

doi:10.13756/j.gtxyj.2024.230168.

专题:下一代超100 G光接入网关键技术

张佳玮,苏琛,纪越峰. 工业PON中确定性网络传输技术研究[J]. 光通信研究, 2024(1):230168.

Zhang J W, Su C, Ji Y F. Research on Deterministic Network Transmission Technology in Industrial PON[J]. Study on Optical Communications, 2024(1):230168.

工业PON中确定性网络传输技术研究(特邀)

张佳玮,苏琛,纪越峰

(北京邮电大学信息光子学与光通信全国重点实验室,北京 100876)

摘要:无源光网络(PON)凭借其大带宽、低成本和抗电磁干扰等优势,被认为是下一代工业互联网的重要组网技术之一。然而,以“带宽提升”为主要技术发展思路的常规PON,其传输控制机制难以满足以“时间敏感”为特征的高品质工业业务传输需求,对常规PON的网络传输能力提出了重要挑战,迫使其融入新的特性,即确定性。文章以时分复用(TDM)-PON为主要研究对象,首先阐述了工业互联网的业务特征及传输需求,分析了工业互联场景下常规TDM-PON面临的两大技术挑战:一是传统带宽分配方案引起的时延不确定性;二是队列调度机制僵化引起的时延不确定性。围绕上述挑战,文章介绍了提升TDM-PON确定性网络传输能力的关键技术,如协作传输接口、单帧多突发和确定性带宽分配(DetBA)等。其次,文章介绍了一种基于网络演算的时延边界建模思路作为确定性工业PON系统设计与性能评估的理论模型。最后,文章从业务层、媒质接入控制(MAC)层、物理层及控制管理平面等多个角度探讨了确定性工业PON的潜在技术及发展方向。

关键词:工业无源光网络;确定性网络传输技术;确定性带宽分配;网络演算

中图分类号:TN915.6

文献标志码:A

Research on Deterministic Network Transmission Technology in Industrial PON

ZHANG Jiawei, SU CHEN, JI Yuefeng

(State Key Lab of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Passive Optical Network (PON) is considered a crucial networking technology for the next-generation industrial Internet due to its advantages of high bandwidth, cost-effectiveness and resistance to electromagnetic interference. However, the technical development of conventional PON is based on the principle of "bandwidth enhancement", making its transmission scheduling mechanism difficult to meet the transmission requirements of "time-sensitive" industrial services. This poses a significant challenge to the network transmission capability of conventional PON, necessitating the incorporation of determinism as a new characteristic. This paper mainly focuses on the Time Division Multiplexing (TDM)-PON. Firstly, it illustrates the service characteristics and transmission requirements of industrial Internet, and analyzes the two major technical challenges faced by conventional TDM-PON in industrial Internet scenarios: one being uncertain delays caused by the traditional bandwidth allocation scheme; and the other being uncertain delays caused by the inflexible scheduling mechanism. Addressing these challenges, this paper summarizes the key technologies to enhance the deterministic transmission capability of TDM-PON, such as collaborative transmission interfaces, multi-bursts per frame, and Deterministic Bandwidth Allocation (DetBA). Furthermore, this paper proposes a network calculus-based delay boundary modeling method as a theoretical model for designing and evaluating the performance of deterministic industrial PON systems. Finally, potential technologies and directions for deterministic industrial PON are discussed, including the service layer, the Media Access Control (MAC) layer, the physical layer, and the control and management plane.

Key words: industrial PON; deterministic network transmission technology; DetBA; network calculus

0 引言

工业互联网旨在实现人、机器、平台等生产要素的泛在互联,其发展大体可分为3个阶段:阶段1,最初的工业互联网只包含工业控制网络,用于工业控制系统内部(工业设备与可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC))以及系统间

(PLC和PLC)控制、监测和诊断信号的传递,多为机器与机器的通信,实时性与可靠性要求极高,因此,多采用私有化通信协议和点到点的连接方式;阶段2,随着企业信息化、数字化需求的逐渐增加,以现代通信网络技术为基础的工业信息网络发展起来,从此工业互联网包含了工业控制网络和工业信息网络“两张网”,且各自演进,独立发展;阶段3,

收稿日期:2023-11-15; 修回日期:2023-11-23; 纸质出版日期:2024-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62271077;61971055)

作者简介:张佳玮(1984—),男,河北唐山人。教授,博士,主要研究方向为光网络架构及优化。

通信作者:张佳玮,教授。E-mail: zjw@bupt.edu.cn

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

在新技术的推动下,“两张网”呈现出融合发展趋势,即在一张物理网络中同时传输控制信号与数据信息^[1]。“共网承载”对传统通信网络传输性能提出了更高要求。典型的工业互联网组网技术有时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN)、工业第五代移动通信(the 5th Generation Mobile Communication Technology, 5G)和工业无源光网络(Passive Optical Network, PON)等^[2-3]。

相比于其他组网技术,PON具有如下优势:(1)抗干扰能力强。光纤作为主要传输媒介具有抗电磁干扰能力强的特点,适合强电环境下的工业场景。(2)全光扁平结构和无源器件组网。采用点到多点(Point-to-Multipoint, P2MP)的树状拓扑、无需复杂路由、业务一跳直达,且光分配网络(Optical Distributed Network, ODN)由光纤、光耦合器等无源光器件组成,部署方便,运维成本低。(3)大带宽和低时延。采用光纤通信方式,具有传输容量大、信号损伤小的特点。业务端到端全光传输、无光电转化与电层处理。

然而,以“带宽提升”为主要技术发展思路的常规PON,主要面向家庭宽带等传统通信场景,其传输控制机制难以满足以“时间敏感”为特征的高品质工业业务传输需求,亟须突破传统时分复用多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术的固有时延和抖动限制,实现网络的确定性传输。在工业PON系统中,确定性网络传输能力是指通过业务调度和传输行为的控制,为时间敏感业务流提供可预测和可保证的“传输通道”,实现有界时延和抖动的能力。

围绕上述需求,国内外标准化组织及科研机构开展了针对确定性工业PON体系架构及关键技术的研究。欧洲电信标准化协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)发布的《F5G Industrial PON》白皮书描述了工业PON的应用场景、系统架构及核心功能^[4];国际电信联盟电信标准化部门(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)第15研究组第2工作组开展了针对低时延PON传输技术的标准化研究,包括PON时延范围和确定性传输能力的定义等;在国内,中国工业互联网产业联盟发布了《高性能工业PON》白皮书,探讨了工业互联网业务类型及传输需求^[3]。

本文以ITU-T定义的时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)-PON为主要研究对象,阐述了工业互联网的业务特征及传输需求,分析了常规PON的媒质接入控制(Media Access Control, MAC)层调度机制在传输时间敏感的工业业务时所面临的主要挑战,阐述了提升工业PON确定性传输能力的关键技术,介绍了基于网络演算的时延与缓存边界建模思路。针对新技术与新趋势,从业务层、MAC层、物理层及控制管理平面等多个角度探讨了确定性工业PON的潜在技术及发展方向。

1 工业互联网业务特征及传输需求

工业PON是一种基于P2MP的无源光组网架构,包括光线路终端(Optical Line Terminal, OLT)、ODN、光网络单元(Optical Network Unit, ONU)以及工业PON网关,如图1所示。工业场景

