

基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统有序可靠重传方法

郑萌^{1,2,3}, 冯彬^{1,2,3,4}, 赵永恒^{1,2,3,4}, 梁炜^{1,2,3}

1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;
4. 中国科学院大学, 北京 100049

基金项目: 国家自然科学基金项目(62022088), 中国科学院对外合作重点项目(173321KYSB20200002), 沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC210482, RC210314)

通信作者: 郑萌, zhengmeng_6@sia.cn 收稿/录用/修回: 2023-05-11/2023-07-13/2023-08-30

摘要

近年来,工业无线网络在自动引导车(automated guided vehicle, AGV)系统的应用愈来愈广泛。目前的AGV通信主要依赖于WiFi技术,由于其采用竞争式接入机制,无法满足恶劣工业环境下的有序和可靠传输要求。因此,本文提出一种基于WIA-FA的无线AGV系统有序可靠重传方法。首先,给出基于WIA-FA的AGV通信系统架构和数据传输过程,并设计一种新的超帧结构以满足数据传输的严格顺序性要求。进而,基于新超帧,设计一种基于有序调度的端到端重传策略(sequential scheduling based end-to-end retransmission, SSER),可实现上行数据的按需传输和下行数据的按序传输,并支持上行和下行数据时段长度的动态优化。仿真结果表明,在不同超帧长度、节点数量和信道条件等网络参数设置下,SSER在传输可靠性方面均优于现有工作。

关键词

工业无线网络
自动引导车
有序重传
可靠性
超帧

中图法分类号: TP18

文献标志码: A

Ordered and Reliable Retransmission Method for Wireless AGV Systems Based on WIA-FA

ZHENG Meng^{1,2,3}, FENG Bin^{1,2,3,4}, ZHAO Yongheng^{1,2,3,4}, LIANG Wei^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Recently, industrial wireless networks have been increasingly adopted in automated guided vehicle (AGV) applications. Current AGV communications primarily depend on Wi-Fi technology that employs contention-based access methods and thus cannot meet the requirement of ordered and reliable wireless transmission in harsh industrial environments. To this end, we investigate an ordered and reliable retransmission method for wireless AGV systems based on WIA-FA. First, the communication system architecture and data transmission process of WIA-FA-based AGV systems are presented. A new superframe structure is designed to guarantee strictly ordered transmission.

Keywords

industrial wireless network;
automated guided vehicle;
ordered retransmission;
reliability;
superframe

Then, on the basis of the new superframe, a sequential scheduling-based end-to-end retransmission (SSER) strategy is proposed. SSER realizes on-demand transmission for uplink data and sequential transmission for downlink data and supports the dynamic optimization of durations for uplink and downlink data phases. Simulation results show that SSER outperforms existing works in terms of transmission reliability under different network parameter settings, such as superframe length, number of nodes, and channel conditions.

0 引言

自动引导车(automated guided vehicle, AGV)作为智能制造的核心自动化装备,是构建低成本、智能化的工业自动化物料运输系统的基础。无线网络作为 AGV 系统组建、运行的重要组成部分,负责 AGV 与网关间的信息传输。目前,基于无线网络的 AGV 系统已经被柔性制造、智慧物流等行业广泛采用^[1-2]。随着应用规模的扩大,AGV 和网关间的通信数据量迅速增长,高效的数据传输方法对于保障 AGV 系统的有序、可靠运行具有重要意义^[3]。

现有的无线 AGV 通信系统主要采用 Wi-Fi、ZigBee 和 WIA-FA 等无线网络技术。由于 Wi-Fi 和 ZigBee 采用基于 CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoid) 的竞争性接入机制,在网络负载较大时,节点间的传输冲突频繁发生,导致网络可靠性急剧下降,无法满足工业应用的高可靠传输要求^[4-5]。WIA-FA 是一种面向工厂自动化的专有无线网络技术标准,采用基于 TDMA (time division multiple access) 的确定性时隙通信方式,可避免节点竞争接入所造成的高丢包率^[6]。因此,基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统更适合工业自动化应用。

传输调度作为 WIA-FA 网络的核心问题,对于保障网络的高可靠传输起到至关重要的作用^[7]。本文研究基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统有序可靠传输方法。在本文的 AGV 系统中,网关负责实时收集 AGV 运行状态,并在线对 AGV 系统进行集中调度,最后再将控制数据下发给 AGV。AGV 的状态信息收集和控制数据下发均通过 WIA-FA 网络实现。为避免 AGV 的拥堵和碰撞,控制数据要严格按给定顺序到达目的 AGV,因此传输调度要满足顺序约束。传统的 AGV 可靠传输调度问题不考虑有序传输约束,且只针对上行或下行无线传输情形,对于基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统端到端有序可靠传输方法尚未见报道。

基于上述讨论,本文的主要贡献有:

1) 给出了基于 WIA-FA 的 AGV 通信系统架构

和数据传输过程,并设计了一种全新的超帧结构以满足数据传输的严格顺序性要求。

2) 在新超帧的基础上,设计了基于有序调度的端到端重传策略(sequential scheduling based end-to-end retransmission, SSER),可实现上行数据的按需传输和下行数据的按序传输,并支持上行和下行数据时段长度的动态优化。

3) 仿真结果表明,在不同超帧长度、节点数量和信道条件等网络参数设置下,SSER 在传输可靠性方面均优于现有工作。

1 研究现状

本节从无线 AGV 系统和工业无线传感器网络(industrial wireless sensor networks, IWSNs)的端到端可靠传输调度两个方面回顾当前研究现状。

1.1 无线 AGV 系统

根据接入机制的不同,当前有关无线 AGV 系统的传输研究主要分为基于 CSMA/CA 竞争性机制的研究和基于 TDMA 调度机制的研究。

在基于 CSMA/CA 的无线 AGV 系统研究方面,文[8]设计了一种结合使用射频识别和 ZigBee 技术的 AGV 系统,该系统主要使用 ZigBee 网络来导航 AGV,辅助使用射频标签定位 AGV。文[9]针对无线信道和媒体访问控制所导致的随机通信时延问题,设计了一种基于卡尔曼滤波的网络时延估计器,该估计器指导无线通信系统在精确的时间范围内发送和接收信息。文[10]设计了一种分析 AGV 通信系统下行和上行无线链路延迟需求的方法。文[11]设计了一种提前确定最佳质量接入点(access point, AP)的方法,即通过使用一组位于 AP 和 AGV 通信位置附近的传感器来监测频谱使用情况,提前确定最佳质量的 AP。文[12]提出了一种分布式的控制系统以支持 AGV 间通信,增强了 AGV 的自主性和灵活性。文[13]基于 IEEE 802.15.4a 技术,设计了一种可实现大量 AGV 本地实时通信的网络协议。文[14]设计了一种在室内环境中定位 AGV 的非光学方法,即利用从 AGV 车载 Wi-Fi 无

