

5G上行链路中基于预测的紧急资源分配方法研究

许方敏^① 伍丽娇^{*①} 王翔^② 赵成林^①

^①(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

^②(北京简易科技有限公司 北京 100086)

摘要: 作为5G uRLLC的典型应用场景,工业应用对于数据传输的延迟和可靠性要求越来越严苛,且多样化业务带来的多样性数据的融合传输是当前亟待解决的问题,其中高效的无线资源调度以保障各种数据共存互不干扰、稳定可靠地传输和系统安全稳定的运行是重要的挑战之一。为解决无线网络中周期性的监测数据与紧急数据的协同传输问题,该文针对工业多样化业务数据传输场景中的5G上行链路传输,提出一种基于预测的资源分配方案,该方案利用自回归滑动平均(ARMA)模型根据紧急数据的历史传输周期的激活率预测下一传输周期的紧急数据激活率,根据预测激活率动态地为周期数据和紧急数据预留资源,以在满足紧急数据传输条件的前提下最小化对周期数据传输的影响。仿真实验表明,与传统的资源分配方案相比所提方案能有效降低紧急数据传输对周期数据的影响,并能提升频谱资源的利用率。

关键词: 资源分配; 5G; ARMA模型; 免授权传输; 上行传输

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)02-0611-09

DOI: 10.11999/JEIT201050

Research on Prediction Based Emergency Resource Allocation in 5G Uplink

XU Fangmin^① WU Lijiao^① WANG Xiang^② ZHAO Chenglin^①

^①(School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(Beijing Jianyi Technology Co., Ltd, Beijing 100086, China)

Abstract: As a typical application scenario of 5G uRLLC, the data transmission delay and reliability requirements of industrial applications are more and more stringent, and the convergent transmission of diversified data becomes an urgent problem to be solved. One of the important challenges is the efficient scheduling of wireless resources to ensure the coexistence of various data transmission without interfering with each other and stable operation of the system. In view of 5G uplink transmission in industrial transmission scenarios, a prediction-based resource allocation scheme is proposed, which uses Auto Regressive Moving Average (ARMA) model to predict the activation rates of the next transmission cycle based on the historical data. Then the resources are dynamically reserved for periodic and emergency data, so as to minimize the impact on periodic data transmission under the premise of meeting the emergency data transmission conditions. Experimental results show that, compared with the traditional resource allocation scheme, this scheme can effectively reduce the impact of emergency data transmission on periodic data and improve the utilization of spectrum resources.

Key words: Resource allocation; 5G; Auto Regressive Moving Average (ARMA); Grant-free transmission; Uplink transmission

收稿日期: 2020-12-14; 改回日期: 2021-05-18; 网络出版: 2021-06-03

*通信作者: 伍丽娇 2313043782@qq.com

基金项目: 2019年工业互联网创新发展工程——工业企业网络安全综合防护平台,北京市自然科学基金-海淀前沿项目面向工业互联网场景无线边缘智能协同关键技术研究(L202017)

Foundation Items: The 2019 Industrial Internet Innovation Development Project of Ministry of Industry and Information Technology of P.R. China "Comprehensive Security Defense Platform Project for Industrial/Enterprise Networks", The Beijing Natural Science Foundation - Haidian Frontier Project Research on Key Technologies of Wireless Edge Intelligent Collaboration for Industrial Internet Scenarios (L202017)

1 引言

5G(5th Generation)技术相比于上一代的4G移动通信技术有了质的飞越, 5G技术支持高连接、高可靠性和低延迟的特性也推动了其在垂直行业的广泛应用。超可靠低延迟通信(ultra Reliable and Low Latency Communications, uRLLC)是5G的3大应用场景之一, 也是对可靠性和时延要求最严格的一类应用服务(一般要求99.999%的传输可靠性和1 ms用户面延迟^[1]), 它用于支持各类对时间敏感的任务关键型应用程序, 如自动驾驶、工业自动化和配电^[2]。

工业4.0推动着工业应用向自动化、智能化方向快速发展, 作为uRLLC的重要用例, 工业应用具有数据量小、端到端时延和可靠性要求严苛等特点^[3], 这也是5G网络支持工业用例所面临的主要挑战。在工业应用如煤矿采集现场的传感器网络^[4]中, 部分传感器周期性地感知周围环境数据如温湿度、瓦斯浓度、煤尘浓度等, 并将其传送给控制器用以监测外界环境的变化; 另一部分传感器只在检测到突发紧急情况时, 如发生火灾、瓦斯或煤尘浓度逼近阈值等, 会传送数据并请求快速解决问题, 若无法在极短的延迟限制内完成紧急数据传输将导致严重的经济损失甚至人身安全问题。针对这类场景中传输环境的复杂性、数据及其传输需求的多样化问题, 制定高效的无线资源调度机制以满足各种数据共存时互不干扰、稳定可靠地传输, 保障系统安全稳定的运行是一个很大的挑战。同时紧急数据和周期数据在无线网络中的协同传输是亟待解决的关键性问题, 也是本文研究的重点。

为解决上述关键问题, 前人做了很多相关的研究。目前基于优先级的抢占机制是一种重要的解决方案, Shen等人^[5]提出的PriorityMAC协议允许高优先级流量占用低优先级流量的带宽来快速接入信道, 但其以接入等待时间体现不同的优先级会增加等待延迟; Farag等人^[6]提出的SS-MAC协议允许紧急数据利用抢占周期性数据时隙的方式快速接入信道, 但其每次传输前都要紧急需求收集和计算, 会带来很大的信令开销; 基于资源完全预留的方案也是有效的传输方案之一, 文献^[7,8]为紧急资源完全保留传输资源以便紧急数据到来时的及时接入和提高紧急数据的QoS(Quality of Service), 但由于零星的紧急数据并非每个传输周期都会出现而导致资源利用率较低, 会造成严重的资源浪费。基于穿孔的传输机制致力于解决资源浪费问题, 文献^[9,10]基于穿孔的方法通过覆盖或打孔的方式占用非紧急数据的资源以保证紧急数据的传输, 但穿孔必然会