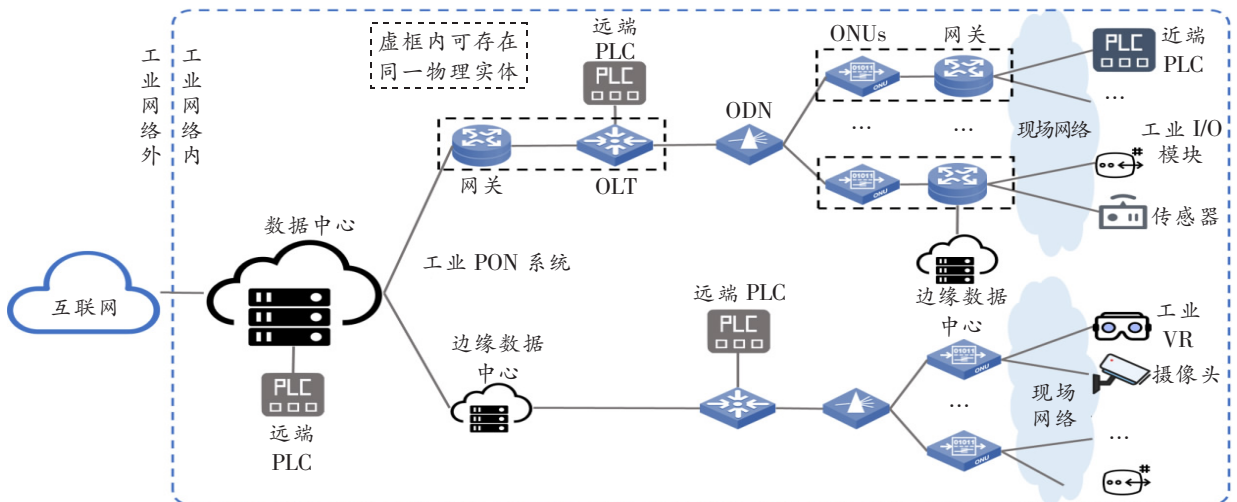


图1 工业PON系统架构

Figure 1 Industrial PON system architecture

中包含各类生产元素,如工业输入/输出(Input/Output, I/O)模块、传感器、工业虚拟现实(Virtual Reality, VR)、数据中心和 PLC 等。其中,部分工业元素(如工业 I/O 模块、传感器、工业 VR 和近端 PLC)位于现场以支持工业生产和过程的监控。另一部分工业元素(如远端 PLC 和数据中心)则位于车间或园区机房,用于集中控制和数据处理。为了满足时间敏感业务的低时延传输需求,数据中心和远端 PLC 可下沉至 OLT、ONU 甚至是工业 PON 网关,以实现业务的及时处理。工业元素可通过现场网络与工业 PON 相连。其中,现场网络包括现场总线和工业以太网等,通常采用私有通信协议,且协议种类多,需要进行协议转换才能在 PON 中进行传输。因此,工业 PON 网关的一个主要功能是实现私有通信协议到通用通信协议(如,以太网)的转换。此外,工业 PON 网关亦可实现流量整形、抖动补偿和时延监测等功能,用于提升工业流的时延和抖动性能。工业 PON 承载了各类工业生产元素的通信需求,主要包含 3 种典型的通信类型(见表 1)^[5]:(1)控制器与设备间(Controller-to-Device, C2D)通信,主要用于 PLC 到工业 I/O,例如,控制器对机械臂的控制;(2)控制器与控制器间(Controller-to-Controller, C2C),即 PLC 间通信,多用于工业流水线中各类生产设备间的协作;(3)设备与计算机间(Device-to-Compute, D2Cmp)通信,主要用于工业设备与云服务器间,如机器视觉和数字孪生等业务。

上述通信类型按照流量特征又可分为等时流(Isochronous Flow)、循环流(Cyclic Flow)和突发流(Bursty Flow)。

(1) 等时流:即同步周期流,用于同步 C2C 和

C2D 类业务,如运动控制,是一种低带宽、低时延和高可靠性的业务。数据包周期性发送,且大小固定不变,通常<100 字节。为保证对设备的连续控制,等时流对时延和抖动的要求极高,通常时延要求不超过流周期,抖动要求<1 μs。因此,需要工业控制系统与传输网络进行严格的时间同步,以保证业务流的确定性传输。可借鉴 TSN 中时间感知整形(Time-Aware Shaper, TAS)的思想,对等时流在 PON 的传输过程进行统一规划。

(2) 循环流:即异步周期流,用于异步 C2C 和 C2D 类业务,如循环诊断。工业控制系统不需要与传输网络进行时间同步,而是通过本地时钟发送数据包,是一种低带宽、低时延和高可靠性工业业务。与等时流一样,数据包为周期性发送,且大小固定,通常不超过 1 000 字节。该类业务对时延和抖动的要求低于等时流,其时延要求不超过流周期,抖动要求通常为时延的一半。为了保证该类流的确定性,可以借鉴 TSN 中循环队列转发(Cycling Queuing and Forwarding, CQF)的思想,通过周期性传输窗口(Transmission Window, TW)保证业务的时延和抖动上界。

(3) 突发流:工业设备以突发形式发送数据包,数据包大小可变,通常不超过 1 500 字节。该类流对应于两种应用场景:一种是对时延有一定要求的业务,例如配置和告警业务等低时延类业务,时延要求较等时流和循环流低,通常为数十毫秒;另一种是邮件和文本传输等尽力而为业务,对时延要求最低。对突发流来讲,可通过常规 PON 的动态带宽分配(Dynamic Bandwidth Allocation, DBA)算法进行调度。

表 1 工业通信类型及传输需求^[5-7]

Table 1 Industrial communication types and industrial flow requirements^[5-7]

通信类型	流类型	业务实例	周期/ms	时延/ms	抖动	包大小/字节
C2D	等时流	运动控制	0.5~2.0	0.5~2.0	1 μs	30~100
	循环流	循环诊断	4.0	4.0	2 ms	50~1 000
C2C	等时流	C2C	4.0~10.0	4.0~10.0	1 μs	<1 000
	突发流	配置诊断	—	100.0	—	500~1 500
D2Cmp		视频流	采样频率	10.0	—	1 000~1 500
	循环流	数据采集	100.0~10 000.0	100.0~10 000.0	—	<1 500

