



专题：5G 行业应用

端边协同保障时延确定性技术研究

宋光敏¹, 王群青², 黄占兵³, 施迅⁴, 韩高健⁴

(1. 联通(浙江)产业互联网有限公司, 浙江 杭州 310051;

2. 中国联合网络通信有限公司浙江省分公司, 浙江 杭州 310051;

3. 华为技术有限公司, 浙江 杭州 310051; 4. 华为技术有限公司, 广东 东莞 523808)

摘要: 工业自动控制等 5G 垂直行业对网络传输时延与可靠性有着苛刻的要求。聚焦自动导引车 (automated guided vehicle, AGV) 协同搬运业务场景, 深入分析 AGV 业务关键质量指标 (key quality indicator, KQI) 与网络时延可靠性需求。现有的 5G 低时延技术, 比如预调度机制通过大量预留空口时频资源降低传输调度等待时延, 降低了频谱效率。此外, 无线信道弱覆盖、干扰等质差因素会引发较大的时延抖动, 难以满足业务时延可靠性需求。针对现有 5G 网络面临的挑战, 设计了一种端边协同时延确定性保障技术方案, 基于业务特征进行网络资源预留, 同时感知空口信道状态, 开启质差保障机制, 提升传输可靠性。测试结果表明, 端边协同技术方案可以有效提升时延可靠性, 降低大时延抖动与优化业务 KQI。

关键词: 5G; AGV; 确定性网络; 端边协同

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022090

Research on the edge-end collaboration framework for deterministic network

SONG Guangmin¹, WANG Qunqing², HUANG Zhanbing³, SHI Xun⁴, HAN Gaojian⁴

1. Unicom (Zhejiang) Industrial Internet Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

2. Zhejiang Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

3. Huawei Technologies Co., Ltd., Hangzhou 310051, China

4. Huawei Technologies Co., Ltd., Dongguan 523808, China

Abstract: 5G vertical industries such as industrial automatic control have strict requirements on network transmission delay and reliability. It was focused on the AGV collaborative carrying scenarios, in which the key quality indicator (KQI) of the AGV collaboration and the requirements for network jitter were analyzed. Existing 5G ultra-low-latency technologies, such as the pre-scheduling mechanism, reduce transmission scheduling latency by reserving a large number of time-frequency resources, which heavily decreases spectrum efficiency. In addition, wireless channel quality factors such as weak coverage and interference, often cause large jitter, making it difficult to meet the service reliability requirements. In order to deal with these challenges, a deterministic edge-end cooperation framework design to guarantee end-to-end latency was proposed. Based on service flow characteristics, resource reservation was utilized to reduce scheduling latency. Moreover, the proposed framework could enhance data transmis-

sions when poor status of channels was sensed. The experimental results show that the edge-end collaboration framework design can effectively increase the delay reliability, reduce the large jitter, and improve the KQI of AGV collaboration.

Key words: 5G, AGV, deterministic network, edge-end collaboration

0 引言

随着工业互联网、车联网、智能电网等领域数字化转型,各垂直行业对确定性时延诉求日益增加^[1-4]。例如虚拟现实/增强现实(virtual reality/augmented reality, VR/AR)等应用一般要求时延低于 50 ms,并且满足 99.9%以上的时延可靠性要求。港口煤矿等远控场景要求传输时延低于 50 ms,并且满足 99.99%以上的时延可靠性要求,工业自动化控制要求传输时延低于 4 ms,并且满足 99.999%以上的时延可靠性要求。为了满足各行业差异化服务等级协定(service level agreement, SLA)需求,5G 确定性网络技术要求对无线、承载网、核心网各域实现资源隔离,确定性调度与转发,可以将端到端时延时、抖动和丢包率等指标控制在业务所需的上下界^[5-7]。

传统数据转发网络基于“尽力而为”和“统计复用”,难以满足垂直行业超高可靠低时延的业务需求。虽然有一些基于以太网扩展的低时延方案,例如硬实时交换机体系结构(hard real time switch architecture, HaRTES),但以太网不具备网络带宽预留能力,无法绝对优先转发时延敏感业务流^[2]。IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 协会和 IETF (Internet Engineering Task Force) 提出了一系列时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)技术,主要包括 IEEE 时间同步(802.1AS)、IEEE 802.1Qav(流媒体优先级队列)、IEEE 802.1Qbv(时间窗调度)、IEEE 802.1Qcc (TSN 配置),以及其他扩展增强机制,例如流分类、整形与冗余传输机制。为了加快 5G 赋能工业自动化升级的步伐,中国信息通信研究院、中国联通、中国移动、华为公司于 2020

年联合发布了《5G 确定性网络产业白皮书》和于 2021 年发布了《5G 确定性网络架构产业白皮书》,详细调研了行业业务 SLA 需求和探讨了确定性网络架构的演进路线。

虽然业界有大量的确定性技术研究,但仍无法满足垂直行业对网络可靠性的需求。因为无线传输信道存在多径效应、弱覆盖、突发干扰等时延抖动因素,空口时延抖动是保障 5G 端到端时延可靠性的主要挑战。5G 预调度技术是一种典型可降低上行业务调度等待时延的技术。通过预先分配上行调度资源,终端用户可实时发送数据,无须上行调度申请(scheduling request, SR)。为了减少控制信令的资源开销,免授权技术可以在终端无线资源控制(radio resource control, RRC)实体配置固定资源进行数据传输,避免基站频繁发送上行调度授权(UL grant)消息。在多终端和混合流场景,基站无法准确感知业务周期与发包偏移时刻,这两种技术往往需要密集预留空口资源保障业务的可靠性,造成空口资源严重浪费。另外,在空口质差场景中,数据传输解码失败,会引入额外的重传时延,降低端到端时延可靠性。分组数据汇聚协议(packet data convergence protocol, PDCP)复制可以提升空口链路的可靠性。这种技术对终端的能力有依赖,并且通常对小区所有签约用户的报文(5QI 粒度)进行复制重传,无法针对某一个终端的单一业务流开启。为了解决上述问题,核心网可深入感知业务流特征、协同基站和应用,进行跨域调度,提升 5G 端到端时延确定性能力。