导致其他流量性能受损以致无法满足其QoS。而基于预测的方案倾向于利用节点间传输的相关性主动分配传输资源^[11,12], 只对节点间有相关性的系统有较大增益, 适用场景比较单一。

本文提出一种灵活高效的5G上行紧急业务资源预留和分配机制, 利用基于预测的方式来计算和预留下一个时隙分配给紧急业务的资源, 并利用基于竞争的多重复传输机制来传输数据量小的紧急数据, 在满足紧急数据的资源需求量的同时, 最大化系统的资源利用率, 减少对周期性数据服务质量的影响。与3GPP(3rd Generation Partnership Project)标准化中讨论的上行指示周期用户出让资源的方案相比, 本方案能避免因向基站传输信令和调度周期用户资源所需的时间, 大幅缩短了传输紧急数据的响应时间, 满足了紧急数据对于延迟的严苛要求。本文所做贡献如下:

(1) 对于紧急数据与周期数据的共存问题, 本文提出一种基于预测的资源分配方案。在没有紧急数据到来的平稳状态下, 周期数据的传输采用免授权的方式, 并预留小部分资源用于紧急数据的应急传输; 在紧急数据到来时, 触发系统的预测算法并提前预留出下一个时隙分配给紧急数据的资源量。与传统方案进行仿真比较, 验证了本文方案的有效性。

(2) 导出了紧急数据的传输资源量需求对周期数据资源量和传输的可靠性、紧急数据可靠性、系统资源利用率的影响公式, 这些公式与仿真结果非常相符, 同时优化了紧急数据的资源占用率, 在满足紧急数据的QoS的同时最小化紧急数据消耗的资源量。

2 基于预测的传输方案

2.1 系统模型

本文考虑采用星形网络拓扑的系统集中控制模型, 如图1所示。该网络模型由单个基站和一组传感器节点组成, 其中 N_p 个节点用于传输周期性监测数据, N_s 个节点用于传输紧急数据, 并由基站直接为所有的传感器节点分配无线资源。其中无线资源的分配分为时域和频域两个维度的资源分配, 如图2, 时域维度基于每个传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)分配资源, 在频域维度上, 将总带宽划分为若干个等带宽子信道, 基于子信道分配资源。单个TTI与单个子信道组成的资源块(Resource Block, RB)是设备进行数据传输的最小无线资源单元。本文考虑的数据传输场景中假设数据包在无线信道上传输失败的概率为 ρ , 激活率定义为每个传输周期紧急设备产生数据包的概率, 紧

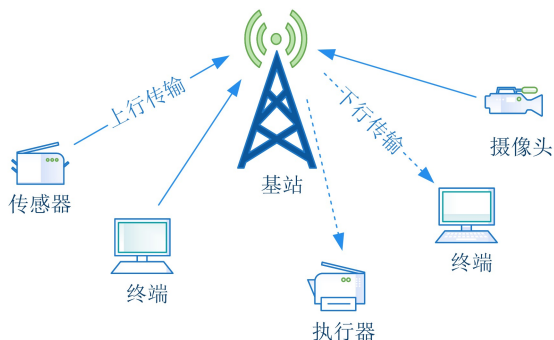


图1 系统结构图

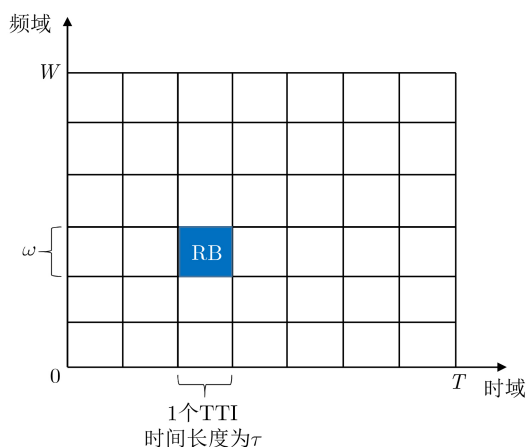


图2 无线资源分配方式

急数据激活的概率为 λ 。本文的资源分配方案包括平稳情况和紧急情况两种场景的分配，其中平稳情况定义为系统中只有周期设备传输周期数据或存在紧急数据但其激活率很低；紧急情况定义为系统中有周期数据传输的同时还存在紧急数据的传输且当前预留资源无法满足其QoS。具体的资源分配细节将在2.2节介绍。

2.2 平稳情况下的传输

在平稳情况下系统并没有紧急数据传输或者紧急节点的激活率很低，此时主要探讨周期数据的传输。给定系统的总资源带宽为 W ，为避免紧急数据到来时无可用资源而造成紧急数据无法及时传输，会提前预留 ηW ($0 < \eta < 1$) 的资源，用于紧急数据在这个资源带内基于竞争的传输，因此用于周期数据传输的资源数量为 $(1 - \eta) W$ 。对于周期性传输的数据，设备会在每一个传输周期内传输环境监测等采样数据，因此资源分配必须满足每个设备在每个传输周期都至少1次专用的传输机会；其次为保证其传输的可靠性，在时间条件允许的情况下保证周期节点设备能接收到至少1次ACK (ACKnowledge character)，并周期性地预留部分资源池用于丢失数据的重传。周期数据的传输利用5G支持的免授权方式，由基站预先配置周期性资源，用户无须每次传输都申请资源，省去了向基站发送调度请求、申请资源以及接收基站反馈的时间，也不会与其他传输系统产生干扰。