业务的通信时延取决于数据流在 PON 中的传输路径,如图 2 所示,包括:(1) PON 内工业设备和

远端设备的通信,通信时延依赖于 PON 上行或下行传输时延;(2) PON 内工业设备间的通信,由于

两个设备属于同一 PON 系统,工业流仅需在 OLT 两层转发,通信时延取决于 PON 的上下行传输以及 OLT 两层转发时延;(3) PON 间工业设备的通

信,属于跨 PON 通信,需要通过外部网络进行互联,通信时延取决于 PON 的上下行传输以及外部网络时延。

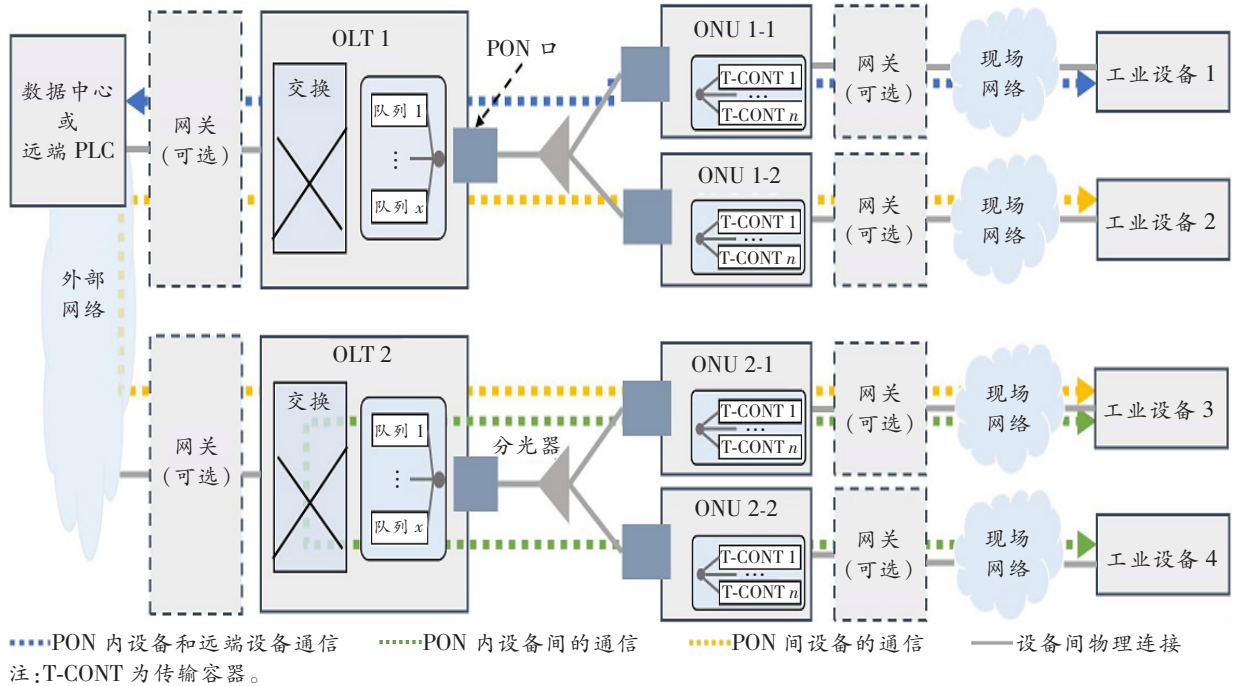


图 2 数据流在工业 PON 中的传输路径

Figure 2 Transmission path of data flow in industrial PON

2 常规 PON 的确定性网络传输挑战

工业场景下业务的低时延传输需求对常规 PON 的网络性能提出了严峻挑战。业务的端到端时延主要由处理时延、PON MAC 转发时延、发送时延、传播时延及 OLT 两层转发时延组成^[8]。(1) 处理时延:业务在 OLT/ONU 处进行成/解帧、复用/解复用、均衡处理、加/解扰、串/并变换和光/电转换等一系列 MAC 层和物理层处理所产生的时延。处理时延属于系统时延的一部分,取决于硬件处理能力、端口速率和光/电转换时延等。(2) PON MAC 转发时延:也称排队时延,是指从数据帧到达 OLT/ONU 的 T-CONT 到完全离开所经历的时延,在 TDM-PON 中,上行基于 TDMA,下行基于 TDM 广播,由于上下行采用的通信方式不同,所产生的等待时延也不相同。(3) 发送时延:PON 传输过程中从 ONU/OLT 发送数据帧的第一个比特开始,到发送完最后一个比特结束所需的时间,取决于 PON 端口速率及数据帧长。(4) OLT 两层转发时延:以太网数据包在 OLT 与上联端口间以及跨 PON 口的转发时延,取决于以太网的队列调度机制。(5) 传播时延:数据包在光纤中传播时所需时

延,取决于传输距离。除上述时延外,还包括由 TDM-PON 系统引入的特定延,如因静默窗口所引入的时延也会对时间敏感业务产生影响。

上述时延因素可分为两大类。一类是由系统设置所决定的,如处理时延(硬件处理能力决定)、发送时延(端口速率决定)和传播时延(光纤距离决定),可视为固有时延或确定性时延,即系统一旦确定,时延为固定值;另一类是由业务特征及调度机制所决定的,如 PON MAC 和 OLT 两层转发时延,是一种不确定性时延,受限于 TDM-PON 带宽分配策略和以太网队列调度机制。

不确定性时延主要表现为以下两方面挑战。

挑战 1:传统带宽分配方案引起的时延不确定性。

常规 PON 的带宽分配方案包含固定带宽分配(Fixed Bandwidth Allocation, FBA)和 DBA 两种。其中 FBA 面向于语音和视频等较低时延需求的业务,OLT 以帧长(125 μ s)或帧长的整数倍为周期,分配固定的 TW 给业务。TW 的大小通常由业务的峰值速率决定。业务时延受限于 TW 周期,难以满足超低时延(如低于 125 μ s)工业业务的需求。工业业务多为周期流,且业务周期具有多样性。FBA

会导致 TW 周期与业务周期不匹配,从而造成时延和抖动的不确定性,如图 3 所示。工业流经过 TW 传输后,不同发送周期的数据包等待时延不同,导致业务抖动增大。

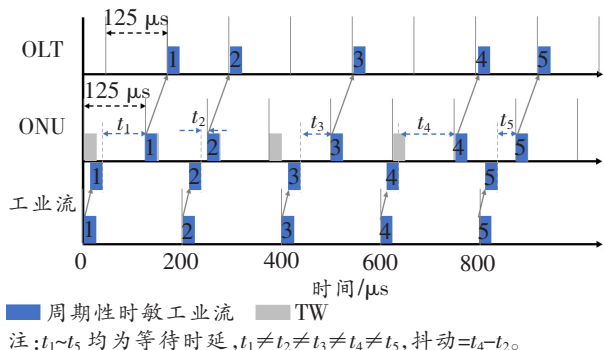


图 3 传统 FBA 引起的时延和抖动不确定性

Figure 3 Delay and jitter uncertainty caused by traditional FBA

DBA 通过“状态上报(Status Reporting, SR)”机制实现 TW 的按需分配,该机制通常可保证分配给 T-CONT 的带宽(即 TW 的大小,带宽确定性),但无法保证 TW 所在上行帧中的具体位置,从而造成时延/抖动的不确定性,如图 4 所示。在 OLT 的 4 次分配中, TW 可能位于上行帧的任何位置,这取决于当前网络状态与带宽分配规则。TW 位置的随机性导致了业务等待时延和抖动的不确定性。传统带宽分配机制本质上基于统计复用原理,其核心目标是实现带宽资源的高效利用。OLT 把总带宽看作一个“资源池”,在业务接入总量不超过资源池容量上限的前提下,保证带宽资源的按需分配,而不考虑 TW 的具体位置及相邻关系。传统 DBA 在较长的统计时间内可实现较低的“平均时延”,适用于传统电信业务,但无法满足具有低时延边界的工业业务需求。

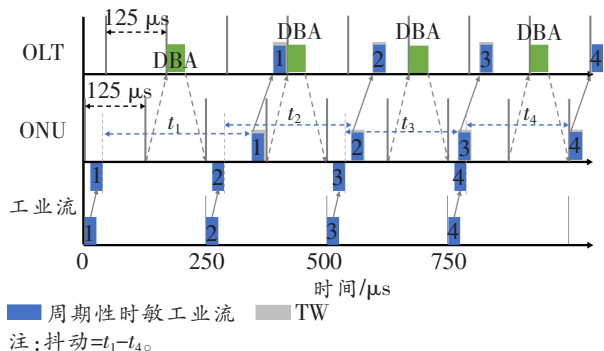


图 4 传统 DBA 引起的时延和抖动不确定性

Figure 4 Delay and jitter uncertainty caused by traditional DBA

挑战 2:队列调度机制僵化引起的时延不确定性。

在 PON 系统中,需要对进入 PON 的以太网数据帧进行处理和转发。常规 PON 的队列调度机制相对简单,例如根据以太网帧的优先级或地址选择特定的队列入队,出队策略采用严格优先级 (Strict Priority, SP) 或轮询 (Round Robin, RR) 等方式。上述调度策略虽可一定程度上保证服务质量 (Quality of Service, QoS),但 OLT/ONU 内的转发时延存在长尾效应,无法满足工业时间敏感业务的确定性传输需求。现有 MAC 层调度策略本质上基于统计复用原理,不能根据当前网络状态及业务传输需求实现基于“时间触发”的队列调度。

3 工业 PON 中提升确定性网络传输能力的关键技术

工业 PON 中,传统带宽分配方案是造成其时延/抖动不确定的主要因素,故而优化带宽分配过程,减少排队时延,是保证工业业务确定性传输的关键。下面将介绍几种用于提升工业 PON 确定性网络传输能力的关键技术。

3.1 CO-DBA

协作式 (Cooperative, CO)-DBA 是一种基于 OLT 与外部设备“协作”,通过外部设备提供的应用级调度信息进行带宽分配的方案,可有效减少 SR-DBA 带来的等待时延,且与“流量监测”式 (Traffic Monitoring, TM)-DBA 相比能够获得更加准确的业务信息^[9]。OLT 通过协同传输接口 (Cooperative Transport Interface, CTI) 与外部设备进行通信,从而获得业务流的到达时间、数据量和周期等参数,并为业务流提前分配上行带宽资源,从而使得数据包到达 ONU 后即可传输,以达到降低 PON 上行传输时延的目的^[10]。

