

# 基于滑动窗口的接入新方案

李 军, 孙 君, 余云河, 贾志豪

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏南京 210003)

**摘 要:** 在大规模机器类通信(Machine Type Communication, MTC)中,当短时间内大量的设备涌入LTE-A(Long Term Evolution-Advanced)网络,同时发起随机接入的时候就会造成严重的网络拥塞,需要采取合适的措施对拥塞加以控制.为此,本文提出了一种基于滑动窗口的拥塞控制方案,通过窗口的大小控制同时发起接入尝试的设备数量,降低设备间的碰撞概率,能够有效提高系统接入成功率,缓解网络拥塞.本文在不同负载场景中,将提出的方案与静态ACB(Access Class Barring)策略、动态ACB策略的接入性能进行了比较.仿真结果表明,本文所提出的方案能够实现接近100%的接入成功率,同时进一步降低平均接入时延与系统总体服务时长.

**关键词:** 大规模机器类通信; LTE-A 随机接入; 拥塞控制; 滑动窗口; 接入成功率; 平均接入时延

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2021)02-0300-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20200166

## A Novel Random Accessing Scheme Based on Sliding Windows

LI Jun, SUN Jun, YU Yun-he, JIA Zhi-hao

(Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

**Abstract:** In massive machine type communication (MTC), when a large number of devices flood into the LTE-A (long term evolution-advanced) network in a short period of time, and simultaneously initiated random access attempt, which will cause serious network congestion. Appropriate measures need to be taken to control the congestion. Therefore, this paper proposes a congestion control scheme based on a sliding window. The size of the window controls the number of devices that simultaneously initiate attempts to reduce the collision probability between devices, which can effectively improve the success rate of system access and alleviate network congestion. In different load scenarios, the proposed scheme is compared with the receiving performance of the static ACB (access class barring) strategy and the dynamic ACB strategy. The simulation results show that the scheme proposed here can achieve access success rate close to 100%, while reduces the minimum average reception delay and overall system service time.

**Key words:** massive machine type communication; LTE-A random access; congestion control; sliding windows; access success probability; average access delay

## 1 引言

随着通信技术的飞速发展,通信业务已经从传统的人与人之间的通信逐渐发展到物与物之间的通信,这种通信方式叫做物联网(Internet of Things, IoT)<sup>[1]</sup>,根据预测到2020年,全球实现M2M(Machine-to-Machine)之间通信的设备将增加至290亿<sup>[2]</sup>,这给现有的蜂窝网络带来的严峻的挑战,于是第五代移动通信(5G)技术成为了研发的焦点<sup>[3]</sup>,其中mMTC(massive Machine Type Communication)是5G三大应用场景之一<sup>[4]</sup>,它是

一种基于蜂窝网络以实现M2M进行数据传输的通信方式,相比于传统的H2H(Human-to-Human)之间的通信, M2M之间的通信具有数量大、小数据包、短时间内突发大量接入等特征<sup>[5]</sup>.当海量机器类通信设备在短时间内同时发起随机接入请求,在现有的LTE(Long Term Evolution)网络的情况下,必定造成严重的网络拥塞,大大降低了接入效率以及资源的利用率,很大程度上影响了用户体验<sup>[6]</sup>.

为了缓解大规模机器类通信中的网络拥塞问题,3GPP在TR37.868<sup>[2]</sup>中提出了六种处理方法.其中最

效的方法就是采用合适的策略控制每个随机接入时隙中同时发起接入尝试的设备数量或者实现资源复用,以此为基础提出了许多拥塞控制方案,文献[7]中提出了一种自适应前导码分集的方法复用前导码;文献[8]中通过可控制算法以分布式的方式在有限的时间内分配上行链路资源;文献[9~11]中,作者主要通过调整 ACB 参数控制每个接入时隙中发起随机接入尝试的设备数量;文献[12]中,则是将设备按照性能要求分成若干设备小组的方式复用资源;文献[13]和文献[14]中提出了一种两步 ACB 策略来控制同一时隙中发起接入的设备数量,降低设备碰撞概率。

