

# WiFi-TSN 低时延转换架构\*

王博,王雪迪,时广轶,严伟

(北京大学 软件与微电子学院,北京 102627)

**摘要:** 无线网络与 TSN(Time Sensitive Networking)的融合是目前工业界的关注点之一。传统的基于应用层软件的网关存在 CPU 利用率高、处理延迟长、性能差等缺点。因此提出了一种 WiFi-TSN 低时延转换架构,来实现 WiFi 网络与 TSN 网络的集成。该架构采用 Verilog 语言实现,通过硬件来保证通信信道之间可预测的延迟,能够在极短的时间内完成协议转换和协议数据的转发。采用 Vivado EDA 工具来完成电路的设计,并进行足量的仿真测试来评估电路的端到端延迟性能。

**关键词:** TSN;WiFi;协议转换;端到端时延

中图分类号: TN926;TP393

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.222721

中文引用格式: 王博,王雪迪,时广轶,等. WiFi-TSN 低时延转换架构[J].电子技术应用,2022,48(4):24-28,33.

英文引用格式: Wang Bo, Wang Xuedi, Shi Guangyi, et al. WiFi-TSN low latency conversion architecture[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(4): 24-28, 33.

## WiFi-TSN low latency conversion architecture

Wang Bo, Wang Xuedi, Shi Guangyi, Yan Wei

(School of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102627, China)

**Abstract:** The integration of wireless network and TSN(Time Sensitive Networking) is one of the concerns of industry at present. The traditional gateway based on application layer software has some disadvantages, such as high CPU utilization, long processing delay, poor performance and so on. Therefore, a WiFi TSN low delay conversion architecture is proposed to realize the integration of WiFi network and TSN network. The architecture is implemented in Verilog language, which ensures the predictable delay between communication channels through hardware, and can complete protocol conversion and protocol data forwarding in a very short time. Vivado EDA tool is used to complete the circuit design, and sufficient simulation tests are carried out to evaluate the end-to-end delay performance of the circuit.

**Key words:** TSN; WiFi; protocol conversion; end-to-end delay

### 0 引言

21 世纪以来,工业物联网技术的发展日新月异。从工业现场总线到以太网,从传统的以太网到工业以太网,从工业以太网到时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN),从时间敏感网络再到无线-TSN 技术,每一次技术革命都蕴含着通信技术的飞跃。当前工业互联网技术的核心是 TSN。TSN 通过加入时间同步机制、流量整形机制以及排队转发机制,使不同业务的流量同时在一个网络中流转,同时能保证实时流量的确定性传输<sup>[1-2]</sup>。然而传统的 TSN 技术主要集中在有线传输领域,有线组网有建设周期长、成本高、缺少灵活性等缺点。所以 TSN 与无线技术的融合成为学术界和工业界研究的热点。5G 技术和 WiFi 技术成为业内公认的最适合与 TSN 融合的两种候选技术,但是目前并没有实际落地的产品和方案<sup>[3-5]</sup>。

物联网技术飞速发展,其核心技术为无线通信。本世纪初,无线通信技术开始蓬勃发展,逐渐走进工业控制领域,为万物互联提供了新的手段。无线技术可以为端到端的通信设备提供灵活、低成本的组网环境。然而,无线通信方案也有其不足:由于信道的复杂,无线通信缺乏时间确定性的机制。目前在工业界和学术界,应用于工业控制领域的无线组网方案还比较少见<sup>[6-7]</sup>。如何实现时间确定和低时延的无线-TSN 混合网络,进行数据的可靠传输,这成为工业界的研究热点。

李众和王鹏澄等人设计了一种基于 ZigBee、WiFi、以太网的网关,该网关采用 STM32 和 CC2530 双处理器架构。其中,硬件部分的 STM32 作为主处理器进行不同网络中数据的转发,软件部分移植了 LwIP 精简 TCP/IP 协议。该研究用软硬件协同的方式实现了物联网网关的系统<sup>[8]</sup>。