线网卡中提取出的信道状态信息计算出 AGV 的当前位置。

在基于 TDMA 调度的无线 AGV 系统研究方面, 文[15]针对 AGV 控制信息的高可靠和低延迟传输需求, 提出了一种同时具备基于 CSMA 的时隙预留和动态 TDMA 时隙调度的结构化 MAC 协议。文[2]全面综述了 WIA-FA 技术, 重点介绍了 WIA-FA 的默认超帧结构和重传方法, 并给出了基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统的多个典型应用案例。文[16]研究了 WIA-FA 网络的重传时隙分配问题, 提出了一种高效的按需自动重传方法以改进 WIA-FA 定义的重传方法。进一步, 针对按需自动重传方法^[16]信标开销大的问题, 文[17]提出了一种基于灵活模式选择的时隙调度策略, 结合了循环重传和按需重传的优点, 提高了通信资源的利用效率。文[18]首次设计了一种基于 WIA-FA 技术的集中式 AGV 通信系统, 采用 TDMA 接入机制, 满足了大规模 AGV 网络对实时性和可靠性的严苛要求。

综上, 基于 CSMA/CA 的无线 AGV 通信系统由于难以保证数据传输的可靠性, 需要采用各种方法^[8-14]以削弱节点间传输冲突带来的丢包影响。基于 TDMA 调度机制的无线通信技术, 如 WIA-FA^[16-18], 从根本上规避了节点竞争接入问题。因而, 基于 TDMA 调度机制的无线 AGV 通信系统已成为 AGV 研究的重要发展方向。

1.2 IWSNs 的端到端可靠传输调度

数据包传输的可靠性一直是 IWSNs 传输调度的重要目标, 尤其是对于关键控制应用而言, IWSNs 必须保证数据传输的可靠性。文[19]设计了一种通用的 IWSNs 启发式传输调度方法, 可以保障用户所需的端到端传输可靠性。文[20]针对基于 TDMA 机制的多跳 IWSNs, 提出了一种基于分段时隙分配的全新调度方法, 优化了共享重传时隙的利用效率。文[21]为 IWSNs 的单径路由和多径路由设计了专用调度和共享调度两种方法, 在满足时延要求基础上, 最大化端到端数据包传输的可靠性。文[22]为 IWSNs 设计了一种面向数据流可靠性和实时性的传输调度方法, 该方法为每条链路都设置了重传时隙以实现所需的传输可靠性。

综上, 现有的 IWSNs 端到端传输调度方法通常假定数据包的传输是相互独立的, 因而难以满足 AGV 场景下顺序约束的要求。此外, 目前 AGV 场景下的顺序传输调度研究只关注上行或下行的单向可靠传输, 而本文首次研究基于 WIA-FA 的无线

AGV 系统端到端有序可靠传输方法, 具有重要的理论和应用价值。

2 基于 WIA-FA 的 AGV 通信系统

2.1 AGV 通信系统架构

如图 1 所示, 本文考虑一个面向工厂车间应用的 AGV 物料运输系统, 其通信系统基于 WIA-FA 网络^[18], 由 1 个网关 (gateway, GW)、1 个接入设备 (access device, AD) 以及 N 个现场设备 (field device, FD) 组成。GW 配有 3 个天线, 每个天线工作在不同的信道上, 每个 FD 装配 1 个天线, 可以在 3 个信道间切换。每个 AGV 都配备一个 FD, FD 负责将 AGV 的工作状态数据包 (working status data packet, WSDP) 发送给 AD, 同时接收由 AD 发送的控制数据包 (control data packet, CDP)。WSDP 包含 AGV 的当前速度、位置、电量等工作状态信息, CDP 包含 AGV 的导航指令。FD 和 AD 之间的数据传输采用 WIA-FA 网络。AD 负责将 FD 发送的 WSDP 转发给 GW, 同时向 FD 转发 GW 下发的 CDP。由于 AGV 活动范围仅限于工厂车间, 且运行速度通常为 $1 \text{ m/s} \sim 2.5 \text{ m/s}$ ^[2], 这种低移动性对于无线信道的影响可以忽略, 所以本文不考虑 AGV 移动性对无线通信的影响。AD 与 GW 之间的通信基于有线网络。GW 基于收集的 WSDP 计算导航指令, 实际应用中 GW 通常是与工作站相连, 其计算能力可以支持在线的 AGV 路径规划, 本文对具体的 AGV 路径规划方法不做讨论。

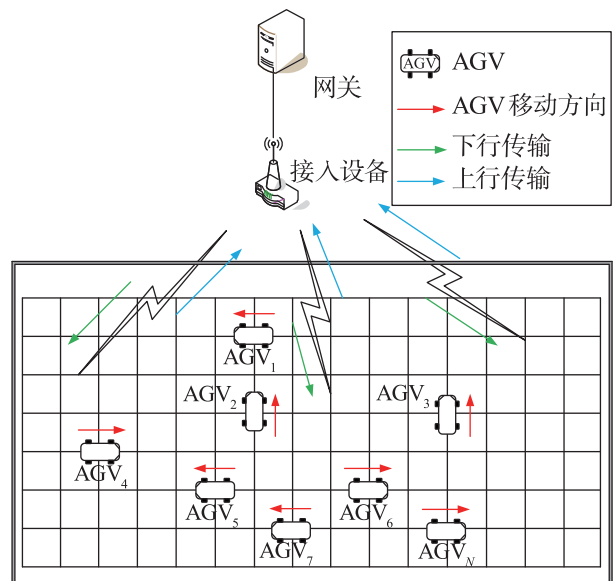


图 1 基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统

Fig.1 A wireless AGV system based on WIA-FA

本文考虑所有 FD 同步产生周期 WSDP 的情形, WSDP 的产生周期被称为循环周期。本文记从 FD 产生一个 WSDP 数据到在循环周期内成功接收到 CDP 为一次端到端传输。由于有线网络的可靠性远高于无线部分, 因此本文只关注 WIA-FA 网络的端到端(上行 FD→AD 和下行 AD→FD)可靠传输方法, 目的是最大化在每个循环周期内完成端到端传输的 FD 数量。

为便于理解, 表 1 列出了本文中重要符号定义。

表 1 符号定义
Tab.1 Symbol definition

符号	定义
GW	网关
AD	接入设备
FD	现场设备
N	现场设备个数
M	上行信道
WSDP	工作状态数据包
CDP	控制数据包
L	数据时段时隙总数目
A	上行数据时段时隙数目
B	下行数据时段时隙数目
p_1	上行传输丢包率
p_2	下行传输丢包率
R	传输可靠性
LR_{avg}	平均丢包率

2.2 CDP 传输的严格顺序性要求

在复杂的车间环境中, 数量众多的 AGV 若不能得到及时有效的导航指令, 很容易发生堵塞或碰撞事故。所以, 无线 AGV 系统必须能够同时保证 CDP 的合理性和顺序性。CDP 的合理性由 GW 的路径规划算法来保障。需要强调的是, WSDP 传输并不要求时间顺序性, GW 只需要在运行规划算法前收集到各个 AGV 的状态信息即可。所以, 本文只考虑 CDP 下行传输(AD→FD)的严格顺序性要求。

