

时间敏感网络研究现状 与关键技术探析

Research Status and Key Technologies of Time-sensitive Network

赵 奕,王海涛(南京审计大学金审学院,江苏 南京 210023)

Zhao Yi, Wang Haitao(Nanjing Audit University Jinshen College, Nanjing 210023, China)

摘 要:

随着现代工业信息化技术与网络管理运维技术的不断融合,可以较好确保高实时性与确定性传输的时间敏感网络已成为工业互联网和车联网等领域重点研究的技术方向之一。时间敏感网络符合标准以太网规范,具备流量调度与时间感知能力,通过交错传输周期性数据与非周期性数据来提供业务流量确定性传输服务。旨在对 TSN 这一新兴技术领域进行调研和分析,在对现有研究工作进行归纳总结的基础上,重点分析了 TSN 涉及的主要关键技术,并对其可能的应用场景和未来发展进行讨论和展望。

关键词:

时间敏感网络;工业互联网;系统架构;时间同步;流量调度

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2022.10.0013

文章编号:1007-3043(2022)10-0065-06

中图分类号:TN915

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

With the continuous integration of modern industrial information technology and network operation and maintenance technology, time sensitive Networking (TSN), which can better ensure high real-time and deterministic transmission, has become one of the key research technical directions in the fields of industrial Internet and Internet of vehicles. The time sensitive network conforms to the standard Ethernet specification, has the ability of traffic scheduling and time perception, and provides deterministic transmission services of business traffic by interleaving periodic data and aperiodic data. It aims to investigate and analyze the emerging technology field of time sensitive network. On the basis of summarizing the existing research work, It focuses on the main key technologies involved in time sensitive network, and discusses and prospects its possible application scenarios and future development.

Keywords:

Time-sensitive network; Industrial Internet; System architecture; Time synchronization; Traffic scheduling

引用格式:赵奕,王海涛. 时间敏感网络研究现状与关键技术探析[J]. 邮电设计技术, 2022(10): 65-70.

0 引言

随着信息技术的不断发展,确定性的流量传输成为传统以太网的一大挑战。传统以太网只注重解决非实时数据的传输,实时流量和传统 TCP 流量竞争资源将导致较大的传输时延和抖动,使得传统以太网无法满足实时音视频业务的数据传输需求^[1]。为此,2006年成立的 IEEE AVB (Audio Video Bridging) 工作组制定了一组 802.1 以太网标准,包含 802.1AS,

802.1Qat, 802.1Qav 等协议,该标准通过采用预留带宽、流量优先级和时间同步等技术来提供低传输时延的以太网服务。随着工业互联网(Industrial Internet)对以太网实时通信需求的迅速增长,2012年 AVB 工作组更名为 TSN (Time-Sensitive Networking) 工作组,TSN 工作组通过扩展 AVB 技术以统一解决网络传输的时效性问题。例如,TSN 在 AVB 基础上引入了时间调度流量(Time-scheduled traffic)和帧抢占(Frame-preemption)机制,并且允许采用不同协议的时间敏感数据流和非时间敏感数据流混合交错传输。此外,TSN 可以在数据源头获取精确的数据信息,快速诊断

收稿日期:2022-08-10

和及时修复网络中出现的各种传输异常^[2]。

时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)协议族的主体位于OSI网络模型的第2层,即数据链路层,属于IEEE 802.1协议体系。TSN在传统以太网的基础构架上重新定义了流量传输机制,利用以太网数据帧的包头进行数据传输,适用于任何以以太网为传输媒介的应用场景,实现了现有工业网络的技术突破。具体而言,TSN引入的新技术主要包括时间同步、时间感知调度、流量整形和调度以及冗余备份路径机制等。通过综合应用这些新技术实现的具有时间敏感特性的TSN可以为上层业务提供具有确定性时延特征的信息传输。

1 研究概况

随着信息网络技术的快速发展,通信主体不再局限于人与人,人与物以及物与物为通信主体的通信业务日趋增加。面对互联网通信主体的更新变化,工业互联网和车联网等许多应用场景对数据传输的确定性和低时延的要求愈加严格。为满足上述场景的数据传输需求,许多标准化组织和行业提出了诸如HSE、Profinet、EtherCAT、TCnet等协议^[3-5],但由于这些协议互不兼容,其发展和应用受到诸多限制,在这种背景下TSN应运而生。