ÓSCAR SEIJO 等人提出了一种适用于工业控制应用的有线-无线混合体系架构。在该架构中,使用时间

\* 基金项目:国家重点研发计划资助(2020YFB1711001)

敏感网络(TSN)来控制有线网络,并且设计了针对于802.11的媒体访问控制(MAC)协议来控制无线网络。为了实现有线和无线网络的融合,还提出了一种具有实时特性的确定性接入点(AP)的网桥<sup>[9]</sup>。

印尼大学工程学院电气工程系的 Delphi Hanggoro、Lukman Rosyidi、Riri Fitri Sari 设计了一种物联网多协议网关系统。该网关是用 Python 和 Lazarus 语言开发的一个嵌入式系统,并且支持前端用户显示界面。该网关传输三种网络协议,其中 WiFi 协议数据传输的最大延迟为 362 ms<sup>[10]</sup>。

传统的网桥系统采用软件实现网络协议的转换,延迟比较高,无法满足低时延、高实时性的应用场景。本文设计了一种支持 WiFi 协议和 TSN 协议在数据链路层进行协议转换的网桥架构。它是一个基于数字电路的硬件网关,采用 Verilog 语言进行电路描述,具有端到端延迟低的优点。该电路架构支持 WiFi 数据与 TSN 数据进行协议格式转换,端到端的最低延迟可达到微秒级别。

### 1 WiFi-TSN 协议转换原理

TSN 是确保网络数据传输时间确定性的一个协议标准集合,它是隶属于 IEEE 802.1 下的协议标准。根据协议标准,TSN 工作在 OSI 模型的第二层即数据链路层。同时,TSN 的大部分机制都是通过硬件来实现的,所以处理数据流只消耗极少的时间。WiFi 协议主要遵循 IEEE 802.11 协议标准。802.11 标准中规定的协议帧也包含 Address 字段,只要将 802.11 与 TSN 协议的 Address 进行统一编址,就有希望实现 WiFi 网络到 TSN 网络的协议转换。

基于以上技术背景,本文设计了基于硬件电路的 WiFi 和 TSN 的网络协议转化模型,如图 1 所示,它主要工作于数据链路层。在数据链路层,本文设计的 WiFi-TSN 低时延转换电路可以完成 WiFi 与 TSN 的协议数据的拆帧与组帧,包括:TSN 帧头的拆解与填充、VLAN Tag 的解析与填充、MAC 地址的统一编址与映射、payload 的填充、CRC 校验与重新计算等。

WiFi 和 TSN 的协议帧转换过程示意如图 2 所示。当 WiFi 网络和 TSN 网络进行桥接,并且有两种网络有统一编制的 MAC 地址时,可以进行协议帧的转换。

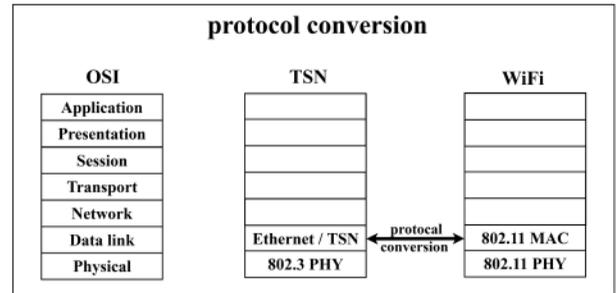


图 1 WiFi-TSN 协议转换模型

协议转换时每个字段的组帧方法如下所述:

(1)对于地址字段,将 WiFi 数据帧的 Address1、Address2 与 TSN 数据帧的 Destination Address、Source Address 直接替换;

(2)WiFi 的帧主体 Frame Body 和 TSN 的 payload 可以直接替换来组帧。但需要注意该字段的字节长度,TSN 协议帧的 payload 长度为 46~1 500 B,而 WiFi 协议帧的字段长度为 0~2 312 B,所以一种网络协议数据长度太长或者太短会造成两种网络不兼容的问题。因此两种网络进行桥接时,应充分考虑两种网络的实际情况,设定 TSN 协议的 payload 字段和 WiFi 协议的 Frame Body 的长度为 46~1 500 B;

