



机器类通信中基于负载反馈的拥塞控制方法

段红光, 卢松品, 王利飞, 谭丹, 高江奇

(重庆邮电大学, 重庆 400065)

摘要:通过分析 LTE-Advanced 系统中机器类通信(MTC)设备的随机接入效率,提出一种负载反馈控制的改进方法。利用前导状态信息估计当前负载并预测下一接入时隙的负载,然后基于负载的变化调整 MTC 设备接入控制参数,减少了大量 MTC 设备突发性接入对人与人(H2H)设备的影响,能有效降低重传次数,提升接入成功率。通过仿真分析说明所提方案有效可行,具有良好性能。

关键词: LTE-Advanced; 随机接入; 机器类通信; 负载反馈

中图分类号: TN915.6

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016280

A congestion control method based on loading-feedback in MTC

DUAN Hongguang, LU Songpin, WANG Lifei, TAN Dan, GAO Jiangqi

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Through analyzing the access efficiency of machine type communication (MTC) devices in LTE-Advanced system, a loading-feedback control method was proposed. The current access load was estimated and the load of next access slot were calculated using the preamble state information, and the access control parameters for MTC device were adjusted based on the load change dynamically. The good performance of the proposed solution was evaluated by computer simulations. The simulation result shows that the proposed scheme can reduce the impact of nearly simultaneous access of a large number of MTC devices on human-to-human (H2H) devices, decrease the number of retransmissions and improve the access success rate effectively.

Key words: LTE-Advanced, random access, machine type communication, loading-feedback

1 引言

机器类通信(machine type communication, MTC)在智能家居、电子健康、智能电网等领域得到了广泛应用,使得 MTC 受到了运营商和相关组织的广泛关注。MTC 不同于以语音和数据为主的人与人(human to human, H2H)通信, MTC 有自己独特的特点,具有设备数量庞大、时延容忍性、

小数据传输等特性^[1,2]。3GPP 在技术报告 TR37.868 中指出,单小区 MTC 设备数目将达到 30 000 个,远远超过传统的 H2H 数目^[1]。网络通过小区内的 MTC 设备收集相关 MTC 应用数据时,势必会造成接入网或核心网或信令网的拥塞,导致时延增加、分组丢失,甚至服务不可用^[3],因此拥塞问题成为近年来的一个研究热点。

为解决海量设备可能导致的拥塞问题,参考文献[4]提

收稿日期:2016-08-08;修回日期:2016-11-10

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(No. 2015ZX03001026-002)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China(No. 2015ZX03001026-002)

出基于优先级的接入方案,将 H2H 与 MTC 从接入资源上分开,并使用 DAB(digital audio broadcasting)控制,保证 H2H 设备的成功率和时延要求的同时,使 MTC 设备保持接入成功率为 0.93,但方案固定了不同优先级设备的接入子帧,仅考虑了高负载情况,对于低负载情况接入资源利用率不高。

参考文献[5]提到一种 SOOC(自优化过载控制)方案,该方案能通过检测过载情况,动态调整接入资源,但未给出相应的性能评估。参考文献[6]中针对 MTC 的同步性接入流量,采用 Beta 流量模型分析了不同负载条件下 RACH 信道的性能,但未结合网络的控制功能提出拥塞问题的解决方案,无明显的性能提升。

参考文献 [7] 提出一种协作增强的接入类禁止方案 (ECACB),通过小区间的协作决定接入类禁止 (ACB) 参数来提高网络整体性能,使得 MTC 设备的平均接入时延降低 33.19%,由于需要不同小区间的协作决定控制参数,不能适应小区内流量的快速变化。

参考文献[8]还提出用马尔可夫方法估计 ACB 的接入负载,但涉及矩阵维数较高,运算量较大。参考文献[9]创新提出通过码域扩展的接入机制,增加 UE(user equipment)接入的可用码字数目,通过扩充接入码字资源缓解拥塞问题,但会造成虚拟码场景,即基站不能准确知道设备发送的前导码字,造成下行额外的资源分配,下行资源利用率不高。

基于上述研究现状及不足之处,考虑到 MTC 设备的突发式流量到达,本文采用 Beta 函数对 MTC 业务流量进行模拟,通过基站检测前导码状态,估计当前接入负载,简化估计过程,然后反馈调节 MTC 设备接入参数,能在小区设备数量的变化时保持良好性能,且对原有 H2H 用户影响较小,通过仿真验证所提方案有效可行。

2 系统模型

2.1 随机接入过程

在 LTE-Advanced(以下简称 LTE-A)网络中,H2H/MTC 设备发送数据前必须通过随机接入 (random access, RA) 连接网络,完成上行同步及资源申请,网络配置参数为 6,相邻接入时隙间隔为 T_m ,以竞争方式的随机接入过程包含 4 条信令过程,竞争接入设备仅在成功完成 4 条信令流程之后,才认为接入成功^[10]。