为便于计算和理解，假设紧急数据和周期数据包的大小相同为 B bit，在1个TTI (时间长度为 τ) 的时间内能传输的数据包的数量即1个TTI可以服务的周期节点数量为 M ($M < N_p$)，如图3。周期设备能忍受的延迟限制为 T ，等待接受ACK所需的时间为 t_{ack} ，则在截止时间的限制内，可以容纳重传的用户数为

$$M_{res} = M \left(\left\lfloor \frac{T}{\tau} \right\rfloor - \left\lceil \frac{t_{ack}}{\tau} \right\rceil - \left\lceil \frac{N_p}{M} \right\rceil \right) \quad (1)$$

其中， $\lfloor x \rfloor$ 表示小于等于 x 的最大整数($\lceil x \rceil$ 表示大于等于 x 的最小整数)。由于各周期节点占用独立的资

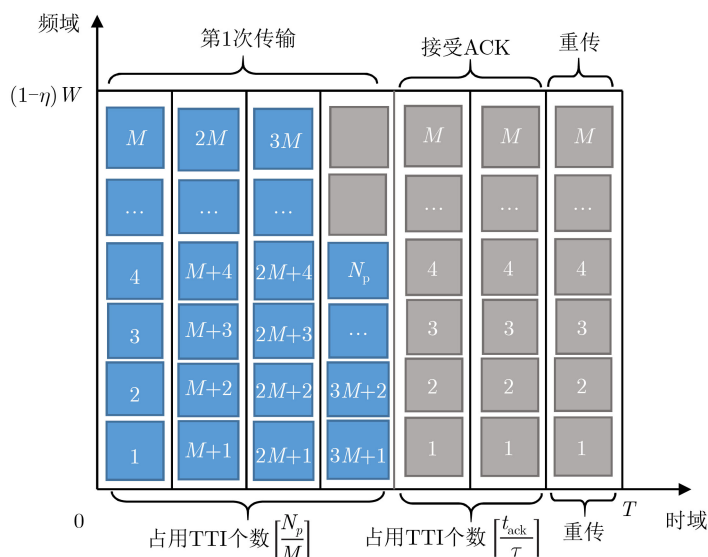


图3 周期资源分配方案

源块进行数据传输,数据包传输过程相互独立,则周期节点传输数据包的链路丢失符合二项分布 (N_p, ρ) ,其中 ρ 为链路丢失概率。周期节点 i 在延迟限制 T 时间内的传输分为第1次专用资源的传输和收到NACK后第2次在重传资源池内传输两个阶段。若周期节点在两个阶段都传输失败,则判定为该节点在当前周期传输失败。

假设第1次传输的链路丢失率为 ρ_1 ,周期节点在第1次的专用资源块上传输失败的概率为

$$P_1 = \sum_{n=0}^{N_p-1} C_{N_p-1}^n \rho_1^{n+1} (1-\rho_1)^{N_p-n-1} \quad (2)$$

若第1次传输失败的节点会在资源块数量为 M_{res} 的资源池内重传,假设在第1次传输过程中其他 (N_p-1) 个节点有 n 个节点数据包传输失败,且在第2次传输的链路丢失率为 ρ_2 ,重传输失败的概率为

$$P_2 = \begin{cases} \rho_2, & n+1 \leq M_{res} \\ \rho_2 \frac{M_{res}}{n+1} + \frac{n+1-M_{res}}{n+1}, & n+1 > M_{res} \end{cases} \quad (3)$$

此时周期用户数据包传输的失败率为 $P_{p_err} = P_1 P_2$,资源利用率: $\alpha_{sta} = (1-\eta)$ 。

2.3 紧急情况下的传输

当传输紧急数据的传感器监测到网络中出现紧急情况时,如突然发生的安全问题,会短时间内产生非周期的紧急数据,并要求在极低的延迟范围内将数据传送至目的地。当基站接收到紧急数据时,

为保证分配给紧急节点的资源充足,执行2.3.1节的激活预测算法,预测下一个传输周期紧急节点的激活率,并根据激活率计算下一传输周期紧急节点所需的资源量,动态地给节点分配资源。具体资源分配流程如图4所示。

2.3.1 紧急情况下的预测算法

由于紧急数据的传输要求非常严格,因此需要设计准确高效的预测算法才能进行合理的资源分配。常用的预测算法包括时间序列预测^[13,14]、Markov预测^[15]、神经网络^[16,17]等。ARMA预测模型融合了自回归和时间序列预测,对于单变量的预测精度较高,因此本文利用ARMA模型来预测紧急节点的未来激活率。

用基于马尔可夫调制的泊松过程来模拟数据的突发特征^[18],紧急数据的激活率随着时间变化,当紧急事件处理完成或当前预留的紧急资源够用,便重新恢复了系统的平稳状态。基于ARMA模型,紧急数据在 t 时刻的激活率 λ_t 表示为

$$\lambda_t - \sum_{i=1}^p \varphi_i \lambda_{t-i} = \xi_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \xi_{t-j} \quad (4)$$