(3)当 WiFi 协议数据转换为 TSN 数据时,应对 WiFi 协议帧的 frame body 进行计数,并将计数结果填充到 TSN 协议帧的 length/type 字段中;

(4)WiFi 和 TSN 的 FCS 字段长度都为 4 B,在协议转换时,FCS 的位置应填充 CRC calculator 计算的结果;

(5)WiFi 协议的 Preamble 和 Header 字段,一种是 144 bit 的长帧头,另一种是 72 bit 的短帧头,组帧时根据 CPU 配置的寄存器进行选择;

(6)TSN 协议的 Preamble 和 SFD 分别为 7 B 和 1 B 的固定值,硬件电路应固化这两个固定值;

(7)剩余的字段由 CPU 进行统一配置,组帧时硬件电路根据寄存器的配置值进行协议帧的封装。

### 2 WiFi-TSN 转换电路架构设计

本文设计的 WiFi-TSN 低时延转换架构如图 3 所示。其中,实线框内包含了该系统的所有电路模块。虚线

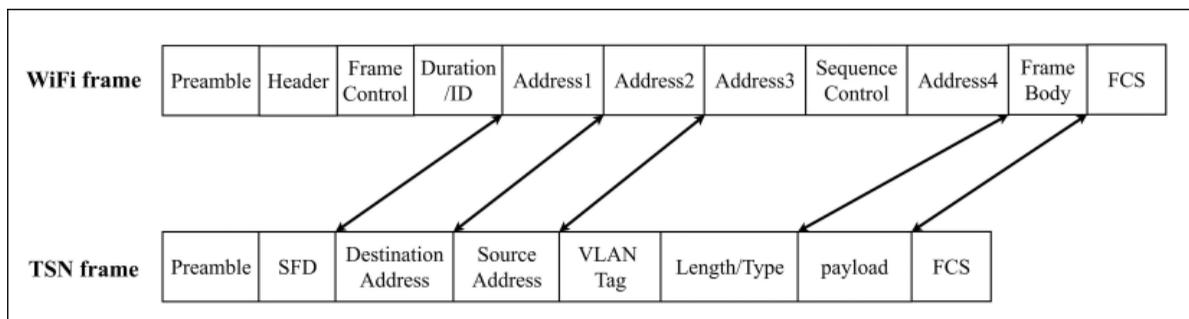


图 2 WiFi 协议帧和 TSN 协议帧转换示意图

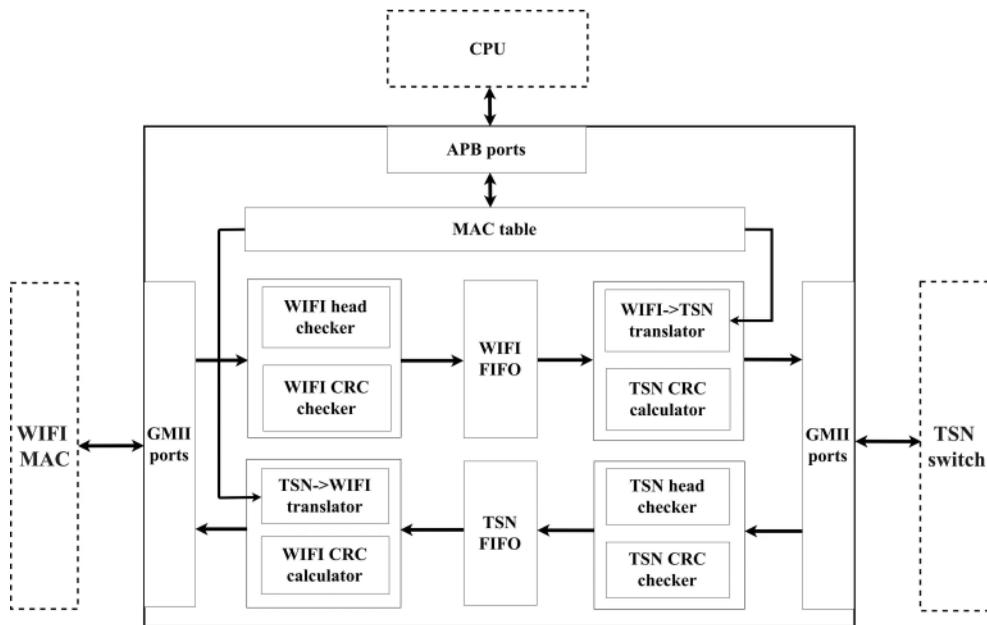


图3 WiFi-TSN 协议转换电路架构

框内部分表示与本系统进行数据交互的电路部分。黑色箭头表示数据流向。该电路架构支持CPU通过APB接口对配置寄存器的内容进行实时更新。Registers存储的内容指示了WiFi协议与TSN协议的各个字段的默认值,也可以寄存中断类型的信息。除此之外,该电路架构处理两个流向的数据,上行方向指的是WiFi MAC到TSN switch,下行方向指的是从TSN switch到WiFi MAC。对于上行方向的数据,该电路对GMI收到的协议帧进行识别和解析、进行CRC校验、缓存入WiFi FIFO、根据Registers内的配置信息进行组帧以完成WiFi到TSN的协议转换、转发到TSN switch。对于下行方向的数据,该电路进行上行数据处理过程的逆向处理。电路架构中每个模块的功能分别如下所述:

