ \mu\text{s}$), $2\ \mu\text{s}$ 是不同ONU的响应时间差,剩余 $48\ \mu\text{s}$ 为ONU在收到授权开窗时额外的随机时延,用于降低距离相近的ONU在上行注册时的冲突概率。除了ONU注册外,在ONU测距中,OLT也采用静默窗口来实现。

由于ONU注册/测距时不允许正常ONU发送上行数据,而此时某正常ONU如有上行业务需要发送,需等到静默窗口结束。因此,ONU注册/测距机制也会引入额外的上行时延,该时延一般为静默窗口设置的时间,即 $250\ \mu\text{s}$ 。同时,由于一个

PON中ONU注册/测距事件随机,所以这个时延为随机时延。

正是由于现有PON系统中存在因ONU带宽分配机制导致的上行固有时延和ONU注册/测距机制引入的上行随机时延,最大分别为 125 和 $250\ \mu\text{s}$,在新兴业务部署和工业互联网应用场景存在时延方面的困境和挑战,进而需研究PON超低时延技术。

3 PON超低时延技术方案探析

国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector,ITU-T) 50 Gbit/s PON已明确为后10 Gbit/s PON的演进技术^[6],在标准制定和讨论中,为应对低时延的应用场景,多个低时延技术方案被提出。为了与现网兼容,业界同时在研究将低时延技术应用到现网正大规模部署的万兆对称无源光网络(10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network, XGS-PON)系统中。从实用性角度,本文主要对单帧多突发技术和独立注册通道技术方案进行探讨。

3.1 单帧多突发技术方案

单帧多突发技术主要是指将原来 $125\ \mu\text{s}$ 的带宽分配周期缩小,单帧内进行多次带宽分配,进而降低上行传输时延,这里的多次可以是 $2\sim 8$ 次。例如,如果采用单帧4次调度,调度周期可以缩短至 $125\ \mu\text{s}/4=31.25\ \mu\text{s}$,则每 $125\ \mu\text{s}$ 的帧中,ONU₁可获得4个上行发送时隙的机会,上行最大时延理论上可以缩减到原来的 $1/4$,如图2所示。

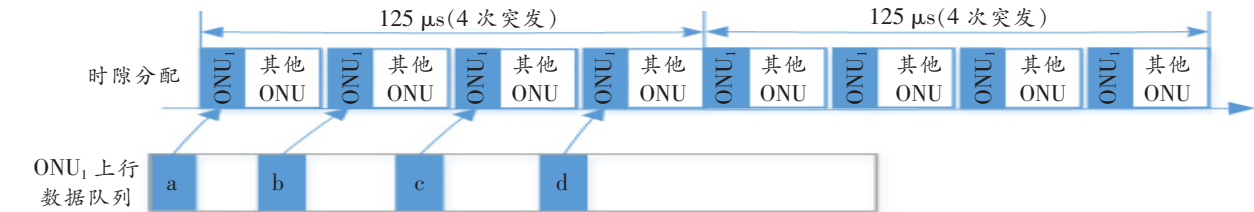


图2 单帧多突发技术示意图
Figure 2 Schematic diagram of single frame multi burst technology

采用XGS-PON系统进行仿真,调度周期分别设置为原来 $125\ \mu\text{s}$ 的 $1/2$ 、 $1/4$ 和 $1/8$,测试ONU上行平均时延和吞吐量,并将吞吐量换算为有效带宽利用率(有效带宽利用率=实测吞吐量/上行总带宽),测试结果如图3所示。由图可知,缩小调度周期可以适当减小时延,但非周期越小越好。图中测试的3个典型调度周期, $1/4$ 调度周期的时延较 $1/2$

调度周期要小,但 $1/8$ 调度周期的时延反而较 $1/4$ 调度周期要大,主要是因为单次分配时隙越少,数据包被分片发送的可能性就越大,进而造成了时延的增大。此外,随着数据包被分片概率的增加,引入的封装开销也就越大,进而会造成带宽利用率的下降,如图所示, $1/8$ 调度周期的带宽利用率明显降低(约为 41.5%)。因此,结合时延和带宽利用率两个性