其中, $\{\lambda_i | i=1,2,\dots,p\}$ 表示紧急数据在过去 p 个传输周期上的激活率, $\{\xi_j | j=1,2,\dots,q\}$ 表示方差为 σ^2 的白噪声, $\{\varphi_i | i=1,2,\dots,p\}$ 和 $\{\theta_j | j=1,2,\dots,q\}$ 分别表示待估计的激活率及白噪声的模型参数。对网络中紧急数据的激活率构造预测模型的具体过程如下:

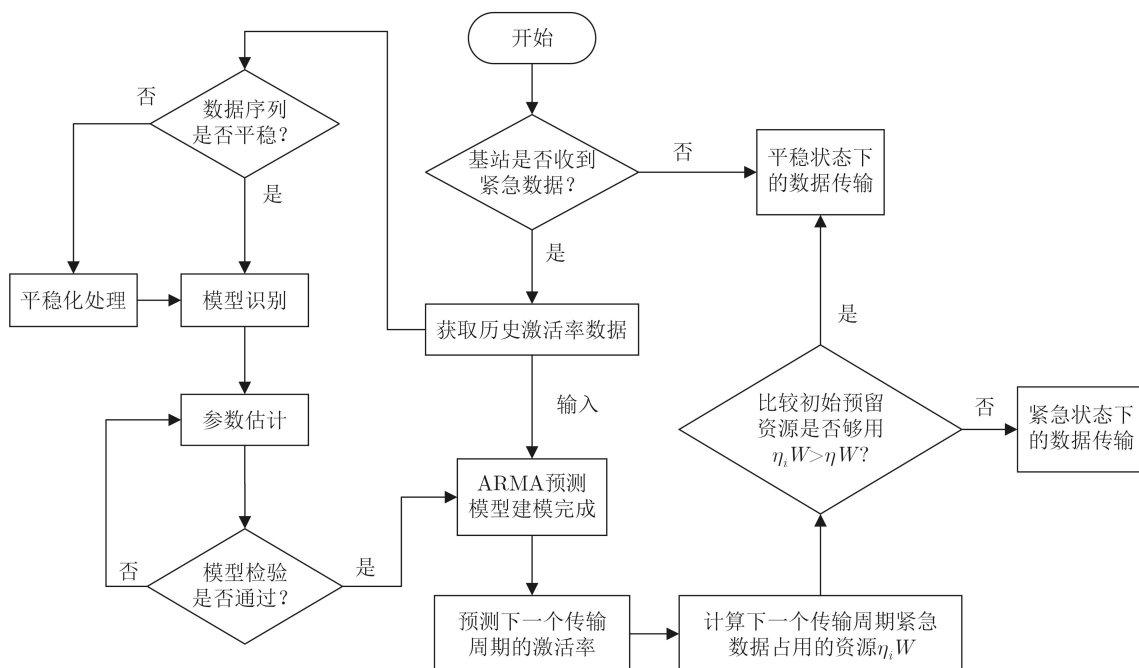


图4 基于ARMA的上行资源调度流程

(1) 时间序列数据预处理, 首先对紧急节点的历史激活率序列进行平稳性检验, 若序列不平稳则进行差分平稳化处理。完成平稳化处理后, 需对序列进行白噪声检验, 以确定数据具有分析价值。

(2) 模型识别与定阶, 本文采用最小信息准则法进行模型定阶。

(3) 模型的参数估计, 该过程用于估计参数 $\{\varphi_i | i = 1, 2, \dots, p\}$, $\{\theta_j | j = 1, 2, \dots, q\}$ 及噪声方差 σ^2 , 本文采用最小二乘估计法进行参数估计。

(4) 模型的检验与预测, 本文通过判定残差序列是否为白噪声序列来进行模型检验, 采用最小均方误差预测法, 根据预测误差的平方达到最小的原则实现预测。

2.3.2 紧急情况下的传输方案

由于总带宽不变, 当紧急数据的资源数量发生变化时, 若当前预留的紧急资源无法满足紧急数据的传输要求, 就需要占用周期节点的部分资源, 周期数据的带宽会相应地发生变化。为了最大限度地保证周期数据的可靠性, 并尽量减少系统的信令开销, 在一个时间长度为 T 的传输周期内动态地为周期数据分配传输资源; 假设在第 i 个传输周期紧急数据的激活率为 λ_i , 紧急数据的资源占用比例为 η_i , 则具体计算讨论如下。

对于周期数据, 其可用的带宽为 $(1 - \eta_i)W$, 当周期数据的可用带宽减少时, 为最大限度地保证周期数据的QoS, 必须重新为周期数据分配资源块, 而不是任由被占用资源的用户传输失败, 采取的措施是在延迟范围内缩短重传资源池的大小, 尽量减少紧急数据对周期数据的影响。针对周期数据的动态调度, 依旧采用上行免授权的自由传输机制, 当周期用户的资源池变化时, 基站向周期性用户发送含有调度信息的DCI数据包, 以指示当前周期每个用户的传输资源分配情况。

在带宽变化后, 假设在当前传输周期内1个TTI时间内能传输的用户数量为 M_i , 则1个传输周期内能传输的最大用户数量为 $M_{i_max} = M_i \lfloor T/\tau \rfloor$, 则周期用户的传输失败率计算分3种情况讨论如下:

(1) 当 $M_{i_max} \leq N_p$ 时, 表示当前留给周期用户的资源不能保证每个周期数据包都有传输机会, 如图5(a)所示, 此时最多能传输 M_{i_max} 个用户的数据包, 剩余的 $K = N_p - M_{i_max}$ 个用户注定传输失败, 且无重传资源池可用, 此时 M_{i_max} 个用户的传输错误率为

$$P_{i_1} = \sum_{n=0}^{M_{i_max}-1} C_{M_{i_max}-1}^n \rho_1^{n+1} (1 - \rho_1)^{M_{i_max}-n-1} \quad (5)$$