TSN是一项从音视频数据领域延伸到汽车领域并进一步推广至工业领域的信息技术。

2006年IEEE成立AVB任务小组^[6],于2012年更名为TSN任务组,研究领域从原来的音/视频拓展到车载网络和工业控制网络。2015年TSN和Interworking任务组合并,研究TSN在运营商骨干网领域的标准。2017年IEEE与IEC联合建立60802工作组,主要研究TSN在工业控制网络的应用方案。2019年TSN任务组开始研究TSN在车载控制网络应用的标准。近年来,TSN技术在各个应用场景不断发展,并将与OPC UA、5G和边缘计算等新技术进行深度融合,实现TSN在不同领域的创新应用^[7]。截至2022年8月,已经发布的TSN主要标准参见表1,部分研制中的标准见表2^[8]。

国内外相关组织和研究院近年来也高度重视TSN的理论研究和实际应用。在2016年的SPS上,CISCO、NI、KUKA、Parker、SEW、TTTech等主流的自动化与IT厂商都宣布了对OPC UA TSN的支持。2018年11月27日,在德国纽伦堡电气自动化系统及元器件展(SPS IPC)上,CC-Link协会正式发布最新的开放式工业网

表1 已发布的TSN标准

序号	标准号	标准名称	时间
1	IEEE 802.1CBdb-2021	FRER 扩展流识别功能	2022-03
2	IEEE 802.1 CBcv-2021	FRER YANG 数据模型和管理信息基础模块	2022-02
3	IEEE 802.1 Qcr-2020	异步流量整形	2020-11
4	IEEE 802.1 Cmde-2020	前传时间敏感网络修正	2020-10
5	IEEE 802.1 AS-2020	时间敏感应用程序的定时和同步	2020-06
6	IEEE 802.1 Qcx-2020	CFM YANG 数据模型	2020-06
7	IEEE 802.1 AX-2020	链路聚合	2020-05
8	IEEE 802.1 Qcc-2018	流预留协议的增强(SRP增强)	2018-10
9	IEEE 802.1 Qcp-2018	YANG 数据模型	2018-09
10	IEEE 802.1 CM-2018	前传时间敏感网络	2018-06
11	IEEE 802.1 CB-2017	帧复制和可靠性消除(FRER)	2017-09
12	IEEE 802.1 Qch-2017	循环排队和转发(CQF)	2017-06
13	IEEE 802.1 Qci-2017	逐流过滤和监管(PSFP)	2017-02
14	IEEE 802.3br-2016	穿插快速流量的规范和管理参数	2016-10
15	IEEE 802.1 Qbu-2016	帧抢占	2016-08
16	IEEE 802.1 AB-2016	站和媒体访问控制连接发现	2016-03
17	IEEE 802.1 Qbv-2015	调度流量的增强(TAS)	2016-03
18	IEEE 802.1 Qca-2015	路径控制和保留	2016-03
19	IEEE 802.1 Qat-2010	流预留协议(SRP)	2010-09
20	IEEE 802.1 Qav-2009	时间敏感型流的转发和排队增强	2010-01

表2 研制中的部分标准

序号	标准号	标准名称	状态	时间
1	IEEE P802.1Qdj	时间敏感网络的配置增强	更新至D1.5	2022-08
2	IEEE P802.1Qdj	时间敏感网络的配置增强	更新至D0.3	2022-06
3	IEEE P802.1Qcz	拥塞隔离	更新至D1.2	2022-05
4	IEEE P802.1Qcw	用于计划流量、帧抢占以及逐流过滤和监管的YANG数据模型	更新至D1.4	2022-05
5	IEEE P802.1DG	用于汽车车载以太网通信的TSN配置文件	更新至D1.4	2021-12
6	IEEE P802.1 ABcu	LLDP YANG 数据模型	更新至D2.3	2021-09
7	IEEE P802.1DF	服务提供商网络的TSN配置文件	更新至D0.1	2020-12

络协议——CC-Link IE TSN。2019年起,北京邮电大学、南京紫金山实验室和广东通信与网络创新研究院从学术和产业角度研究了面向工业互联网的确定性网络的技术和市场需求。同年,PI组织(工业通信组