通过 WIA-FA 网络, AGV 每个循环周期都需要接收到来自 AD 的 CDP, 并依赖 CDP 内的控制指令执行前进、转向或停止等待等操作。为保证 AGV 的工作效率, 循环周期通常非常短, 若某一循环周期内的 CDP 发生丢包, 则未接收到 CDP 的 AGV 将停止等待, 直至接收到新的控制指令后继续动作。由于前方 AGV 的动作会严重影响后方 AGV 的动作, 所以 GW 发出的一系列 CDP_{*i*} 是严格有序的, 同时 AD 要保证 CDP_{*i*} 要以原顺序依次到达目标 AGV, 进而整个 AGV 系统才能按 GW 所规划的

那样有序运行。

为保障 CDP 传输的顺序性, 本文基于先入先出(first in first out, FIFO)原则, 在 AD 中设置了 FIFO 缓存器。如图 2 所示, CDP_{*1*} 是当前 FIFO 缓存器队列中的第一个 CDP。当 AD 成功收到目标 FD_{*i*} 的确认(ACKnowledgement, ACK)后, AD 将 FIFO 缓存器队列的第一个控制包 CDP_{*1*} 删除, 这样队列中下一个控制包 CDP_{*2*} 就成为了第一个 CDP。AD 将重复上述过程, 直到 FIFO 缓存器队列为空。

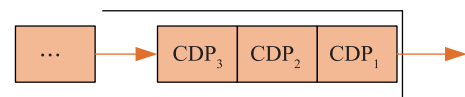


图 2 FIFO 缓存器

Fig.2 FIFO buffer

考虑到 CDP 传输的严格顺序性要求, AGV 通信系统完成一次端到端传输的工作过程为:

上行传输过程:

Step 1 FD_{*i*} 通过 WIA-FA 网络将 WSDP_{*i*} 发送给 AD。

Step 2 若存在传输失败的 WSDP_{*i*}, AD 生成否定确认(Negative ACKnowledgement, NACK)并将重传时隙分配结果向 FD_{*i*} 广播。传输失败的 FD_{*i*} 执行 Step 1, 重复上述过程直至所有 FD 均成功或者上行时段结束。

Step 3 AD 将所有收集到的 WSDP_{*i*} 通过有线网络转发给 GW。

下行传输过程:

Step 1 GW 基于成功接收到 WSDP_{*i*}, 生成一系列有序 CDP_{*i*}, 并通过有线通信发送给 AD。

Step 2 AD 将接收到的 CDP_{*i*} 放入缓存器队列中。

Step 3 基于 FIFO 原则, AD 通过 WIA-FA 网络将 CDP_{*i*} 发送给 FD_{*i*}。

Step 4 FD_{*i*} 在成功接收到 CDP_{*i*} 后, 向 AD 回复 ACK。AD 在成功接收到 ACK 后, 将 CDP_{*i*} 从缓存器队列中删除。重复步骤 Step 3 直至缓存队列为空或者下行时段结束。

2.3 超帧设计

WIA-FA 采用集中调度方式, 由 GW 生成并维护一个超帧, 超帧由一组固定数量的连续时隙所构成, 其长度设定为一个循环周期。如图 3 所示, 为支持第 2.2 节提出的端到端有序传输过程, 本文为基于 WIA-FA 的 AGV 通信系统设计了全新的超帧结构。新超帧包括以下时段:

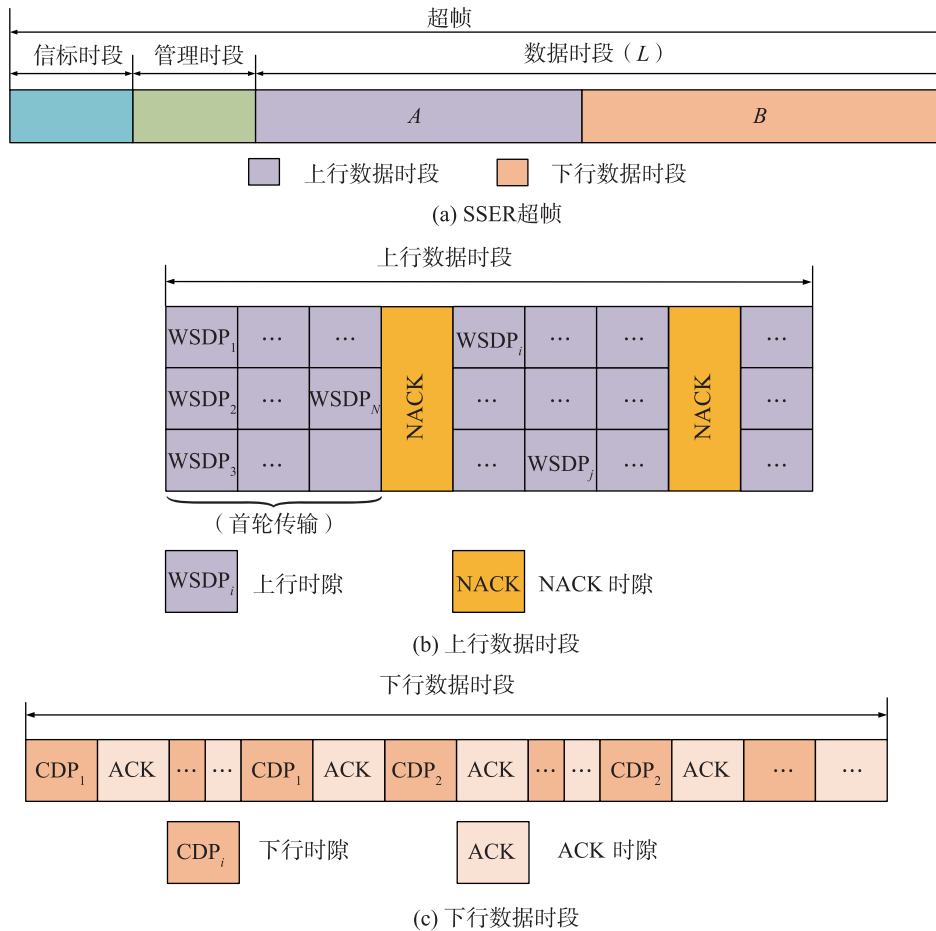


图3 面向无线 AGV 系统的 WIA-FA 超帧设计

Fig.3 The design of WIA-FA superframe for wireless AGV systems

1) 信标时段:

- 用于 AD 广播信标帧。

2) 管理时段:

- 上行共享时隙: FD 通过竞争接入机制向 AD 发送数据包, 包括加入请求数据包、离开响应数据包、时间同步请求数据包等。

- 下行管理时隙: AD 通过基于调度的机制向 FD 发送数据包, 包括加入响应数据包、离开请求数据包、时间同步响应数据包等。

3) 数据时段:

(1) 上行数据时段:

- 上行时隙: FD_i 向 AD 发送 $WSDP_i$
- NACK 时隙: AD 向 FD_i 发送 NACK。

(2) 下行数据时段:

- 下行时隙: AD 向 FD_i 发送 CDP_i
- ACK 时隙: FD_i 向 AD 发送 ACK。

不同于现有的 WIA-FA 超帧结构, 本文所提的超帧结构有两个创新点:

1) 将数据时段进一步分为上行数据时段和下

行数据时段。上行数据时段设计不考虑 WSDP 传输的顺序性, 以提升资源利用率为手段, 支持上行数据的按需重传; 下行数据时段设计考虑 CDP 传输的顺序性, 以 FIFO 队列管理为手段, 支持下行数据的按序传输。

2) 上行和下行数据时段的长度不是固定的, GW 可以根据超帧长度、AGV 节点数量、信道条件等网络参数来动态优化, 以达到不同场景下最高的数据传输可靠性。

3 问题模型

本节研究无线 AGV 系统的上行和下行传输调度问题模型。设数据时段的总时隙数为 L , 分配给上行和下行数据时段的时隙数目分别记为 A 和 B , 于是有 $L = A + B$ 。记上行 $FD \rightarrow AD$ 传输和下行 $AD \rightarrow FD$ 传输的丢包率分别为 p_1 和 p_2 。记上行数据时段内成功传输的 FD 个数为 N_1 , 下行数据时段内接收成功的 FD 个数记为 N_2 , 显然 $N_2 \leq N_1 \leq N$ 。本文的传输可靠性 R 定义为在每个循环周期(或长

度为 L 个时隙的数据时段)内完成端到端传输的 FD 比例, 即

$$R = \frac{N_2}{N} \quad (1)$$

问题描述(问题 Q): 已知三元组 $\langle N, L, (p_1, p_2) \rangle$, 设计一种时隙分配方法, 分配 A 个上行数据时段时隙和 B 个下行数据时段时隙给 FD 和 AD, 在满足 CDP 传输顺序性要求的基础上, 最大化传输可靠性 R 。

4 SSER 设计

记最大传输可靠性 R_{\max} 所对应的 A 值为 A_{opt} , 解决问题 Q 首先要确定 A_{opt} , 然后再解决 AD 和 FD 的时隙分配问题。为求解问题 Q , 本文设计了一种基于有序调度的端到端重传策略(Sequential Scheduling based End-to-end Retransmission, SSER)。

首先, 在确定 A_{opt} 方面, SSER 通过计算机仿真, 根据其描述的传输方法, 逐一测试可行的 A 。不同超帧长度、AGV 节点数量、信道条件等参数下仿真得出的 A_{opt} 将被纳入经验值表格。本文将在 4.3 节用一个仿真算例说明 A 值对 R 的影响。

其次, 在时隙分配方面, SSER 基于自动重传的原则, 按需地为 FD 和 AD 分配时隙, 具体算法设计在第 4.1 节和第 4.2 节中给出。

4.1 上行数据时段的时隙分配

根据图 1 所示的 AGV 通信系统架构, GW 只有成功收到来自 FD_i 的 $WSDP_i$ 后, 才能生成针对 FD_i 的 CDP_i , 因此在端到端传输中要尽可能先保障 $WSDP_i$ 的可靠传输。

$WSDP$ 的传输无顺序约束, 为扩展通信资源, GW 同时利用 3 个天线并行接收数据。如图 3(b) 所示, SSER 在首轮传输为 N 个 FD 都分配一个资源块(即时隙和信道的组合)。若首轮传输中所有 $WSDP$ 都传输成功, FD 保持监听状态, AD 进入空闲状态, 直到上行数据时段结束。若 $WSDP_i$ 存在丢包, AD 根据失败的 FD_i 生成 NACK, NACK 中包含了上一轮传输失败的 FD_i 的地址和接下来重传所用的资源块。AD 向 FD 广播 NACK。成功收到 NACK 的 FD_i 若发现 NACK 中包含其地址, 则该 FD_i 在 NACK 预留的重传资源块中重传 $WSDP_i$ 。SSER 将根据上行数据时段剩余时隙数量采取不同的重传策略:

若上行数据时段剩余资源块数量大于等于传输失败的 FD 数量, GW 将为传输失败的每个 FD 分配

一个资源块用于数据重传。

若上行数据时段剩余资源块数量小于传输失败的 FD 数量, GW 将剩余资源块随机分配给失败的 FD。

FD 的状态机如图 4 所示。在超帧的上行数据时段开始后, FD_i 在被分配到的首轮传输资源块向 AD 发送 $WSDP_i$ 。完成首轮传输后, FD_i 将监听信道, 只有当接收到 AD 发送的 NACK 时才进一步动作, 否则将一直处于监听状态。接收到 NACK 的 FD_i 立即解析 NACK, 若 NACK 中包含 FD_i 的地址, 则 FD_i 在分配的重传资源块中重传 $WSDP_i$; 若 NACK 中不包含 FD_i 的地址, 则说明 $WSDP_i$ 传输成功, FD_i 转入空闲状态。在上行数据时段终止时, 仍未被成功传输的 $WSDP$ 将会被丢弃, 视为丢包。

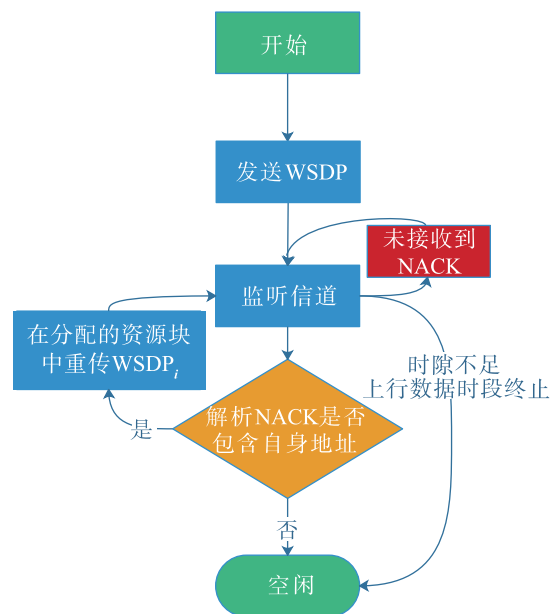


图 4 FDs 的状态机

Fig.4 State machines of FDs

AD 的状态机如图 5 所示。在超帧的上行数据时段开始后, AD 开始监听信道并接收 FD 的首轮传输。若首轮 $WSDP$ 存在丢包, AD 生成 NACK 并向 FD 广播, 随后继续监听无线信道, 接收失败的 FD 重传。若首轮 $WSDP$ 不存在丢包, AD 将转入空闲状态, 直到下行数据时段开始。