(1)APB ports:CPU通过APB ports对电路进行寄存器的配置以及读取;

(2)Registers:寄存WiFi和TSN的协议帧的字段信息、寄存中断类型信息;

(3)WiFi header checker:通过状态机对接收到的WiFi协议数据进行识别、校验和缓存;

(4)TSN header checker:通过状态机对接收到的TSN协议数据进行识别、校验和缓存;

(5)WiFi CRC checker:对接收到的WiFi协议数据进行CRC32校验,当校验出错时,将WiFi错误指示信号置位;

(6)TSN CRC checker:对接收到的TSN协议数据进行CRC32校验,当校验出错时,将TSN错误指示信号置位;

(7)WiFi->TSN translator:将接收到的WiFi协议数据转换为TSN协议数据;

(8)TSN->WiFi translator:将接收到的TSN协议数据转换为WiFi协议数据;

(9)WiFi CRC calculator:对接收到的WiFi协议数据进行CRC32校验,寄存校验结果;

(10)TSN CRC calculator:对接收到的TSN协议数据进行CRC32校验,寄存校验结果;

(11)WiFi FIFO:缓存WiFi的协议数据;

(12)TSN FIFO:缓存TSN的协议数据。

下面介绍电路架构的两个关键模块的工作原理,WiFi header checker模块和TSN header checker模块。

### 2.1 WiFi header checker 模块

WiFi header checker模块是一个状态机模块,该状态机是一个mealy型状态机。状态机通过判断GMI接收到的8 bit数据和当前的状态,进行状态的跳转和输出信号的改变。状态图如图4所示。每个状态释义及工作细节如下:

(1)IDLE:状态机上电之后进入IDLE初始状态,等待GMI接收数据,如果接收到的数据为连续的16个8'hff,则判定为长前导码,进入SFD状态;若接收到的数据为连续的7个8'h00,则判定为短前导码,进入SFD状态;若接收到的数据既非长前导码也非短前导码,则继续持续在IDLE状态。