本文聚焦于 AGV 协同业务,AGV 之间通过 5G 局域网(local area network, LAN)传输导航与定位指令,协同搬运货物。基于弧线业务模型,



推导和分析主从 AGV 间距误差（业务 KQI）与网络时延可靠性之间的映射关系。为了应对空口上行调度等待时延、弱覆盖和同频信号干扰等时延抖动因素，本文提出了一种端边协同时延确定性保障技术方案，实现业务流级跨域时延保障。首先，核心网可基于业务 IP 与端口号等特征，实现流分离，利用机器学习等算法推断单流业务的起始发包时刻与业务周期。这可以突破基站无法识别多流业务特征的瓶颈。

核心网可协同基站，进行空口资源预留，降低空口上行调度等待时延和资源开销。同时，用户面功能（user plane function, UPF）可向基站订阅空口信道状态数据，针对某一业务流，动态开启对应终端侧与 UPF 侧的传输可靠性保障措施，提升空口质差场景的时延可靠性。

1 5G E2E 时延构成

从广义来看，5G 端到端（end-to-end, E2E）通信主要包含两类：终端到终端和终端到服务器。本文聚焦主从 AGV 通信业务，针对终端到终端场景进行 5G E2E 时延分析。E2E 时延指终端设备之间端到端通信的来回时延。5G 端到端时延如图 1 所示，E2E 时延主要由节点处理时延与节点之间的传输时延构成，终端到服务器场景仅包含单次空口传输时延，但涉及 UPF 转发到应用服务器的时延消耗。可以表示为：

$$t_{E2E} = 2t_{\text{radio}} + 2t_{\text{gnb}} + 2t_{\text{transport}} + t_{\text{core}} \quad (1)$$

各变量具体含义如下。

- t_{radio} 代表终端设备与基站之间的无线传输时延，主要由物理层通信引起。无线传输时延取决于无线传输的物理距离，以及无线环境的信道质量，例如射频信号被建筑表面反射，穿越丛林等，无线传输的物理距离。在空口弱覆盖或干扰场景，初传包丢包后，空口会进行 HARQ 重传和 RLC 重传。重传时延开销与基站配置的 HARQ/RLC 重传间隔与最大重传次数相关。
- t_{gnb} ：代表基站的处理时延。基站在物理层处理涉及信道编解码、信道交织与去交织，循环冗余校验（cyclic redundancy check, CRC）、信号调制与解调、波束成形、正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）信号产生等。另一方面，数据包会在任务缓存队列中产生排队等待时延，主要与物理层资源块（resource block, RB）的数目与 RB 复用能力相关。特别地，在传统上行调度中，终端发送上行数据时，可能会从 RRC_idle（空闲）或 RRC_inactive（休眠）状态进入 RRC_connected（连接）状态，并向基站发起调度申请（scheduling request, SR），产生上行调度等待时延。

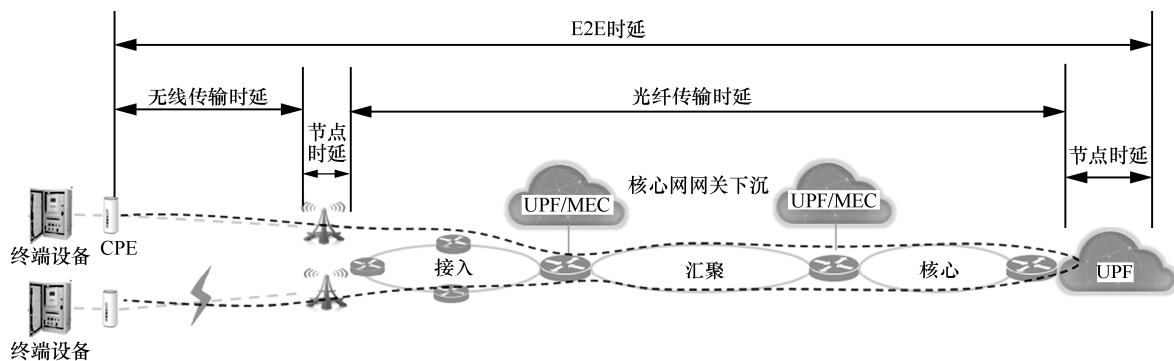


图 1 5G 端到端时延

- $t_{\text{transport}}$: 代表基站与核心网之间的光纤传输时延。时延的主要影响因素有基站到核心网的距离, 接入、汇聚、核心的网络拓扑结构, 以及传输设备的转发能力。一般来说, 相比空口传输, 光纤传输时延会低很多, 时延的抖动范围也更小。
- t_{core} : 代表核心网处理时延。时延的主要影响因素是 UPF 转发策略、转发路径、IP 寻址以及报文过滤。

总体来说, E2E 时延包含上下行无线传输时延、上下行基站处理时延、往返光纤传输时延和核心网处理时延。为了便于描述, 本文把无线传输时延与基站处理时延统称为空口时延。

2 多 AGV 协同业务与时延可靠性需求

本节主要介绍 5G 使能多 AGV 协同业务、5G 通信组网, 并推导业务 KQI 与网络时延可靠性之间的映射关系。

2.1 多 AGV 业务协同业务

为了满足生产作业的复杂性, 多 AGV 可通过协作完成设定的任务, 如协同搬运大型货物。本文考虑经典的“领航—跟随”协作模型^[2]。这种模型把小车划分为主 AGV 类型和从 AGV 类型。

主 AGV 承担领航任务, 具备自主导航能力。通常来说, AGV 可以采用同步定位与地图构建 (simultaneous localization and mapping, SLAM) 技术进行导航规划。根据文献[2], 主 AGV 硬件架构如图 2 所示。上位机主要包含 Linux 开发板, 运行 SLAM 定位算法与导航控制系统。上层控制层包含激光雷达和视觉采集相机等传感器模块。仅依靠激光雷达或者相机扫描数据, 很难在复杂环境准确构建地图。AGV 可以融合激光雷达、视觉特征等传感器数据, 提升地图构建精度, 消减导航累积误差。主 AGV 在领航运行时, 需要向从 AGV 实时传输导航指令, 包含运行的速度、加速度、角速度等信息。

