



研究与开发

交通应急通信中信道自适应的业务接入机制

王娇, 邱恭安, 张士兵

(南通大学信息科学技术学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 在高密度蜂窝车联网 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 中, 群集通信终端的有效阵列接入方法是多业务性能保障和有限频谱效率提升的前提。利用蜂窝车联网中终端计算能力, 提出了信道自适应的业务接入机制。该机制由基站估计当前区域通信密度, 生成通信密度关联的接入类别限制 (access class barring, ACB) 因子, 并在通信区域内广播; 随后, 车载通信终端根据接收基站广播信号的信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 和 ACB 因子计算自适应信道状态的接入概率, 并比较接入概率和 ACB 因子。当接入概率大于 ACB 因子时, 通信终端以最小接入概率从前导码池中随机选择一个前导码上传到基站, 以获得与信道状态匹配的接入机会。仿真结果表明, 在高密度通信状态下, 与 S-ALOHA 协议和 M2M-OSA 方案相比, 所提方案平均接入碰撞概率降低了约 5%~20%, 有效地减小了平均接入时延。

关键词: 车联网; 群集通信; 信道状态感知; 阵列接入

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022009

Adaptive channel status based access class barring scheme for traffic emergency communication

WANG Jiao, QIU Gong'an, ZHANG Shibing

School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China

Abstract: In high-density cellular vehicle-to-everything (C-V2X), effective massive access method of cluster communications is the basis to assure the performance index for different services and enhance the spectrum efficiency under limited resource. An improved access class barring (ACB) scheme was proposed using channel status information based on computing power of communication terminal in C-V2X. The base station estimated the communication density within its cover range, generated the ACB factor using the communication density, and broadcasted the ACB. According to signal to interference plus noise ratio (SINR) and ACB factor of the received broadcast signal, the vehicular communication terminal computed the access probability, and compared with ACB factor. When the access probability was more than the ACB factor, the terminal selected a preamble randomly from the preamble pool with the probability which equal to the access probability or one. The terminal transmitted the selected preamble to the base station for finishing the access program. The simulation results show that the scheme proposed has 5%~20% advantage over S-Aloha and machine to machine opportunistic splitting algorithm (M2M-OSA) schemes in average access collision probability. It reduces the average access delay effectively.

Key words: internet of vehicles, cluster communication, channel status awareness, massive access



0 引言

蜂窝车联网 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 应用新兴通信技术在广覆盖、高容量、高移动支持的蜂窝网络中实现车联网应用, 是移动互联网应用的新场景和业务增长点, 是 5G 中最受关注的物联网应用^[1-2]。5G 网络是多种新型无线接入技术与移动互联网的融合, 具有信号稳定、传输速率高、时延低等特征, 能够承担交通状态信息业务与交通网络应用的通信纽带作用。

车联网通信具有和传统的人际 (human-to-human, H2H) 通信不同的一些特点: 车联网的应用场景更加丰富, 包括车辆对行人 (vehicle-to-people, V2P)、车辆对车辆 (vehicle-to-vehicle, V2V)、车辆对基础设施 (vehicular-to-infrastructure, V2I) 和车辆对网络 (vehicular-to-network, V2N) 通信; 车联网应用需要车辆可以实时与周围环境进行信息交换, 这对通信的时延要求更高; 在堵车等小范围聚集大量节点场景下, 并发、频繁的实时数据交互容易对空口信道造成压力, 这要比传输传统 H2H 通信更有效的接入方式。在正常交通运输状态下, 路网中行驶车辆一般呈稀疏分布, 5G 网络频谱资源能够同时满足车联网应用和 H2H 通信等多种业务需求。当某路段发生交通异常导致相关路段上聚集大量的车辆时, 在有限区域和有限时间范围内形成高密度群集 (cluster) 通信场景。群集通信终端需要竞争接入区域基站的有限频谱资源, 潜在的业务拥塞导致短暂的业务失效和临时性网络性能降级, 其根本原因是蜂窝网络接入机制主要为服务 H2H 通信而设计优化, 在面对短时局部突发的大规模车联网应用消息时, 会存在频谱资源效率低下和接入拥塞问题^[3]。

在解决突发短数据业务接入蜂窝网络过程中的拥塞问题上, 接入类别限制 (access class barring, ACB) 方法是最有效的多业务接入机制^[4]。

