

面向工业无线网络的动态 TDMA 系统设计与实现

徐 川¹ 曾日辉¹ 邢 媛¹ 邓炳光¹ 赵国锋¹

摘 要 随着工业 4.0 的发展, 不同种类的新型工业应用被部署到工厂中, 这对现有工业无线技术提出了实时性和高速率的要求. 为了同时满足这两种需求, 本文在支持高速率的 IEEE802.11 的基础上, 提出了基于软件定义的动态时分多址 (Time division multiple access, TDMA) 机制无线接入系统. 首先, 为了提供时延有界的传输服务, 设计并实现了基于 MAC (Medium access control) 层的动态 TDMA 接入机制. 然后, 为了满足工业无线网络中的动态变化的带宽需求, 考虑设备数据量的动态变化, 在 SDN (Software defined network) 控制器上通过基于最小二乘法的线性回归算法预测设备时隙需求, 再将动态时隙分配问题转化为优化问题以最大化网络中所有设备动态时隙需求. 最后, 通过仿真对比 TDMA 时隙分配算法的性能, 并在实际网络环境中开展系统部署与测试. 结果表明, 相对于其他 TDMA 接入机制, 动态 TDMA 机制在保障时延有界的同时能有效提升传输性能.

关键词 工业无线网络, 动态 TDMA, 软件定义网络, 时隙分配

引用格式 徐川, 曾日辉, 邢媛, 邓炳光, 赵国锋. 面向工业无线网络的动态 TDMA 系统设计与实现. 自动化学报, 2022, 48(11): 2812–2822

DOI 10.16383/j.aas.c190797

Design and Implementation of Dynamic TDMA System for Industrial Wireless Networks

XU Chuan¹ ZENG Ri-Hui¹ XING Yuan¹ DENG Bing-Guang¹ ZHAO Guo-Feng¹

Abstract With the development of Industry 4.0, various types of new industrial applications are deployed in factories, which introduces real-time and high-rate requirements for existing industrial wireless technologies. To satisfy the two requirements simultaneously, we propose a software-defined based dynamic TDMA (time division multiple access) wireless access system with high-speed IEEE802.11. Firstly, to guarantee the transport service with bounded delay, we design a dynamic TDMA access mechanism based on MAC (medium access control) layer. Moreover, to meet the dynamic bandwidth requirements in industrial wireless networks, the linear time-regression algorithm based on the least square method on the SDN (software defined network) controller considering the dynamic changes in the amount of device data is used to predict the device time slot requirements, then the dynamic time slot allocation problem is translated into an optimization problem to maximize the dynamic slot requirements of all devices in the network. Finally, we conduct simulations to compare the performance of TDMA channel resources management algorithms, and implement them in real networks to evaluate the performance of dynamic TDMA system. The experimental results demonstrate that comparing with existing TDMA wireless access mechanisms, the dynamic TDMA mechanism can guarantee delay bound and improve the transmission performance efficiently.

Key words Industrial wireless network, dynamic TDMA, software defined network (SDN), time slot allocation

Citation Xu Chuan, Zeng Ri-Hui, Xing Yuan, Deng Bing-Guang, Zhao Guo-Feng. Design and implementation of dynamic TDMA system for industrial wireless networks. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(11): 2812–2822

收稿日期 2019-11-20 录用日期 2020-06-19

Manuscript received November 20, 2019; accepted June 19, 2020

国家自然科学基金 (62171070), 国家重点研发计划 (2018YFB1800301, 2018YFB1800304), 国家科技重大专项基金 (2018ZX03001016), 重庆市研究生科研创新项目 (CYB19176, BYJS201905) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62171070), National Key Research and Development Program of China (2018YFB1800301, 2018YFB1800304), National Science and Technology Major Project (2018ZX03001016), and Chongqing Postgraduate Research and Innovation Project (CYB19176, BYJS201905)

本文责任编辑 孙健

Recommended by Associate Editor SUN Jian

1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065

随着工业 4.0 的蓬勃发展, 工业物联网 (Industrial internet of things, IIoT) 中的智能制造和管理技术引起工业界和学术界的极大关注^[1–2]. 为了实现工业系统中的智能决策和自动工控, 工厂中会部署种类繁多的感知设备和控制设备, 例如移动巡检机器人、自动运输车和监控摄像头等, 这些工业设备在实时性和可靠性等方面对传统工业网络提出了严格的挑战^[3]. 针对工业网络的实时性和可靠性需求, IEEE 和 IETF 工作组分别提出了应用于链路层的 TSN (Time sensitive networking) 标准体系^[4–5]和应用于网络层的 DetNet 标准体系^[6], 然而这些技术均属于有线网络技术, 不能够很好地支持设备的

移动性且布线成本较高. 与有线技术相比, 无线技术^[7] 由于具有易部署、成本低和支持移动性等优势, 可以很好地应用于工业领域. 目前最常用的工业无线标准 WirelessHART、ISA100.11a 和 WIA-PA 都基于 IEEE802.15.4^[8-10], 且只适用于低速率且数据量小的工控信息传输, 无法满足新型工业物联网设备的高速率传输要求^[11-14]. IEEE802.11 系列协议适用于高速率传输, 但由于信道接入采用竞争机制, 无法提供低且有界的时延传输服务^[15]. 与传统工业应用相比, 现代工厂中的业务传输的数据不再是单一且固定的小流量数据, 而是具有非周期性规律的高动态变化流量的数据. 因此, 如何在保障工业物联网设备时延有界的同时, 提升传输效率是现代工业无线技术需要解决的难点问题.

现有研究成果根据其是否需要修改 802.11 协议的信道接入机制分成两类. 第 1 类方法无需修改信道接入机制, 以 Cena 等^[16] 的研究方案为代表, 通过最大化无缝冗余信道提高基于 802.11 协议的 WiFi 可靠性. 但这类方案需要在终端设备上部署多个无线网卡设备, 因此会增加部署成本和难度. 同时, 802.11 协议中基于载波侦听多址接入 (Carrier sense multiple access, CSMA) 的机制引入了随机性时延, 无法保证时延有界. 第 2 类方法对 802.11 协议的 CSMA 机制进行改进. 一部分研究人员提出在 MAC (Medium access control) 层采用时分多址 (Time division multiple access, TDMA) 机制取代 CSMA 机制. 例如, Wei 等^[17] 通过修改商用无线网卡驱动, 在 WiFi 下设计并实现高吞吐量和低时延的实时高速无线通信协议 RT-WiFi (Real time WiFi). 然而, RT-WiFi 的设计初衷是针对固定速率数据传输的感应设备, 它为每个设备分配固定的信道资源, 无法适应业务需求的变化. 随后, Cheng 等^[18] 在 RT-WiFi 的基础上提出了一种适用于移动设备的工业无线多跳网络协议 Det-WiFi. 尽管固定 TDMA 方案可以为设备分配固定的接入信道从而确保实时通信, 但是存在可扩展性差和信道利用率低的问题.