综上所述,当海量设备在短时间内同时发起随机接入尝试,控制发起接入尝试的设备数量是一种可靠有效的方法,本文以此为基础提出了一种基于滑动窗口的拥塞控制方案,滑动窗口机制(sliding window)是传输控制协议中的一项关键的流量控制技术,这种技术被用来解决早期网络中由于同时发送数据而产生的网络拥塞问题;在随机接入过程中也面临着同样的问题,需要控制同时发起随机接入尝试的设备数量,所以可以借助滑动窗口来控制同时发起随机接入尝试的设备数量.本文主要贡献提出了一种基于滑动窗口的拥塞控制方案,通过窗口大小控制同时发起接入尝试的设备数量.本文方案相对于文献[15]中的最优静态 ACB 而言更加灵活,在海量设备场景中依然能够有效地控制同时发起接入尝试的设备数量;而相对于文献[16]中的动态 ACB 而言,本文方案的实现复杂度更低,不需要像动态 ACB 频繁的估计系统活跃设备数量.仿真结果表明,相比于最优静态 ACB 策略,本方案能够更有效地控制发起接入的设备数量,明显提升接入成功率,降低接入时延;而相对于文献[16]中的动态 ACB 策略而言,本方案不需要频繁的调整参数  $P_{ACB}$ ,降低了实现的复杂度,并且能够进一步降低系统接入时延,提升接入成功率。

## 2 系统模型

假设系统中有  $N$  个设备在时间  $[0, T_A]$  内按照 Beta 分布到达,这是 3GPP 提出的一种典型的系统模型,其概率密度函数如式(1)所示,参数分别为  $\alpha=3, \beta=4$ <sup>[4]</sup>.

$$\begin{cases} f(t) = \frac{t^{\alpha-1} (T_A - t)^{\beta-1}}{T_A^{\alpha+\beta-1} \cdot \text{Beta}(\alpha, \beta)}, & 0 \leq t \leq T_A \\ \text{Beta}(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx \end{cases} \quad (1)$$

### 2.1 基于滑动窗口的随机接入模型

假设当前接入时隙发起随机接入尝试的设备数量为  $N_i = n$ ,可用前导码数量为  $R, D_k = 0, 1, 2, \dots$  表示第  $k$  个前导码被 0 个设备、1 个设备、多个设备选中,则第  $k$

个前导码仅被  $N_i = n$  个设备中的某一个设备选择的概率为  $P(D_k = 1 | N_i = n)$ ,其计算式为:

$$P(D_k = 1 | N_i = n) = \binom{n}{1} \frac{1}{R} \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{n-1} \quad (2)$$

进一步假设  $S_i$  为第  $i$  时隙中设备数量为  $N_i = n$  时成功发送前导码的设备数量,  $E[S_i | N_i = n]$  为第  $i$  时隙中设备数量为  $N_i = n$  时成功发送前导码的期望值,则有

$$\begin{aligned} E[S_i | N_i = n] &= \sum_{k=1}^R P(D_k = 1 | N_i = n) \\ &= n \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{n-1} \end{aligned} \quad (3)$$

根据文献[15]可知每个时隙可用的上行链路授权为  $N_{UL} = 15$  个,这也就意味着每个时隙中允许接入的设备数量最多为  $N_{UL}$  个,若当前时隙中成功发送前导码的设备数量超过了  $N_{UL}$ ,则超过  $N_{UL}$  的那些设备也将进入退避状态,等待发起新的随机接入尝试.由式(3)可知,当可用前导码数量  $R = 54$  时,得到成功发送前导码设备数量  $S_i$  和当前时隙中设备活跃数量  $N_i$  的图形如图 1 所示。

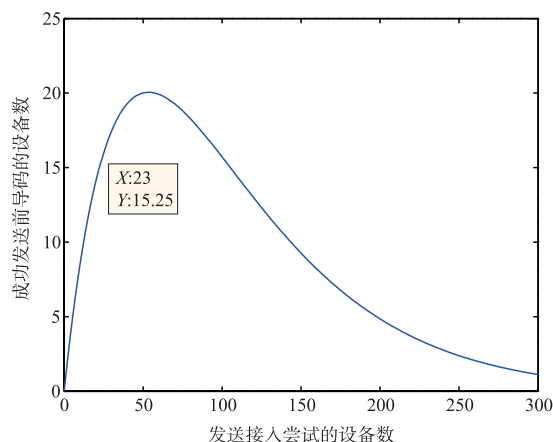


图1 成功发送前导码设备数量随总设备数变化关系图( $R=54$ )