在各种优化的 ACB 算法中, 第一类方法是建立突发数据流到达过程的数学模型^[5-8], 根据请求接入终端数和成功接入终端数, 应用最大似然估计方法预测请求接入终端数, 并计算优化的 ACB 因子值, 通过调节允许接入终端数以避免接入过程中产生拥塞, 但该类方法性能受限于业务流模型的准确性。第二类方法是通过区分优先级为不同类终端赋予差异化接入机会^[9-10], 分配与优先级关联的 ACB 因子门限, 则终端获得前导码资源的概率不同, 但该类方法需要为不同等级终端设置差异化的检测门限, 改变了蜂窝网络随机接入机制, 且优先级的区分存在行业差异性。第三类方法是通过随机接入控制与上行链路资源分配联合优化过程^[11-13], 根据上行链路既有资源和前导码池资源推导出优化的 ACB 因子值, 实现业务接入与业务传输的一致性, 但该类方法通常以最大化静态机器类通信 (machine-type communication, MTC) 的系统吞吐量为优化目标, 默认无线链路为慢变信道, 不适合具有强动态性的车联网通信场景。

针对蜂窝车联网中高密度群集多业务通信场景下随机接入控制问题, 借助 5G 基站和通信终端的计算能力, 在不改变既有蜂窝网络接入过程的基础上, 本文提出了一种信道自适应的业务接入机制——信道自适应接入类别限制 (adaptive channel status access class barring, ACS-ACB) 机制。在该方案中, 将允许接入基站的概率定义为信道状态和车联网通信密度的函数, 减小通信终端随机接入的盲目性, 降低接入过程中的碰撞概率。随后, 关联信道状态与选择前导码的机会概率, 使信道状态好的通信终端具有更高的接入概率, 提高接入信道中数据传输的可靠性, 从而提高频谱资源效率。

1 系统模型

在 5G 蜂窝车联网中, 设某基站通信覆盖的区域路段上, H2H 业务和车联网应用等多种业务共

享有限无线频谱资源。当该路段交通异常导致车辆聚集时,车联网终端通过竞争接入蜂窝网络频谱资源进行通信,以向基站上传周期性交通状态消息、实时传播时延敏感的突发性交通安全预警消息和 H2H 业务消息,蜂窝车联网中群集通信模型如图 1 所示。车辆的高速移动和车流量分布的不均匀性会带来短时局部网络接入终端数量过多,接入冲突概率增加,增大了接入时延,降低了系统吞吐量。

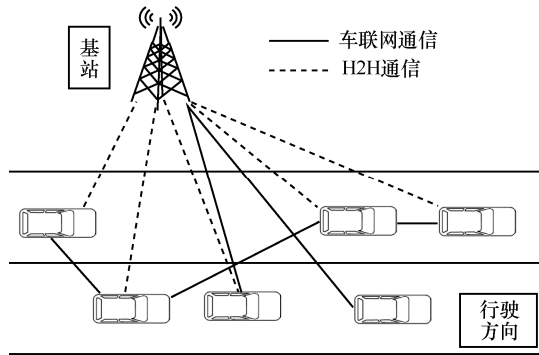


图 1 蜂窝车联网中群集通信模型

在蜂窝多业务通信竞争接入过程中,通信终端共享有限数量的前导码资源,并通过物理随机接入信道 (physical random access channel, PRACH) 向基站上传选择的前导码。设某时隙 T_s 内基站广播的 ACB 因子为 p , 请求接入基站的通信终端数为 N , 终端生成随机数为 $q, q \in (0,1)$ 。当 $q < p$ 时, 设有 N_p 个终端接入请求被允许在时隙 T_s 内开始接入进程, 随后 N_p 个终端从前导码池中随机选择一个前导码通过 PRACH 信道上传至基站。当 N_p 个终端中有超过一个终端选择相同前导码时, 将发生接入碰撞并导致接入失败。因此, 成功通过基站接入网络的通信终端数为 N_s , ACB 阵列接入原理如图 2 所示^[14]。

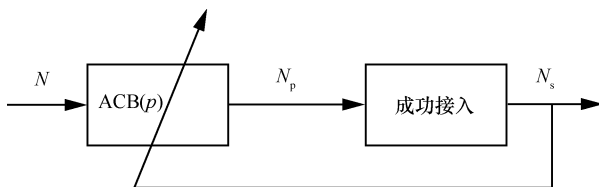


图 2 ACB 阵列接入原理

在车联网中,车载通信终端的高动态性使得无线信道具有强时变性,而随机数 q 独立于终端的通信状态,使得业务通信的信道接入具有一定的盲目性,因此,需要提高群集通信阵列接入方法的有效性和业务接入的成功率。