CO-DBA 技术是为了解决移动前传业务上行传输时延问题^[11-12]。如图 5 所示,在 CO-DBA 中,分布式单元 (Distributed Unit, DU) 会将用户数据的发送时间、数据量和所接入的无线单元 (Radio Unit, RU) 等信息以 CTI 消息的形式提前发送给 OLT, OLT 则将其转换成 PON 内部业务需求参数 (信息转化),提前为 ONU 分配带宽,使数据到达 ONU 后无须请求上报即可传输,保证其确定性低时延。CO-DBA 同样适用于工业互联网场景,OLT 可通过 CTI 与工业网络控制器通信,提前获取业务信息并分配 TW,保证业务的确定性传输^[13-15]。

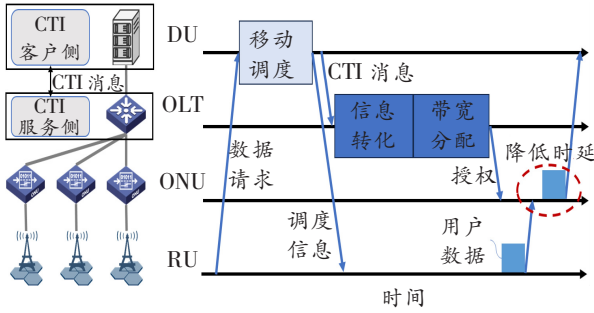


图5 移动前传场景中 CO-DBA 的实现过程
Figure 5 Implementation process of CO-DBA in mobile fronthaul scenario

3.2 单帧多突发

单帧多突发技术是通过在上行帧中增加 ONU 的突发次数以降低时延^[16-17]。在 TDM-PON 系统中,上行方向是基于 TDMA 方式,OLT 为 ONU 分配传输时隙(即 TW),ONU 只能在 OLT 分配的时隙内发送数据。单帧多突发如图 6 所示,最坏情况下,数据包刚好在 TW 结束时到达,则需要等待一个 TW 周期(一般为上行帧长)才能被发送。ITU-T PON 中,上行帧长为 125 μs,如果 OLT 在每个上行帧为每个 ONU 分配一个 TW,则业务等待时延上界 $\tau = 125.00 \mu s$,对于超低时延业务来说是难以接受的。因此,需要降低每个 ONU 的 TW 间隔,让每个 ONU 在 125 μs 内有多次发送机会。在 XGS (10-Gigabit-Capable Symmetric) PON 中每个上行帧可分配 4 个 TW, τ 可降低至 31.25 μs。50 Gbit/s PON 的单帧突发个数可达到 16 个(16 突发/帧/ONU), τ 降低至 7.80 μs,可满足大部分时间敏感业务的传输需求^[9]。然而过多的光突发包会增加系统中的保护带宽,从而造成吞吐量下降。因此,在实际中需要结合业务场景设计合适的 TW 分配算法,以减少多突发情况下所造成的系统开销。

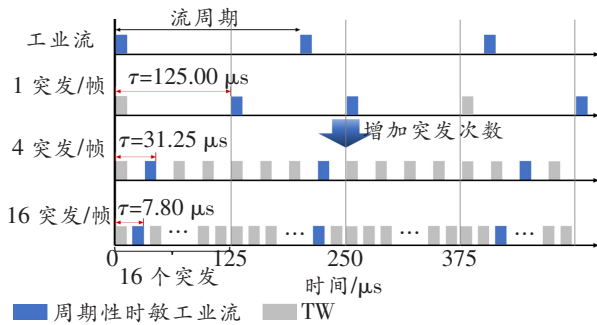


图6 单帧多突发示意图

Figure 6 Schematic diagram of single frame multiple bursts

3.3 确定性带宽分配

针对工业业务的确定性传输需求,设计有效的

TW 分配方案,从而减少传统带宽分配方案所引起的时延、抖动不确定性^[13-15,18]。本节主要介绍两种代表性的确定性带宽分配(Deterministic Bandwidth Allocation, DetBA)方案:(1)基于时间感知(Time-Aware, TA)的 DetBA 方案 TA-DetBA^[14-15];(2)基于循环窗口(Cyclic Transmission Windows, CTW)的 DetBA 方案 CTW-DetBA^[18]。

3.3.1 TA-DetBA 方案

TA-DetBA 方案借鉴了 TSN 中 TAS 的思想,可以看作是 TAS 在工业 PON 中的一种应用,适用于时间敏感的同步周期流。在传统网络中,时延的不确定性来源于业务之间对传输资源的竞争,TAS 通过门控技术将时间敏感流与非时间敏感流进行隔离,并分配独立的传输时隙以实现基于“时间”的转发。基于此,TA-DetBA 方案为每个时间敏感流分配一组独立的 TW,以避免其他业务的干扰。当网络中存在多条周期不同的时间敏感流时,需要对 TW 的位置进行规划。而 TW 位置规划需要在一个超周期中进行,超周期为所有待调度流周期的最小公倍数。TW 位置规划的关键就在于既要保证业务时延和抖动的确定性,又要避免 TW 之间发生冲突。因此,OLT 需要提前知晓所有待调度流的到达时间、周期、时延和抖动等参数,根据参数对 TW 在超周期中的位置进行约束。TA-DetBA 方案如图 7 所示,TW 应位于流到达时间和时延上界(流到达时间+最大容忍等待时延)之间,从而保证传输时延的确定性。同时,TW 的开始时刻与流到达时间偏移的最大差值为流的抖动,其要小于流的抖动需求。此外,还应保证 TW 之间不存在时间冲突。根据上述约束条件,可利用可满足性模型理论(Satisfiability Modeling Theory, SMT)和整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)等工具求解每个流 TW 的开始时间。具体建模及求解过程可参考文献^[14]。

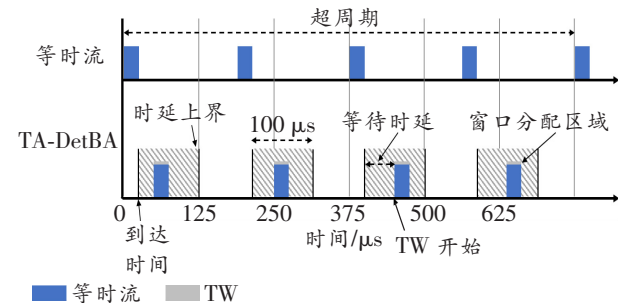


图7 TA-DetBA 方案示意图

Figure 7 TA-DetBA scheme

3.3.2 CTW-DetBA 方案

TA-DetBA 方案的核心思想是根据业务的到达时间和时延上界确定 TW 的位置,从而保证时间敏感业务的确定性传输,适用于等时流。该方案依赖于 PON 与外部网络的时间同步,而高精度时间同步会大大增加网络的复杂度和运维成本。

CTW-DetBA 方案^[18]解决了异步周期流的确定性传输问题。在异步通信系统中,OLT 无法感知工业流准确的到达时间,因此不能像 TA-DetBA 方案一样针对流到达时间进行 TW 位置规划。CTW-DetBA 方案借鉴了 TSN 中 CQF 的思想。当数据包到达队列后,最多等待一个窗口周期即可传输出去,时延上界与窗口周期有关而与数据包的到达时间无关。基于 CQF 思想,CTW-DetBA 方案为每条工业流预留一组周期性的 TW,CTW-DetBA 方案如图 8 所示,在最坏情况下,数据包需要等待一个 TW 周期(即 100 μs)。为了保证业务流的确定性时延,TW 周期应小于业务流的时延需求。同时,在流和 TW 的一个超周期中,由最大(t_1)和最小(t_2)等待时延可得出流的抖动($t_1 - t_2$)。当 TW 周期改变时,流的抖动也随之改变,因此可以通过限制 TW 周期来满足流的抖动需求^[18]。在完成 TW 大小和周期设计后,需要对 TW 进行规划,CTW-DetBA 方案的 TW 规划问题与 TA-DetBA 方案相同,可通过 SMT 和 ILP 等优化工具求解。