步骤 1 Msg1-前导传输

用户数据到达,设备从前导池中随机选择可用前导,

以竞争的方式发送该前导信号(其他用户可能发送相同的信号),并在随机接入窗口 W_{mr} 内接收随机接入响应 (random access response, RAR)。若未收到 RAR,在退避参数 $[0, T_{backoff}]$ 随机退避后重传直到最大重传次数。

步骤 2 Msg2-随机接入响应传输

基站正确解码前导信号后,对检测到的前导通过下行共享信道给予 RAR, RAR 包含上行定时调整量、退避指示和传输 Msg3/Msg4 的信道资源等。值得提出的是,步骤 2 不能完全解决碰撞问题,如多个用户在相同时隙发送相同的前导信号,而且收到基站的 RAR,将由 Msg3/Msg4 竞争解决^[12]。

步骤 3 Msg3-连接请求消息

设备成功收到 RAR 后,将调整上行同步后发送 Msg3 消息。如果两个用户收到相同 RAR,将会在发送 Msg3 时发生相互干扰,较强的干扰将会导致所有碰撞用户重新执行接入过程,否则,信道质量较好的用户接入成功。

步骤 4 Msg4-竞争解决

用户成功收到包含本终端标识的 Msg4 消息后,意味着用户成功完成随机接入过程,否则将返回步骤 1 重新发起接入过程。

2.2 模型分析

H2H 设备到达规律服从泊松分布,而 MTC 到达规律服从 Beta 分布^[1],为计算前导成功、空闲、碰撞概率,使用 R, M_i 分别代表可用前导数目、当前发送前导的(含 H2H、MTC)设备数目。 $p=1/R$ 为设备随机选择一个前导发送的概率,则前导空闲概率为 $p_i=(1-p)^M$;前导成功概率为 $p_s=M \times p^i(1-p)^{M-1}$;前导碰撞概率为 $p_c=1-p_i-p_s$ 。Msg1 最大重传次数为 N_{ms} ,设备成功接入即在达到最大重传次数之前完成 RA 过程,第 n 次发送前导信号被基站检测到的概率为 $p_n=1-e^{-n}$,则 i 时隙成功接入设备数目为:

$$M_s(i) = \sum_{n=1}^{N_{ms}} M_{s,n}(i) = \sum_{n=1}^{N_{ms}} M(n) p_n e^{-M/R} \quad (1)$$

考虑到 Msg2 的容量限制,每条 RAR 能响应 3 个接入用户,最大响应数目为 $Nack=15$,成功接入设备数目为:

$$M_s(i) = \begin{cases} M(n) p_n e^{-M/R}, & M_s < Nack \\ \frac{M(n) p_n e^{-M/R}}{M_s} Nack, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $M_s = \sum_{n=1}^{N_{ms}} M_{s,n}(i) = \sum_{n=1}^{N_{ms}} M(n) p_n e^{-M/R}$ 。未收到 RAR 的用

户将执行退避,退避参数为 $T_{backoff}$,则重传 MTC 数目表示为:



$$M_i(n) = \sum_{j=i-K_{\max}}^{i-1} 1/K_{\max} \times M_{c,n-1}(j), 2 < n \leq N_{\max} \quad (3)$$

当 $K_{\max} = T_{\text{backoff}}/T_m, n=1$ 时, 新 MTC 设备到达数目为:

$$M_{i,\text{mtc}}(1) = M \int_{t_{i-1}}^{t_i} p(t) dt \quad (4)$$

其中, $p(t) = \frac{t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1} \text{beta}(3,4)}$, M 为 MTC 设备数目。 i 接入

时隙新到达的总设备数目表示为:

$$M_i(1) = M \int_{t_{i-1}}^{t_i} p(t) dt + \lambda \quad (5)$$

λ 为 H2H 用户的到达率, 则 i 时隙重传 n 次设备数目表示为:

$$M_{c,n}(i) = M_i(n) - M_{s,n}(i) \quad (6)$$

当系统存在 M_i 个竞争用户占有 PRACH (物理随机接入信道) 时, 系统接入效率可以表示为:

$$R_{\text{eff}} = \frac{M_i}{R} \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{M_i-1} \quad (7)$$

参考文献[7]证明当 $M_i=R$ 时, 系统效率最高, 网络工作于最稳定状态。如果当前用户 $M_i > R$, 系统已经无多余资源分配给用户使用, 如果没有合适的控制机制, 系统接入效率将会下降, 性能将会恶化, 需要合适的机制控制网络工作在最佳效率点附近。