2 信道自适应的业务接入机制

在交通路网中,当有限区间道路上车辆聚集形成密集交通场景时,群集车辆平均车速低于道路正常通行下限速度或不能满足交通安全规定的车间间距,车辆的高速移动性导致车载通信无线信道具有强时频衰落特性,通信信道质量与车辆相对位置间具有紧密相关性,因此,车载通信终端使用所接收基站广播信号的信干噪比值估计无线信道状态。

在基站通信投影路段上,设车辆 i 接收基站广播信号的信干噪比值为 $SINR_i$, 且 $SINR_i$ 如式 (1) 所示^[15]。

$$SINR_i = \frac{P_i G_i}{N_0 + \sum_{j=1}^k P_j G_{ij}} \quad (1)$$

其中, P_i 为车辆 i 通信终端的发射功率, G_i 为车辆 i 通信终端和基站间的信道增益, N_0 为信道中平均噪声功率, k 为对车辆 i 通信信道产生干扰的干扰源总数, P_j 为第 j 个干扰源的发射功率 ($i \neq j$), G_{ij} 为车辆 i 通信终端与干扰源间的信道增益。该接收信干噪比值反映了车辆与基站间相对位置上的信道状态。

根据蜂窝网络阵列接入过程, 基站可以根据车载通信终端前期通信消息的标识符, 估计当前时隙请求接入网络的通信终端数量 N 。在经过前一时隙阵列接入的时频资源分配后, 基站可获得前导码池中剩余前导码数量 M , 则基站计算当前时隙 ACB 因子 p 如式 (2) 所示, 并在通信覆盖区域内广播该因子。

$$p = \frac{M}{N} \quad (2)$$

其中, $N > M$, 该 ACB 因子 p 反映了基站通信范围

内的通信业务密度。

在车联网中, 设以最大数据传输速率传输时能够成功解码的通信信号信干噪比值为 $\text{SINR}_{\max}$, 若车辆 i 接收到基站广播信号的信干噪比值为 SINR_i , 定义车辆 i 通信信道状态关联的接入概率 r_i 如式 (3) 所示。

$$r_i = \left(\frac{\text{SINR}_i}{\text{SINR}_{\max}} \right)^{1/p} \quad (3)$$

在当前时隙中, 比较车辆 i 接入概率 r_i 和 ACB 因子 p 。当 $r_i > p$ 时, 车辆 i 以概率 $r_i^* = \min\{1, r_i\}$ 从前导码池中随机选择一个前导码, 并通过 PRACH 信道上传到基站, 否则该时隙内不选择前导码, 进入退避过程。信道状态自适应的业务接入流程如图 3 所示。

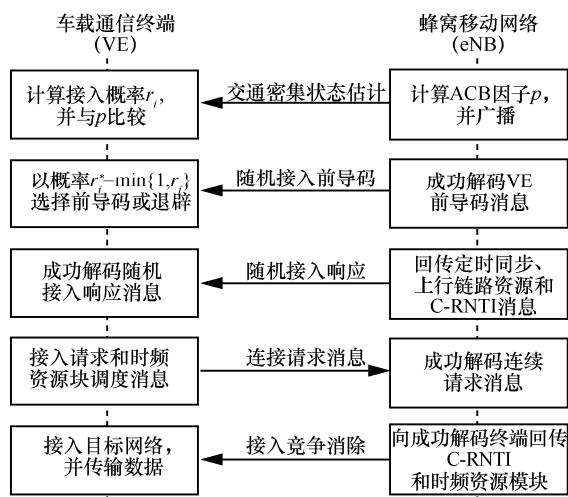


图3 信道自适应的业务接入流程

由图 3 可知, ACS-ACB 机制通过基站计算当前通信密度, 寻找信道状态好的车载通信终端, 并以信道状态关联的概率选择前导码请求接入通信网络。随后, 通过蜂窝网络多业务竞争接入的 4 次“握手”过程完成接入请求过程或退避^[16]。

由此, ACS-ACB 机制的重要步骤可以总结为以下 4 个。

步骤1 当车载*i*通信终端的接入概率大于接收到的ACB因子*p*时,以概率 $r_i^* = \min\{1, r_i\}$ 随机选择一个前导码,并通过PRACH上传到基站。