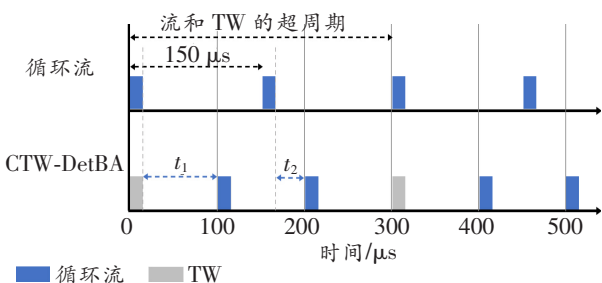


图 8 CTW-DetBA 方案示意图

Figure 8 CTW-DetBA scheme

4 基于网络演算的工业 PON 时延边界建模

传统网络通常将业务到达与网络服务建模为随机过程,求解随机过程达到稳态下的性能均值作为衡量网络传输性能的评价标准。然而,工业 PON 需要具备确定性网络传输能力,即保证时延和抖动等网络性能的上界满足业务需求。网络演算是一种分析网络时延和队列缓存上界的数学方法^[19-21],可为确定性工业 PON 的系统设计提供有效的数学模

型。

网络演算中,用到达曲线 $\alpha(t)$ 描述流量到达过程的特征,用服务曲线 $\beta(t)$ 表示网络设备(如 OLT、ONU 和网关)的服务能力,通过求取两个曲线的最大水平和最大垂直距离可得到业务时延和缓存上界,对通信网络系统设计具有重要的指导意义。图 9 所示为基于网络演算的工业 PON 上行时延建模思路,其中,工业 PON 服务曲线建模可分为工业网关和 PON MAC 的服务曲线建模,即 $\beta^1(t)$ 和 $\beta^2(t)$ 。根据串联定理,端到端的服务曲线为 $\beta = \beta^1 \otimes \beta^2$, \otimes 为最小加卷积运算符。网络演算建模的关键在于如何准确描述业务到达特征,以及如何针对 PON MAC 层调度策略建立网络服务曲线。下面将对工业业务到达曲线和 PON MAC 服务曲线的建模过程进行简要分析。

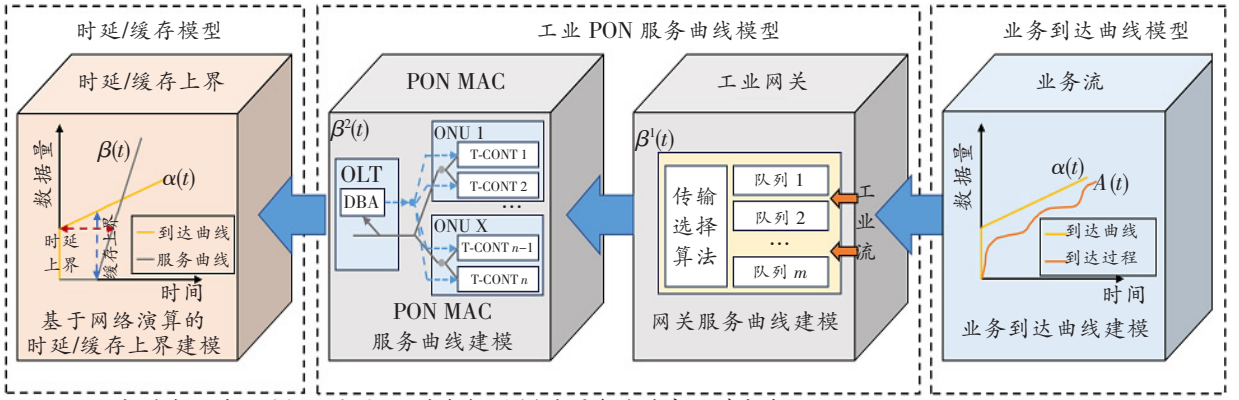
4.1 业务到达曲线建模

周期流到达曲线如图 10 所示,业务在 0 时刻进入 T-CONT 队列,每隔流周期 T_s 会有 3 个大小为 b 的连续数据包到达。最简单的方案,所有网络流量均可建模为漏桶模型,即用最大平均速率($3b/T_s$)和最大突发量($3b$)建模业务的到达曲线 $\alpha_1(t) = (3b/T_s)t + 3b$ (图中黄色曲线)。考虑流量到达受业务周期 T 的影响,到达曲线可以进一步建模为阶梯函数 $\alpha_2(t) = 3b \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor + 3b$ (图中紫色曲线)。如果再考虑流量到达受 PON 端口速率 c 的影响,到达曲线可建模为分段函数 $\alpha_3(t)$ (图中橙色曲线),公式略。由图 10 可见,业务到达曲线越接近业务的实际到达过程,业务特征的描述越精确,数学表达式也越复杂。在实际建模过程中,为了方便地表征多流聚合过程(叠加定理),通常采用漏桶模型。

4.2 PON MAC 服务曲线建模

PON MAC 服务曲线的建模与带宽分配策略有关。对于 FBA 和 CTW-DetBA 方案,OLT 会为 T-CONT 分配一组周期性的 TW,因此 T-CONT 的服务曲线与 TW 的周期(T)和大小(W)有关。如图 11 所示,最坏情况下工业流会在窗口关闭时到达,到达 T-CONT 后会经历($T - W$)的等待时延。T-CONT 队列被服务的时间为 W ,服务间隔为 T ,故而到达曲线为 $\beta(t) = c \times \max\left(\left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor \times W, t - \left\lfloor \frac{t}{T} \right\rfloor \times (T - W)\right)$, $[*]$ 和 $[*]$ 分别为 $*$ 向上和向下取整。

对于 TA-DetBA 方案,OLT 会在一个超周期



注: m, n, X 分别为队列、T-CONT 和 ONU 的个数; $A(t)$ 为周期流的实际到达过程。

图 9 基于网络演算的工业 PON 上行时延建模

Figure 9 Industrial PON upstream delay modeling based on network calculation

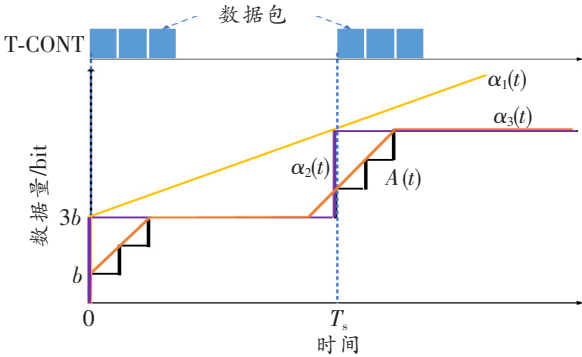


图 10 周期流的到达曲线

Figure 10 Arrival curves for cyclic flow

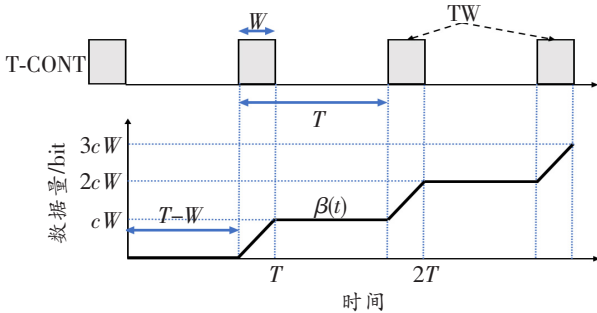


图 11 FBA 和 CTW-DetBA 方案的服务曲线示意图

Figure 11 Service curves of FBA and CTW-DetBA scheme (S) 内为一个 T-CONT 队列分配一组 TW(数量为超周期/流周期)。TA-DetBA 方案的服务曲线如图 12 所示,假设 TW 1、2、3 为一个超周期内为某一 T-CONT 队列分配的一组 TW。这组 TW 会以 S 进行重复,因此可以拆分成 3 组以 S 为周期的 TW,并求出每一组周期为 S 的 TW 的服务曲线,再进行求和。以 TW 1 为例,其服务曲线 $\beta^1(t)$ 的建模可参考 FBA 和 CTW-DetBA 方案的求解过程。不同的是,需要得到 TW 1 的开始时间与 0 时刻(即流到达时间)的偏移量 o^1 ,这个偏移量可通过 SMT 或者 ILP 求出。当求出 TW1、2、3 的服务曲线 $\beta^1(t)$ 、 $\beta^2(t)$ 和 $\beta^3(t)$