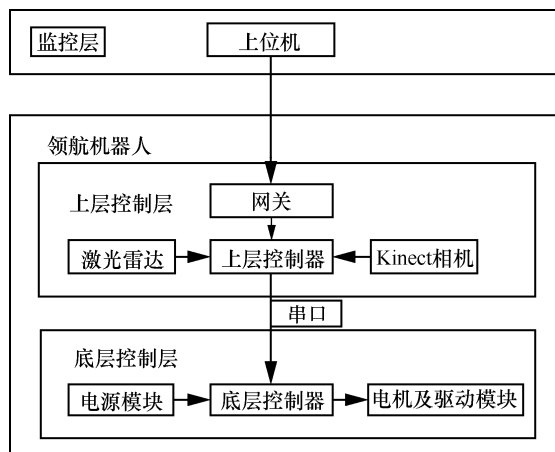


图 2 主 AGV 硬件架构

从 AGV 以跟随主 AGV 运行, 协同完成货物搬运任务为主。在“领航—跟随”关系绑定后, 从 AGV 不会进行自主导航规划, 按照主 AGV 发送的导航指令巡航。同时, 从 AGV 会实时定位, 将自身位置信息以一定的控制频率上报给主 AGV, 辅助主 AGV 进行导航指令计算, 以及监控主从 AGV 距离信息。为了 AGV 协作安全运行, 当主从 AGV 距离超过既定门限后, 主 AGV 会降低运行速度甚至停车, 同时也会将降速指令发送给从 AGV。生产作业时, 主从 AGV 可以灵活切换“领航—跟随”角色, 故从 AGV 采用与主 AGV 同构的硬件架构。

2.2 基于 5G LAN 的主从 AGV 通信

5G LAN 可以为工业制造提供跨域连接和企业移动专网, 允许设定用户组实现 Ethernet 和 IP 通信。基于 5G LAN 的主从 AGV 组网如图 3 所示, 机器人控制系统 (robot control system, RCS)、主从 AGV 均通过 CPE 接入 5G LAN。RCS 机器人控制系统可以通过 5G 网络向既定的主从 AGV 发送协同搬运任务。主从 AGV 收到 RCS 指令后, 完成“领航—跟随”模型绑定。主从 AGV 业务初始化后, 主 AGV 以发包频率 f 向从 AGV 发送导航指令, 从 AGV 同样以发包频率 f 向主 AGV 发送位置信息。在主从 AGV E2E 通信中, 报文经历空口上下行传输时延、基站处理时延、传输时延以及核心网处理时延。

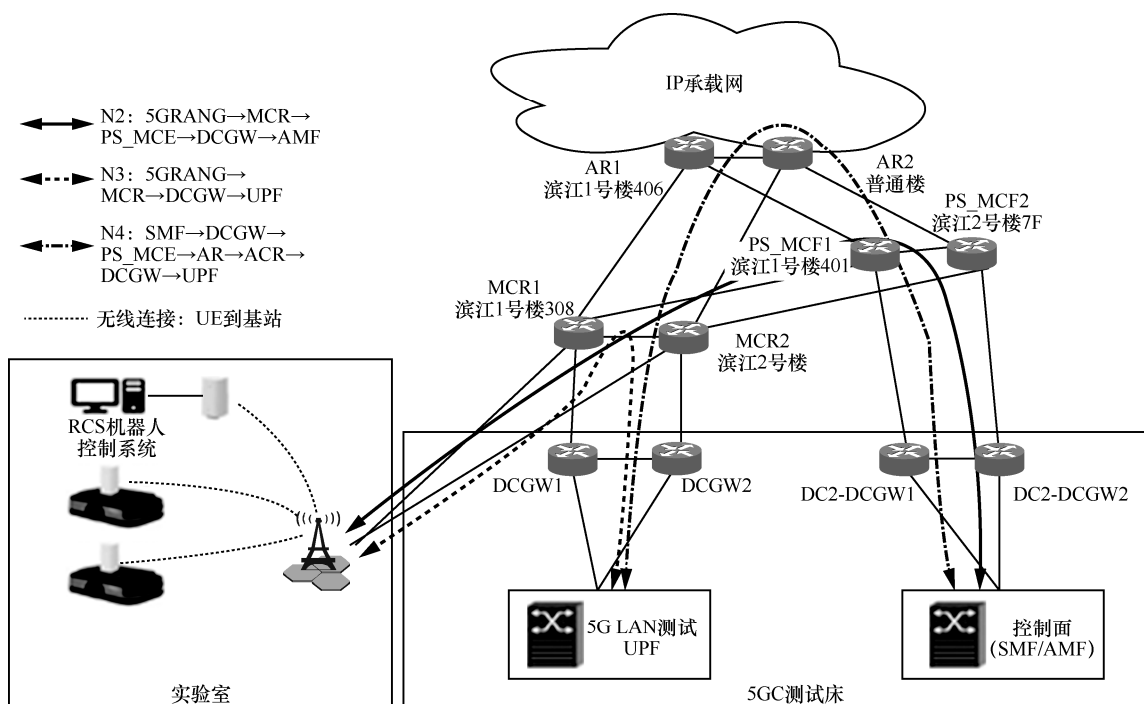


图 3 基于 5G LAN 的主从 AGV 组网

2.3 业务 KQI 与时延 SLA 映射关系

主从 AGV 距离误差是业务 KQI 的关键指标。E2E 时延抖动导致从 AGV 接收导航指令滞后，从而拉大主从 AGV 间距，AGV 可能会减速降低货物搬运效率，甚至导致货物脱落。同时，主 AGV 接收从 AGV 位置信息也会滞后，不能精确计算从 AGV 下一时间窗的导航指令。当主从 AGV 距离超过告警门限后，AGV 会触发保护性停车机制。另一方面，连续多个时间窗未收到报文，会触发 AGV “看门狗” 机制，判决 “主从通信失联”，主从 AGV 业务均会重启。由此可见，AGV 协同业务对时延可靠性有较高需求。通常来说，元器件可靠性、定位算法误差也会影响主从 AGV 的距离误差。本文重点分析 5G 网络时延对距离误差的影响。下面推导业务 KQI 与时延 SLA 的映射关系。