为此, 研究者们提出同时结合 TDMA 和 CSMA 优势的混合 TDMA/CSMA 的接入机制^[19]. Shahin 等^[20] 设计并实现了一种基于 802.11 的混合 TDMA/CSMA 信道接入方式 hMAC, 其中在 TDMA 阶段为时延敏感业务提供时延有界传输保证, CSMA 阶段用于兼容 IEEE802.11. hMAC 不足之处在于只设计下行传输的混合 TDMA/CSMA 传输机制, 无法提供上行数据的可靠传输. Shoaei 等^[21] 提出了基于机器学习的混合 TDMA/CSMA 协议. 在提出的协议中, 具有高吞吐量的用户被安排在 TDMA 阶段进行数据传输, 而低流量的用户在 CSMA 阶段进行接入信道, 竞争传输数据. 但此方案根据吞

吐量的高低进行分级传输, 无法保证网络中所有数据的时延有界. Cruces 等^[22] 提出了一种确定性混合网络架构, 其中无线接入部分采用 TDMA 方式传输时敏业务, CSMA 方式传输尽力而为数据. 然而, 该方案中的 TDMA 阶段采用固定时隙分配方式, 不能合理利用信道资源. 此外, IEEE 于 2019 年 5 月成立 P802.11be Task Group (TGbe) 专门用于解决 WiFi 用于工业物联网的实时性和可靠性问题^[23].

综上所述, 现有的研究虽然从多个方面对 WiFi 协议进行修改, 从而提高 WiFi 传输的可靠性和实时性, 但是缺乏对工业场景中无线终端流量动态变化的考虑, 导致无法满足工业设备实时变化的数据传输需求.

针对工业无线网络中时延有界保障和动态流量的需求的问题, 本文提出了一种基于软件定义动态 TDMA 系统 (Dynamic TDMA system, DTS). 在 MAC 层引入动态 TDMA 分配和反馈机制, 为数据提供时延有界传输保障. 同时, 在控制器上通过收集的用户状态信息对用户需要的时隙数目进行预测, 再通过动态时隙分配算法获得最优时隙分配, 以满足网络中不同业务的动态需求. 最后, 通过仿真和真实网络部署测试对 DTS 性能进行验证, 仿真和测试的结果均表明, 与已有的方案相比, DTS 既能为传输设备提供时延有界的服务, 又能提高网络的总吞吐量.

本文的主要贡献如下:

- 1) 为了确保工业无线网络中业务传输的时延有界需求, 在 WiFi 原有 CSMA 阶段引入用户设备时隙需求协商机制, 同时采用 TDMA 时隙用于用户设备数据传输, 可提供时延有界的传输性能;
- 2) 为了满足用户设备变化的带宽需求, 提出一种动态时隙分配算法, 采用基于最小二乘法的线性回归算法预测用户设备的时隙需求, 然后通过预测函数建立目标函数, 求解出所有设备分配的时隙数目和位置, 以提升网络吞吐量;
- 3) 设计并实现基于软件定义动态 TDMA 系统, 将所提出的动态 TDMA 接入机制和时隙分配算法进行工程实现. 首先将动态时隙分配算法部署到 SDN 控制器, 实现全网时隙资源的动态分配; 其次通过修改商用无线网卡驱动, 实现用户设备以 TDMA 方式接入系统, 但该方式需要对用户设备的网络驱动进行修改, 造成一定程度的不便利.

1 动态 TDMA 无线接入

1.1 问题分析

如图 1 所示, 在工厂中, 各种应用通过工业网

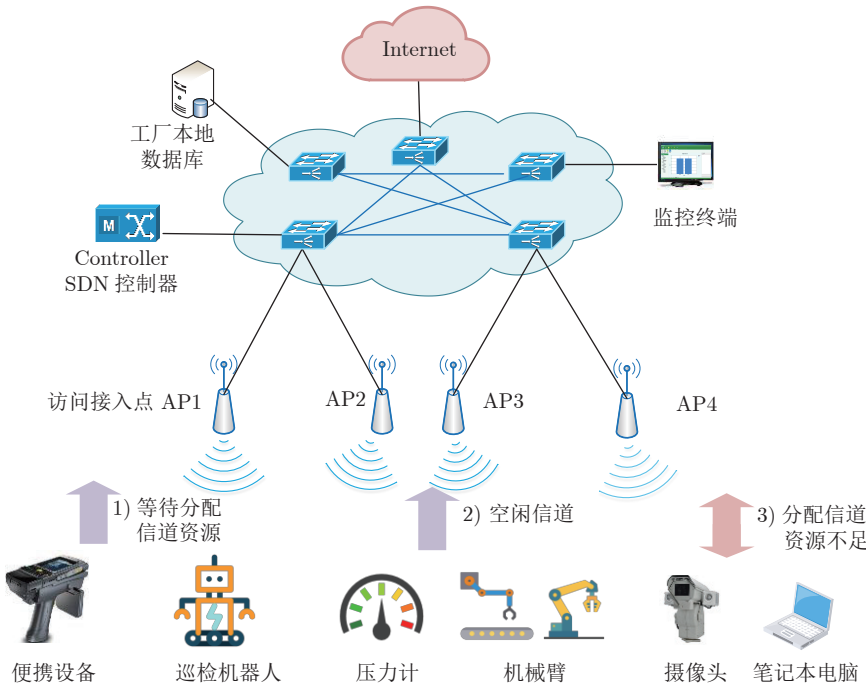


图 1 工业物联网场景图

Fig.1 A typic industrial wireless internet of things

络对生产流程进行管理和监控,例如,无线监视摄像头、移动巡检机器人、手持便携、液压感应器和机械臂等工业物联网设备都通过工业无线网络进行传输.其中会出现如下问题:1)等待分配信道资源:便携设备和巡检机器人等工业物联网移动设备由于不会长期存在一个网络中,因此通常不会分配专属的信道资源,这导致移动设备加入网络时需要等待无线访问接入点 (Access point, AP) 分配信道资源;2)出现空闲信道:压力计和机械臂等传统工业传感器由于传输数据量小且发送频率固定,无法完全使用分配的信道资源,造成信道资源浪费;3)分配信道资源不足:由于监控和图像分析摄像头等多媒体设备传输的数据量大且不确定,这将导致分配的信道资源无法满足动态传输需求.

综上所述,由于现有工业无线接入技术中的信道资源分配相对固定,无法为移动设备及时地分配可用的信道资源,造成设备入网产生排队时延.同时,不同设备具有不同的数据发送频率和信息时效性要求,即网络的带宽需求在实时变化和需要兼顾不同设备的时延标准.因此如何动态且合理地分配信道资源,满足工业无线网络中动态带宽的变化及实时性需求是本文所要解决的问题.

1.2 超帧设计

为了有效地管理和分配信道资源,本文将采取超帧形式对信道资源进行划分.如图2所示,按照

时间顺序将信道资源划分成一个个连续的超帧,其中超帧的长度为 T_{sp} .超帧由3个阶段组成,分别是 Beacon 阶段、CSMA 阶段和 TDMA 阶段.为了确保各类数据的时延有界,本文采用 TDMA 方式进行数据传输,同时为适应数据流量动态变化的需求,在 CSMA 阶段实现 AP 与用户设备之间的无线信道资源协商,并且在一个超帧周期后动态调整用户设备的时隙分配.具体功能如下:

1) Beacon 阶段:其长度为 T_B .为了保证网络时钟同步和广播时隙表,AP 在此阶段向所在网络广播 Beacon 帧.其中,网络时钟同步采用原有 IEEE802.11 中的 TSF (Timing synchronization function) 机制,确保纳秒 (ns) 级别的时间同步.