后,相加得到该 T-CONT 队列的服务曲线 $\beta(t) =$

$$\sum_{i=1}^3 \beta^i(t)。$$

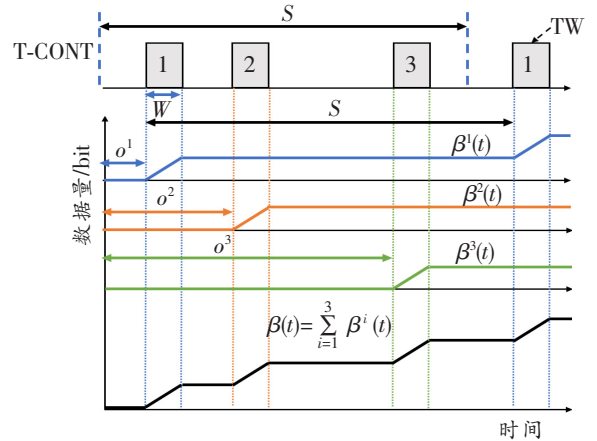


图 12 TA-DetBA 方案的服务曲线

Figure 12 Service curve of TA-DetBA scheme

对于 SR-DBA 方案,OLT 会根据 T-CONT 队列中的缓存状态为其分配 TW,故 T-CONT 的服务曲线与业务的到达曲线有关。若所有 T-CONT 内流的到达曲线已知,则 OLT 可以通过到达曲线为其分配 TW 的大小和开始时间。假设 OLT 每个上行帧中为 T-CONT 分配至多一个 TW,则总的服务曲线为每个上行帧中的服务曲线之和。DBA 的服务曲线如图 13 所示,设总仿真时间为 H,为了保证测得合理的最大时延, H 应足够长。在总仿真时间内共有 K 个上行帧($K = \frac{H}{125 \mu s}$),根据第 i 个上行帧中 TW 的偏移(o^i)和大小(b^i)可得到到达曲线

$$\beta^i(t), 则总的到达曲线为 \beta(t) = \sum_{i=1}^K \beta^i(t)。$$

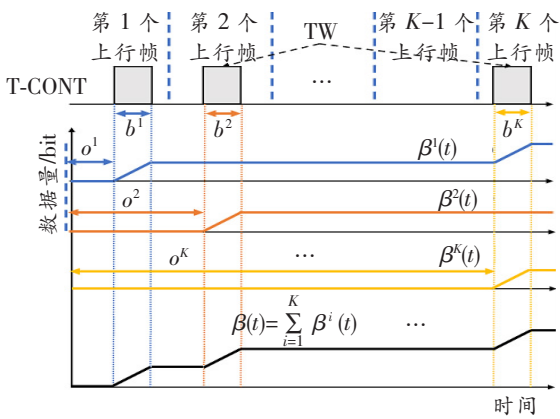


图 13 SR-DBA 的服务曲线
Figure 13 Service curve of SR-DBA

5 确定性工业 PON 的技术展望

确定性网络传输技术是工业 PON 的重要支撑技术之一,用于满足工业互联业务的高品质传输需求。图 14 中自下而上依次展示了确定性工业 PON 的系统结构、核心功能以及潜在关键技术。

(1) 业务层

业务流量特征和网络状态对 PON 系统设计和 TW 的规划十分重要,特别是当进入 PON 的业务流为多种特征和需求的混合流时,将变得十分复杂,如何掌握业务特征与网络状态,将业务变化规律与网络控制机制紧密耦合,是工业 PON 亟待解决的一个重要问题。

一种方法是针对指定业务流进行时延测量,测量方法可通过带外或带内两种方式,支持逐包测量或逐流测量。测量结果上报至工业 PON 控制管理平面,用于建立业务预测模型,指导 TW 规划,并可根据业务需求动态调整窗口大小。另一种方法是通过人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术进行流量预测和业务特征提取^[22-25]。

(2) MAC 层

工业 PON 的 MAC 层机制是实现确定性网络传输的核心,其关键技术可根据工业 PON 的系统结构分为两大部分: PON MAC 调度机制和网关 MAC 调度机制。

PON MAC 中用于提升确定性网络传输能力的关键技术包括:协同控制接口(协作 DBA)、单帧多突发、确定性 DBA、开窗注册优化和时间频率同步等。本文第 3 节已介绍了前 3 种技术,并阐述了已有解决思路。其中,协同控制接口和单帧多突发是确定性 TW 规划算法(确定性 DBA)的实现基础。

此外,新的 ONU 加入时要进行注册和测距,

OLT 会定期开启静默窗口,在静默窗口期间,只允许新的 ONU 发送注册请求,已注册的 ONU 不允许发送数据。静默窗口的开启会对已注册 ONU 的时延和抖动产生重要影响,需要对常规 PON 的开窗注册过程进行优化,以满足工业业务的低时延传输需求。一种方法是通过独立的波长通道^[9]或监控信道^[26-27]完成注册和测距功能,但会引入额外的控制开销,增加系统成本。另一种方法是根据工业场景自适应地调整静默窗口大小、开窗频率以及窗口位置。此外,也可以将静默窗口的位置规划问题看作是一类特殊的 DBA,可与确定性 DBA 算法进行统一规划。

高精度的时间频率同步是实现确定性 DBA 的重要支撑技术,时间同步的精度会影响保护间隔,从而影响传输效率。例如,TA-DetBA 方案需要 PON 与外部网络建立精确时间同步,从而实现 TW 的精准规划。

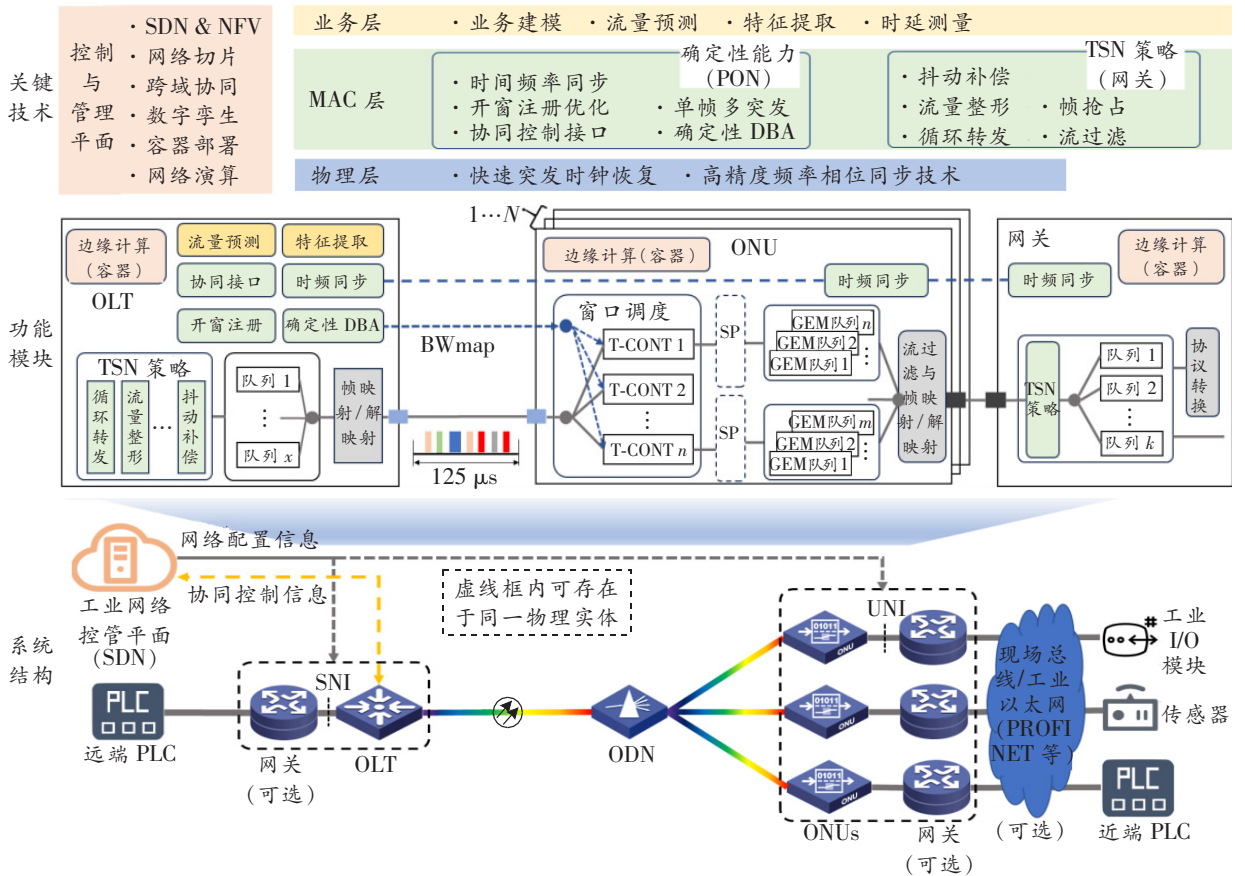
网关 MAC 层中用于提升确定性传输的机制包括:抖动补偿、流量整形、循环转发、帧抢占和流过滤等。抖动补偿机制应用在网关处,用于弥补数据包经 PON 传输后引入的时间抖动。在网关进行流量整形,可将混合流整形为固定周期流,并与 PON 的 TW 进行统一规划,实现端到端的确定性传输。此外,网关可以采用帧抢占(电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.1 Qbu)和流过滤与检测(IEEE 802.1 Qci)机制,用于实现基于业务等级的低时延转发。