主从 AGV 业务协作搬运货物涉及直线运动与弧线转弯。主从 AGV 可以并排行驶，也可以共线行驶。主从 AGV 协同作业示意图如图 4 所示，

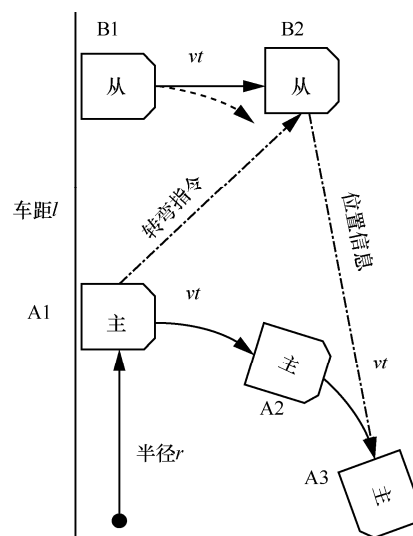


图 4 主从 AGV 协同作业示意图

本文考虑主从 AGV 并排执行弧线作业，分析业务 KQI 与时延 SLA 的映射关系。主 AGV 以半径 r 在内圈做弧线运动。设定主从 AGV 额定车距为 l ，主从 AGV 运行速度为 v 。主 AGV 在 A1 点执行转弯，同时向从 AGV 发送转弯指令，从 AGV 沿着切向直线运行。经历 E2E 时延 t 后，从 AGV 在

B2 点收到指令。此时主 AGV 沿着弧线运行到 A2 点。假设主从 AGV 双向通信的 E2E 时延均为 t 。从 AGV 在 B2 点发送位置信息给主 AGV，经过 E2E 时延 t 后，主 AGV 在 A3 点收到从 AGV 的消息。AGV 日志统计距离为 A3-B2，实际距离为 A2-B2。为了简化分析，本文仅考虑单回合主从 AGV 信息交互，不考虑多个回合的累计误差以及 AGV 的纠偏策略。

首先以圆心点为原点，建立极坐标系，主从 AGV 位置的极坐标如图 5 所示。

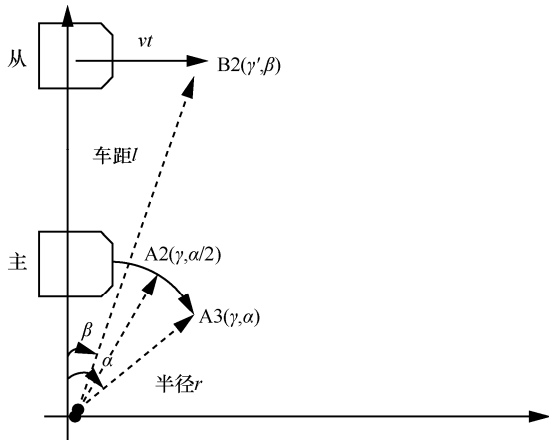


图5 主从 AGV 位置的极坐标

则 A2、A3 和 B2 的坐标依次表示为 $(r, \alpha/2)$ 、 (r, α) 和 (r', β) ，其中：

$$\alpha = \frac{2vt}{r}, \quad \beta = \arctan \frac{vt}{r+l}, \quad r' = \sqrt{(vt)^2 + (r+l)^2} \quad (2)$$

根据极坐标的距离计算公式，主从 AGV 实际距离 A2-B2 为：

$$p = \sqrt{r^2 - 2rr' \cos\left(\frac{\alpha}{2} - \beta\right) + r'^2} \quad (3)$$

化简后，主从 AGV 实际距离 A2-B2 如下：

$$p' = \sqrt{(vt)^2 + (r+l)^2 + r^2 - 2r\sqrt{(vt)^2 + (r+l)^2} \cos\left(\frac{vt}{r} - \arctan \frac{vt}{r+l}\right)} \quad (4)$$

使用类似的方法，可以得到主从 AGV 日志统计距离 A3-B2：

$$p = \sqrt{(vt)^2 + (r+l)^2 + r^2 - 2r\sqrt{(vt)^2 + (r+l)^2} \cos\left(\frac{2vt}{r} - \arctan \frac{vt}{r+l}\right)} \quad (5)$$

根据主从 AGV 距离公式，业务 KQI 可以表示为 $p-l$ 。上述推导方法可以应用于主从 AGV 共线弧线行驶、直线行驶，本文不展开分析。

综上，主从 AGV 的距离误差不仅与 E2E 时延 t 相关，也与额定距离 l 、转弯半径 r 和 AGV 运行速度 v 相关。例如设定 AGV 最大速度为 1 000 mm/s，额定主从 AGV 距离 1 200 mm，AGV 转弯半径不小于 50 mm。为了使业务 KQI 误差小于 10 mm，则根据业务 KQI 公式，得出 E2E 传输时延值为 47.8 ms。AGV 业务通常对业务可靠性要求较高，如主从 AGV 交互一万回合指令，最多有一次距离误差超出 10 mm，则理论时延 SLA 需求为 47.8 ms@99.99%。

2.4 5G 满足 AGV 时延需求的挑战

由于空口时频资源受限，链路易受干扰和调度机制复杂性，空口时延抖动是满足 AGV 时延可靠性需求的主要挑战。5G 空口上行调度如图 6 所示，本文重点对空口上行传输各个状态过程的时延抖动展开分析，主要包括状态切换、调度授权等待、数传等待和数据重传。

(1) 状态切换时延

终端状态切换流程如图 7 所示，终端设备在处于非活动状态时，可能会释放无线资源控制 (RRC) 连接，节省电能。当 UE 处于用户连接管理空闲态 (CM-idle) 时，首先需要和恢复 RRC 连接与 PDU 会话承载，切换到 RRC-connected 状态才能监听物理下行控制信道 (physical downlink control channel, PDCCH)，获取基站发送的上行调度授权 (UL grant)，随后在基站分配的时频资源进行上行数据传输。一般来说，上行传输时，终端主动发起协议数据单元 (protocol data unit, PDU) 会话建立或恢复请求，时延开销为 50~70 ms。下行传输时，网络需要寻呼处于 CM-idle 态的终