(2)SFD:该状态为起始定界符状态,如果收到的数据为16'05CF,则判定接收到了起始界定符,进入header状态,否则回到IDLE状态。

(3)header:该状态为MAC header状态,每接收1 B数据,计数器自加1,接收到6 B,则认为MAC header已接收完成,进入MDPU状态。

(4)MDPU:该状态为MAC数据接收状态,在接收数据的过程中,电路一边缓存入FIFO中,一边进行CRC校验。同时,通过计数器对帧长度进行统计,并通过计数器

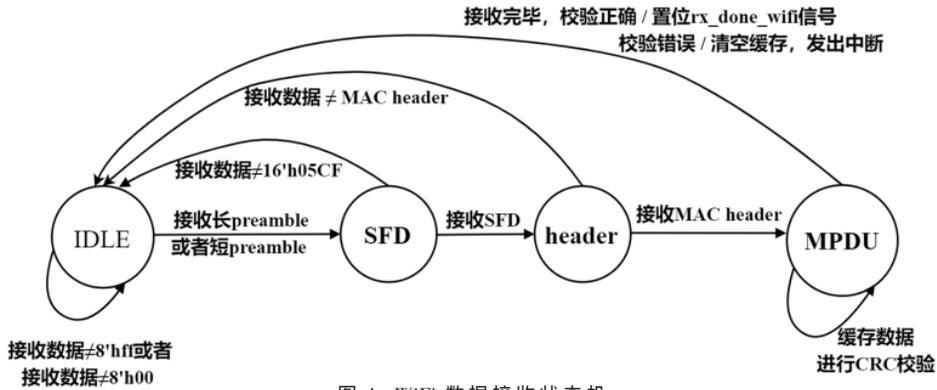


图4 WiFi数据接收状态机

的值来判定并寄存 MAC 地址字段,以便下游模块在协议转换时进行地址字段的封装。接收数据完成之后,状态机回到 IDLE 状态等待下一帧的接收。

### 2.2 TSN header checker 模块

TSN header checker 模块也是一个状态机模块,工作流程类似于 WiFi header checker,但是具体的流程细节有所不同。状态图如图 5 所示:每个状态释义及工作细节如下:

(1)上电之后,状态机进入 idle(空闲)状态,等待 GMII 接口的数据。当 GMII 接口收到数据之后,状态机进入 rx\_pre(接收前导码)状态。

(2)在 rx\_pre 状态中,状态机边接收边检测数据的值。如果 7 B 数据中每个字节的数据值都为 01010101,表示接收到的 TSN 数据的前导码值正确,进入 rx\_sfd(接收起始符)状态,否则回到 idle 状态。

(3)在 rx\_sfd 状态中,状态机边接收边检测数据的值,如果接收到的 1 B 数据为 8'b11010101,表示接收到的 TSN 数据的起始符值正确,进入 rx\_addr(接收 MAC 地址)

状态,否则回到 idle 状态。

(4)在 rx\_addr 状态中,状态机依次接收 6 B 的 MAC 目的地址和 6 B 的 MAC 源地址,接收完成后,进入 rx\_vlan(接收 VLAN Tag)状态。

(5)在 rx\_vlan 状态中,接收并锁存完毕之后,进入 rx\_leng(接收数据长度)状态。

(6)在 rx\_leng 状态中,状态机接收并锁存数据的字节数。接收完毕后,进入 rx\_data(接收数据)状态。

(7)在 rx\_data 状态中,状态机接收数据,并将数据缓存入 TSN FIFO 中。当接收数据的数量达到 rx\_leng 状态中锁存的字节数后,表示接收数据完成,接下来回到 idle 状态。

## 3 仿真与评估

### 3.1 功能仿真

图 6 展示了 WiFi 协议帧转换为 TSN 协议帧的过程。

当电路接收到 WiFi 协议帧时,状态机依次检查 WiFi 协议帧的 Preamble、Header 等每个字段,锁存 WiFi 协议帧的 Address1、Address2 字段,并用 WiFi FIFO 缓存 Frame Body 字段,接收缓存完毕后,rx\_done\_wifi 信号被置位,指示 WiFi 数据缓存完成。WiFi-TSN translator 模块在识别到 rx\_done\_wifi 信号被拉高的下一个时钟周期,开始从 GMII 口发送 TSN 协议帧的各个字段,其中 Destination Address 和 Source Address 字段用之前锁存的 Address1、Address2 字段进行填充,VLAN tag 字段使用 CPU 配置的值进行填充,payload 字段用 WiFi FIFO 中取出的数据进行填充,FCS 用 TSN CRC calculator 计算的值进行填充。