则周期用户传输失败率表示如式(6), 其中公式的第1部分表示没有资源可以传输导致的传输失败, 第2部分表示在传输过程中的失败率

$$P_{i_err} = \frac{N_p - M_{i_max}}{N_p} + \frac{M_{i_max}}{N_p} P_{i_1} \quad (6)$$

(2) 当 $M_{i_max} - M_i \lfloor t_{ack}/\tau \rfloor \leq N_p < M_{i_max}$ 时, 当前资源量并不足以满足周期用户接受ACK和进行重传, 但满足所有的周期用户能完成第1次数据包的传输, 如图5(b)所示, 此时周期用户传输的失败率就是第1次传输的失败率, 即

$$P_{i_err} = P_1 \quad (7)$$

(3) 当 $N_p < M_{i_max} - M_i \lfloor t_{ack}/\tau \rfloor$ 时, 表示每个周期用户都至少有1次传输机会, 且有重传机会, 与平稳情况下的传输情况相同, 则在截止时间的限制内, 可以容纳重传的用户数为 $M_{i_res} = M_i (\lfloor T/\tau \rfloor - \lfloor t_{ack}/\tau \rfloor - \lfloor N_p/M_i \rfloor)$, n 表示其他 $(N_p - 1)$ 个用户中传输失败的用户数量, 则周期用户重传时的失败率为

$$P_{i_2} = \begin{cases} \rho_2, & n + 1 \leq M_{i_res} \\ \rho_2 \frac{M_{i_res}}{n + 1} + \frac{n + 1 - M_{i_res}}{n + 1}, & n + 1 > M_{i_res} \end{cases} \quad (8)$$

此时周期用户传输失败的概率为: $P_{i_err} = P_1 P_{i_2}$ 。

对于非周期的紧急数据传输, 由于其并不是在每个时隙都会有数据传输, 为其分配固定的资源是非常不合理的。因此采用基于竞争的方式传输紧急数据, 在预留的资源池中, 每个用户随机选择1个子信道来传输其数据, 当两个及以上的用户在同一个时隙选择同一个子信道传输时, 就会发生传输冲突而导致数据传输失败; 为减少冲突导致的传输失败和提升传输的可靠性, 本文采用多重传输机制, 用户设备在连续的时隙随机选择子信道发送 β 个数据包的副本, 预留给紧急数据的带宽为 $\eta_i W$, 为保证最大限度地提高带宽利用率并减小对周期用户的影响, 需要找到最小的带宽 $\min(\eta_i W)$ 以保证紧急数据的QoS要求。

预留给紧急资源的带宽 $\eta_i W$ 在1个TTI能传输的数据包个数 $M_{si} = M_i \lfloor \eta_i / (1 - \eta_i) \rfloor$, 则当前传输周期内可传输紧急数据包的总数量为: $M_{si_sum} = M_{si} \lfloor T/\tau \rfloor$, 为保证紧急用户的传输可靠性, 每个紧急用户传输 β 个数据包, 当前用户的所有 β 个数据包与其他用户的数据包占用相同的资源块进行传输时, 就会发生碰撞而导致传输失败。当前用户发送的 β 个数据包中至少有1个数据包成功传输就可算作