2) CSMA 阶段:其长度为 T_C .主要有两个功能:一是新设备入网协商,其中包括传输的数据类型和初始分配的时隙数目;二是用户设备向控制器

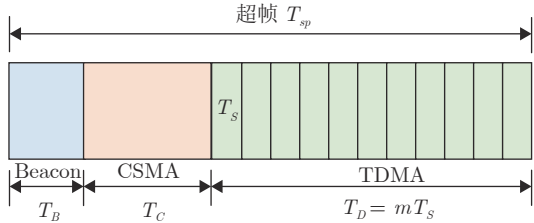


图 2 动态 TDMA 信道接入方式

Fig.2 Dynamic TDMA channel access method

反馈与协商时隙资源需求。

3) TDMA 阶段: 其长度为 T_D . 此阶段由 m 个长度为 T_s 的时隙组成. 每个时隙有且只允许一个设备 (包括用户设备和 AP) 进行数据传输。

2 动态 TDMA 时隙分配

2.1 动态时隙需求预测

用户设备 n 通过超帧中 CSMA 阶段反馈当前数据量 T_n , 控制器根据反馈的数据量 T_n 为设备分配时隙, 然而, 当下一个超帧到来进行时隙分配时, 用户设备可能会产生新数据, 使得其实际需要的时隙数目大于原来反馈的 T_n . 因此, 为进一步地准确得到用户设备实际需求的时隙数目 S_n , 控制器通过离线模式和在线模式对各个用户设备需求的时隙数进行预测. 在离线模式阶段, 通过训练大量收集的历史数据求出线性回归函数的参数; 在线模式阶段, 通过线性回归函数预测用户设备实际需要的时隙数目。

根据机器学习拟合, 建立基于线性回归的时隙数目预测模型, 如式 (1) 所示. 其中, $f(T_n)$ 表示在 T_n 下预测的时隙数目, ω 和 b 均是预测函数的参数, 预测函数的目的是让 $f(T_n)$ 的值靠近设备 n 实际需要的时隙数目 S_n , 即 $f(T_n) \approx S_n$.

$$f(T_n) = \omega T_n + b \quad (1)$$

均方误差是线性回归中最常用的性能指标, 通过最小化均方误差可以求解 ω 和 b 的值。

因此, 为求解 ω 和 b 的值, 本文采用最小二乘法建立数学模型进行求解. 已知历史数据集 $D = \{(T_1, S_1), (T_2, S_2), \dots, (T_N, S_N)\}$, 并建立均方误差最小化优化函数为

$$\min_{\omega, b} \sum_{j=1}^N (S_j - \omega T_j - b)^2 \quad (2)$$

为求解该函数, 通过求解函数 $E(\omega, b) = \sum_{j=1}^N (S_j - \omega T_j - b)^2$ 的偏导数, 分别得出 ω 和 b 的特定值, 计算结果为

$$\omega = \frac{\sum_{j=1}^N (T_j - \bar{T})(S_j - \bar{f})}{\sum_{j=1}^N (T_j - \bar{T})^2} \quad (3)$$

$$b = \bar{f} - \omega \bar{T} \quad (4)$$

其中, $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j$, $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(T_j)$.

2.2 动态时隙分配模型

通过上述时隙预测算法, 可以得到每个设备所

需要的时隙数目 $f(T_n)$, 假设当前网络设备的总数目为 k , T_n 表示设备 n 产生的数据量, 超帧的长度为 T_{sp} . $\alpha_n \in \{0, 1\}$ 表示设备 n 的数据量因子, 代表设备 n 是否产生数据量, $\alpha_n = 1$ 表示设备 n 产生了数据量, 否则没有. $\beta_{in} \in \{0, 1\}$ 表示第 i 个时隙与设备 n 的关联关系, 若第 i 个时隙分配给设备 n , 则 $\beta_{in} = 1$, 否则为 0. 记 x_n 表示控制器为每个设备最终分配的时隙数目, 本文旨在满足设备时延有界的条件下, 动态分配信道资源, 以满足网络中所有设备的动态时隙需求, 则建立目标函数如下:

$$\min \sum_{n=1}^k \alpha_n |x_n - f(T_n)| \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } f(T_n) = \omega T_n + b, \quad \forall n = 1, 2, \dots, k \quad (5b)$$

$$x_n = \sum_{i=1}^m \beta_{in}, \quad \forall n = 1, 2, \dots, k \quad (5c)$$

$$\alpha_n \in \{0, 1\}, \quad \forall n = 1, 2, \dots, k \quad (5d)$$

$$\beta_{in} \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (5e)$$

$$\sum_{n=1}^k \beta_{in} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (5f)$$

$$\sum_{n=1}^k \alpha_n x_n \leq m \quad (5g)$$

$$\ell T_{sp} + T_B + T_C + i \beta_{in} T_s \leq D_n^{\max}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (5h)$$

其中, 目标函数为最大化网络中每个设备最终分配的时隙数目无限接近于其需求时隙数目, 约束条件 (5f) 表示每一个时隙只能分配给一个设备, 约束条件 (5g) 表示所有设备所分配的数目和不能大于总时隙数目, 约束条件 (5h) 表示每个设备的传输时延不能超过其最大允许时延 $D_n^{\max}$, 其中 $\ell \in [0, \infty)$ 的自然数。

2.3 动态时隙分配算法

动态 TDMA 时隙分配算法如算法 1 所述. 其中, 步骤 1 控制器根据历史数据集 D 分别计算出 $\bar{T}$ 和 $\bar{f}$, 步骤 2 ~ 8 通过历史数据训练分别求得预测参数 ω 和 b , 步骤 9 则获得预测函数 $f(T_n)$, 然后根据获得的预测函数和设备向控制器反馈的数据量, 步骤 10 和步骤 11 求得所有设备所需要的时隙数, 步骤 13 是将动态时隙分配问题转化为时隙分配优化问题构建优化目标函数以满足网络中所有设备的动态时隙需求, 从而获得最优动态时隙分配方案。

算法 1. 动态时隙分配算法

输入. 历史数据集 $D = \{(T_1, S_1), (T_2, S_2), \dots, (T_N, S_N)\}$, 设备数目 k , 设备 n 的数据量 T_n , 设备 n 的数据量因子 α_n ,

超帧的长度为 T_{sp} , 时隙数目 m .

输出. 第 i 个时隙与设备 n 的分配关系 β_{in} , 控制器为每个设备最终分配的时隙数目 x_n .

- 1) 计算 $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j$, $\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(T_j)$;
- 2) 初始化 $num = 0$, $d = 0$;
- 3) **for** $j = 1, 2, \dots, N$ **do**
- 4) 计算 $num += (T_j - \bar{T})(S_j - \bar{f})$;
- 5) 计算 $d += (T_j - \bar{T})^2$;
- 6) **end for**
- 7) 计算 $\omega = num/d$;
- 8) 计算 $b = \bar{f} - \omega \bar{T}$;
- 9) 构建预测函数 $f(T_n) = \omega T_n + b$;
- 10) **for** $n = 1, 2, \dots, k$ **do**
- 11) 计算 $f(T_n) = \omega T_n + b$;
- 12) **end for**
- 13) 构建目标函数 $\min \sum_{n=1}^k \alpha_n |x_n - f(T_n)|$;
- 14) 求解目标函数, 得到 β_{in} ;
- 15) 获得控制器为每个设备最终分配的时隙数目 $x_n = \sum_{i=1}^m \beta_{in}$.