4.2 下行数据时段的时隙分配

由于 CDP 的传输需要满足顺序约束, 所以 GW 不能在同一个时隙向多个 AGV 发送 CDP。另外, 由于仅装配 1 个天线, 每个 AGV 不能在同一个时隙接收多个数据包, 所以下行数据的传输只能使用单信道。

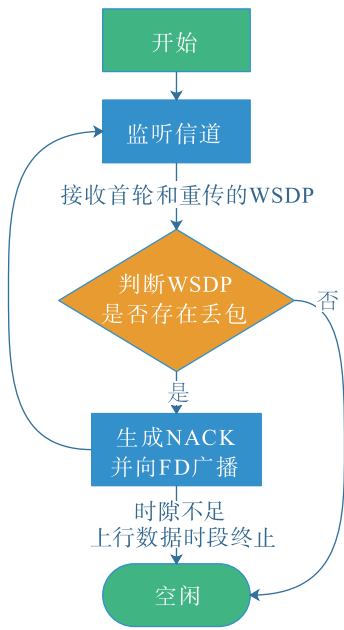


图5 AD的状态机

Fig.5 State machine of the AD

如图3(c)所示, SSER 采用按序方式为 AD 和 FD 分配下行时隙和 ACK 时隙, 并确保在成功传输 CDP_i 后再开始传输 CDP_{i+1} , 以满足 CDP_i 传输的顺序性要求。

下行传输($AD \rightarrow FD_i$)成功需要 CDP_i 和其对应的 ACK 全部传输成功。记传输 CDP_i 和其对应的 ACK 的两个时隙为一个时隙对。下行数据时段开始后, AD 按照缓存器队列中的顺序向 FD_i 发送 CDP_i , 成功接收到 CDP_i 的 FD_i 会立即在下一时隙向 AD 回复 ACK。只有 AD 成功接收到 ACK 后, 才传输 CDP_{i+1} , 否则将重传 CDP_i 。因此, 每个下行传输($AD \rightarrow FD_i$)的成功可能占用一个或多个时隙对。在下行数据时段终止时, 仍未成功传输的 CDP_i 将会被丢弃, 视为丢包。

4.3 说明性示例

本节利用计算机仿真算例说明 A 值对 R 的影响。仿真参数为数据时段长度 L 、FD 的数量 N 、信道条件 (p_1, p_2) 。具体的参数值设置如下: L 在 200, 250 和 300 中取值, $N=64$, $(p_1, p_2) = (0.3, 0.3)$ 。

根据 4.1 节和 4.2 节的描述, 对于一个包含 N 个 FD 的 AGV 通信系统来说, 上行传输至少需要 N/M 个时隙(首轮传输所需时隙), 下行传输至少需要 $2N$ 个时隙(每个 FD 分配到一个时隙对), 其中 $|x|$ 表示向上取整函数。因此为了保障各节点传输的公平性, A 的可行取值范围应在 $|N/M, L-2N|$ 区间内。根据本节的参数值, $L=$

200 时 A 的可行范围是 $[22, 72]$, $L=250$ 时 A 的可行范围是 $[22, 122]$, $L=300$ 时 A 的可行范围是 $[22, 172]$ 。

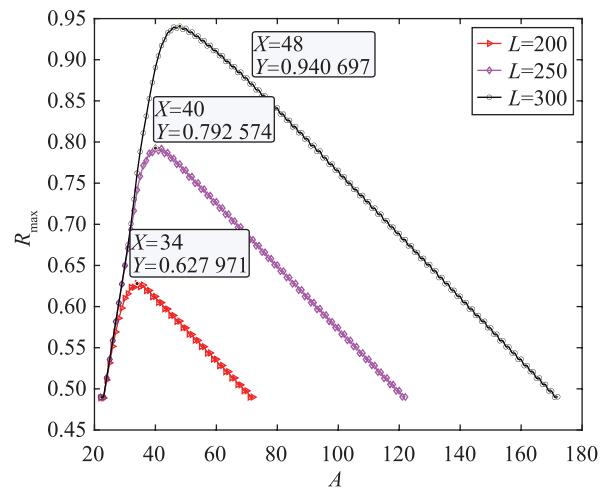
仿真结果如图 6 所示, 可以看出:

1) 随着 A 的变化, 不同 L 对应的所有曲线都呈现出先上升而后下降的趋势。

2) 在 A 较小时, 用于传输 WSDP 的时隙不足, WSDP 的丢包是影响 R 的主要因素; 随着 A 的增大, 分配给上行传输的时隙资源更加丰富, WSDP 的丢包降低, 进而提升了 R 。

3) 随着 A 的进一步增大, 通过增加时隙减少 WSDP 丢包的效果并不明显, 但是却导致了下行数据时段时隙的不足, 进而 CDP 丢包数上升。此时, CDP 丢包对 R 的影响起主导作用, R 逐渐下降。

4) 每条曲线都存在着最高点, 其纵坐标 Y 对应最大可靠性 R_{\max} , 其横坐标 X 对应 A_{opt} 。

图6 A 值对 R 的影响Fig.6 Impact of A on R

5 性能评估

5.1 仿真设置

本节使用 Matlab 仿真评估 SSER 的性能。仿真参数同 4.3 节, 其中 L 在 $[150, 500]$ 范围内变化, N 的取值为 16、32、48 和 64, 并设置以下 3 个场景代表不同的信道条件:

场景 1: $p_1 = p_2 = 0.1$, 此时信道条件良好。

场景 2: $p_1 = p_2 = 0.2$, 此时信道条件中等。

场景 3: $p_1 = p_2 = 0.3$, 此时信道条件恶劣。

在不同的仿真参数设置下, 对 WIA-FA 网络进行时长为 10^5 次超帧的仿真。根据式(1)可知, R 为一个超帧内传输成功的 FD 数目和所有 FD 数目

的比值。相应地，网络丢包率即为 $1 - R$ 。进而，对 10^5 个超帧的丢包率取平均值得到 LR_{avg} 。

5.2 对比传输调度策略

以下给出 3 种与 SSER 对比的传输调度策略。

BASIC：上下行时隙平均分配给 FD 和 AD。

DELTA：上下行时隙按照 DELTA 算法^[18] 分配。

ALPHA：如图 7 所示，ALPHA 上行传输按照优先级分配时隙，前 r 个 FD 将分配到 $t_0 + 1$ 个连续时隙，后 $N - r$ 个 FD 将分配到 t_0 个连续时隙，各 FD_i 在所分配到的时隙中重复传输 $WSDP_i$ 。其中 $r = (A \times M) \bmod N$ ， $t_0 = (A \times M) / N$ ， $|x|$ 表示向下取整函数。下行传输与 SSER 相同。