能指标综合来看,1/4 调度周期表现最优。

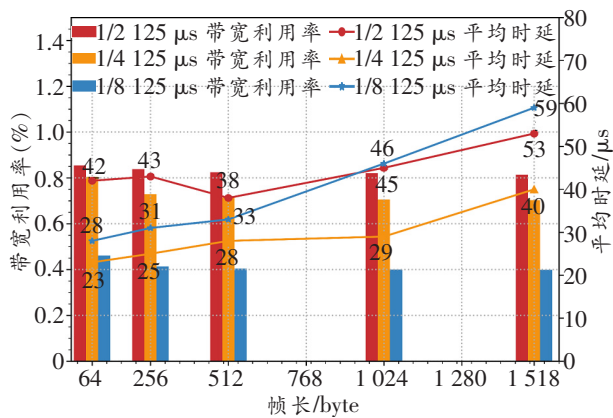
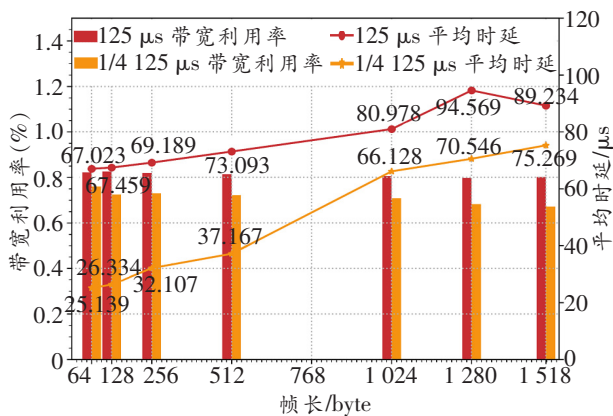
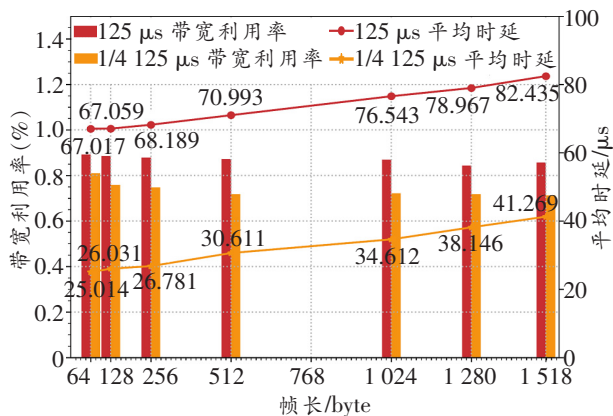


图 3 不同调度周期平均时延和带宽利用率对比图
Figure 3 Comparison of Average Delay and Bandwidth Utilization in Different Scheduling Periods

另外,基于 XGS-PON 的 2.5 和 10.0 Gbit/s 上行通道分别进行原始调度周期和 1/4 调度周期的时延和带宽利用率测试,结果如图 4 所示。采用 1/4



(a) XGS-PON 2.5 Gbit/s 通道
(a) XGS-PON 2.5 Gbit/s channel



(b) XGS-PON 10 Gbit/s 通道
(b) XGS-PON 10 Gbit/s channel

图 4 采用单帧多突发技术前后时延和带宽利用率对比
Figure 4 Comparison of delay and bandwidth utilization before and after using single frame multi burst technology

调度周期在 2.5 和 10.0 Gbit/s 上行通道的时延与原始调度周期相比分别平均降低了 40.7% 和 56.8%,带宽利用率也分别降低了 12.11% 和 14.98%。因此,单帧多突发技术确实可以缩小 PON 系统的上行传输时延,但会牺牲小部分带宽,比较适合传输对时延敏感而带宽不敏感的业务。

3.2 独立注册通道技术方案

为了避免因 ONU 注册/测距机制引入的额外随机时延,一种有效的方法就是引入一个独立的波长用于 ONU 注册/测距^[6-7]。一种典型的利用独立注册通道的 PON 系统中,会采用 2 个上行波长 (λ_{u1} 和 λ_{u2}) 和 1 个下行波长 (λ_d),进而 OLT 侧模块需要 2 个波长接收机 (R_{x1} 和 R_{x2}) 和 1 个波长发射机 (T_x),ONU 侧模块需要 1 个波长接收机 (R_x) 和 2 个波长发射机 (T_{x1} 和 T_{x2}),如图 5 所示。其中,某个上行波长(如 λ_{u1}) 主要用于 ONU 注册 / 测距,但为了提高资源利用率, λ_{u1} 还可以被灵活调度用于对时延不敏感的业务传输,而 λ_{u2} 就可以长期承载对时延敏感的业务传输。在某些特定应用场景下,OLT 还可以实现两个上行通道间的负荷均衡,使上行带宽调度更有效率。而这样的系统和调度机制,恰恰能够满足当下时延敏感特性各异的业务在一个网络中共生的需求。