从图中标识点的坐标(23, 15.25)可以知道,当前时隙中设备数量  $N_i = 23$  时,成功发送前导码的设备数量为 15.25 个,接近  $N_{UL}$ .若活跃设备数量少于 23 个,则成功发送前导码的设备数量不足 15 个,将无法充分利用上行链路授权;若活跃设备数量多于 23 个,虽然能够充分利用全部上行链路授权,但是势必有些成功发送前导码的设备也需要退避,将无法成功接入网络,这将会增加设备前导码发送次数.综上所述,如果能将每个接入时隙周期内活跃设备数量限制在 23 个,那么不仅可以缓解拥塞,还能充分利用资源,提升资源利用率。

在此种思想的基础上,提出了一种基于设备队列的随机接入过程,系统模型图如下页首页图 2。

该系统主要由三个部分组成,等待发起随机接入尝试的设备队列  $W$ 、进入退避状态的设备队列  $B$  和滑

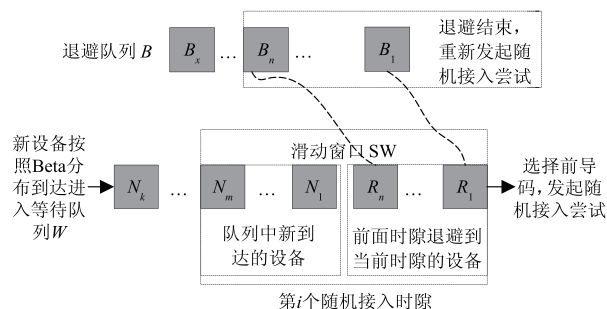


图2 系统模型图

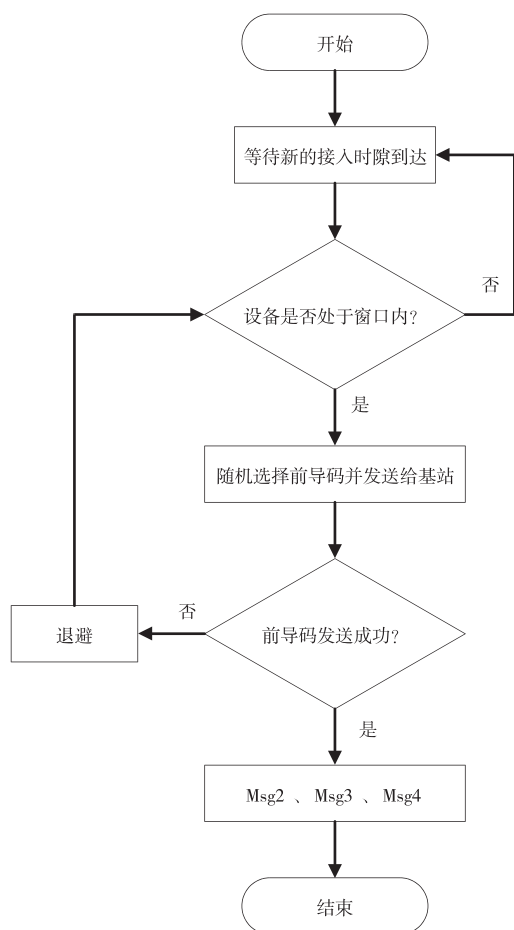


图3 系统流程图

动窗口 SW。例如图中第  $i$  个随机接入时隙开始前,新到达的设备依次排在等待接入队列  $W$  的队尾,而退避队列  $B$  中在当前随机接入时隙中若有设备已经退避结束,则退避结束的设备插入到等待接入队列  $W$  的队首;随机接入时隙开始时,处于滑动窗口 SW 中(窗口大小为  $W_{RA} = 23$ )的设备允许随机选择前导码,发起随机接入尝试,而处于窗口外的设备禁止发起随机接入尝试,继续等待;在当前随机接入时隙结束时,被允许发起随机接入尝试的设备中如果有设备发生了碰撞,并且该设备前导码发送次数未达到允许的最大发送次数,则