织)发布了新的使用TSN技术的ProfiNet协议。OPC UA基金会也成立工作组,目标在于将TSN技术和OPC UA规范融合。2020年,中国铁道科学研究院基于以太网技术分析验证了TSN在列车以太网通信技术中应用的可行性。如今,市场上许多知名企业都投入TSN领域的布局与研发生产中,例如华为、Intel、MOXA、研华等,先后推出了不同层级的TSN相关产品。虹科电子也在2020年推出TSN IP核的开发方案以及TSN端/桥设备的使用方案,致力于帮助国内企业更快速、简单地使用和集成TSN技术^[9]。2021年,OpenTSN项目组自主研发了一款低功耗TSN芯片-枫林一号,以满足确定性组网需求^[10]。美国微芯科技公司(Microchip Technology Inc)同年发布SparX-5i系列以太网交换机,提供了业界最全面的TSN功能集^[11]。2021年4月,ITU在uRLLC R16方面除了引入对工厂自动化、车联网以及智能电网场景的支持,还考虑支持工业互联网(IIOT——Industrial IoT),满足TSN对接5GS^[12]。MPLS-TSN草案^[13]提出MPLS和TSN需要协

同提供服务保护、资源分配和显性路由,但并未提供具体的网络互联方法。

总体来看,TSN技术已经成为产业链各环节的关注重点,国外的自动化厂商、通信设备厂商以及行业组织对TSN的研究都较优先于国内。随着工业4.0时代的到来,TSN+OPC UA、TSN+边缘计算、TSN+5G成为了国内外的热门研究。目前,TSN与众多技术的融合互通仍处于研究阶段,各大厂家的TSN设备并未做到对全部协议族的支持,如何完善接口协议和增强应用适配能力也成为今后TSN发展的技术重难点。

2 关键技术

2.1 系统架构

2018年发布的IEEE 802.1Qcc标准正式制定了TSN的系统架构^[14],该系统架构非常类似于软件定义网络(SDN)的3层架构,包含应用层、控制层和网络层3个层次,如图1所示。