3 负载反馈算法及实现

3.1 ACB 方案

ACB 方案用于传统 H2H 用户的接入网控制, 其核心思想是基站广播一个禁止因子 p_{acb} 和禁止时间 T_{barred} , 用户发送随机接入之前产生一个随机数, 与禁止因子进行 ACB 比较, 检查通过的用户发起随机接入过程, 否则设备将退避一段时间 T_{barred} [7]。

$$T_{\text{barred}} = (\alpha + \beta \times \text{rand}) \times \text{ac_barringtime} \quad (8)$$

并在下一次重新进行 ACB 检查, 这里 $\alpha=0.7, \beta=0.6$, rand 是 $(0, 1]$ 之间的随机数 [7]。但传统 ACB 方案参数设置不灵活, 对于突发式流量控制性能不佳, 本文提出一种基于当前负载估计反馈调节接入负载的机制, 如图 1 所示。考虑前导状态, 用 a, b, c 分别表示可用前导组中被一个用户选择、多个用户选择、未被任何用户选择的前导数目。

当估计值 $\hat{M}_{i+1}$ 超过最佳系统效率对应的竞争用户数目时, 减少控制因子参数 p_m , 当小于/大于最优效率对应的竞争用户数目时, 增加/降低控制因子参数 p_m , 这样系统将

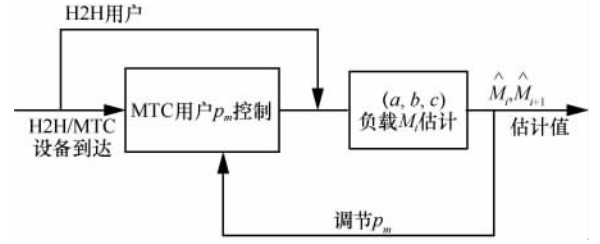


图 1 负载反馈调节控制

会工作在最佳效率附近。考虑到网络中存在的大量 MTC 设备, 而 H2H 设备相对较少, 选择对 MTC 设备进行 p_m 参数控制, 而 H2H 设备选择该忽略或采用其他方法。

当网络负载较高, 禁止时间也较长, 负载较低时, 禁止时间短, 调整 T_{barred} 为:

$$T_{\text{barred}} = \frac{(\alpha + \beta \times \text{rand}) \times \text{ac_barringtime}}{p_m} \quad (9)$$

3.2 负载估计

第 2.2 节从用户发送前导信号角度分析了前导空闲、碰撞、成功概率, 现在从基站检测前导信号考虑, 在随机接入过程中, 基站可以通过前导信号的检测, 得知当前 RA 时隙的前导码状态。基站将会得到当前时隙的前导的状态 (a, b, c) 且 $a+b+c=R$; R 为网络可用前导数目; 参考文献[9]中提出利用马尔可夫方法构造转移矩阵, 然后使用最大似然负载估计, 涉及矩阵维数较高, 运算复杂, 这里采用前导状态信息估计当前负载, 简化估计过程。

对于当前时隙 i , 基站检测到的前导空闲概率 $P_{i,\text{emb}} = c/R$; 令 $p_i = P_{i,\text{emb}}$ 就可以估计出当前负载 M_i 。假设系统到达稳定状态后, 相邻时隙网络发生剧烈变化的可能性较小, (a, b, c) 具有一定的随机性, 这里采用增加历史值求平均的方法, 降低估计产生较大波动, $P_{i,\text{emb}}$ 调整为:

$$P_{i,\text{emb}} = (c_{i-4} + c_{i-3} + c_{i-2} + c_{i-1} + c)/5R \quad (10)$$

估计式变为:

$$P_{i,\text{emb}} = P_i = \left(1 - \frac{1}{R}\right)^{M_i} \quad (11)$$

负载估计为:

$$\hat{M}_i = \frac{\lg P_{i,\text{emb}}}{\lg((R-1)/R)} \quad (12)$$

图 2 为实际负载与估计负载的比较。

图 2 描述了为实际负载值与估计值的对比, 为更加清晰地说明模型的准确性, 图 2(b)、图 2(c) 显示某些时隙的估计值和实际值比较, 不难得出, 无论在高负载函数低负载情况下, 实际值和估计值差距都比较小, 并且估计负载