图 7 展示了 TSN 协议帧转换为 TSN 协议帧的过程,电路的工作流程为图 6 的逆过程,这里不再赘述。

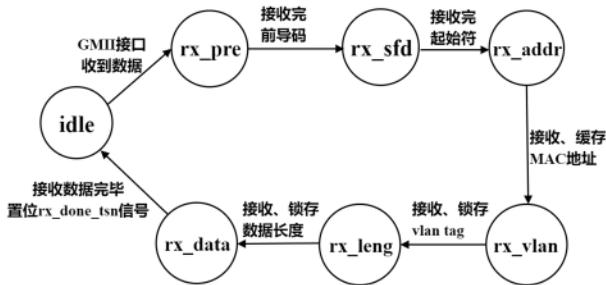


图5 TSN数据接收状态机

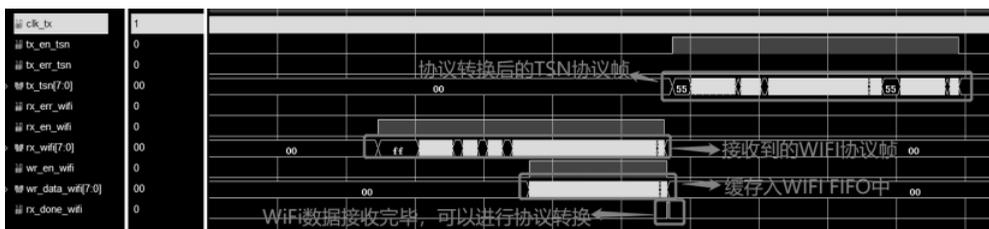


图6 WiFi协议帧转换为TSN协议帧

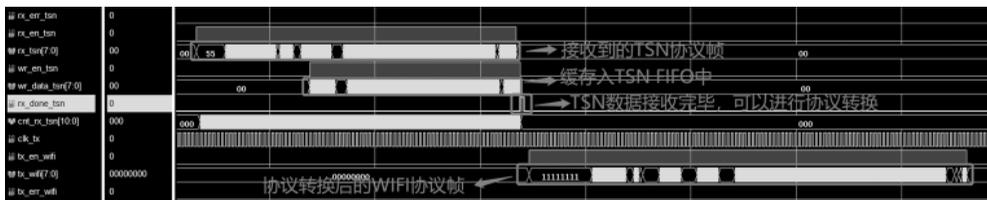


图7 TSN协议帧转换为WiFi协议帧

从图6、图7的仿真波形可以看到,接收TSN数据完成和接收WiFi数据完成的下一个时钟周期,rx\_done\_tsn和rx\_done\_wifi被置位,再下一个时钟周期,协议转换后的数据帧开始发送。由此可见,从接收完成数据到开始发送新的协议类型数据,仅消耗了2个时钟周期,本文设计的硬件电路进行协议转换的延迟非常小。

### 3.2 性能分析

交换机类型的设备的时延性能有四种评判指标,分别为首位进到末位出(FIFO)、末位进到首位出(LIFO)、首位进到首位出(FIFO)和末位进到末位出(LILO)。这些指标的时延都是在交换机的入口和出口进行测量的。

其中,LIFO可以通过硬件电路的设计直接得出。无论是WiFi协议帧转换为TSN协议帧还是TSN协议帧转换为WiFi协议帧,LIFO都为2个时钟周期,即16 ns。剩余三个指标都与协议帧的长度有关。本文选取LILO指标对电路的时延进行评判。