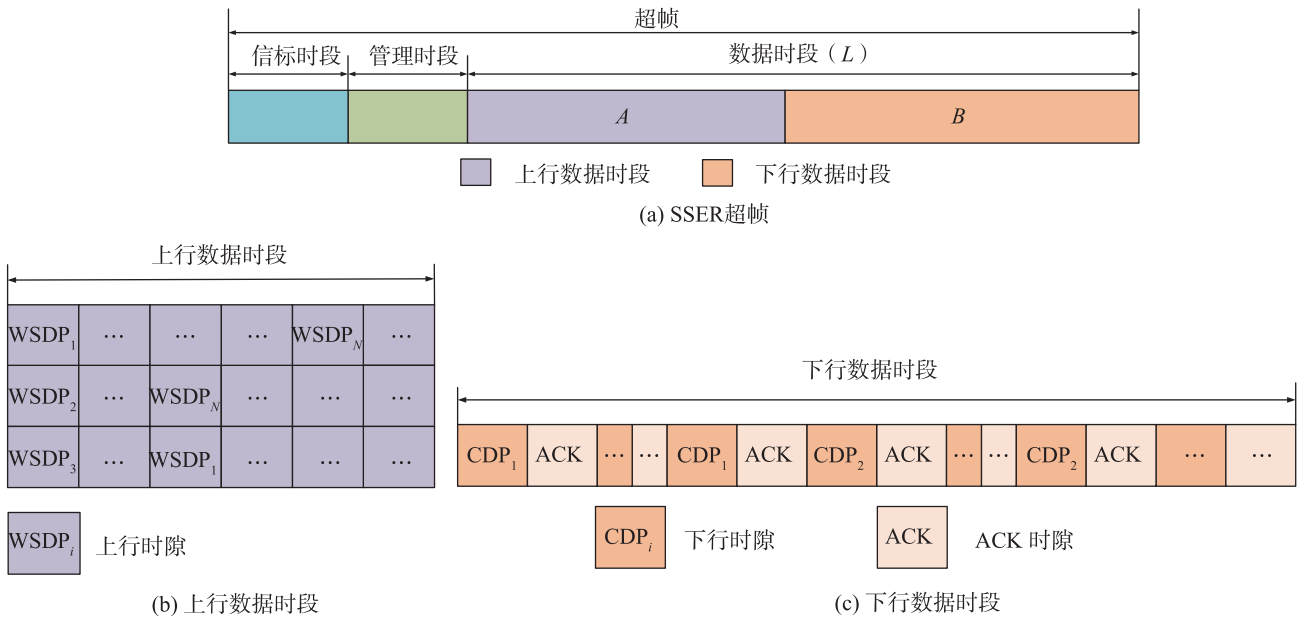


图 7 ALPHA 的超帧结构

Fig.7 Superframe architecture for ALPHA

5.3 性能比较

为了使比较更清晰，下文采用对数坐标系绘图。图 8、图 9 和图 10 给出了 SSER、ALPHA、DELTA、BASIC 四种策略关于 LR_{avg} 的性能比较。

1) 变化 L 值： $N = 64$ 。

从图 8 中可以看出：

在相同场景和相同 L 下，SSER 较其他 3 种策略拥有更低的 LR_{avg} 。这是由于 SSER 未采用固定的上行和下行数据时段长度，因而能根据不同网络参数，动态调整分配给上行传输和下行传输的时隙数目，实现了上下行数据时段长度的动态优化。

与其他 3 种策略相比，SSER 以更少的重传时隙实现了相同的 LR_{avg} 。这是因为 SSER 采用按需方式分配重传时隙，可以根据上一轮的数据包丢包情况确定当前重传轮应当传输的数据包，从而规避了 BASIC、ALPHA 等采用预留时隙的传输策略对时隙资源的浪费，更加有效地利用了通信资源。

1) 变化 N 值：考虑 3 个场景， $L = 230$ 。

从图 9 中可以看出：

(1) 各场景下，由于有限时隙不能满足大量 FD 的高可靠传输，4 种策略的 LR_{avg} 均随着 N 增加而增大。

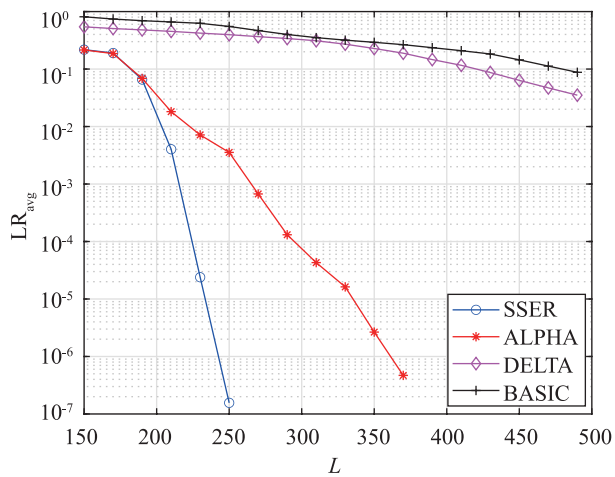
(2) 各场景下，在 N 较小而时隙资源较为丰富时，SSER 和 ALPHA 的 LR_{avg} 等于 0，两种策略效果相同。但是，当 N 增大使得时隙资源紧张时，SSER 较其他策略的优势更加明显。

(3) 随着场景的变化，当信道条件变差时，所有策略的 LR_{avg} 都会升高，但是 SSER 始终优于其他策略。这种优势在信道条件良好时更加突出。这是由于当信道条件良好时，信道条件不是 LR_{avg} 的决定性因素，因而能更多地反映不同时隙分配策略的性能差异。

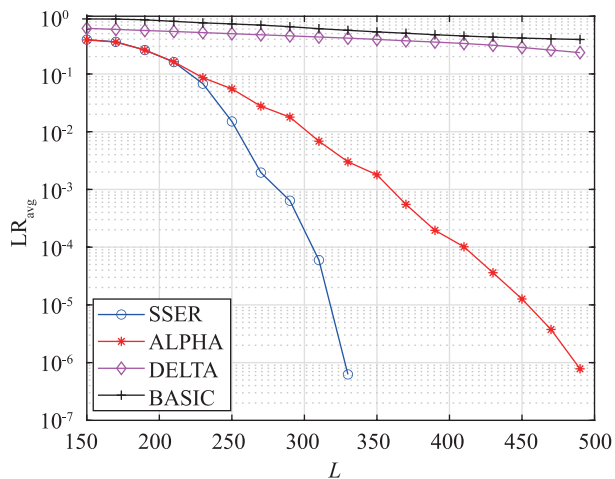
2) 变化信道条件： $N = 64$ ， L 分别设置为 200、300 和 400。