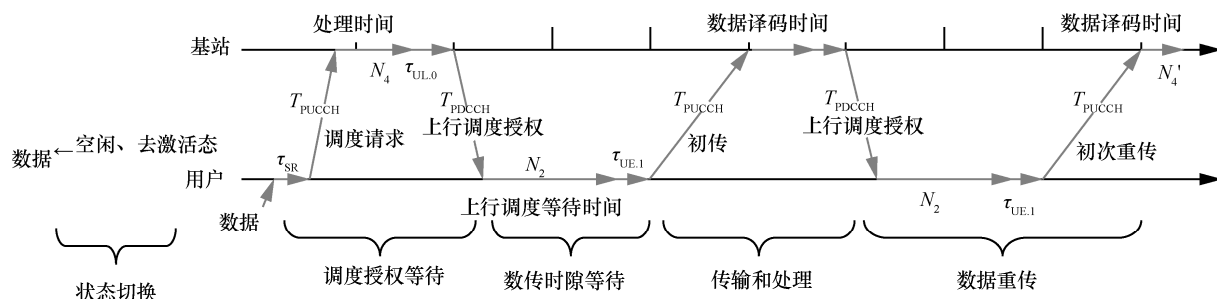


图 6 5G 空口上行调度

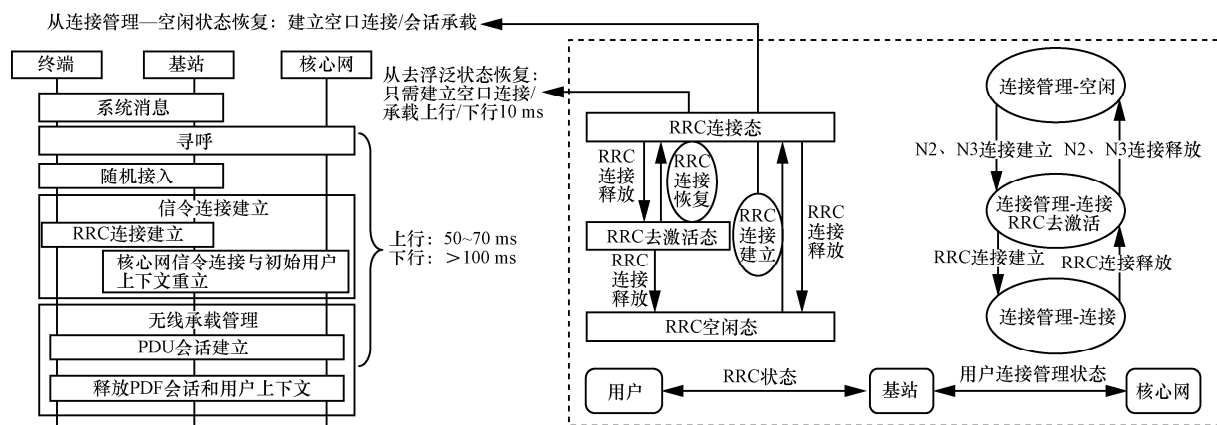


图 7 终端状态切换流程

端，需要 100 ms 以上的时延开销。特别地，5G 通信增加了 RRC-inactive 态，仅释放终端到基站的 RRC 连接，但保留终端到核心网的上下文，如用户接入状态，可以有效减少用户恢复与网络连接时的信令交互次数。用户处于 RRC-inactive 状态时，需要 10 ms 重新建立 RRC 连接，就能进行数据传输。

(2) 调度授权等待时延

由于空口时频资源有限，终端需要等待基站 UL grant 才能发送数据。上行调度时延开销包括 SR 发送等待时延开销和基站调度时延开销。在传统上行调度中，终端发送缓存区已经清空后，有新的数据到来，需要通过物理上行控制信道（physical uplink control channel, PUCCH）向基站发送 SR，等待基站上行调度授权。根据协议，终端只能在 SR 固定周期点发送请求，平均等待时延约为 20 ms。收到用户 SR 请求后，基站会让终端

通过物理上行共享信道（physical uplink shared channel, PUSCH）发送缓存状态报告（buffer status report, BSR）。在多终端场景，基站根据可用 RB 数目、用户优先级、数据量等信息，进行 RB 分配。业务并发量越大，用户等待基站调度的时延抖动越大。

(3) 数传等待时延

终端收到 UL grant 后, 在指定时隙发送数据, 平均等待时延约为 2 ms, 抖动较小。

(4) 数据重传时延

由于无线信道衰落、小区边缘接入以及同频信号干扰等空口质差因素，无线链路接收端常常会解码失败，引发数据重传。5G 通信在介质访问控制（medium access control, MAC）层使用混合自动重传请求（hybrid automatic repeat request, HARQ）技术合并多次传输误码数据，提升解码成功率。基站通常配置最大 4 次 HARQ，每次重

传时延开销为 5 ms。当基站采用非确认 (unacknowledged mode, UM) 模式, 4 次 HARQ 重传均解码失败后, 该数据包丢失。反之, 基站采用确认 (acknowledged mode, AM) 模式, 有可能触发无线链路控制 (radio link control, RLC) 层重传。通常 RLC 重传周期 40 ms, 最大重传次数为 32 次。在空口质差场景中, 链路解码失败可能性变大, 会引入多次 HARQ/RLC 重传, 常常导致大时延抖动。