该算法的计算复杂度主要包括两个过程: 历史数据集有 N 个, 网络中设备数量为 k 个, 总时隙数目为 m 个, 首先对网络中所有设备实际需要的时隙数进行预测的时间复杂度为 $O(N + k)$; 然后为网络中所有设备分配最优时隙的时间复杂度为 $O(km)$. 算法总的时间复杂度为 $O(N + k(m + 1))$.

3 DTS 系统实现

3.1 系统总体设计

为了实现动态时隙分配算法和机制, 本文设计并实现到基于软件定义的动态 TDMA 系统, 如图 3 所示. DTS 的系统结构自上而下分为应用层、控制层和基础设施层. 应用层向网络管理者提供各种应用服务, 控制层通过 SDN 控制器^[24-26] 提供网络流量控制, 此外, 控制层提供两个重要的接口, 分别是北向接口和南向接口. 其中, 北向接口为应用层提供可编程接口, 从而让应用层无需处理复杂物理底层参数; 南向接口主要负责与基础设施层中网络元件进行交互, 其中 Openflow 协议^[27] 是南向接口协议. 基础设施层主要负责无线接入用户设备的数据传输和转发, 其主要网络元件是 AP 和用户设备. AP 与用户设备通过超帧进行交互, 其中, AP 在 Beacon 阶段广播超帧信息; 用户设备通过 CSMA 阶段发送反馈管理帧, 上报当前设备情况; 在 TDMA 阶段, AP 和用户设备按照时隙表进行数据传输.

控制器主要功能包括可编程接口、管理与控制、

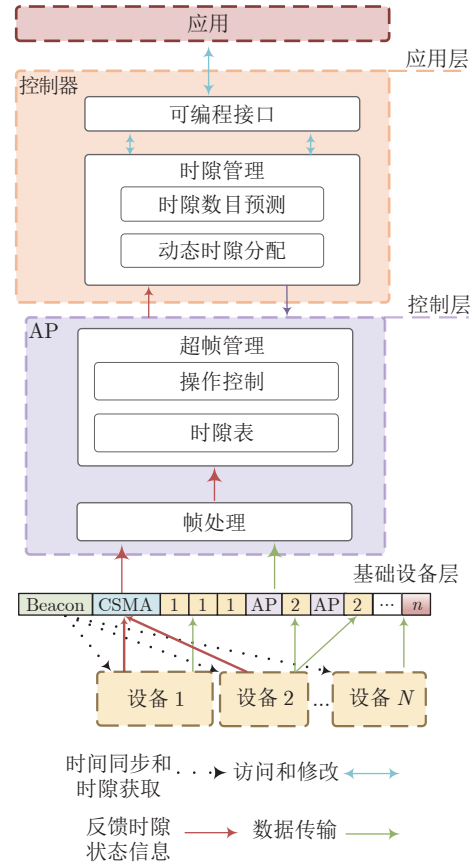


图 3 DTS 系统结构图

Fig.3 The architecture of DTS system

时隙管理和消息处理.

AP 主要功能包括提供时隙同步、时隙表更新、数据收发控制和数据转发.

用户设备需要控制数据缓存队列和反馈队列状态信息, 如图 3 所示. 当设备采样的数据量发生变化时, 用户设备将通过向控制器反馈的缓存队列信息来表示当前数据量的变化, 从而让控制器对信道资源进行动态调整分配. 用户设备的信息反馈过程如下:

1) 设备将在当前超帧的 CSMA 阶段内发送 INFO_FEEDBACK 帧, 如图 4 所示. 其中, INFO_FEEDBACK 帧是根据 IEEE 802.11 管理帧进行构造, 它主要包含当前设备的数据缓存队列长度信息.

2) 如果用户设备在 CSMA 阶段成功发送 INFO_

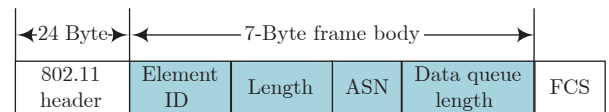


图 4 INFO_FEEDBACK 帧的结构

Fig.4 INFO_FEEDBACK frame structure

FEEDBACK 帧, 则 AP 将会返回 ACK 应答帧, 同时用户设备将会在下一个 Beacon 帧中提取出属于自身的时隙表信息; 如果发送失败, 则用户设备将在下一个 CSMA 阶段内重新发送。

3.2 控制器实现

1) 系统配置

配置模块用于处理配置请求以及设置物理和虚拟资源, 其中包括虚拟网络 (SSID (Service set identifier)、网络规模、策略、时隙等)、用户服务 (应用程序的传输规则和 QoS (Quality of service), 例如吞吐量、时延等) 和访问点设备 (通道、电源、策略等)。数据库采用 MySQL 数据库, 其中, 配置数据库和状态数据库用于维护物理资源和虚拟资源的状态、属性、功能和配置记录; 资源数据库用于记录并维护时隙长度、超帧参数、用户时隙数目、历史数据量等信道资源。

2) 功能管理

管理模块用于提供各种无线网络管理功能, 可以分为两个部分。第 1 部分是基本管理, 主要负责管理用户访问、身份验证、系统监视、拓扑管理、链接发现和自定义插件等功能。第 2 部分是时隙管理, 如图 5 所示。管理模块首先通过从事务模块获取的用户反馈信息和从资源数据库中获取的历史数据量进行时隙数目预测, 然后将预测时隙数目通过动态时隙分配算法得出时隙分配结果, 最后将时隙分配结果通过消息模块下发到 AP。以上的管理功能都通过消息模块下发到相应的网络设备, 同时网络设备反馈的状态信息也将通过事件模块报告到管理

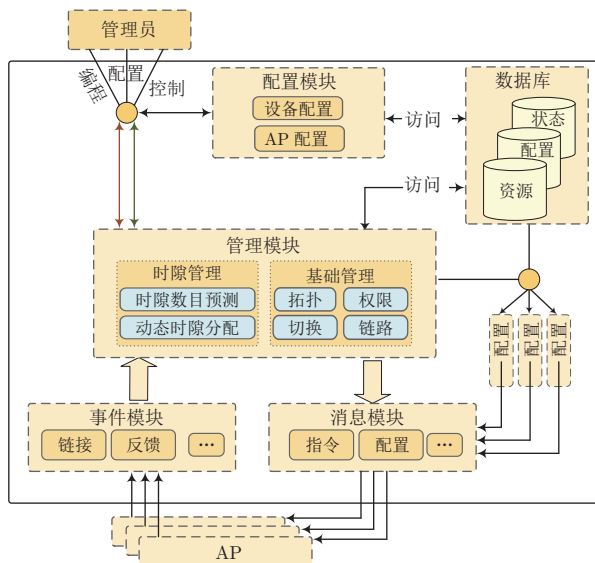


图 5 控制器原理图

Fig.5 The schematic of controller

模块。

3) 网络可编程性

控制器为管理员和上层应用程序提供一组可编程接口。管理员可以通过可编程接口修改时隙分配算法或路由算法。例如如图 5 中, 管理员可以通过上层应用直接更换时隙预测模型或者动态时隙分配算法。同时控制器提供了一系列事件和参数, 应用程序可以通过注册进行获取。当响应事件发生时, 控制器将触发对应消息, 并通过回调函数上报给应用程序。