随机选择退避时长,进入退避队列  $B$  中,直到退避结束并且新的随机接入时隙到达时才能重新发起新的随机接入尝试,反之若前导码发送次数达到允许的最大发送次数则该设备随机接入失败,禁止再次发起接入尝试;最后滑动窗口向后滑动一次,进入下一个随机接入时隙。

系统流程图如图 3 所示。本方案随机接入流程的重点是判断等待队列  $W$  中的设备是否在窗口 SW 内部,若处于窗口内如则允许选择前导码,发起随机接入尝试,反之则继续等待。

## 2.2 主要性能指标

本文中判断系统总体性能的关键指标有:接入成功概率  $P_{succ}$ 、平均接入时延  $D_{ave}$ 、系统总体服务时长  $T_{ALL}$ 。

连续两个随机接入时隙之间的间隔  $T_{RA\_REP}$  为 5 个子帧,随机接入时隙占用一个子帧,用于传输前导码,基站接收到前导码之后需要  $T_{RAR}$  的时间检测接收到的前导码,并在随机接入响应窗口  $W_{RAR}$  个时隙中给设备发送随机接入响应信息 RAR (Random Access Response),同时设备等待基站发送 RAR,若设备在响应窗口内没有接收到 RAR,则此次随机接入尝试失败,设备随机选择退避时长,进入退避状态,等待退避结束才能再次发起新一次的随机接入尝试。假设第  $i$  个随机接入时隙中活跃的设备数量为  $N_i$ ,新到的设备数量为  $N_{i,New}$ ,前面时隙发生碰撞退避到当前时隙重传的设备数量为  $N_{i,RT}$ ,前面时隙积压的设备数量为  $N_{i,BL}$ ,当  $0 \leq i \leq T_p/T_{RA\_REP}$  时,每个随机接入时隙周期内有新设备到达,当  $T_p/T_{RA\_REP} \leq i \leq T_s/T_{RA\_REP}$  时,无新的设备到达,有式(4):

$$N_i = \begin{cases} N_{i,New} + N_{i,RT} + N_{i,BL}, & 0 \leq i \leq T_p/T_{RA\_REP} \\ N_{i,RT} + N_{i,BL}, & T_p/T_{RA\_REP} < i \leq T_s/T_{RA\_REP} \end{cases} \quad (4)$$

若当前接入时隙发起随机接入的设备数量为  $N_{i,RA\_Attempt}$ ,成功的设备数量为  $N_{i,S}$ ,发生碰撞的设备数量为  $N_{i,F}$ 。由本方案的原理可知若此时等待队列中的活跃设备数量  $N_i \leq W_{RA}$ ,则  $N_{i,RA\_Attempt} = N_i$ ;反之, $N_{i,RA\_Attempt} = W_{RA}$ 。显然每个接入时隙中发起随机接入的设备要么成功,要么发生碰撞接入失败,即  $N_{i,RA\_Attempt} = N_{i,S} + N_{i,F}$ 。

接入成功率  $P_{succ}$ :在仿真周期  $T_s$  内成功接入的设备总数量与到达设备总数的比值,则接入成功率如式(5)所示。

$$P_{succ} = \frac{\sum_{i=1}^{T_s/T_{RA\_REP}} N_{i,S}}{\sum_{i=1}^{T_s/T_{RA\_REP}} N_{i,New}} \quad (5)$$

平均接入时延  $D_{ave}$ :所有成功接入的设备所需的时延与所有成功接入的设备数量的比值,假设设备在第  $i$  个随机接入时隙到达等待接入队列,此时等待接入队列中等待的设备数量为  $N_{i-1}$ ,则等待第一次发起随机接入所需的平均时间为  $\lceil N_{i-1}/N_{UL} \rceil \times T_{RA\_REP}$  个随机接入时隙,所以该设备第一次发起随机接入尝试的是在第  $j = i + \lceil N_{i-1}/N_{UL} \rceil$  个随机接入时隙.若此次随机接入尝试发送失败,失败概率为式(6)所示

$$P_F = \begin{cases} 1 - (1 - \frac{1}{R})^{N_{j,RA\_Attempt} - 1}, & N_{j,RA\_Attempt} \leq W_{RA} \\ \frac{N_{j,RA\_Attempt} - N_{UL}}{N_{j,RA\_Attempt}}, & N_{j,RA\_Attempt} > W_{RA} \end{cases} \quad (6)$$