网络层由各种网络转发设备组成,主要用于数据

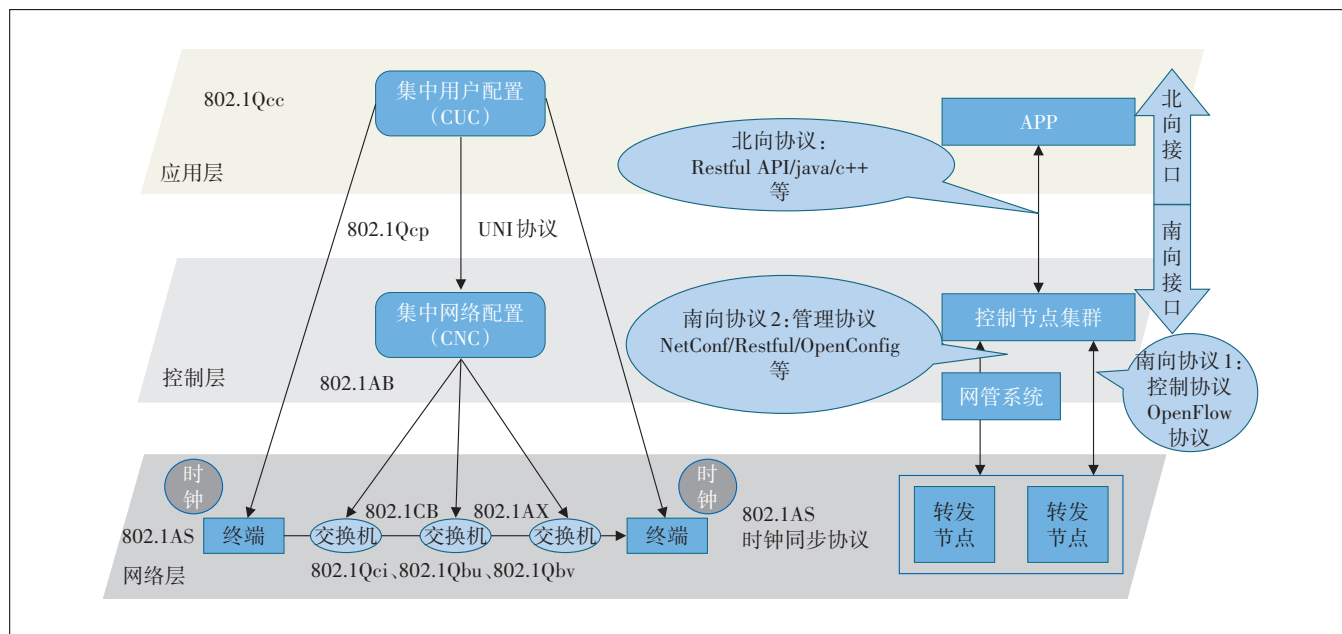


图1 IEEE 802.1Qcc的TSN系统架构

的转发传输,同时将网络状态和自身资源信息上传给控制层,用于全网监控,并依据应用需求和网络当前状态做出动态调整。控制层中的网络控制器(NC)利用北向接口向上面的应用层开放网络资源和能力,利用南向接口向转发节点下发定制策略,实现设备监控、拓扑发现、流量监控等功能。此外,该层的网管系

统提供运维服务,并实时监控网络状态。应用层为各类业务应用提供接入TSN的接口,用户控制器(UC)通过北向接口按需向用户提供自适应服务,支持在线测量以及运维相关协议,实现全网拓扑发现、状态检测和业务动态调度等功能。

基于IEEE 802.1Qcc标准提出的TSN体系架构,给

出了一种TSN网络分层模型如图2所示,该分层模型同样包括应用层、控制层和网络层3层。其中,应用层的CUC负责采集终端业务的带宽、时延、抖动等网络服务质量需求,并将其转换后通过北向接口发给CNC,向用户提供网络能力。应用层借助控制层提供的网络资源和状态信息基于业务应用要求进行智能化的网络应用及运维;控制层通过流预留协议来实现OPC UA的发布—订阅模式,通过添加CNC网络组件来实现TSN的网络功能和服务,具有计算拓扑路径等网络功能,通过南向接口下发更新路由路径、门控列表等配置信息到TSN交换机。TSN工作组发布了一系列与Yang模型定义相关的标准草案,如基于统一数据语言的信息模型和Yang数据模型,基本的桥配置,结合Netconf实现的时间感知整形、帧抢占、流过滤和策略的配置以及结合Netconf的包复制和消除机制的配置;网络层在设备中集成802.1AS精确时钟同步协议,并支持流预留、入端口每流过滤和策略、出端口时间感知整形、Yang数据模型等功能。

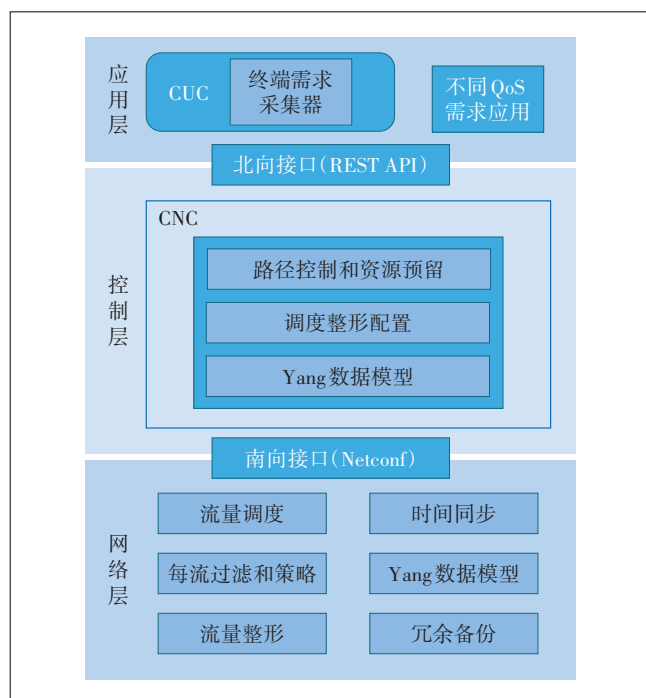


图2 TSN的分层模型

2.2 时间同步

为了使全网络围内的各个设备之间能够协调配合,使数据帧能按照正确的时序到达下一个设备以保障数据流在网络上顺畅传输,TSN中所有设备都必须在时间上保持高度一致,即TSN必须基于可靠的时间