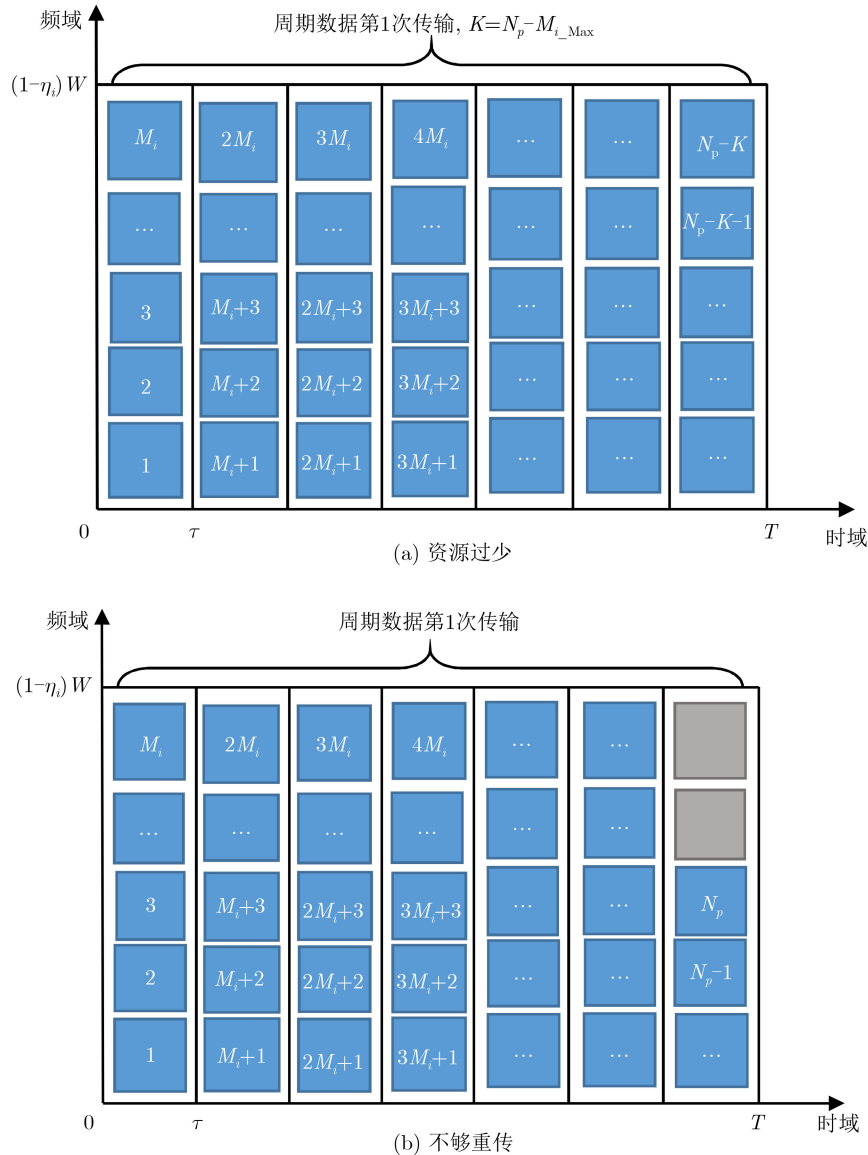


图5 紧急情况下周期数据的传输方案

当前用户传输成功。假设当前用户有 j 个数据包不与其他用户发生碰撞概率为 $p_c(i, j)$ ，也即是其他用户没有数据传输或者传输了但没有占用当前 j 个数据包所占用的资源块，则

$$p_c(i, j) = (1 - \lambda_i) + \lambda_i \frac{C_{M_{si_sum} - j}^\beta}{C_{M_{si_sum}}^\beta} \quad (9)$$

因此当前用户与其他 $(N_s - 1)$ 个用户没有发生碰撞的概率为

$$p_{col} = \sum_{j=1}^{\beta} (-1)^{j+1} C_{\beta}^j p_c(i, j)^{(N_s-1)} \quad (10)$$

在考虑链路丢失的情况下，紧急用户传输失败的概率为

$$P_{fail} = 1 - \sum_{j=1}^{\beta} (-1)^{j+1} C_{\beta}^j p_c(i, j)^{(N_s-1)} (1 - \rho_1)^j \quad (11)$$

此时为满足紧急数据的QoS所需要的最小带宽应满足

$$\left. \begin{aligned} &\min(\eta_i W) \\ &C1: T_{delay} < T \\ &C2: P_{fail} \leq P_f \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中，C1表示紧急数据需要在延迟要求范围内完成传输， T_{delay} 表示紧急数据完成传输所需的时间，C2表示紧急数据传输的丢失率需足够小以满足可靠性要求。需要找到最小的 η_i 使得在限制条件下 $\eta_i W$ 最小，由于当前传输方案的前提是优先延迟要求，因此条件C1始终能满足。C2为非线性约束条件。本文利用内点罚函数法，构造惩罚函数 $F(\eta_i, u) = \eta_i W - u(P_{fail} - P_f)$ ，其中 u 是很小的正数，将该优化问题转化为在可行域为 $S = \{\eta_i | 0 < \eta_i < 1\}$ 的无约束非线性规划问题 $\min F(\eta_i, u)$ ，然后通过梯度下降法求解最优解 η_i 。

在此紧急状态下，紧急数据和周期数据在争相占用带宽，因此当前带宽利用率为： $\alpha_{urg} = 1$ 。

3 仿真分析

为验证本文提出的基于预测的上行资源分配策略的有效性，本文利用MATLAB工具进行仿真，并分别与基于优先级抢占机制^[5]和始终预留资源机制^[7]进行对比验证。具体仿真参数如表1所示。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
数据包大小 B	100 bit
紧急设备数量 N_s	30
周期设备数量 N_p	22
总带宽 W	15 MHz
子载波间隔 ω	15 kHz
最小传输时间间隔 τ	0.144 ms(2个符号长度)
ACK时间间隔 t_{ack}	0.288 ms
延迟限制 T	1 ms
丢失率限制 P_t	10^{-5}
重传数据包数量 β	3

本文利用基于马尔可夫的泊松调制过程来模拟网络流量的突发状态被证明是有用的，并大量用于在具有突发性网络数据的建模，首先将模拟产生的紧急设备节点的上行激活率输入建立的ARMA模型中，预测结果如图6所示，预测数据与历史数据的走势基本一致，以验证该预测模型的有效性和准确性。在总资源量一定的条件下，依据时隙变化的激活率对紧急数据和周期数据的带宽分配的影响如图7所示，依据统计激活率变化对于紧急数据和周期数据的带宽分配的影响如图8所示。由图可知，当激活率较小时，预留资源完全满足紧急数据的传输要求，当激活率过大时，紧急数据会占用全部的资源，此时便需要调整资源总量，但这种情况一般不会出现。