从图 10 中可以看出：

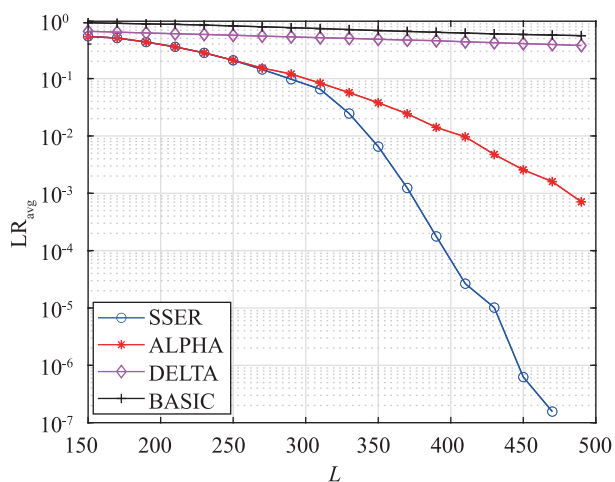
(1) 当无线信道质量变差时，各策略的 LR_{avg} 都会增加，但 SSER 的 LR_{avg} 在所有情况下都低于或等于其他 3 种策略。



(a) 场景1



(b) 场景2



(c) 场景3

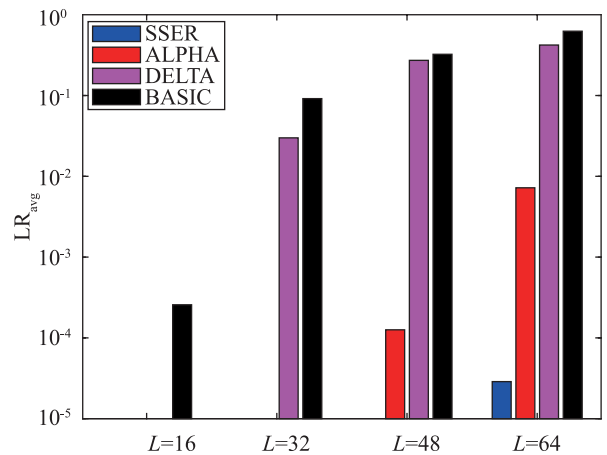
图 8 不同 L 值下的 LR_{avg} 比较

Fig.8 Comparison on LR_{avg} for different values of L

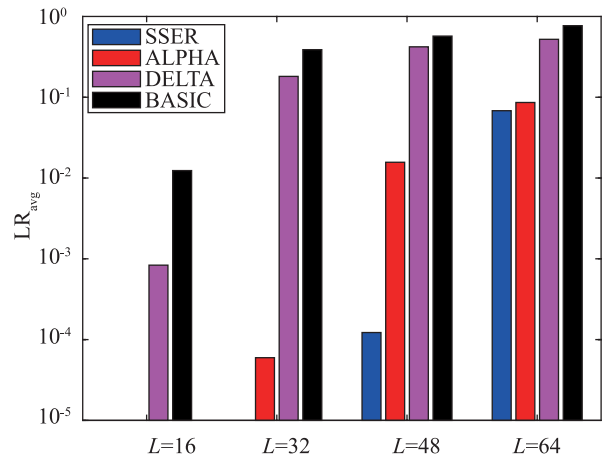
(2) 当信道质量从优到劣变化时, 增加 L 可以减缓 LR_{avg} 的增大。

(3) 在信道条件较好时, SSER 和 ALPHA 的

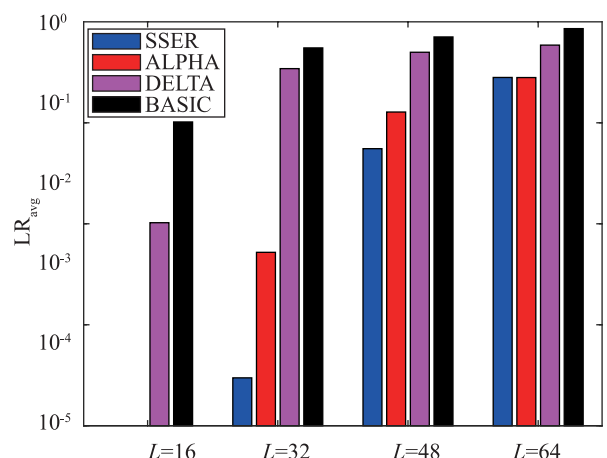
LR_{avg} 比较接近。例如, 在 $L = 400$ 时的场景 1 中, SSER 和 ALPHA 的 LR_{avg} 均等于 0。但是, 当信道条件变差时, SSER 和 ALPHA 的 LR_{avg} 均增大, 尽管如此, SSER 的 LR_{avg} 明显低于其他策略。