3.3 AP 实现

本文通过修改现有 Atheros 无线网卡驱动, 在原网卡驱动上添加了消息模块、管理模块、时隙模块、数据缓存模块和定时器模块, 如图 6 所示。管理模块和消息模块部署在用户空间。其中, 管理模块用于验证新用户请求、管理时隙信息、收集和上报用户状态信息; 消息模块用于处理控制器下发的命令或反馈用户信息。时隙模块、定时器模块和发送模块部署在内核空间。其中, 时隙模块用于记录和广播时隙表; 定时器模块是以时隙长度为中断间隔提供中断服务; 数据缓存模块用于存储和控制发送的数据帧。AP 主要完成如下两个功能:

1) 时隙表更新

控制器下发的新时隙表信息通过消息模块进行

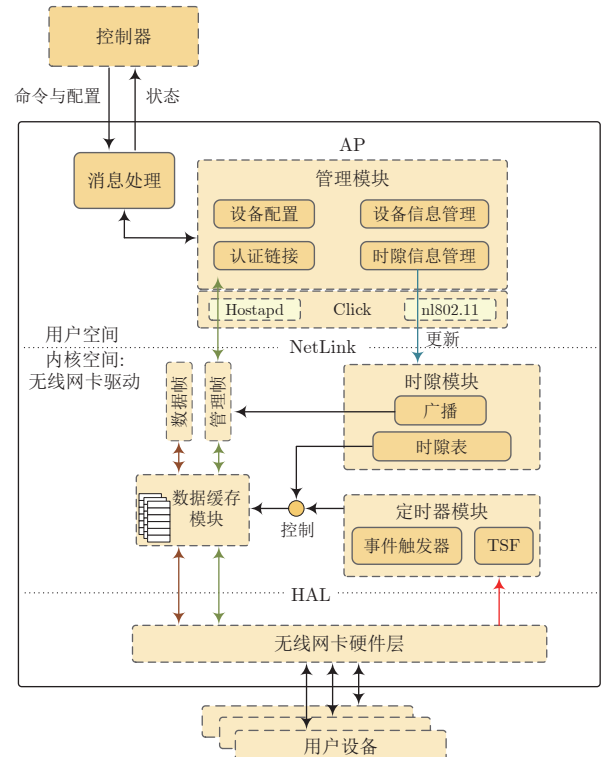


图 6 AP 原理图

Fig.6 The schematic of AP

提取后, 通过 AP 用户空间中的管理模块进行处理. 首先管理模块检查时隙长度、超帧长度等基本参数是否需要更改, 然后通过 NetLink 套接字将新时隙表下发至内核空间中时隙模块, 最后时隙模块将时隙表以二维数组的形式写入到 Beacon 帧的可选字段并进行广播发送.

2) 发送调度

由于 AP 需要与多个用户设备进行交互, AP 的数据缓存模块通过“数组+链表”的方式进行存储和控制用户发送数据. 数组以设备 ID 作为索引存储对应链表的首地址. AP 根据每个数据帧对应的描述结构体 `ath_buf` 中的设备 ID, 将数据帧添加到相应的链表后. 当定时器模块的中断函数 `ath_isr` 触发发送事件后, 函数 `DTS_tasklet` 根据时隙表调度对应设备的数据帧到硬件数据队列中, 从而进行数据传输.

3.4 用户设备实现

本文对用户设备的网卡驱动程序进行简单的修改, 添加了反馈、队列和定时器 3 个模块, 如图 7 所示. 其中反馈模块用于构造反馈管理帧和存储时隙表; 队列模块用于存储和控制终端应用的传输数据; 定时器模块提供以时隙长度为时间间隔的中断服务. 主要功能如下:

1) 数据传输

与 AP 不同, 用户设备需要交互的对象单一, 因此采用简单的队列进行存储和控制数据帧. 在 `ath9k` 驱动程序层中, 将终端应用程序产生的数据

帧存储在队列模块 `DTS_fifo` 软队列中. 本文设计的 `DTS_fifo` 是采用 Linux 环形缓冲区的数据结构 `kfifo`. 当定时器模块触发了发送事件后, `DTS_fifo` 能快速将数据帧通过底层发送函数 `ath_tx_txqaddbuf` 进行数据传输.

2) 状态信息反馈

用户设备需要定期将当前 `DTS_fifo` 队列状态反馈到控制器, 因此本文通过管理模块获取用户设备的当前 `DTS_fifo` 长度, 并将其封装进管理帧 `INFO_FEEDBACK` 中. 当定时器模块触发了反馈事件, 管理模块将确定当前时隙是否为 CSMA 阶段. 若是, 则通过底层发送函数 `ath_tx_txqaddbuf` 将 `INFO_FEEDBACK` 放入硬件队列中进行传输.

4 实验测试

在本节, 首先通过仿真实验, 对动态 TDMA 时隙分配算法的性能进行对比分析. 然后将 DTS 系统进行实现, 并将其与 RT-WiFi 部署于相同实际网络环境, 进行性能测试.

4.1 算法性能仿真对比

本文采用 MATLAB 分别对 DTS 时隙分配算法、RT-WiFi^[17]、Hmac^[20] 和自适应 TDMA-CSMA^[21] (ADWiFi) 进行对比测试. 仿真环境中, 采用超帧长度为 8 ms, 时隙长度为 250 μ s, 因此一个超帧中有 32 个时隙. 周期性数据设备将每秒发包 125 个, 每个数据帧长度为 250 字节; 多媒体设备将产生 1000 字节的数据帧, 每秒平均发包 375 个.

图 8 所示为在设备数量不断增加时, 4 种算法在 3 种数据类型下的平均时延结果分析图. 从图 8(a) 可以发现, DTS 和 RT-WiFi 在传输周期性数据时, 两者时延较低, 远小于 Hmac 和 ADWiFi, 且 DTS 的时延更加稳定, 而 ADWiFi 的时延性能最差. 这是由于 DTS、RT-WiFi 和 Hmac 都为每个周期性数据设备分配对应的 TDMA 时隙, 保障周期性数据的时延有界, 而 ADWiFi 使用 CSMA 时隙传输周期性数据, 无法保障时延的有界. 从图 8(b) 可以发现, 随着多媒体设备数量的增加, DTS 的时延稳定在 1.2 ~ 1.4 ms, ADWiFi 时延有一定增长 (1.2 ~ 2 ms), 而 RT-WiFi 和 Hmac 时延性能衰减过大 (1.2 ~ 3 ms). 在图 8(c) 中, 在混合数据时延结果上可以发现类似的现象. 得益于 DTS 和 ADWiFi 为多媒体设备分配足够的 TDMA 时隙, 而 RT-WiFi 是固定分配 TDMA 时隙, 无法适应数据需求, 因此性能较差, 而 Hmac 将多媒体数据放在 CSMA 时隙传输, 时延无法得