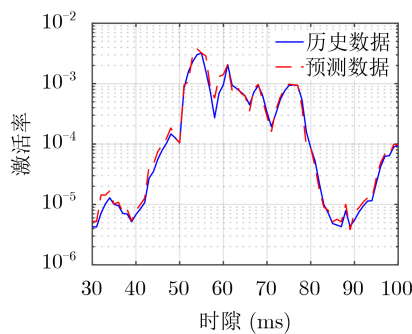


图 6 预测结果

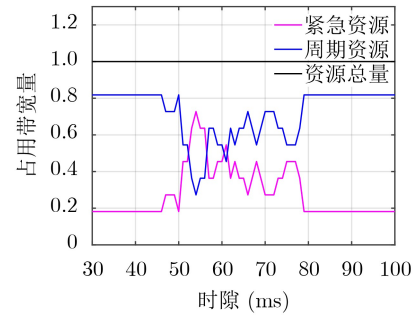


图 7 每传输周期资源占用率

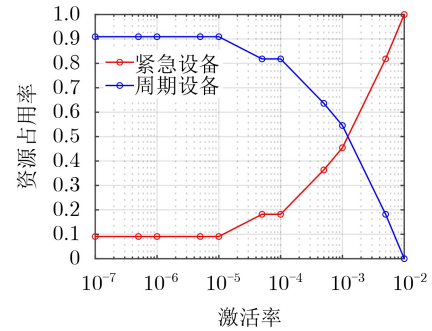


图 8 不同激活率下的资源占用率

紧急情况下的资源分配过程主要是在每个传输周期基于紧急设备的历史激活率预测下一个周期的激活率，依据预测的激活率计算在满足紧急数据可靠性要求的前提下最小化紧急数据的预留资源，以减少对周期数据的影响。在仿真过程中，采用polar编码的编码效率为 $\delta = 2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ，则其对应的链路丢失率 $\rho = 0.001$ ，为便于计算我们假设在周期用户第1次传输和重传时的链路丢失率为 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ ，计算可得数据包大小为 B 的数据包传输1次需要RB的数量为 $R = \lceil B/(\delta\omega\tau) \rceil$ ，则在可用带宽为 $(1 - \eta)W$ 条件下1个TTI能传输的用户数量为 $M = \lfloor [(1 - \eta)W]/(R\omega) \rfloor$ 。如图9、图10所示，在优先满足紧急数据可靠性的前提下，为满足周期数据的可靠性要求，与基于抢占的传输方案相比，本文提出的基于预测的资源预留方案可容纳更高层次的紧急数据突发，且由于紧急数据的激活率增加，基于预测的方案对周期数据的影响要更小，也验证

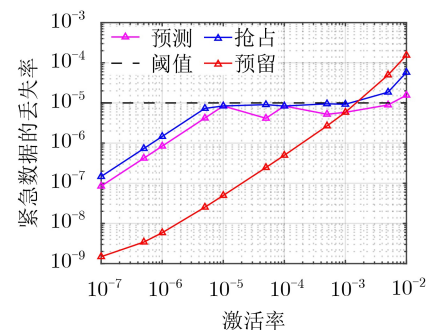


图 9 紧急数据的可靠性比较

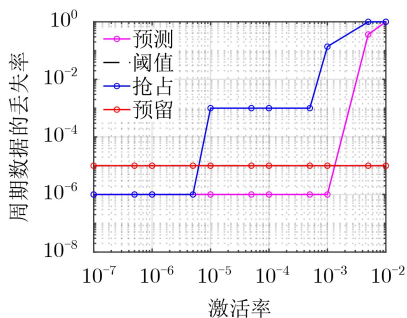


图10 周期数据可靠性比较

了本方案的有效性；而始终预留的方案以牺牲更多的资源为代价，始终保持周期数据的可靠性，这也是导致其资源利用率过低的原因。

本文利用基于预测的激活率动态为紧急数据分配带宽资源，零星的紧急业务并不是在每个传输周期都有数据需要传送，因此持续性地为紧急数据预留资源便会造成极大的资源浪费，而本方案基于预测的预留紧急数据的资源，与始终预留的方案相比能在满足紧急数据可靠性要求的同时减少带宽浪费，提高资源利用率，如图11所示。在不同的激活率条件下，同时满足紧急数据和周期数据传输要求时，本方案与基于抢占和始终预留的方案对总资源的需求量如图12所示，基于抢占的方案没有预先预留用于紧急数据传输的资源，因此在紧急数据的激活率较低时消耗的资源较少，但也因此在紧急数据的激活率升高时，对周期数据QoS的影响较大。

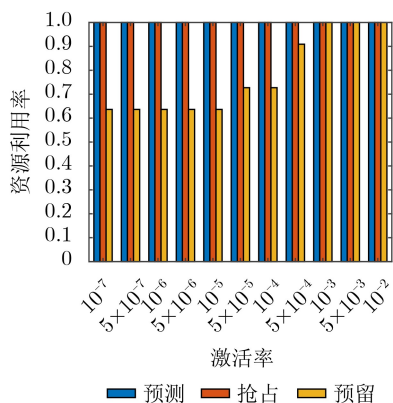


图11 紧急状态资源利用率比较

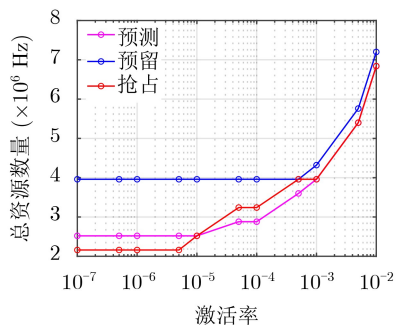


图12 资源消耗量比较

4 结束语

为解决工业应用中周期性数据与非周期性数据的协同传输问题，本文针对5G上行链路数据传输过程，提出一种基于预测的资源分配方案，对于没有紧急数据传输平稳状态，采用免授权的5G上行自由传输方案，大幅减少数据的端到端传输延迟，并能进一步提高传输的可靠性。对于需要传输紧急数据的紧急状态，利用ARMA模型根据紧急数据的历史传输周期的激活率预测下一传输周期的紧急数据激活率，根据预测激活率动态地为周期数据和紧急数据预留资源，并采用多重竞争的方案来完成紧急数据的传输，以在满足紧急数据传输条件的前提下最小化对周期数据传输的影响。仿真实验表明，本方案能在一定程度上减少紧急数据对周期数据的传输影响，并能提高物理资源利用率。但本方案只研究了上行链路的传输情况，未来的工作将致力于研究下行链路传输过程中周期数据与紧急数据的协同传输问题。