(3) 物理层

目前 TDM-PON 可支持 10 Gbit/s 端口速率,未来可支持 50 Gbit/s。端口速率的提升需要更先进的光突发接收技术。OLT 采用突发时钟数据恢复(Burst Clock Data Recovery, BCDR)技术来实现快速的相位和频率同步^[28]。特别是面向单帧多突发场景下的高速 PON,BCDR 性能直接影响了网络吞吐。一种方法是设计高速的突发模式跨阻放大器(Burst-Mode Transimpedance Amplifier, BM-TIA)^[29],能够快速(百 ns 级)响应不同功率的光信号,从而减少前导码的长度,降低 BCDR 的开销。另一方法是基于物理层的高精度频率和相位同步技术,在 OLT 接收机与 ONU 发射机之间建立同步信道,实现收发机之间的高精度频率和相位同步,从而减少因 BCDR 带来的恢复时间^[30-33]。

(4) 控制与管理平面

工业互联网络常常包含多种组网技术,跨域网



注:SDN 为软件定义网络; NFV 为网络功能虚拟化; GEM 为千兆无源光网络封装方式; SNI 为业务节点接口; UNI 为用户网络接口; BWmap 为带宽映射。

图 14 工业 PON 的确定性网络传输技术研究概况

Figure 14 Potential research directions on deterministic network transmission technology for industrial PON

网络的高效协同是实现工业数据确定性传输和网络资源高效利用的保障。SDN 和 NFV 技术^[34-39]可以实现更加高效、灵活的数据传输。通过 NFV 技术,可以将部分 OLT 功能虚拟化,如 DBA 算法,可将确定性 DBA 算法从 OLT 硬件中剥离,运行于具备 Docker 容器功能的虚拟机上^[40-42]。网络切片是在一个共享的物理网络基础上构建出多个逻辑网络,每个逻辑网络可以为业务提供特定的服务,以满足业务差异化的需求^[43-46]。工业场景中,工业信息的采集和处理往往需要在极短的时间内完成,一方面依赖于网络的确定性传输,另一方面依赖于边缘计算。将计算能力下沉到网络边缘有助于降低业务的端到端时延。

6 结束语

PON 是工业互联网的潜在组网技术之一,时间敏感是工业互联业务的重要特征,如何提升 PON 的确定性网络传输能力,满足时敏业务的高品质传输需求是目前面临的一个重要技术挑战。本文分析

了常规 PON 面临的技术挑战,重点介绍了 PON MAC 层提升确定性网络传输能力的几种关键技术,如协同控制接口、单帧多突发和 DetBA 等。关于未来发展方向,包括但不限于以下几个方面:(1) 建立基于网络演算的确定性 PON 传输模型与评价机制,作为性能评估和系统设计的理论基础;(2) 借鉴 TSN 等确定性网络技术思想并融合工业 PON 自身特点,研究 PON MAC 和网关 MAC 的确定性低时延传输机制;(3) 开展高精度时间同步技术和 BCDR 技术的研究,为确定性时延传输提供物理层基础;(4) 开展业务时延测量及实时仿真环境的研究,构建数字孪生网络;(5) 开展基于功能解耦的 PON 控制架构研究,开展机器学习辅助的模型优化与算法设计研究,实现跨域网络(PON 域、无线域和 TSN 域)的统一规划与资源部署。

参考文献:

[1] Charalambides M. Industrial IoT Consortium. IT-OT Convergence Impact on Networking[R/OL]. (2022-

- 08-02)[2023-10-30]. <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/07/IT-OT-Convergence-Impact-on-Networking-Tech-Brief-2022-08-02.pdf>.
- [2] 李宗辉, 杨思琪, 喻敬海, 等. 时间敏感网络中确定性传输技术综述[J]. 软件学报, 2022, 33(11): 4334—4355.
- Li Z H, Yang S Q, Yu J H, et al. State-of-the-art Survey on Deterministic Transmission Technologies in Time-sensitive Networking[J]. Journal of Software, 2022, 33(11): 4334—4355.
- [3] 中国电信集团有限公司. 高性能工业PON白皮书[R/OL]. (2023-06-27) [2023-10-30]. <http://www.aii-alliance.org/uploads/1/20230627/57f76803206912880207437ba5078aa7.pdf>.
China Telecom Group Co Ltd. High-performance Industrial PON White Paper [R/OL]. (2023-06-27) [2023-10-30]. <http://www.aii-alliance.org/uploads/1/20230627/57f76803206912880207437ba5078aa7.pdf>.
- [4] ETSI GR F5G 007 V1. 1. 1-2022, Fifth Generation Fixed Network (F5G); F5G Industrial PON [S].
- [5] 5G Alliance for Connected Industries and Automation. Integration of 5G with Time-sensitive Networking for Industrial Communications [R/OL]. (2021-02-01) [2023-10-30]. https://5g-acia.org/wp-content/uploads/2021/05/5G-ACIA_Integration_of_5G_with_Time-Sensitive_Networking_for_Industrial_Communications_single-pages.pdf.
- [6] Industrial Internet Consortium. Time Sensitive Networks for Flexible Manufacturing Testbed Characterization and Mapping of Converged Traffic Types [R/OL]. (2019-03-28) [2023-10-30]. https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_TSN_Testbed_Char_Mapping_of_Converged_Traffic_Types_Whitepaper_20180328.pdf.
- [7] Gangakhedkar S, Cao H, Ali A R, et al. Use Cases, Requirements and Challenges of 5G Communication for Industrial Automation[C]//2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Kansas City, MO, USA: IEEE, 2018: 1—6.
- [8] Pfeiffer T, Dom P, Bidkar S, et al. PON Going Beyond FTTH [Invited Tutorial][J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2022, 14(1): A31—A40.
- [9] ITU-T G. 9804. 2-2021, Higher Speed Passive Optical Network Common Transmission Convergence Layer Specification [S].
- [10] O-RAN Alliance O-RAN. WG4. CTI-TCP. 0-v04. 00-2023, O-RAN Cooperative Transport Interface Transport Control Plane Specification 4. 0 [S].
- [11] Tashiro T, Kuwano S, Terada J, et al. A Novel DBA Scheme for TDM-PON based Mobile Fronthaul[C]//Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, California, Washington, D. C.; OSA, 2014: Tu3F. 3.
- [12] Uzawa H, Nomura H, Shimada T, et al. Practical Mobile-DBA Scheme Considering Data Arrival Period for 5G Mobile Fronthaul with TDM-PON[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg, Sweden; IEEE, 2017: 1—3.
- [13] Christodoulopoulos K, Bidkar S, Pfeiffer T, et al. Deterministically Scheduled PON for Industrial Applications[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: Tu3F. 5.
- [14] Su C, Zhang J W, Ji Y F. Time-aware Deterministic Bandwidth Allocation Scheme in TDM-PON for Time-sensitive Industrial Flows[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(5): 255—267.
- [15] Su C, Zhang J W, Yu H, et al. Time-aware Deterministic Bandwidth Allocation Scheme for Industrial TDM-PON[C]//2022 European Conference on Optical Communication (ECOC). Basel, Switzerland; IEEE, 2022: Tu5. 62.
- [16] Bidkar S, Galaro J, Pfeiffer T. First Demonstration of an Ultra-low-latency Fronthaul Transport over a Commercial TDM-PON Platform[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2018: Tu2K. 3.
- [17] Bidkar S, Bonk R, Pfeiffer T. Low-latency TDM-PON for 5G Xhaul[C]//2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Bari, Italy: IEEE, 2020: 3203123.
- [18] Su C, Zhang J W, Ji Y F. Cyclic Transmission Window-based Bandwidth Allocation Scheme for Asynchronous Time-sensitive Industrial Applications in TDM-PON[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(11): 820—829.
- [19] 华为技术有限公司. 基于TSN的端到端网络演算技术研究[R/OL]. (2023-06-27) [2023-10-30]. <http://www.aii-alliance.org/uploads/1/20230627/2dd584b18e9487afe367febf9b3e6d1.pdf>.
Huawei Technologies Co Ltd. Research on End-to-end Network Calculation Technology based on TSN [R/OL]. (2023-06-27) [2023-10-30]. <http://www.aii-alliance.org/uploads/1/20230627/>