若该设备在此次随机接入尝试中失败,就需要随机选择退避时长  $T_{BO}$ ,平均退避时长  $T_{Ave\_BO} = W_{BO}/2$ ,则从发起第 1 次随机接入尝试到第  $k$  次随机接入尝试才成功的平均时延为式(7)所示

$$\begin{cases} D_{ave} = \sum_{k=1}^{N_{Prmax}} T_{One\_RA} \cdot P_F^k \\ T_{One\_RA} = T_{PRACH} + T_{RAR} + W_{RAR} + T_{Ave\_BO} \end{cases} \quad (7)$$

设备成功接收到 RAR 后,发送 Msg3 和 Msg4 需要的平均时间为  $P_{MSG}^{[18]}$ ,所以第  $n$  个设备从进入等待队列到成功接入需要的时延为式(8):

$$D_n = (\lceil N_{i-1}/N_{UL} \rceil + D_s + P_{MSG}) \times T_{RA\_REP} \quad (8)$$

综上所述,成功接入设备的平均接入时延如式(9)所示

$$D_{ave} = \frac{\sum_{n=1}^N D_n}{\sum_{i=1}^N N_{i,S}} \quad (9)$$

### 3 仿真结果分析

在本章中将比较文献[15]中的最优静态 ACB 策略、文献[16]中提出的动态 ACB 策略以及本文提出的拥塞控制方案的系统总服务时长、接入成功率、平均接入时延.

首先本文比较了系统总体服务时长.图 4(a)、(b)分别对应在设备总数量为 30000 情况下不采用任何拥塞控制策略、最优 SACB 策略、文献[16]中的 DACB 策略和本文方案时的接入情况.

图 4(a)是未采用拥塞控制策略的情况,图中的绿、红、黑和蓝色曲线分别代表各个接入时隙的积压设备数量、发生碰撞的设备数量、新到达的设备数量和成功接入网络的设备数量.从图中可以看出在第 300 至第 800 个接入时隙时积压设备和碰撞设备快速上升,接入成功设备数量在第 450 个接入时隙下降至 0,此时开始发生严重的网络拥塞,导致大量的设备接入失败.图 4(b)分

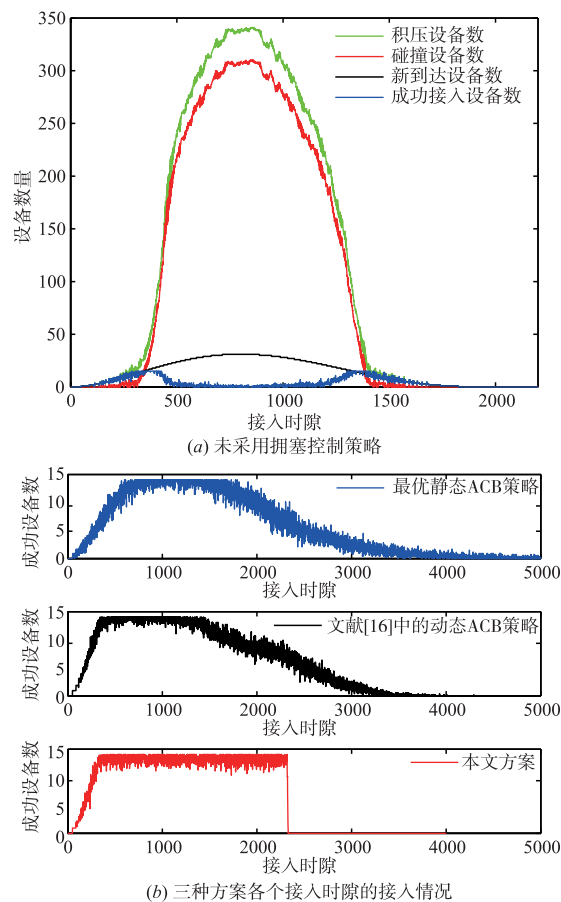


图4 每个接入时隙成功接入的设备数量(设备总数 $N=30000$ )

别是采用最优 SACB 策略、文献[16]中的 DACB 策略和采用本方案时各个接入时隙成功接入的设备数量,可以看出三种方案分别在第 500 ~ 1600 个接入时隙、第 300 ~ 1500 个接入时隙、第 300 ~ 2300 个接入时隙保持高效状态,并且分别在第 5000、第 4000 和第 2300 个接入时隙完成所有设备的接入,本方案在系统总服务时长方面相比于最优 SACB 策略和文献[16]中的 DACB 策略分别提升了 54% 和 43.9%. 因此本方案比两种对比策略吞吐性能更高,且系统总体服务时长更短.