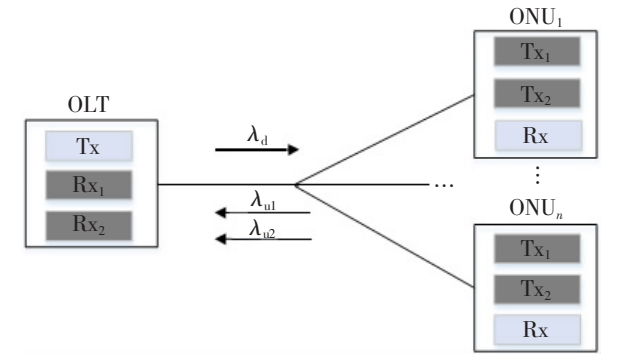


图 5 典型的独立注册通道的 PON 系统
Figure 5 A typical PON system with independent registration channel

在 TDM PON 系统中,通过引入额外波长用于 ONU 注册/测距通道,可以完全消除正常业务通道因注册/测距的静默窗口引入的额外时延和抖动。同时,将单帧多突发技术引入至单通道的带宽分配,所提供的低时延通道便可满足新兴业务部署和工业 PON 的应用场景需求。

4 结束语

本文从 PON 广泛应用的场景出发,总结了目

前 PON 在低时延方面面临的挑战,并从技术原理角度分析了 PON 时延较高的主要原因,探讨了基于 PON 的具体可实现低时延技术方案,且进行了单帧多突发技术的实验验证。然而,基于 PON 的低时延技术方案还有很多种,例如,在固移融合场景中,采用光与无线协同动态带宽分配(Cooperative Dynamic Bandwidth Allocation, CODBA)可降低第五代移动通信(The 5th Generation Mobile Communication, 5G)前传业务的时延。随着业务的发展和网络的演变,PON 的低时延技术方案远不止于此,还需根据行业融合的需求做进一步的探索。

参考文献：

[1] 范立. F5G 时代 PON 技术的演进方向和策略[J]. 无线互联科技,2022,19(12):82—84.
Fan L. The Evolutionary Trend and Strategy of PON Technology in the F5G[J]. Wireless Internet Technology,2022,19(12):82—84.

[2] 杨立伟,易湘诚,刘兆瑞,等. 基于光纤传能的异构无源光网络研究[J]. 光通信研究,2022(1):23—26.
Yang L W, Yi X C, Liu Z R, et al. Heterogeneous Passive Optical Network based on Power over Fiber [J]. Study on Optical Communications,2022(1):23—26.

[3] 宽带发展联盟. 固定家庭宽带高质量业务体验研究白

皮书[EB/OL]. (2019-06-16) [2022-11-01]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201906/P020190627496635216501.pdf>.

Broadband Development Alliance. White Paper on High Quality Service Experience of Fixed Home Broadband[EB/OL]. (2019-06-16) [2022-11-01]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201906/P020190627496635216501.pdf>.

[4] 工业互联网产业联盟. 工业 PON2.0 白皮书[EB/OL] (2020-08-31) [2022-11-01]. http://aii-alliance.org/upload/202009/0907_101809_849.pdf.
Alliance of Industrial Internet. White Paper on Industrial PON 2.0[EB/OL](2020-08-31)[2022-11-01]. http://aii-alliance.org/upload/202009/0907_101809_849.pdf.

[5] ITU-T G. 9807. 1-2016, 10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network (XGS-PON)[S].

[6] ITU-T G. 9804. 2-2021, Higher Speed Passive Optical Networks: Common Transmission Convergence Layer Specification[S].

[7] 张伟良,黄新刚,马壮. 基于专用激活波长的低时延 50 G-PON 原理与实现[J]. 中兴通讯技术,2022, 28(4):58—62.
Zhang W L, Huang X G, Ma Z. Mechanism and Application of DAW-based Low Latency 50 G-PON[J]. ZTE Technology Journal, 2022, 28(4): 58—62.