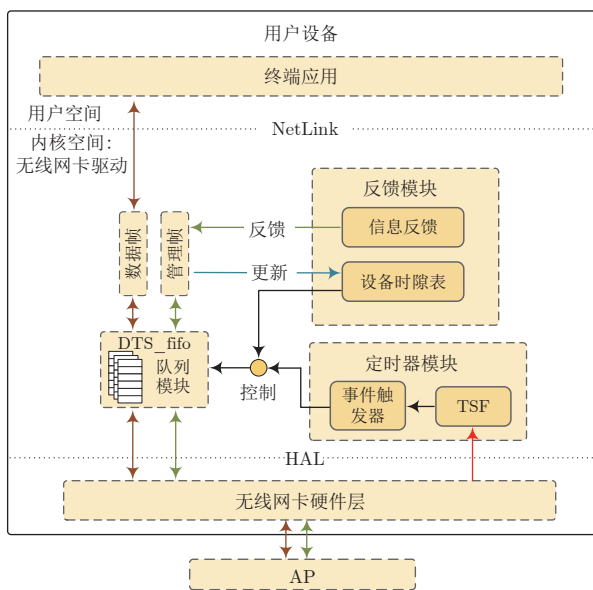


图 7 用户设备原理图

Fig.7 The schematic of device

到保障. 进一步分析发现, DTS 的时隙分配算法通过预测多媒体数据的时隙数量, 可动态分配连续的时隙, 所以其多媒体数据传输时延性能更好.

图 9 所示为在设备数量不断增加时, 4 种算法在 3 种数据类型下的吞吐量结果分析图. 从图 9(a) 可以发现, DTS 和 RT-WiFi 在传输周期性数据时吞吐量没有损失, ADWiFi 损失较小, 而 ADWiFi 吞吐量降低较明显. 这是由于 DTS、RT-WiFi 和 Hmac 都为每个周期性数据设备分配对应的 TDMA 时隙, 保障周期性数据设备的吞吐量, 而 ADWiFi 使用 CSMA 时隙传输周期性数据, 无法保障稳定吞吐量. 从图 9(b) 可以发现, 随着多媒体设备数量增多时, DTS 和 ADWiFi 吞吐量能随用户设备的带宽需求增大而变化, 而 RT-WiFi 和 Hmac 吞吐量衰减较大. 在图 9(c) 中, 在混合数据吞吐量也可以发现类似的现象. 这是由于 DTS 和 ADWiFi 为多媒体业务分配足够的 TDMA 时隙, 而 RT-WiFi 是固定分配 TDMA 时隙, 很难适应数据量变化, 因此无法提供动态的带宽服务, 而 Hmac 将多媒体设备放在 CSMA 时隙传输, 容易产生数据传输碰撞现象, 导致吞吐量下降. DTS 通过设备需求时隙反

馈能进一步提升时隙的利用率, 从而提高网络的吞吐量.

4.2 真实网络场景系统部署

本文将 DTS 和 RT-WiFi^[17] 部署于如图 10 所示的网络环境进行对比测试, 设备硬件参数如表 1 所示. 通过周期性数据和多媒体视频数据来模拟工厂数据流, 其中多媒体视频数据是通过电脑摄像头产生, 周期性数据是通过无线路由器在 STA 模式下运行 UDP 灌包程序产生. 通过大量测试得出将 T_{sp} 设置为 8 ms 和 T_s 设置为 250 μ s 时, 能使得设备在 100 ~ 200 μ s 内完成网络同步, 同时允许最多 20 个设备进行接入, 提供最高 44 Mbps 的吞吐量、22.2 μ s 的时延抖动和 0.64% 的丢包率的传输质量, 这足以满足工业设备的传输要求.

- 1) 每组数据是由在特定的设备数目下的网络总吞吐量和每个用户设备的吞吐量与时延组成的;
- 2) 每组数据测试 5 次, 每次运行 30 min, 取平均值作为最终结果;
- 3) 周期性数据设备和多媒体设备产生的数据特征如表 2 所示, 其中设备数目变化规律是周期性

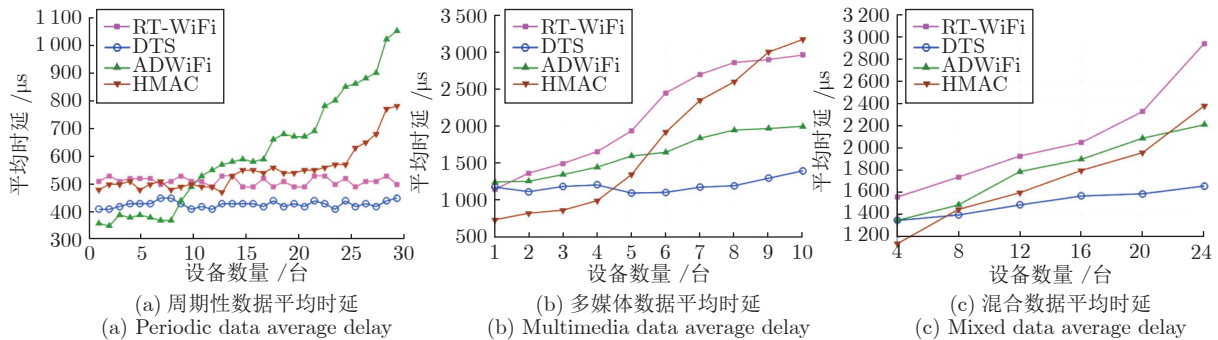


图 8 不同类型数据的平均时延

Fig. 8 The average delay of different types of data

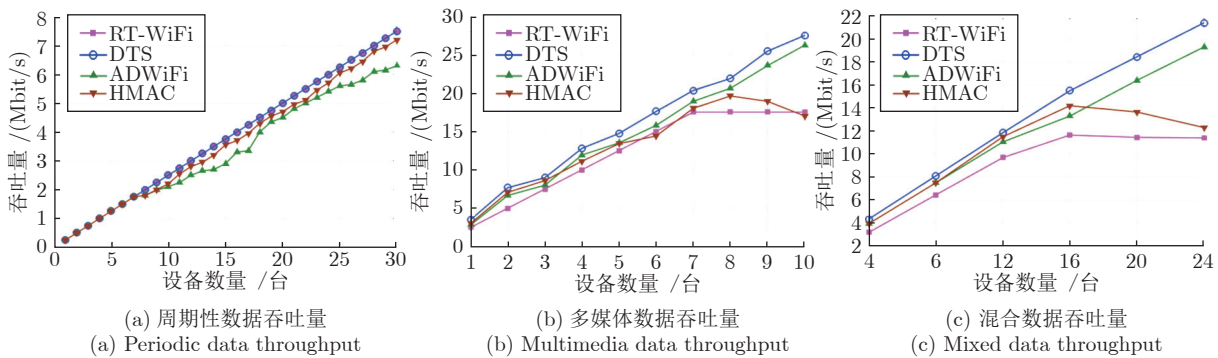


图 9 不同类型数据的吞吐量

Fig. 9 The throughput of different types of data

表 1 测试硬件设备以及参数
Table 1 Testing hardware devices and parameters

设备名称	设备型号	数目	CPU	内存	网卡	操作系统
控制器	台式机	1	I5-7300 四核	16 GB	AR9580	Windows7
AP	WNDR4300	1	QCA9553	128 MB	AR9580	OpenWRT
多媒体设备	台式机	4	E7200 双核	2 GB	AR9280	Ubuntu14
周期性数据设备	WNDR3800	12	AR7161	128 MB	AR9220	OpenWRT