然后本文讨论三种方案的接入成功率和平均接入时延,如图 5 所示.

图 5(a) 和图 5(b) 分别是本文提出的方案、最优 SACB 策略和文献[16]中提出的 DACB 的接入成功率和平均接入时延的仿真曲线.从图 5(a) 中可以看出,三种方案的接入成功率随接入总设备数量的增多呈下降趋势,本文提出的拥塞控制方案接入成功率始终保持在 99.99% 以上;文献[16]中提出的 DACB 策略接入成功率随着设备数量增加略有下降,设备总数增加到 30000 个时,接入成功率依然保持在 99.65% 左右,但是与本文的拥塞控制方案相比,在设备总数大于 16000 时,本文的方案与文献[16]中的 DACB 策略相比有明

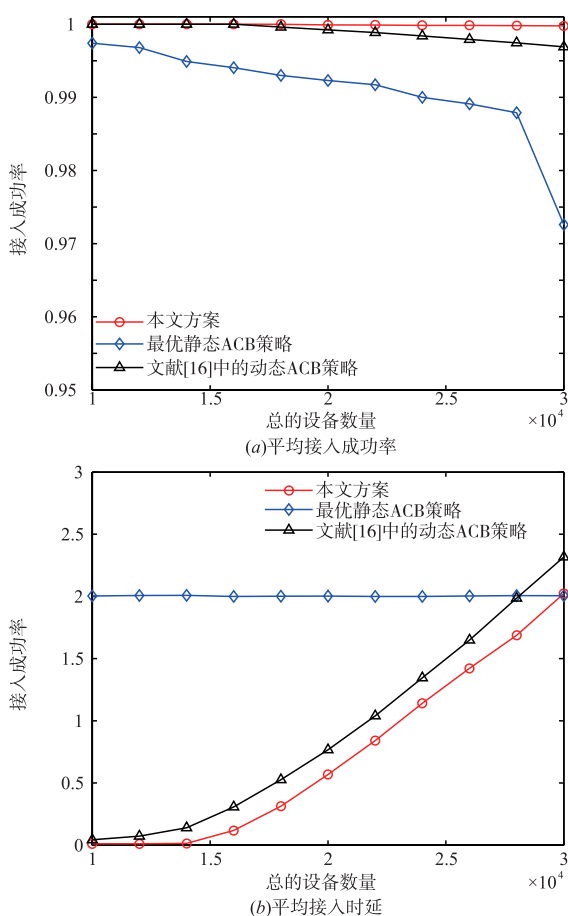


图5 接入成功率和平均接入时延的比较

显的优势;三种方案中,接入成功概率性能最差的是最优 SACB 策略,当设备总数增加至 30000 时接入成功率下降至 97.3% 左右. 根据图 5(b) 可以看到, SACB 策略的平均接入时延始终保持在 2s 左右,因为 SACB 策略不管是在低负载情况下还是高负载情况下都会限制一半设备发起随机接入,所以接入时延比另外两种方案要高;文献[16]中 DACB 策略和本文提出的方案的平均接入时延在设备总数量小于等于 14000 时,本文方案的平均接入时延保持在 200ms 以内,在设备总数大于 14000 时两者随设备总数的增加的增长趋势大致相同,但是平均接入时延方面本方案相比于文献[16]中的 DACB 方案的平均接入时延有大概 0.3s 左右的提升.

#### 4 结论

在 5G 的海量机器类通信中,若是不采用合适的拥塞控制策略,将会在随机接入过程中产生严重的拥塞,而用户得到的是糟糕的用户体验,本文提出了一种基于滑动窗口的拥塞控制方案,有效地缓解了数量庞大的设备在短时间涌入系统造成随机接入过程中的网络拥塞问题. 本方案的主要思想是将设备按照到达的先后顺序依次排入到等待接入的队列中,每当新的接入

时隙到来时,窗口向后滑动一次,处于窗口内部的设备被允许发起随机接入尝试,反之窗口外部的设备则继续等待. 在本文的第 3 部分分别对接入成功率、平均接入时延、系统总体服务时长这三个关键方面进行了仿真比较,从仿真结果可以看出,本方案在严重负载的场景下仍然能够保证接近 100% 的接入成功率,相较于对比方案能够进一步降低平均接入时延,同时还拥有更短的总服务时长,对系统总体性能有明显的提升.