同步协议来提供严格的时间同步。

经典的网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)虽已得到了广泛的应用与发展,但是时间精度仅限于微秒级别,不能满足TSN要求的亚微秒级精度。TSN使用的精密时钟同步协议源自于IEEE 1588V2协议,又称精确时间协议(Precise Time Protocol, PTP),主要用于以太网和分布式计算网络中各时间节点的时钟同步^[15]。在局域网环境中,PTP可实现亚微秒级的时钟精度,使其适用于测量和控制系统^[16]。PTP协议的同步过程主要包括主时钟选择、传播时延和时钟偏差计算以及偏差校准3个阶段^[17]。PTP协议的报文主要有同步、跟随、延迟请求、管理4种报文,具体的报文收发流程如图3所示。主时钟周期发送同步报文,并且依据主时钟精确记录同步报文发送的时间点 t_1 。同步报文包含的时间戳是预发送时间点,而真正发出时间点在该同步报文发出后被记录并由一个跟随报文进行发送,然后从时钟记录下同步报文的到达时间 t_2 。

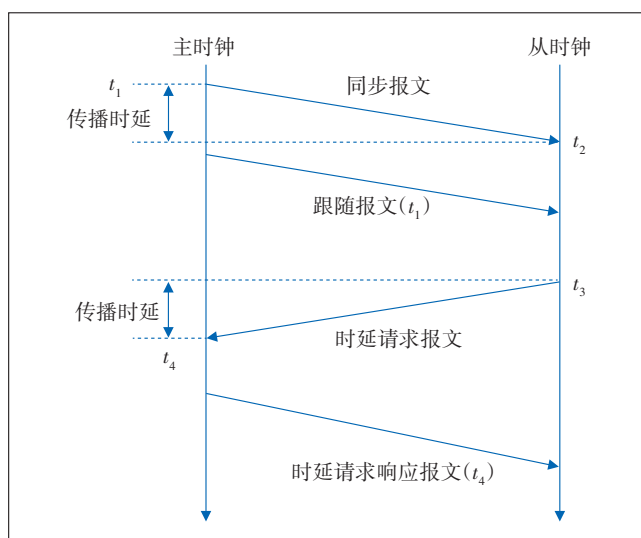


图3 PTP协议的报文收发流程

从时钟发送时延请求响应报文并记录发送时间点 t_3 ,主时钟记录报文到达时间点 t_4 ,然后把 t_4 通过延时响应报文发送给从时钟,此时从时钟获取到4个确定的收发时间。在传播路径一致的情况下,2次传播时延可视为相等,且存时钟偏差。根据图3,可推算出: $t_2=t_1+\text{时延}+\text{偏差}$; $t_4=t_3+\text{时延}-\text{偏差}$ 。由此可以计算出延迟和偏差,然后通过修改本地时钟来实现时间同步。

802.1AS-Rev在802.1AS的同步机制上扩充了冗余备份机制,包括主时钟冗余和时钟通路冗余。主时

钟冗余允许当前主时钟和备份主时钟同步运行,如果当前主时钟发生问题,会立即切换到备份主时钟,以确保系统正常运行。时钟通路冗余规定每个主时钟维护2条传输路径,一条路径发生故障或拥塞后,立即切换备用路径。

2.3 时间感知流量调度和整形

2.3.1 时间敏感流量调度

时间感知流量调度是在时钟同步的基础上,对流量进行基于时间约束的传输调度,优先执行对时间因子更为敏感的数据传输。时间感知调度增加了时间维度,利用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)协议,把时间分割为固定周期长度的帧(也称时元);每一帧又分割为若干更细粒度的时间片,称为时隙或时间槽。每个时隙被分配特定的以太网优先级,不同优先级的时隙构成一种虚拟信道,允许特定的实时流量能在非实时流量负载中交替传输,显著减小了突发故障或异常发送对实时数据传输的影响。在使用TDMA协议时,具体的时隙划分应根据实际信道需求而定,并要兼顾通信实时性与网络传输效率,时隙过小会导致效率低下,时隙过大则会降低传输的实时性。

上述的时间感知调度仍存在一些缺陷,如在一个时间段内无法完成某个较大数据帧传输时,会导致该数据帧占用下一个周期的时间槽,进而造成传输故障或信息延迟。为此,TSN工作组引入了保护带机制。保护带是在每个时间周期结束前划分的一个时间段,规定在保护带内不允许有新的帧进行传输,而保护带之前的帧若没有传输完毕可以在保护带内继续传输。因此,保护带时长应不小于此链路中最长帧的传输时间。采用保护带的时间敏感调度如图4所示。