(a) 场景1



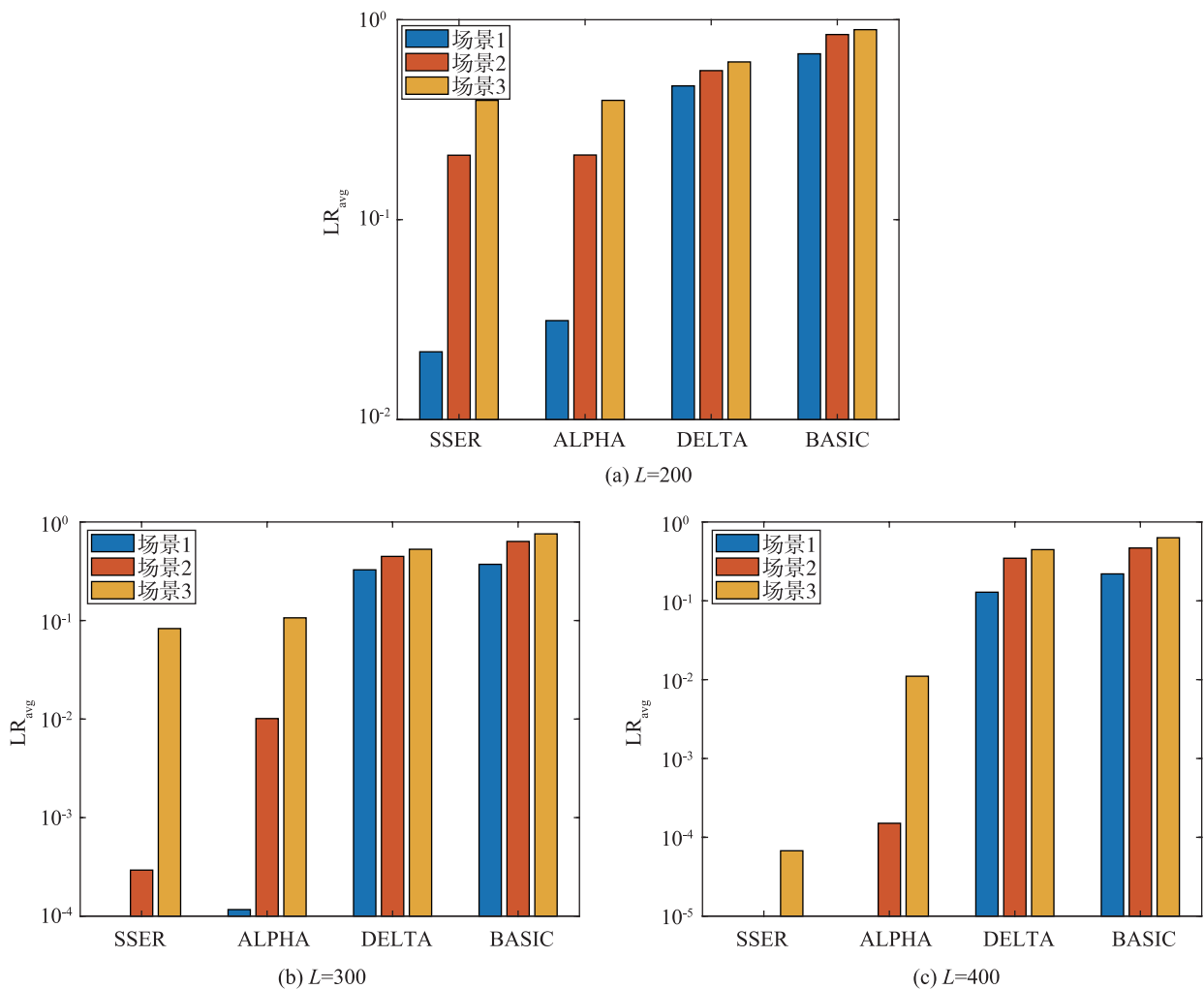
(b) 场景2



(c) 场景3

图 9 不同 N 值下的 LR_{avg} 比较

Fig.9 Comparison on LR_{avg} for different values of N

图 10 不同信道条件下的 LR_{avg} 比较Fig.10 Comparison of LR_{avg} in different channel conditions

6 结论

本文研究了基于 WIA-FA 的无线 AGV 系统有序可靠重传方法。首先,给出了基于 WIA-FA 的 AGV 通信系统架构和数据传输过程,并设计了一种全新的超帧结构。该超帧结构满足 CDP 传输的严格顺序性要求。进而,基于新超帧结构,本文提出

了一种基于有序调度的端到端重传策略 SSER,实现了上行数据的按需传输和下行数据的按序传输,并支持上行和下行数据时段长度的动态优化。仿真结果表明,在不同超帧长度、节点数量和信道条件等网络参数设置下,SSER 在传输可靠性方面均优于其他策略。SSER 的策略建模与优化将是本文的下一步工作。

参考文献

- [1] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication; automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17–27.
- [2] LIANG W, ZHENG M, ZHANG J L, et al. WIA-FA and its applications to digital factory: A wireless network solution for factory automation[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1053–1073.
- [3] ZHANG Y F, ZHU Z F, LYU J X. CPS-based smart control model for shopfloor material handling[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1764–1775.
- [4] LIANG W, ZHANG J L, SHI H G, et al. An experimental evaluation of WIA-FA and IEEE 802.11 networks for discrete manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(9): 6260–6271.

- [5] DEMESURE G, DEFOORT M, BEKRAR A, et al. Decentralized motion planning and scheduling of AGVs in an FMS[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1744 – 1752.
- [6] LUVISOTTO M, PANG Z, DZUNG D. High-performance wireless networks for industrial control applications: New targets and feasibility[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1074 – 1093.
- [7] 张晓玲, 梁炜, 于海斌, 等. 无线传感器网络传输调度方法综述[J]. 通信学报, 2012, 33(05): 143 – 157.
ZHANG X L, LIANG W, YU H B, et al. Survey of transmission scheduling methods in wireless sensor networks[J]. Journal of communications, 2012, 33(5): 143 – 157.
- [8] KO J P, JUNG J W, JEON J W. Anti-collision method for AGV using RFID and ZigBee network[C]//13th International Conference on Control, Automation and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 599 – 604.
- [9] LOZOYA C, MARTI P, VELASCO M, et al. Effective real-time wireless control of an autonomous guided vehicle[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 2876 – 2881.
- [10] SCHEUVENS L, SIMSEK M, NOLL-BARRETO A, et al. Framework for adaptive controller design over wireless delay-prone communication channels[J]. IEEE Access, 2019, 7: 49726 – 49737.
- [11] OHORI F, ITAYA S, OSUGA T, et al. Estimating wireless link quality using multiple remote sensors for wireless control of AGV in a factory[C/OL]//23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Piscataway, USA: IEEE, 2020[2022 – 11 – 30]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9309467>. DOI: 10.1109/WPMC50192.2020.9309467.
- [12] ZHANG G Q, PAN Z M. The application research of mobile robots and wireless sensor network in laser automatic guided vehicles[C]//3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2011: 708 – 711.
- [13] ROHRIG C, TELLE L. Real-time communication and localization for a swarm of mobile robots using IEEE 802.15.4a CSS [C/OL]//IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2011[2022 – 10 – 16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6093057>. DOI: 10.1109/VETECF.2011.6093057.
- [14] HUYNH M K, NGUYEN D A. A research on automated guided vehicle indoor localization system via CSI[C]//International Conference on System Science and Engineering, Piscataway, USA: IEEE, 2019: 581 – 585.
- [15] KIM G, BAI S N, PARK P, et al. A structured TDMA-based V2I MAC protocol for automated guided vehicle control systems [C]//International Conference on Information Network. Piscataway, USA: IEEE, 2012: 154 – 158.
- [16] SHI H G, ZHENG M, LIANG W, et al. AODR: An automatic on-demand retransmission scheme for WIA-FA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 6094 – 6107.
- [17] ZHENG M, ZHAO Y H, SHI H G, et al. A flexible retransmission scheme for reliable and real-time transmissions in industrial wireless networks for factory automation[J/OL]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023[2023 – 03 – 06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10077781>. DOI: 10.1109/TVT.2023.3259945.
- [18] SHI H G, ZHENG M, WEI L, et al. Transmission scheduling with order constraints in WIA-FA based AGV systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(1): 381 – 392.
- [19] DOBSLAW F, ZHANG T, GIDLUND M. End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 758 – 767.
- [20] YANG D, XU Y Z, WANG H C, et al. Assignment of segmented slots enabling reliable real-time transmission in industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3966 – 3977.
- [21] YAN M, LAM K Y, HAN S, et al. Hypergraph-based data link layer scheduling for reliable packet delivery in wireless sensing and control networks with end-to-end delay constraints[J]. Information Sciences, 2014, 278: 34 – 55.
- [22] HASHIMOTO M, WAKAMIYA N, MURATA M, et al. End-to-end reliability- and delay-aware scheduling with slot sharing for wireless sensor networks[C/OL]//8th International Conference on Communication Systems and Networks. Piscataway, USA: IEEE, 2016[2023 – 01 – 20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7439984>. DOI: 10.1109/COMSNETS.2016.7439984.

作者简介

郑 萌(1983 –), 男, 博士, 研究员。研究领域为无线自组织和传感器网络, 工业无线网络。

冯 彬(2000 –), 男, 博士生。研究领域为工业无线网络。

赵永恒(1998 –), 男, 硕士。研究领域为工业无线网络。

梁 炜(1974 –), 女, 博士, 研究员。研究领域为无线传感器网络, 工业无线网络, 模式识别与智能系统。