3 端边协同时延确定性方案

为了应对上述时延抖动挑战, 本节介绍一种端边时延确定性解决方案用于提升 AGV 通信时延可靠性, 满足 AGV 业务可靠性需求。端边协同时延确定性组网方案如图 8 所示, 端边协同时延确定性方案架构主要包含端侧确定性 Agent 模块和服务侧确定性 Service 模块。确定性 Agent 可植入 AGV 上位机进行流量透明代理, 与位于 UPF 的确定性 Service 建立确定性时延保障管道。Agent 代理 AGV 应用流量, AGV 应用不需要做额外开发。确定性 Service 对业务流量进行分析, 识别主从 AGV 交互指令的周期与起始发包时刻, 利用预调度技术、协同基站进行空口资源预留、降低包调度等待时延。同时, 确定性 Service 会采集空口信道的实时测量数据, 如参考接入功率 (reference signal receiving power, RSRP)、信道质量指标 (channel quality indication, CQI) 等, 在质差条件下, 动态开启时延保障策略, 提升包传输可靠性。

端边协同时延保障技术的交互流程如图 9 所示, 端边协同时延保障技术的交互流程包含如下 3 个阶段。

(1) 端边协同配置阶段

终端确定性 Agent 置于 AGV 上位机, 向确定性 Service 发起注册。Agent 成功注册后, 确定性 Service 可对 Agent 进行生命周期管理, 监控 Agent 运行状态, 配置确定性时延保障参数。确定性 Service 可根据业务特征, 配置服务质量 (quality of service, QoS), 并且向基站发送调度策略配置。

(2) 端边协同资源预留阶段

主从 AGV 流量经过端侧 Agent 代理后, 由确定性管道转发至确定性 UPF。确定性 Service 采集业务流量来包信息, 使用机器学习算法推断业务发包周期与起始时刻, 以及感知业务包长。根据业务发包特征, UPF 协同基站, 进行空口资源预留, 降低状态切换和基站调度授权等待时延。特别地, 该方案可以根据业务特征, 精准配置所需 RB 数目和预期调度时隙, 避免了空口资源浪费, 有效提升频率利用率。

(3) 端边协同质差保障阶段

确定性 Service 向基站订阅空口信道测量数据。基站周期性上报链路 RSRP、CQI 等参数。当检测到上行信道质差, 确定性 Service 传递消息给端侧, 开启端侧质差保障措施。端侧 Agent 对上行业务流量进行可靠传输处理, 确定性 Service 进行对应的处理。当检测到下行信道质差, 端侧 Service 对下行业务流量进行可靠性处理, 确定性

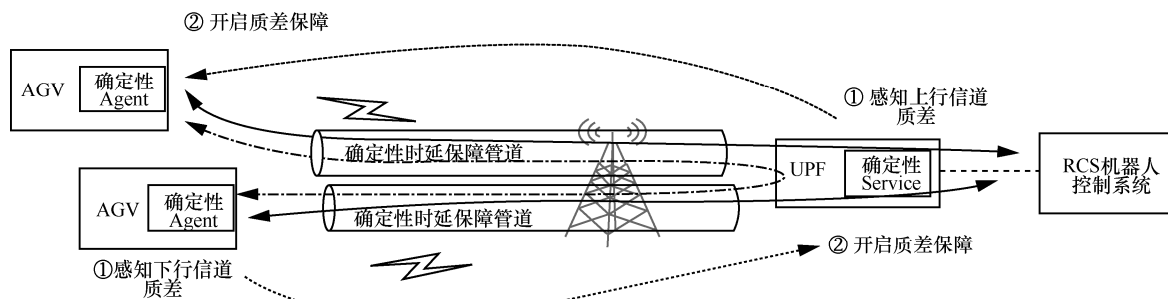


图 8 端边协同时延确定性组网方案

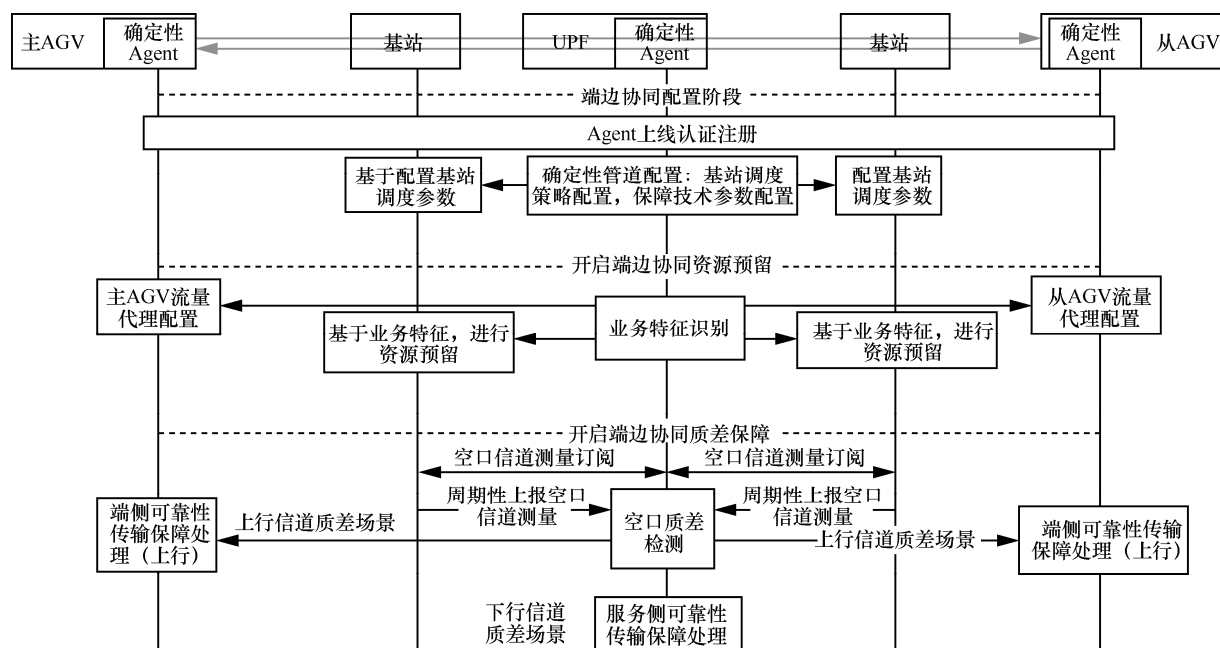


图9 端边协同时延保障技术的交互流程

Agent 进行对应的处理。当空口信道质量恢复到良好水平，可关闭质差保障，降低空口资源消耗。

本文的创新性主要在于构建端边协同机制，联动端侧和 RAN 侧，协同优化传输时延与资源开销。该方案适用于终端混合流、视频背景流等典型 toB 业务场景。核心网可以基于业务粒度（如利用业务收/发 IP 地址、收/发端口号及协议信息过滤流量）感知时延敏感业务流的特征，例如包长、周期、发包时隙偏移等，开启业务级时延保障技术，以最优资源开销保障传输时延可靠性。