- 2dd584b18e9487afe367febfb9b3e6d1.pdf.
- [20] Kalør A E, Guillaume R, Nielsen J J, et al. Network Slicing in Industry 4.0 Applications; Abstraction Methods and End-to-end Analysis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(12): 5419–5427.
- [21] Jiang Y M, Liu Y. *Stochastic Network Calculus*[M]. London: Springer, 2008.
- [22] Yao H, Gao P, Wang J, et al. Capsule Network Assisted IoT Traffic Classification Mechanism for Smart Cities [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 7515–7525.
- [23] Ruan L, Dias M P I, Wong E. Achieving Low-latency Human-to-machine (H2M) Applications: An Understanding of H2M Traffic for AI-facilitated Bandwidth Allocation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(1): 626–635.
- [24] Wong E, Pubudini Imali Dias M, Ruan L. Predictive Resource Allocation for Tactile Internet Capable Passive Optical LANs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(13): 2629–2641.
- [25] Ruan L, Dias M P I, Wong E. Deep Neural Network Supervised Bandwidth Allocation Decisions for Low-latency Heterogeneous E-health Networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(16): 4147–4154.
- [26] Bonk R, Borkowski R, Straub M, et al. Demonstration of ONU Activation for In-service TDM-PON Allowing Uninterrupted Low-latency Transport Links [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2019; W3J. 4.
- [27] Bertignono L, Ferrero V, Valvo M, et al. Photon Ranging for Upstream ONU Activation Signaling in TWDM-PON[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 2064–2071.
- [28] 中兴通讯. 下一代固网接入技术发展白皮书[R/OL]. (2021-07-29) [2023-10-30]. https://res-www.zte.com.cn/mediares/zte/Files/PDF/white_book/White_Paper_on_Next-Generation_Fixed_Network_Access_Technologies_20201124_CH.pdf?la=zh-CN. ZTE. White Paper on the Development of Next-generation Fixed Network Access Technology [R/OL]. (2021-07-29) [2023-10-30]. https://res-www.zte.com.cn/mediares/zte/Files/PDF/white_book/White_Paper_on_Next-Generation_Fixed_Network_Access_Technologies_20201124_CH.pdf?la=zh-CN.
- [29] Li J, Wang N, Zhu J L, et al. First Real-time Symmetric 50 G TDM-PON Prototype with High Bandwidth and Low Latency [C]//2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Shanghai, China: IEEE, 2023; 1–4.
- [30] Clark K A, Zhou Z, Liu Z. Picosecond-precision Clock Synchronized Radio Access Networks Using Optical Clock Distribution and Clock Phase Caching [C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023; W4F. 3.
- [31] Zhou Z, Wei J, Luo Y, et al. Communications with Guaranteed Bandwidth and Low Latency Using Frequency-referenced Multiplexing [J]. *Nature Electronics*, 2023, 6(9): 694–702.
- [32] Zhang D, Liu D, Wu X, et al. Progress of ITU-T Higher Speed Passive Optical Network (50G-PON) Standardization [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(10): D99–D108.
- [33] Zhao Y S, Xue X W, Guo B L, et al. White Rabbit Protocol Enhanced TDM-PON with Nanoseconds Clock and Data Recovery and Picoseconds Time Synchronization Accuracy [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022. San Diego, CA, USA: IEEE, 2022; Tu2G. 5.
- [34] Lantz B, Yu J, Bhardwaj A, et al. SDN-controlled Dynamic Front-haul Provisioning, Emulated on Hardware and Virtual COSMOS Optical X-haul Testbeds [C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021; M2B. 8.
- [35] Das S, Slyne F, Kilper D, et al. Schedulers Synchronization Supporting Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC) in Cloud-RAN over Virtualised Mesh PON [C]//2022 European Conference on Optical Communication (ECOC). Basel, Switzerland: IEEE, 2022; 10938.
- [36] Lantz B, Diaz-Montiel A A, Yu J, et al. Demonstration of Software-defined Packet-optical Network Emulation with Mininet-optical and ONOS [C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2020; M3Z. 9.
- [37] Das S, Ruffini M. PON Virtualisation with EAST-WEST Communications for Low-latency Converged Multi-access Edge Computing (MEC) [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020. San Diego, CA, USA: IEEE, 2020; M2H. 3.
- [38] Suzuki T, Kim S Y, Asaka K, et al. PON Virtualization Including PHY Softwarization [C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2022; W3G. 3.

- [39] Suzuki T, Kim S Y, Kani J I, et al. Virtualized PON based on Abstraction, Softwarization, and Service Chaining for Flexible and Agile Service Creations[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023, 15(1): A39–A48.
- [40] Mafioletti D R, Slyne F, Giller R, et al. A Novel Low-latency DBA for Virtualised PON Implemented through P4 In-network Processing[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: F41. 2.
- [41] Slyne F, Zeb S, Ruffini M. Stateful DBA Hypervisor Supporting SLAs with Low Latency & High Availability in Shared PON[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021: W6A. 48.
- [42] Ganguli A, Slyne F, Ruffini M. Real-time, Low Latency Virtual DBA Hypervisor for SLA-compliant Multi-service Operations over Shared Passive Optical Networks[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: T3F. 2.
- [43] Das S, Slyne F, Ruffini M. Optimal Slicing of Virtualized Passive Optical Networks to Support Dense Deployment of Cloud-RAN and Multi-access Edge Computing[J]. *IEEE Network*, 2022, 36(2): 131–138.
- [44] Mondal S, Ruffini M. Optical Front/Mid-haul with Open Access-edge Server Deployment Framework for Sliced O-RAN[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2022, 19(3): 3202–3219.
- [45] Uzawa H, Honda K, Nakamura H, et al. Dynamic Bandwidth Allocation Scheme for Network-slicing-based TDM-PON Toward the Beyond-5G Era [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2020, 12(2): A135–A143.
- [46] ITU-T G Suppl. 74-2021, Network Slicing in a Passive Optical Network Context [S].