#### 参考文献

- [1] 孙其博,刘杰,黎彝,范春晓,孙娟娟. 物联网:概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报,2010,33(03):1-9.
- [2] M Hua-Dong. Internet of things: objectives and scientific challenges[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2011, 6(1): 919-924.
- [3] Z Dawy, W Saad, A Ghosh. Toward massive machine type cellular communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1): 120-128.
- [4] 3GPP, TS 37. 868. Study on RAN Improvements for Machine-Type Communication (Release 11)[S].
- [5] R Ratasuk, N Mangalvedhe, D Bhatoolaul, A Ghosh. LTE-M evolution towards 5G massive MTC[A]. 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps) [C]. Singapore: IEEE, 2017. 1-6.
- [6] F Ghavimi, H Chen. M2M communications in 3GPP LTE/LTE-A networks: architectures, services, requirements, challenges, and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 525-549.
- [7] S Vural, N Wang, P Bucknell, G Foster, R Tafazolli, J Muller. Dynamic preamble subset allocation for RAN slicing in 5G networks[J]. IEEE Access, 2018, 6(24): 13015-13032.
- [8] M El Tanab, W Hamouda. Machine-to-machine communications with massive access: congestion control[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3545-3557.
- [9] T Lin, C Lee, J Cheng, W Chen. PRADA: prioritized random access with dynamic access barring for MTC in 3GPP LTE-A networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2467-2472.
- [10] C Di, B Zhang, Q Liang, S Li, Y Guo. Learning automata-based access class barring scheme for massive random access in M2M communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6007-6017.
- [11] W Zhan, L Dai. Massive random access of M2M communications in LTE networks: modeling and throughput optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2771-2785.

- [12] H S. Jang, B C Jung, D K Sung. Dynamic access control with resource limitation for group paging-based cellular IoT systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 5065 – 5075.
- [13] M Lee, Y Kim, Y Piao, T Lee. Recycling random access opportunities with secondary access class barring [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19(9): 2189 – 2201.
- [14] R Cheng, Z Becvar, Y Huang, G Bianchi, R Harwahyu. Two-phase random access procedure for LTE-A networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2374 – 2387.
- [15] L Tello-Oquendo, et al. Performance analysis and optimal access class barring parameter configuration in LTE-A networks with massive M2M traffic [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3505 – 3520.
- [16] L Tello-Oquendo, J Vidal, V Pla, L Guijarro. Dynamic access class barring parameter tuning in LTE-A networks with massive M2M traffic [A]. 2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop [C]. Capri, IT: IEEE, 2018. 1 – 8.
- [17] 3GPP, TS 36. 321. Medium Access Control(MAC) Protocol Specification[S].
- [18] C Wei, G Bianchi, R Cheng. Modeling and analysis of random access channels with bursty arrivals in OFDMA wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(4): 1940 – 1953.

### 作者简介



**李 军** 男, 1995 年 6 月生于湖北宜昌. 现为南京邮电大学通信与信息工程学院硕士研究生. 主要研究方向为大规模机器类通信设备的随机接入.  
E-mail: 18168401913@163.com



**孙 君 (通信作者)** 女, 1980 年 7 月生, 现为南京邮电大学教师、硕士生导师. 研究方向为无线网络、无线资源管理和物联网.  
E-mail: sunjun@njupt.edu.cn



**余云河** 男, 1995 年 9 月生于安徽安庆. 现为南京邮电大学通信与信息硕士研究生. 主要研究方向为大规模机器类通信下的资源分配与干扰研究.  
E-mail: 15955164212@163.com



**贾志豪** 男, 1995 年 1 月生于安徽宣城. 现为南京邮电大学通信与信息硕士研究生. 主要研究方向为大规模机器类通信下接收端检测算法.  
E-mail: 15201966009@163.com