3.1 5G 端到端时延优化效果

实验基于杭州联通展厅进行测试。考虑两类空口环境：AGV 近点接入 5G 网络，终端 RSRP 约 -71 dBm，平均 RB 干扰功率 -116.9 dBm，最高 -105 dBm，有轻干扰；AGV 小区边缘接入 5G 网络，有邻区同频用户作业，终端 RSRP 约 -95 dBm，平均 RB 干扰强度 -116.2 dBm，最高 -93 dBm，有突发强干扰。本文将端边协同技术与传统上行调度（上行需进行 SR、等待基站调度授权）、预调度（基站逐 TTI 预留资源、无质差保障

措施）技术进行对比。AGV 每 20 ms 发送一个指令，包长 300 byte。

时延可靠性对比结果如图 10 所示。基线数据使用传输上行调度，没有进行上行资源预留，平均时延相比预调度、端边协同技术抬升约 10 ms。在近点场景，预调度与端边协同时延保障技术在 99%~99.99% 可靠性度量下，时延基本一致。但因为近点场景存在轻微干扰，当时延可靠性大于 99.99% 时，使用端边协同技术相比预调度机制可以减小时延抖动 50.8 ms。在质差场景，相比预调

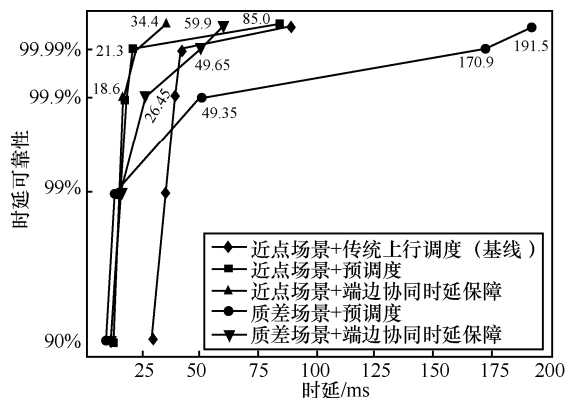


图10 端到端时延可靠性对比结果

度技术,采用端边协同方案,可以降低时延 46.4% (99.9%可靠性度量) 和 70.9% (99.99%可靠性度量)。由此可见,端边协同技术方案可以在空口弱覆盖、干扰等质差场景极大降低时延抖动。此外,使用端边协同技术,可以达到 20 ms@99%、30 ms@99.9%,有效消减 99.99%可靠性及以上的时延抖动。

呈现使用预调度技术和端边协同时延保障技术的 AGV 实际收包序号与理论收包序号的差值分别如图 11 和图 12 所示。实验环境为空口质差场景,端到端时延会有较大抖动。可以看出,在无质差保障的测试场景中,AGV 接收指令序号出现了较大的波动。图 11 有两次较大的序号抖动,

序号范围超过了 100 个包。追踪 AGV 日志发现主从 AGV 因大时延抖动,进入了“失联”状态,业务发生了重启。使用了端边协同时延保障技术,AGV 收包未观察到大时延抖动。上述结果有效验证了端边协同时延保障技术对 5G 端到端时延优化效果。

3.2 AGV 业务 KQI 优化效果

考虑 AGV 最大速度为 1 000 mm/s,额定主从 AGV 距离 1 200 mm,AGV 转弯半径不小于 50 mm,AGV 业务 KQI 优化效果见表 1,结合质差场景时延测试数据,计算业务 KQI (基于 AGV 日志统计主从距离误差)。使用预调度技术,在 99.9%可靠性度量下,主从 AGV 距离误差达到了 10 mm。相

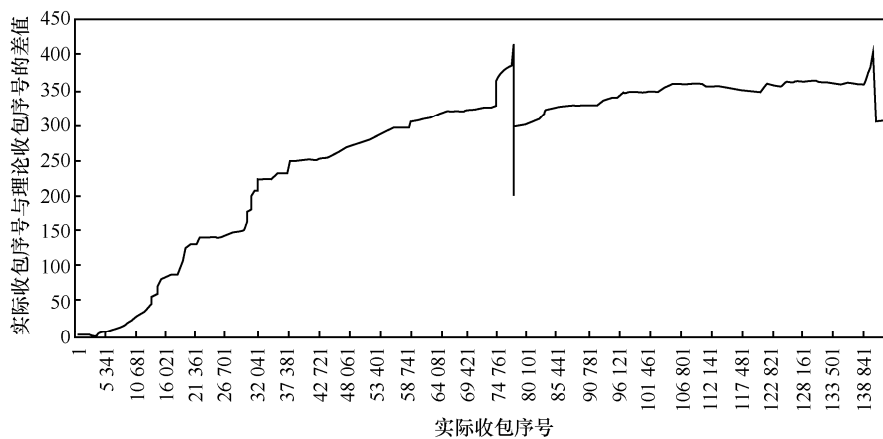


图 11 AGV 实际收包序号与理论收包序号差值 (预调度)