参考文献

- [1] ESSWIE A A and PEDERSEN K I. Multi-user preemptive scheduling for critical low latency communications in 5G networks[C]. 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications, Natal, Brazil, 2018: 136–141. doi: [10.1109/ISCC.2018.8538471](https://doi.org/10.1109/ISCC.2018.8538471).
- [2] PARVEZ I, RAHMATI A, GUVENC I, *et al.* A survey on low latency towards 5G: RAN, core network and caching solutions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3098–3130. doi: [10.1109/COMST.2018.2841349](https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2841349).
- [3] VITTURI S, ZUNINO C, and SAUTER T. Industrial communication systems and their future challenges: Next-generation ethernet, IIoT, and 5G[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 944–961. doi: [10.1109/JPROC.2019.2913443](https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2913443).
- [4] 刘瑞祥. 基于物联网的煤矿井下监测网络平台关键技术研究[D]. [博士学位论文], 中国矿业大学(北京), 2015.
LIU Ruixiang. Research on the key technology of coal mine monitoring network platform based on internet of things[D]. [Ph. D. dissertation], China University of Mining and Technology (Beijing), 2015.
- [5] SHEN Wei, ZHANG Tingting, BARAC F, *et al.* PriorityMAC: A priority-enhanced MAC protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 824–835. doi: [10.1109/TII.2013.2280081](https://doi.org/10.1109/TII.2013.2280081).
- [6] FARAG H, GIDLUND M, and ÖSTERBERG P. A delay-bounded MAC protocol for mission- and time-critical applications in industrial wireless sensor networks[J]. *IEEE*

- Sensors Journal*, 2018, 18(6): 2607–2616. doi: [10.1109/JSEN.2018.2793946](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2793946).
- [7] ELAYOUBI S E, BROWN P, DEGHEL M, *et al.* Radio resource allocation and retransmission schemes for URLLC over 5G networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4): 896–904. doi: [10.1109/JSAC.2019.2898783](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2898783).
- [8] CONDOLUCI M, MAHMOODI T, STEINBACH E, *et al.* Soft resource reservation for low-delayed teleoperation over mobile networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 10445–10455. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2707319](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2707319).
- [9] CHEN Hongyang, WU Jianming, and SHIMOMURA T. New reference signal design for URLLC and eMBB multiplexing in new radio wireless communications[C]. 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Bologna, Italy, 2018: 1220–1225.
- [10] ALSENWI M, TRAN N H, BENNIS M, *et al.* eMBB-URLLC resource slicing: A risk-sensitive approach[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 740–743. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2900044](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2900044).
- [11] LI Mingyan, GUAN Xinping, HUA Cunqing, *et al.* Predictive pre-allocation for low-latency uplink access in industrial wireless networks[C]. IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications, Honolulu, USA, 2018: 306–314.
- [12] BROWN J and KHAN J Y. A Predictive resource allocation algorithm in the LTE uplink for event based M2M applications[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(12): 2433–2446. doi: [10.1109/TMC.2015.2398447](https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2398447).
- [13] 唐伦, 杨希希, 施颖洁, 等. 无线虚拟网络中基于自回归滑动平均预测的在线自适应虚拟资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 16–23. doi: [10.11999/JEIT180048](https://doi.org/10.11999/JEIT180048).
TANG Lun, YANG Xixi, SHI Yingjie, *et al.* ARMA-prediction based online adaptive dynamic resource allocation in wireless virtualized networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 16–23. doi: [10.11999/JEIT180048](https://doi.org/10.11999/JEIT180048).
- [14] 陈强. 基于ARMA模型预测的云计算资源调度策略研究[D]. [硕士学位论文], 重庆大学, 2016.
CHEN Qiang. Cloud computing resource scheduling strategy based on ARMA model prediction[D]. [Master dissertation], Chongqing University, 2016.
- [15] LIU C R, DUAN H Y, CHEN P W, *et al.* Improve production efficiency and predict machine tool status using Markov chain and hidden markov model[C]. 2018 8th International Conference on Computer Science and Information Technology, Amman, Jordan, 2018: 276–281.
- [16] 熊余, 杨娅娅, 张振振, 等. 软件定义时分波分复用无源光网络中基于带宽预测的资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(8): 1885–1892. doi: [10.11999/JEIT180837](https://doi.org/10.11999/JEIT180837).
XIONG Yu, YANG Yaya, ZHANG Zhenzhen, *et al.* Resource allocation based on bandwidth prediction in software-defined time and wavelength division multiplexed passive optical network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(8): 1885–1892. doi: [10.11999/JEIT180837](https://doi.org/10.11999/JEIT180837).
- [17] ZHANG Zhengming, CHEN Hongyang, HUA Meng, *et al.* Double coded caching in ultra dense networks: Caching and multicast scheduling via deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(2): 1071–1086. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2955490](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2955490).
- [18] 师圣蔓. 基于机器学习的网络流量预测与应用研究[D]. [硕士学位论文], 北京邮电大学, 2019.
SHI Shengman. Research on network traffic prediction and application based on machine learning[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- 许方敏: 男, 1982年生, 副教授, 研究方向为未来网络架构及关键技术、大数据分析及应用、工业物联网。
伍丽娇: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为无线网络、时间敏感网络。
赵成林: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为无线通信及信号处理、认知无线电、软件定义网络、物联网技术及其应用。

责任编辑: 马秀强