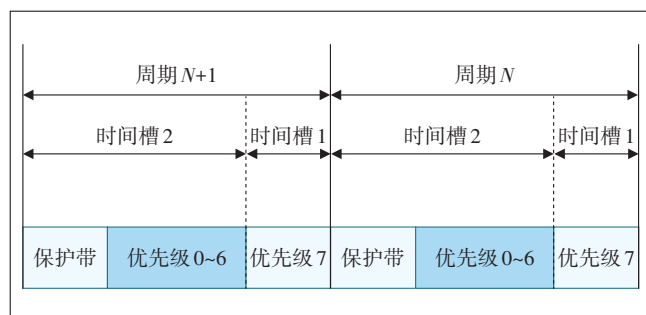


图4 采用保护带的时间敏感调度

网络时延由传播时延、处理时延、转发时延、排队时延等构成。在特定网络场景下,传播时延和处理时

延一般可以确定,转发时延通常较小可以忽略,而排队时延有很强的不确定性。使用传统的静态优先级队列调度^[18]不足以解决不同优先级数据帧的传输时效问题。例如,当一个低优先级的帧已开始传输,即使有更高优先级的帧到达,也需等到当前帧传输完毕,这样会引入最长为以太网最大传输时间的时延,并且这种时延可以在多个节点累计,难以准确估计。为此,IEEE 802.1Qbu^[19]和 IEEE 802.3br^[20]2个标准都引入了提供延迟保障的帧抢占协议,该协议通过修改前导码,将正常的以太网帧分为2类:高优先级的EMAC帧和低优先级的PMAC帧。帧抢占工作原理简述如下:如果在当前的传输线路上已经有低优先级帧在传输,高优先级帧可视情况向低优先级帧发出切片传输中断的请求,并判断是否可能对低优先级帧实施切片操作,如果满足条件,则会在适当位置中断低优先级帧的传输并开始传输高优先级帧。同时,被中断的低优先级帧会添加一个适当的引导码,以便在高优先级帧传输结束后继续传输,接收端根据引导码将切片的低优先级帧重新组装成完整的帧。

2.3.2 时间感知流量整形

流量整形技术是一种主动调控网络数据传输速度的技术。流量整形器将待发送的数据流量按需进行调整,调整为满足TSN传输需求的形式再进行转发。流量整形能减少数据在节点等待排队的时间,减少丢包可能性,减小转发节点的等待区空间大小。整形后的数据将以一种更为平滑的方式在网络上传输,从而显著改善网络业务的服务性能^[3]。时间感知整形(TAS)是在IEEE 802.1 Qbv标准中被正式提出的^[21],旨在优化不同优先级帧的传输性能。TAS将通信时长分为等长周期,并利用门控列表决定当前优先级的数据队列能否进行传输,并视情况在某个特定时间片内暂停低优先级流量的传输,只允许时间敏感的高优先级流传输,降低了普通流量对时间敏感流的影响,有效降低了时间敏感数据的传输时延和时延抖动,保证信息传递的时效性。

2.4 冗余路径机制

鉴于网络通信中存在着大量难以预测的异常和突发故障,可能会导致数据传输的较大延迟甚至数据丢失,破坏数据传输的确定性。为了缓解这种意外情况,TSN引入了冗余路径机制,在当前路径发生故障时,允许流量及时切换至另一条处于激活状态的备用路径。802.1CB协议主要负责数据的冗余备份传输,

利用冗余机制解决环路网络拓扑中可能由CRC、线路开路及节点故障等导致的信息传输错误或丢失问题。冗余传输路径具体实现时,数据帧在传输前需要首先进行复制,然后分别通过2条路径进行传输。当第1份数据帧可靠到达目标管理节点后,会被转发至应用层,随后第2份到达的冗余数据帧则会被识别并丢弃。当然,冗余路径机制并不将同一数据流限制为2条冗余路径,它可以支持多条路径同时传输。实施冗余路径机制时,被发送的数据会被打上特殊的标签和序列号,经过不同节点复制传输。在进行数据帧汇聚时,会选择优先到达的数据,其他的复制数据帧将被丢弃,防止下一节点处理重复数据。