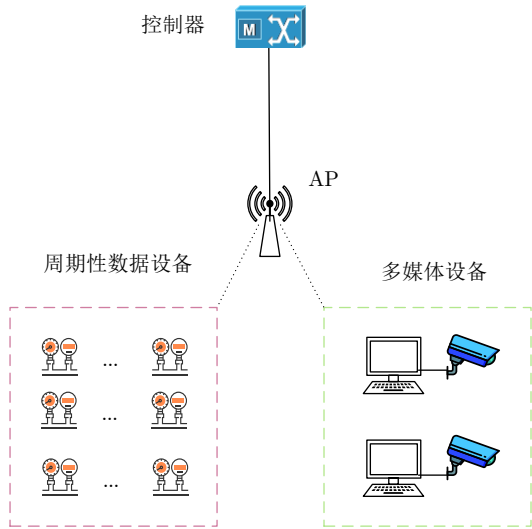


图 10 测试环境逻辑示意图
Fig.10 Test environment logical topology

数据设备数量增加 3 个, 多媒体设备数量增加 1 个, 移动终端设备增加 1 个 (提供移动接入功能);

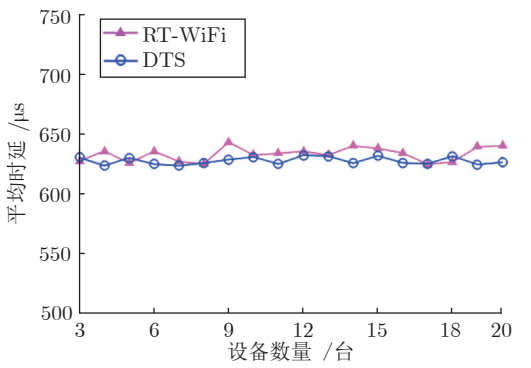
表 2 数据帧参数设置
Table 2 Data frame parameter

数据类型	帧长 (Byte)	平均发包数目 (个/s)
周期性数据	260	125
多媒体数据	860 ~ 1060	250
移动端数据	550	Random (250)

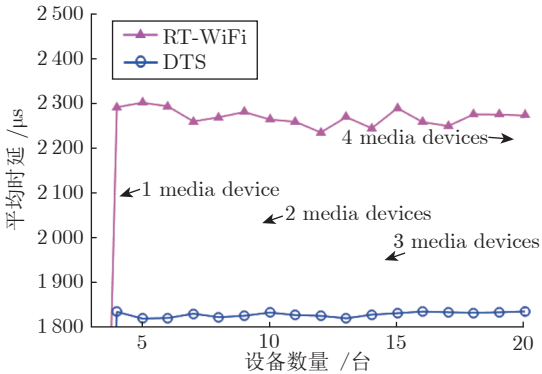
4) DTS 和 RT-WiFi 都采用 IEEE 802.11a 协议的 5GHz 频段的 157 信道进行测试.

4.3 真实网络测试结果分析

图 11 所示为在设备总数不断增加的情况下, DTS 和 RT-WiFi 在两种数据类型下的平均时延结果分析图. 从图 11(a) 可以看出, DTS 和 RT-WiFi 在传输周期性数据具有类似的时延性能. 从图 11(b) 可以发现, 随着多媒体设备数量增加, DTS 的时延比 RT-WiFi 更加稳定, DTS 的时延约为 1.84 ms, RT-WiFi 的时延在 2.3 ms 内, DTS 相对于 RT-WiFi 平均降低了 19% 的延迟时间. 这得益于 DTS 的时



(a) 周期性数据平均时延
(a) Periodic data average delay



(b) 多媒体数据平均时延
(b) Multimedia data average delay

图 11 真实网络中不同类型数据的平均时延
Fig.11 The average delay of different types of data in real network

隙分配算法通过预测多媒体数据的时隙数量, 进而动态分配连续的时隙, 所以减少了多媒体数据的传输时延.

图 12 给出了在不同设备数量下 DTS 和 RT-WiFi 的网络吞吐量性能对比. 从图 12(a) 可以看出, DTS 的总吞吐量比 RT-WiFi 平均提高了 22%, 这是由于 DTS 根据时隙分配算法来动态分配空闲时隙, 从而提高了吞吐量. 但随着所接入设备数量的不断增加, AP 的信道资源也将耗尽, RT-WiFi 的吞吐量接近于 DTS 的吞吐量. 图 12(b) 给出了在设备总数不断增加的情况下, DTS 和 RT-WiFi 传输周期性数据的吞吐量. 可见, DTS 和 RT-WiFi

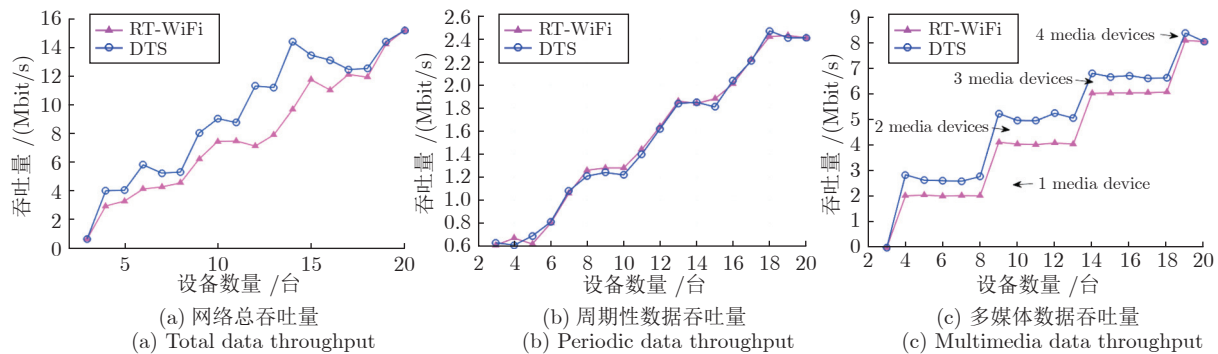


图 12 真实网络中不同类型数据的吞吐量

Fig. 12 The throughput of different types of data in real network

的性能基本相同, 这是因为周期性数据帧只有 260 字节且传输频率很低, 所以 RT-WiFi 和 DTS 的固定时隙分配均能满足需求. 图 12(c) 给出了 DTS 和 RT-WiFi 传输多媒体数据的吞吐量, DTS 性能比 RT-WiFi 提升了 20%. 由于多媒体视频数据帧较大 (约 9 ~ 65 KB, 需要 IP 层分片传输), 并且发送频率高, DTS 通过时隙预测为多媒体设备动态调整时隙数目, 从而提高吞吐量.

综上所述, DTS 确保了工厂周期性工控数据的可靠传输, 同时能根据用户设备的传输需求动态调整信道资源, 从而有效提升无线网络传输性能.

5 结束语

针对工业无线网络中时延不确定性和信道资源分配不合理等问题, 本文设计了一种基于 SDN 的动态 TDMA 接入系统. 通过建立线性回归用户流量模型快速计算用户数据需求, 在 CSMA 阶段实现控制器与用户设备之间的时隙协商, TDMA 阶段为每个用户设备分配足够的时隙, 在保障周期性数据的时延有界的同时, 为多媒体数据提供更高的传输性能. 首先通过在仿真实验场景对比现有方法, 验证了动态 TDMA 时隙分配算法的有效性; 然后, 将 DTS 系统部署在实际网络环境进行性能对比测试; 最后仿真和测试的结果均证明了本文所提出的动态 TDMA 机制相对于现有的方法, 在保障时延有界的同时能有效地提升传输性能. 目前, 本文所实现的系统需要对用户设备代码进行修改, 以实现用户设备的 TDMA 接入, 为了提升系统的部署便利性, 未来将研发通用性更强的 TDMA 插件.