本文通过Vivado软件进行了大量的仿真测试,选取了100 B、300 B、600 B、900 B、1 200 B、1 500 B长度的协议帧,根据仿真图测量了端到端时延,并绘制数据图,如图8所示。从图8中可以看出,WiFi协议帧转换为TSN协议帧的LILO时延和TSN协议帧转换为WiFi协议帧的LILO时延都和协议帧长度呈正相关。区别在于:当原始协议帧的字节数相同时,TSN协议帧转换为WiFi协议帧的LILO时延更大,这是因为TSN协议帧帧头和帧尾的字节数小于WiFi协议帧的帧头和帧尾的字节数,所以TSN协议帧转换为WiFi协议帧后,字节数变大了,电路的LILO时延也就更大了。

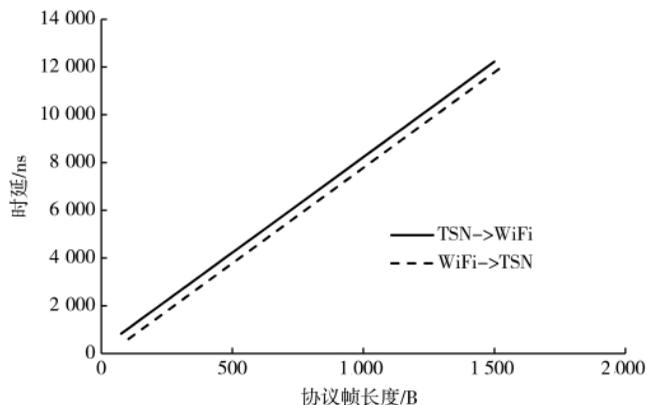


图8 电路的端到端时延

### 4 结论

本文提出了一种在数据链路层对两种协议帧进行协议转换的方案,设计出了一种WiFi-TSN低时延转换架构,并且用Verilog HDL语言对硬件电路进行设计。最后本文通过大量的测试用例,验证了两种协议帧转换的功能正确性,并且测量分析了电路的端到端时延,最低时延可达微秒级别。结果表明,本文设计的WiFi-TSN低时延转换电路能够正确进行协议转换,并且具有极低的端到端时延。

### 参考文献

- [1] 蔡岳平,姚宗辰,李天驰.时间敏感网络标准与研究综述[J].计算机学报,2021,44(7):1378-1397.
- [2] SCHUNGEL M,DIETRICH S,GINTHOR D,et al.Heterogeneous synchronization in converged wired and wireless time-sensitive networks [C]//2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems(WFCS),2021:67-74.
- [3] SEIJO O,ITURBE X,VAL I.Tackling the challenges of the integration of wired and wireless TSN with a technology proof-of-concept[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021:1.
- [4] SEIJO O,LOPEZ-FERNANDEZ J A,VAL I.w-SHARP: implementation of a high-performance wireless time-sensitive network for low latency and ultra-low cycle time industrial applications[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(5):3651-3662.
- [5] SEIJO S,FERNÁNDEZ Z,VAL I,et al.SHARP:a novel hybrid architecture for industrial wireless sensor and actuator networks[C]//2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems(WFCS).IEEE,2018:1-10.
- [6] HAXHIBEQIRI J,JIAO X,ASLAM M,et al.Enabling TSN over IEEE 802.11:low-overhead time synchronization for Wi-Fi clients[C]//2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology(ICIT),2021:1068-1073.
- [7] SAEED R A,MOHAMAD H,ALI B M,et al.WiFi/WiMAX heterogeneous seamless handover[C]//2008 Third International Conference on Broadband Communications, Information Technology & Biomedical Applications,2008:169-174.
- [8] 李众,王鹏澄,陆海空,等.基于 ZigBee、以太网、WiFi 技术的网关设计[J].测控技术,2015,34(3):97-100.
- [9] SEIJO O,FERNÁNDEZ Z,VAL I,et al.SHARP:towards

(下转第33页)

当最近邻居个数为 35 时, Canopy+K-means UBCF 的 MAE 值为 0.758, 同样条件下本文所提出的算法的 MAE 值为 0.741, 推荐效果提升了 1.7%。