步骤 2 基站通过物理下行控制信道 (physical downlink control channel, PDCCH) 返回随机接入响应 (random access response, RAR) 消息, 该消息包括时间同步 (timing alignment, TA)、蜂窝无线网络临时标识符 (cell-radio network temporary identifier, C-RNTI) 等信息。

步骤 3 车载通信终端通过物理上行共享信道 (physical uplink shared channel, PUSCH) 将步骤 (2) 中接收的 C-RNTI 上传到基站。

步骤 4 基站通过物理下行共享信道 (physical downlink shared channel, PDSCH) 为成功接入的车载通信业务分配请求的时频资源。

在密集群集通信场景中，当两个及以上车载通信终端的步骤（1）中同时选择相同前导码时，步骤（2）中通信终端都会收到相同的 RAR 消息，则步骤（3）中这些终端会使用相同的 PUSCH 时频资源向基站上传 C-RNTI，并产生竞争接入碰撞，导致接入失败。

3 接入碰撞概率分析

在密集通信状态下, 设第 k 时隙中请求接入网络的通信终端数为 N_k , 前导码池中有 M_k 个前导码, 车载通信终端 $i(i \in N_k)$ 以自适应信道状态接入概率 r_i^* 从前导码池中随机选择一个前导码上传基站。若第 $m(m \in M_k)$ 前导码仅被唯一一个通信终端 i 选择, 则该时隙内终端 i 成功接入网络。设第 k 时隙中 ACB 因子为 p_k , 则第 i 终端选择第 m 前导码的概率 p_m 为:

$$p_m = r_i^* \cdot \frac{p_k}{M_k} = \begin{cases} \frac{1}{M_k} \cdot \frac{\text{SINR}_i}{\text{SINR}_{\max}}, & \text{SINR}_i \leq \text{SINR}_{\max} \\ \frac{1}{M_k}, & \text{SINR}_i > \text{SINR}_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

在第 k 时隙中, 设同时选择第 m 前导码的终端数量为 N_{km} , 则第 k 时隙内没有终端选择第 m

前导码的概率为:

$$P(N_{k,m}=0)=\prod_{i=1}^{N_k}(1-p_m) \quad (5)$$

其中, $N_k = \begin{cases} N_{k-1} - S_{k-1} + a_k, & k \leq T_s \\ N_{k-1} - S_{k-1}, & k > T_s \end{cases}$, N_{k-1} 为第

$(k-1)$ 时隙中请求接入网络的通信终端数, S_{k-1} 为第 $(k-1)$ 时隙中成功接入网络的通信终端数, a_k 为第 k 时隙内新到达的请求接入网络的通信终端数, T_s 为时隙时长。

在第 k 时隙中, 有且仅有一个终端选择第 m 前导码的概率为:

$$P(N_{k,m}=1)=C_{N_k}^1 \cdot p_m \cdot \prod_{i=1}^{N_k-1}(1-p_m) \quad (6)$$

在第 k 时隙中, 当有超过一个终端同时选择第 m 前导码时发生接入碰撞, 则碰撞概率为:

$$\begin{aligned} P(N_{k,m}>1) &= 1 - P(N_{k,m}=0) - P(N_{k,m}=1) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^{N_k}(1-p_m) - C_{N_k}^1 \cdot p_m \cdot \prod_{i=1}^{N_k-1}(1-p_m) \\ &= 1 - (1 - \frac{N_k+1}{N_k} p_m) \prod_{i=1}^{N_k-1}(1-p_m) \\ &\approx 1 - \prod_{i=1}^{N_k}(1-p_m), \quad N_k \gg 1 \end{aligned} \quad (7)$$

由式 (7) 可知, 碰撞概率与前导码被选择的概率呈正向变化关系, 且前导码被选择概率可由式 (4) 确定。

4 仿真与分析

在基站通信范围为 2 km 的双向四车道上, 由于某单向两车道上的交通异常事件形成高密度交通流状态, 车速为 0~10 km/h, 车间间距为 5~10 m, 反向两车道处于正常交通密度状态, 车速为 20~40 km/h, 车间间距为 20~40 m, 平均车载通信终端数为 3 台, 则基站通信范围内阵列接入终端数约为 1 500~3 000 台, 无线通信信道为对数距离多径衰落模型 (log-distance path loss model), 在密集通信状态下, 车辆通信终端通过