3 结语

TSN是在传统以太网基础上发展而来的用以提供确定性信息传输的标准化网络技术。目前,TSN处于快速发展阶段,相关标准研究也在稳步推进,并已得到工业界的普遍认可,成为未来工业互联网、车联网和智能电网的关键支撑技术之一。例如,随着远程管理运维系统和工业大数据采集分析等需求的涌现,工业网络 and 标准以太网之间的深度融合变得迫在眉睫^[22],TSN可支持时间敏感的控制流量与非时间敏感的普通以太网流量共存传输,并且具有实时性、低延迟和去抖动的特点,有着广阔的应用场合和良好的发展前景。

参考文献:

- [1] 何冬,黄晟,CHARLES W. AVB - 下一代网络音视频实时传输技术 [EB/OL]. [2022-05-20]. <https://wenku.baidu.com/view/9aacc206824d2b160b4e767f5acfa1c7aa00828f.html>.
- [2] 徐骁麟. 时间敏感网络技术及其在工业互联网中的应用[J]. 电信网络技术,2018(5):1-5.
- [3] PRYTZ G. A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT [C]//2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Hamburg: IEEE, 2008: 408-415.
- [4] LIMA D F, AMAZONAS J R. TCNet: Trellis Coded Network - implementation of QoS-aware routing protocols in WSNs [J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11(3): 969-974.
- [5] SCHUMACHER M, JASPERNEITE J, WebER K. A new approach for increasing the performance of the industrial Ethernet system PROFINET [C]//2008 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Dresden: IEEE, 2008: 159-167.
- [6] 丛培壮,田野,龚向阳,等. 时间敏感网络的关键协议及应用场景综述[J]. 电信科学,2019,35(10):31-42.
- [7] 工业互联网产业联盟. 时间敏感网络(TSN)产业白皮书[R/OL]. [2022-05-20]. <https://www.doc88.com/p-37416944251322.html?s=rel&id=4>.
- [8] 曹志鹏,刘勤让,刘冬培,等. 时间敏感网络研究进展[J]. 计算机应用研究,2021,38(3):647-655.
- [9] 文晓. 虹科电子:以创新技术加速企业数字化转型[J]. 自动化博览,2021,38(5):26-27.
- [10] 全巍,付文文,孙志刚,等. 枫林一号:一款面向高端装备定制的低功耗时间敏感网络芯片[J]. 计算机研究与发展,2021,58(6):1242-1245.
- [11] 佚名. Microchip 提供全面的时间敏感网络功能集[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2021,21(4):94.
- [12] 廖敏,李静. uRLLC 中 TSC 技术及相关应用研究[J]. 邮电设计技术,2021(5):49-54.
- [13] VARGA B, FARKAS J, MALIS A, et al. DetNet data plane: MPLS over IEEE 802.1 time-sensitive networking (TSN) [R/OL]. [2022-05-20]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9037/>.
- [14] 朱瑾瑜,陈洁,郭文双. 业务体验驱动的时间敏感网络架构研究[J]. 信息通信技术与政策,2021,47(1):74-81.
- [15] 何沐曦. 无线传感器网络环境下基于 Matlab 和 OMNeT++ 的 IEEE1588 时间同步仿真[D]. 重庆:西南大学,2015.
- [16] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- timing and synchronization for time-sensitive applications; IEEE Std 802.1AS-2020[S]. New York: IEEE, 2020.
- [17] 孙广东. 时间敏感网络中时钟同步与调度算法的研究与仿真[D]. 北京:北京邮电大学,2018.
- [18] 刘飞. 基于静态优先级的调度[J]. 航空电子技术,2007,38(3):15-19,30.
- [19] IEEE. IEEE standard for Ethernet amendment 5: specification and management parameters for interspersing Express traffic; IEEE Std 802.3bq-2016[S]. New York: IEEE, 2016.
- [20] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks -- amendment 26: frame preemption; IEEE Std 802.1Qbu-2016[S]. New York: IEEE, 2016.
- [21] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks - amendment 25: enhancements for scheduled Traffic; IEEE Std 802.1Qbv-2015[S]. New York: IEEE, 2016.
- [22] 王俊文. 未来工业互联网发展的技术需求[J]. 电信科学,2019,35(8):26-38.

作者简介:

赵奕,南京审计大学金审学院本科在读,研究方向为网络协议和时间敏感网络;王海涛,博士,计算机学会高级会员,南京审计大学金审学院教授,研究方向为网络架构、无线自组网、大数据和人工智能。