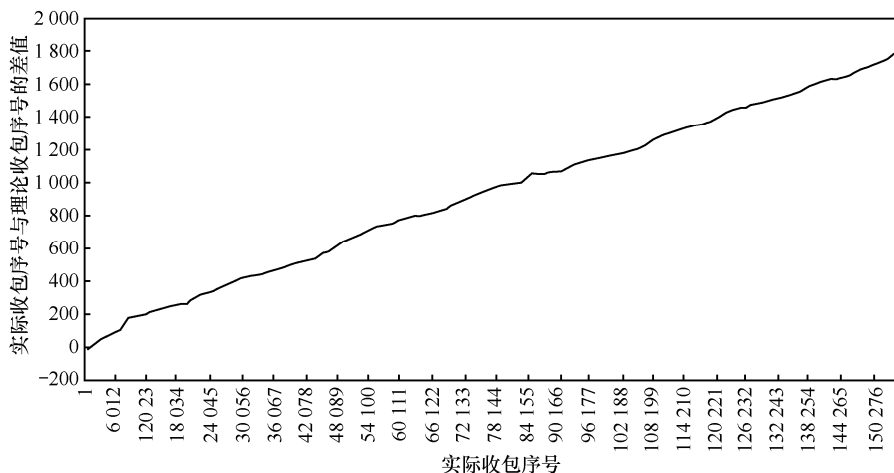


图 12 AGV 实际收包序号与理论收包序号差值 (端边协同技术)



表 1 AGV 业务 KQI 优化效果

条件	N3-N3 时延/ms	实际主从距离/mm	日志统计主从距离/mm	业务 KQI/mm
端边协同, 时延@99.9%	26.45	1 200.699 439	1 203.084 424	3.08 442 446
预调度, 时延@99.9%	49.3	1 202.428 524	1 210.668 866	10.66 886 581
端边协同, 时延@99.9%	47.9	1 202.292 658	1 210.074 978	10.0 749 782
预调度, 时延@99.9%	170.9	1 228.908 022	1 320.322 512	120.3 225 116
端边协同, 最大值	62.2	1 203.863 864	1 216.92 153	16.92 152 972
预调度, 最大值	195.4	1 237.707 535	1 354.21 554	154.2 155 401

比之下, 使用端边协同技术, 主从 AGV 距离误差控制在 10 mm 的可靠性为 99.99%, 可靠性提升了 10 倍。此外, 使用端边协同技术, 主从 AGV 最大距离误差为 16.9 mm, 相比于预调度技术的主从 AGV 最大误差, 业务 KQI 提升了 89.04%。

4 结束语

本文分析了 AGV 协同搬运业务对网络时延可靠性的需求, 推导了业务 KQI 与时延可靠性的映射关系。现有 5G 机制存在频谱浪费严重现象, 并且难以解决空口突发干扰、弱覆盖等质差因素的问题。本文创新性地提出了一种端边协同保障时延确定性方案。基于业务特征进行网络资源预留, 降低调度等待时延, 并且感知空口状态, 开启质差时延保障机制, 实现 5G 时延确定性传输。测试结果证明了该方案可以极大消减时延抖动与优化业务 KQI。此外, 端边协同时延保障方案对终端生态友好, 不需要应用进行修改, 适用于工业物联网等各垂直行业, 可大规模商业部署。最后, 5G 时延确定性传输还有很多挑战亟待解决, 例如空口拥塞、混合流传输等, 需要持续演进端边协同保障时延确定性方案、研究应用和网络跨域协同技术, 加快工业数字化升级。

参考文献:

[1] 刘鹏, 杜宗鹏, 李永竞, 等. 端到端确定性网络架构和关键技术[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 64-73.

LIU P, DU Z P, LI Y J, et al. End-to-end deterministic networking architecture and key technologies[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 64-73.

[2] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.

HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.

[3] PHILIP P C, ABDEL-HAFEZ M. A review on ultra reliable and low latency communications (PHY and MAC layer perspectives)[J]. Journal of Computer Science, 2020, 16(8): 1100-1114.

[4] 李芳, 张海懿, 赵文玉. 面向 5G 和垂直行业的确定性承载技术探讨[J]. 信息通信技术, 2021, 15(2): 30-35.

LI F, ZHANG H Y, ZHAO W Y. Research discussion on deterministic bearer technology for 5G and vertical industries[J]. Information and Communications Technologies, 2021, 15(2): 30-35.

[5] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 等. 大规模确定性网络转发技术[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 12-19.

QIANG L, LIU B Y, YU D L, et al. Large-scale deterministic network forwarding technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 12-19.

[6] 邢真, 邵伟翔, 高峰. 5G+工业互联网能力开放进展和研究[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 7-10.

XING Z, SHAO W X, GAO F. Development and research of 5G+ industrial Internet capacity[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(6): 7-10.

[7] 聂衡, 赵慧玲. 支持行业应用的 5G 核心网方案[J]. 移动通信, 2021, 45(1): 2-5.

NIE H, ZHAO H L. 5G core network solution for industry application[J]. Mobile Communications, 2021, 45(1): 2-5.

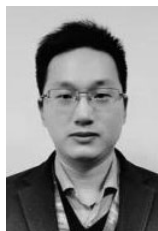
[8] 童仁鹏. 多 AGV 搬运的协同编队与避障算法的研究与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.

TONG R P. Research on cooperative formation and obstacle avoidance algorithm for multi-AGV transport[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.

[9] 张辰, 林晓亮, 段凌霄, 等. 基于 5G 通信技术的配电网精准

控制端到端承载方案研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(2): 78-84.
ZHANG C, LIN X L, DUAN L X, et al. Research on the end-to-end bearing scheme of accurate control in power distribution based on 5G communication[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2): 78-84.

[作者简介]



宋光敏（1981—），男，联通（浙江）产业互联网有限公司 5G 应用系统架构师，主要研究方向为 5G 网络赋能工业领域的关键技术及场景。



王群青（1975—），女，中国联合网络通信有限公司浙江省分公司高级工程师，主要研究方向为 5G 创新网络和差异化业务的端到端解决方案、5G 专网及 MEC 领域。



黄占兵（1981—），男，华为技术有限公司 5G 解决方案架构师，主要研究方向为 5G 确定性网络、行业可靠性综合解决方案。



施迅（1976—），男，华为技术有限公司云核心网系统架构师，主要研究方向为 5G 确定性网络、行业可靠性的关键技术及架构。



韩高健（1985—），男，华为技术有限公司云核心网系统架构师，主要研究方向为 5G 确定性网络、行业可靠性的关键技术及行业场景与解决方案。