蜂窝网络阵列接入, 可用前导数量设置为 54, 每个随机接入前导占用对应于两帧结构的 6 个连续资源块的带宽, 即 PRACH 配置参数设置为 6, 请求接入周期为 10 ms, 退避指数为 20 ms, 在 MATLAB 软件下进行仿真, 主要仿真参数设置见表 1。

表 1 主要仿真参数设置

参数名称	参数取值
分组到达率 $\lambda/(s^{-1})$	1/60
前导码池数量 M	54
PRACH 配置参数	6
接入周期 TA/ms	10
退避指数 W/ms	20

分别与时隙 ALOHA 协议 (S-ALOHA)、M2M-OSA^[7]对比了平均接入碰撞率和平均接入时延性能指标, 平均接入碰撞率如图 4 所示, 平均接入时延如图 5 所示。平均接入碰撞率统计为时隙内接入失败终端数, 理论统计计算为 $(N_p - N_s)$, 平均接入时延统计为分组生成时间至分组离开通信终端时间。当接入碰撞次数达到 16 个接入周期数时, 认为终端不可达, 接入失败。

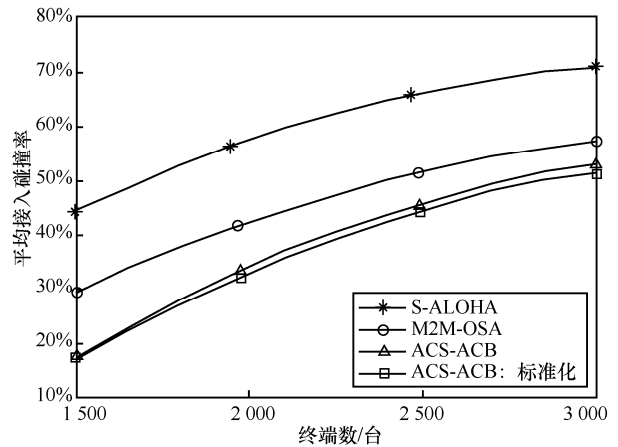


图 4 平均接入碰撞率

图 4 显示在密集状态下, 每个接入周期中新生分组和重传分组构成的混合到达业务多, 时隙开始时刻接入碰撞机会增大, 使得时隙 ALOHA 协议平均接入碰撞率大。M2M-OSA 方法中使用

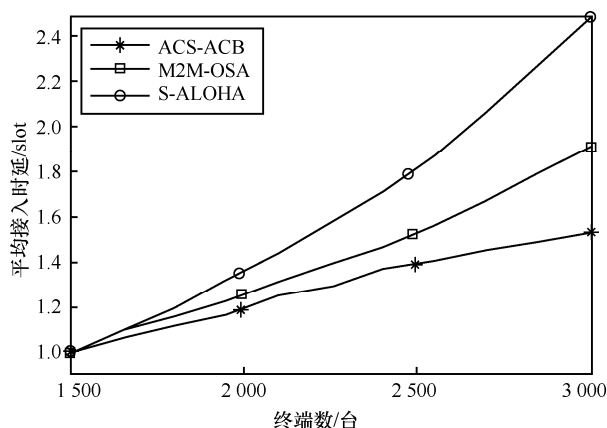


图5 平均接入时延

了伪 Bayes 算法估计请求接入业务分组数, 并据此动态调整接入限制因子 p , 一定程度上控制了时隙开始时刻的请求接入分组数, 减小了碰撞概率。ACS-ACB 方法的平均接入碰撞率性能依赖于前导码选择概率, 受接收信号的 SINR 和终端密度指数影响, 能极大地限制信道状态差的接入终端业务分组数, 减小了信道状态好的终端业务接入碰撞率。

当车联网处于密集状态时, 平均接入时延构成中碰撞接入周期时延一般远大于分组传输时延, 因此, 统计平均时隙数作为平均时延标准值。由图 5 可知, 随着通信终端密集度增加, 时隙 ALOHA 协议接入碰撞概率增大, 业务平均碰撞时隙数增多, 平均时延呈显著性增大。M2M-OSA 方法的平均接入时延直到高密度状态后增加较快, 此时大量重传分组对接入业务分组数估计值的影响增大, 使得接入碰撞概率增大。ACS-ACB 方法中业务对前导码的选择概率与业务密度呈非线性关系, 一定程度上抑制了业务量的快速增加对接入碰撞概率的影响, 使得其平均接入时延平缓增加。