References

- Vitturi S, Zunino C, Sauter T. Industrial communication systems and their future challenges: Next-generation ethernet, IIoT, and 5G. *Proceedings of the IEEE*, 2019, **107**(6): 944-961
- Wang Fei-Yue, Zhang Jun, Zhang Jun, Wang Xiao. Industrial internet of minds: Concept, technology and application. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(9): 1606-1617
- Boyes H, Hallaq B, Cunningham J, Watson T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 2018, **101**: 1-12
- Bello L L, Steiner W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems. *Proceedings of the IEEE*, 2019, **107**(6): 1094-1120
- Jin X, Xia C Q, Guan N, Xu C, Li D, Yin Y, Zeng P. Real-time scheduling of massive data in time sensitive networks with a limited number of schedule entries. *IEEE Access*, 2020, **8**: 6751-6767
- Huang Tao, Wang Shuo, Huang Yu-Dong, Zheng Yao, Liu Ji-ang, Liu Yun-Jie. Survey of the deterministic network. *Journal on Communications*, 2019, **40**(6): 160-176
- (黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 郑尧, 刘江, 刘韵洁. 确定性网络研究综述. *通信学报*, 2019, **40**(6): 160-176)
- Liu Y K, Kashef M, Lee K B, Benmohamed L, Candell R. Wireless network design for emerging IIoT applications: Reference framework and use cases. *Proceedings of the IEEE*, 2019, **107**(6): 1166-1192
- Yousefi H H, Kaviani Y S, Mahmoudi A. A Markov model for investigating the impact of IEEE802.15.4 MAC layer parameters and number of clusters on the performance of wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2019, **25**(7): 4415-4430
- Papadopoulos G Z, Matsui T, Thubert P, Texier G, Watteyne T, Montavont N. Leapfrog collaboration: Toward determinism and predictability in industrial-IIoT applications. In: *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France: IEEE, 2017. 1-6
- Koutsiamanis R A, Papadopoulos G Z, Fafoutis X, Julian M, Fiore D, Thubert P, Montavont N. From best effort to deterministic packet delivery for wireless industrial IIoT networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(10): 4468-4480
- Prinz F, Schoeffler M, Lechler A, Verl A W. Dynamic real-time orchestration of IIoT components based on time-sensitive networking. *Procedia CIRP*, 2018, **72**: 910-915
- Messenger J L. Time-sensitive networking: An introduction. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, **2**(2): 29-33
- Nasrallah A, Thyagaturu A S, Alharbi Z, Wang C X, Shao X, Reisslein M, ElBakoury H. Ultra-low latency networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2018, **21**(1): 88-145
- Xia N, Chen H H, Yang C S. Radio resource management in machine-to-machine communications — A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2017, **20**(1): 791-828
- Gene E, Del Carpio L F. Wi-Fi QoS enhancements for Down-

link Operations in industrial automation using TSN. In: Proceedings of the 15th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), Sundsvall, Sweden: IEEE, 2019.1-6

- 16 Cena G, Scanzio S, Valenzano A. Improving effectiveness of seamless redundancy in real industrial Wi-Fi networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **14**(5): 2095-2107
- 17 Wei Y H, Leng Q, Han S, Mok A K, Zhang W, Tomizuka M. RT-WiFi: Real-time high-speed communication protocol for wireless cyber-physical control applications. In: Proceedings of the 34th IEEE Real-Time Systems Symposium, Vancouver, Canada: IEEE, 2013. 140-149
- 18 Cheng Y J, Yang D, Zhou H C. Det-WiFi: A multihop TDMA MAC implementation for industrial deterministic applications based on commodity 802.11 hardware. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, **2017**: 1-10
- 19 Amodu O A, Othman M. A survey of hybrid MAC protocols for machine-to-machine communications. *Telecommunication Systems*, 2018, **69**(1): 141-165
- 20 Shahin N, Ali R, Kim Y T. Hybrid slotted-CSMA/CA-TDMA for efficient massive registration of IOT devices. *IEEE Access*, 2018, **6**: 18366-18382
- 21 Shoaie A D, Derakhshani M, Parsaeefard S, LeNgoc T. Learning-based hybrid TDMA-CSMA MAC protocol for virtualized 802.11 WLANs. In: Proceedings of the 26th IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Hong Kong, China: IEEE, 2015. 1861-1866
- 22 Cruces C, Torrego R, Arriola A, Val I. Deterministic hybrid architecture with time sensitive network and wireless capabilities. In: Proceedings of the 23rd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, Italy, IEEE, 2018. 1119-1122
- 23 Adame T, Carrascosa M, Bellalta B. Time-sensitive networking in IEEE 802.11 be: On the way to low-latency WiFi 7. *Computer Science*, 2019: 1912
- 24 Yu M L, Rexford J, Freedman M J, Wang J. Scalable flow-based networking with difane. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2011, **41**(4): 351-362
- 25 Xu C, Jin W, Wang X H, Zhao G F, Yu S. MC-VAP: A multi-connection virtual access point for high performance software-defined wireless networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2018, **122**: 88-98
- 26 Sood K, Yu S, Xiang Y. Software-defined wireless networking opportunities and challenges for internet-of-things: A review. *IEEE Internet of Things Journal*, 2015, **3**(4): 453-463
- 27 McKeown N, Anderson T, Balakrishnan H, Parulkar G, Peterson L, Rexford J. Openflow: Enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, **38**(2): 69-74



徐 川 重庆邮电大学通信与信息工程学院教授. 主要研究方向为工业互联网, 软件定义网络, 网络测量, 天地一体化网络. 本文通信作者.

E-mail: xuchuan@cqupt.edu.cn

(XU Chuan Professor at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers in-

dustrial internet, software defined network, network measurement, and the space-earth integrated network. Corresponding author of this paper.)



曾日辉 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为工业互联网, 软件定义网络, 时间敏感网络.

E-mail: zrh_113113@126.com

(ZENG Ri-Hui Master student at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers industrial internet, software defined network, and time sensitive network.)



邢 媛 重庆邮电大学通信与信息工程学院博士研究生. 主要研究方向为工业物联网, 时间敏感网络.

E-mail: xingystudy@foxmail.com

(XING Yuan Ph.D. candidate at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her research interest covers industrial internet of things and time sensitive network.)



邓炳光 重庆邮电大学通信与信息工程学院副教授. 主要研究方向为通信网与测试技术, 仪器科学与技术.

E-mail: dengbg@cqupt.edu.cn

(DENG Bing-Guang Associate professor at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers communication network and testing technology, and instrument science.)



赵国锋 重庆邮电大学通信与信息工程学院教授. 主要研究方向为工业互联网, 天地一体化网络, 网络测量.

E-mail: zhaofg@cqupt.edu.cn

(ZHAO Guo-Feng Professor at the School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers industrial internet, the space-earth integrated network, and network measurement.)