## 5 结论

本文提出一种基于混合聚类与融合用户偏好的协同过滤推荐算法, 通过建立 Canopy+bi-Kmeans 混合聚类模型并且将传统的相似性度量算法中加入用户属性和用户兴趣偏好。实验结果表明, 本文提出的基于混合聚类与融合用户偏好的协同过滤推荐算法在一定程度上提高了推荐可靠性。由于本文的算法是在各方面条件较为理想的环境下实现的, 其鲁棒性和稳定性有待提高, 因此下一步的工作是将该算法运用到现实项目中, 并且不断追求更高的推荐效率。

## 参考文献

- [1] 陆航, 师智斌, 刘忠宝. 融合用户兴趣和评分差异的协同过滤推荐算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(7): 24-29.
- [2] LINDEN G, SMITH B, YORK J. Amazon.com recommendations: item-to-item collaborative filtering[J]. Internet Computing. IEEE, 2003, 7(1): 76-80.
- [3] CELMA Ò, SERRA X. Foafing the music: bridging the semantic gap in music recommendation[J]. Web Semantics Science Services & Agents on the World Wide Web, 2008, 6(4): 250-256.
- [4] HOPFGARTNER F, BRODT T, SEILER J, et al. Benchmarking news recommendations[J]. ACM SIGIR Forum, 2016, 49(2): 129-136.
- [5] 常江. 基于 Apache Mahout 的推荐算法的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [6] 王蓉, 刘宇红, 张荣芬. 基于混合聚类与融合用户属性特征的协同过滤推荐算法[J]. 现代电子技术, 2021, 44(6): 179-182.
- [7] 赵伟, 林楠, 韩英, 等. 一种改进的 K-means 聚类的协同过滤算法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2016, 40(2):

32-36.

- [8] 张琳, 牟向伟. 基于 Canopy+K-means 的中文文本聚类算法[J]. 图书馆论坛, 2018, 38(6): 113-119.
- [9] 王林, 贾钧琛. 基于改进 Canopy-K-means 算法的并行化研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 176-179, 186.
- [10] 魏佳代. 基于 DNS 日志的用户访问行为分析和研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [11] 郝雅娴. K-Means 聚类中心最近邻推荐算法[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2021, 35(1): 72-78.
- [12] LARSEN B, AONE C. Fast and effective text mining using linear-time document clustering[C]//Proceedings of the fifth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM, 1999: 16-22.
- [13] D'ADDIO R M, DOMINGUES M A, MANZATO M G. Exploiting feature extraction techniques on users' reviews for movies recommendation[J]. Journal of the Brazilian Computer Society, 2017, 23(1): 1-7.
- [14] YAN H, PENG Q, HU X, et al. Web service recommendation based on time series forecasting and collaborative filtering[C]//2015 IEEE International Conference on Web Services. IEEE, 2015: 233-240.
- [15] 涂金龙, 涂风华. 一种综合标签和时间因素的个性化推荐方法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(4): 1044-1047.
- [16] 王卫红, 曾英杰. 基于聚类和用户偏好的协同过滤推荐算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(3): 68-73.
- [17] 肖文强, 姚世军, 吴善明. 基于用户谱聚类的 Top-N 协同过滤推荐算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(7): 138-143.

(收稿日期: 2021-08-22)

## 作者简介:

麻天(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 知识图谱与推荐算法。

余本国(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 数据分析与深度学习。



扫码下载电子文档

(上接第 28 页)

the integration of time-sensitive communications in legacy LAN/WLAN[C]//2018 IEEE Globecom Workshops. IEEE, 2018: 1-7.

- [10] DELPHI H, LUKMAN R, FITRI S R. Design and implementation of multi-protocol gateway for Internet of Things[C]//2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT), 2019: 64-69.

(收稿日期: 2022-03-08)

## 作者简介:

王博(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 工业以太网、集成电路设计。

王雪迪(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 工业以太网、集成电路设计。

时广轶(1979-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: MEMS 惯性器件、碳纳米管传感器设计与应用技术。

严伟(1966-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 视频编解码、无线通信电路设计, E-mail: yanwei@ss.pku.edu.cn。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所