5 结束语

车联网作为 5G 蜂窝网络中典型的物联网应用是移动通信潜在业务增长点。在密集交通状态下, 车联网短数据业务通信的强突发性极大地增

加了 H2H 业务通信阻塞率, 因此, 本文利用基站和车载终端的计算能力分别估计通信终端密度和通信信道状态, 定义了接入限制因子, 提出了自适应信道状态的多业务接入方法, 通过控制处于信道状态差的通信终端接入概率减小阵列接入过程中的终端数, 从而减小接入碰撞机会。理论证明接入碰撞概率仅与选择前导码的概率相关, 间接地取决于通信终端密度和信道状态。相较于时隙 ALOHA 协议和 M2M-OSA 阵列接入算法, 实验结果显示平均接入碰撞率性能得到改善, 并降低了由接入碰撞带来的平均接入时延性能。

参考文献:

- [1] KIM J, DUGUMA D G, ASTILLO P V, et al. A formally verified security scheme for inter-gNB-DU handover in 5G vehicle-to-everything[J]. IEEE Access, 2021(9): 119100-119117.
- [2] 董振江, 古永承, 梁健, 等. C-V2X 车联网关键技术与方案概述[J]. 电信科学, 2020, 36(4): 3-14.
DONG Z J, GU Y C, LIANG J, et al. Overview on key technology and solution of C-V2X for internet of vehicles[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(4): 3-14.
- [3] ZHOU L J, LI Q Q, TU W. An efficient access model of massive spatiotemporal vehicle trajectory data in smart city[J]. IEEE Access, 2020(8): 52452-52465.
- [4] TURAN A L, KOSEGLU M, SEZER E A. Reinforcement learning based adaptive access class barring for RAN slicing[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [5] 段红光, 卢松品, 王利飞, 等. 机器类通信中基于负载反馈的拥塞控制方法[J]. 电信科学, 2016, 32(11): 26-31.
DUAN H G, LU S P, WANG L F, et al. A congestion control method based on loading-feedback in MTC[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(11): 26-31.
- [6] JANG H S, JIN H, JUNG B C, et al. Resource-optimized recursive access class barring for bursty traffic in cellular IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(14): 11640-11654.
- [7] EL TANAB M, HAMOUDA W. Machine-to-machine communications with massive access: congestion control[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3545-3557.
- [8] 简鑫, 曾孝平. 机器类通信流量建模与接入控制研究进展[J]. 电信科学, 2015, 31(8): 133-145.
JIAN X, ZENG X P. Traffic modeling and access control for machine type communications: a comprehensive survey[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(8): 133-145.

- [9] KIM T, JANG H S, BANG I, et al. Access priority provisioning based on random access parallelization for prioritized cellular IoT[J]. IEEE Access, 2021(9): 111814-111822.
- [10] FIRDAUS K F, WIBOWO S A, ANWAR K. Multiple access technique for IoT networks serving prioritized emergency applications[C]//Proceedings of 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [11] MIUCCIO L, PANNO D, RIOLO S. Joint control of random access and dynamic uplink resource dimensioning for massive MTC in 5G NR based on SCMA[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5042-5063.
- [12] AL KHANSA R, ARTAIL H A, ASSAAD M, et al. A Hybrid Scheduled and group-based random access solution for massive MTC networks[J]. Computer Networks, 2020(176): 107253.
- [13] 杨桢楠, 李波, 杨懋, 等. 下一代 WLAN 中一种基于分组的上行 OFDMA 随机接入方法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(1): 155-161.
YANG A N, LI B, YANG M, et al. Group-based uplink OFDMA random access algorithm for next-generation WLAN[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(1): 155-161.
- [14] HE H L, DU Q H, SONG H B, et al. Traffic-aware ACB scheme for massive access in machine-to-machine networks[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 617-622.
- [15] IDE C, DUSZA B, WIETFELD C. Client-based control of the interdependence between LTE MTC and human data traffic in vehicular environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 1856-1871.
- [16] TELLO-OQUENDO L, VIDAL J R, PLA V, et al. Dynamic

access class barring parameter tuning in LTE-A networks with massive M2M traffic[C]//Proceedings of 2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.

[作者简介]



王娇(1996-), 女, 南通大学信息科学技术学院硕士生, 主要研究方向为车联网通信。



邱恭安(1973-), 男, 南通大学信息科学技术学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算通信理论、车联网通信理论与技术等。



张士兵(1962-), 男, 南通大学信息科学技术学院教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带数字通信、智能信号处理、认知无线电等。