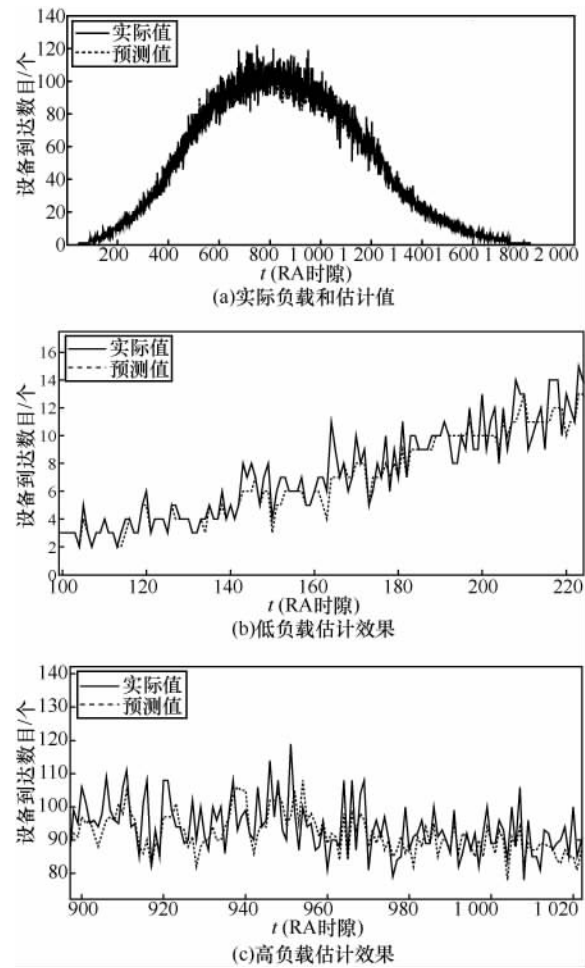


图2 实际负载与估计值比较

能快速反映出实际负载变化。

上面对接入负载做出了估计,但是负载反馈控制是针对下一个接入时隙的,控制参数 p_m 需要根据下一时隙负载变化而变化。这里采用趋势预测的方法预测下一时隙负载。

$$\begin{cases} a=2m^{(1)}-m^{(2)} \\ b=\frac{2}{n-1}(m^{(1)}-m^{(2)}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\hat{M}_{i+1}=a+b \quad (14)$$

其中, $m^{(1)}$ 为 c_{i-n+1} 到 c_i 的平均, $m^{(2)}$ 为 $m_{i-n+1}^{(1)}$ 到 $m_i^{(1)}$ 的平均, n 为移动窗口。

当负载接近 R 时,吞吐量达到最大,系统效率最高,可以选择学习法寻找最优的控制因子。

$$\begin{cases} p_m=p_m+r/2, \hat{M}(i)<50, p_m+r/2\leq 1 \\ p_m=p_m-r, \hat{M}(i)>60, p_m-r\geq 0.1 \end{cases} \quad (15)$$

其中, r 为步长; r 取值较大,学习速度较快,但不一定收敛; r 较小,学习速度较慢,本文 r 取值 0.01。

4 仿真分析

4.1 参数设置

本文中使用 LTE-Sim 搭建无线接入网络仿真平台^[11],合理配置网络参数,H2H 到达服从泊松分布,周期为 60 s, MTC 到达服从 Beta 分布,分布周期为 10 s,主要配置仿真参数见表 1。

表 1 主要参数

参数	含义	配置
M	MTC 设备数量	5 000~35 000
M_h	H2H 设备数量	2 000
T_n/ms	随机接入时隙间隔	5
R	小区可用前导数	54
N_{max}	前导最大重传次数	5
N_{rar}	RAR 容量	4
W_{rar}	RAR 窗口长度	5
$T_{\text{backoff}}/\text{ms}$	退避指示	20
p_n	前导被检测到的概率	$p_n=1-e^{-n}$
p_{harq}	Msg3/Msg4 HARQ 重传概率	0.1
t_{pr}/ms	Msg3/Msg4 处理时间	5
$T_{\text{barrier}}/\text{ms}$	ACB 禁止时间	20

4.2 仿真结果分析

根据前面的分析,定义以下衡量指标来估计所提方案的性能。

(1)接入成功率

在仿真周期内,从第一个竞争接入设备开始到最后一个成功接入网络或达到重传限制停止, P_s 为成功完成接入过程的 MTC 设备数目与总设备数目的比值。

(2)平均时延

包括平均控制时延 (D_{ctr}) 和平均接入时延 (D_{ra}), D_{ctr} 为 ACB 检查退避总时延与总设备数目比值; D_{ra} 为设备从首次发送前导到接入成功的平均时延,随机接入失败不计入接入时延内。可以得出 $\bar{D}=D_{\text{ctr}}+D_{\text{ra}}$ 。

(3)平均前导传输次数

成功设备前导码重传次数的总和与成功设备数目的比值。

图 3 为不同 MTC 数量时 H2H 和 MTC 设备的接入成功率,可以看出 MTC 数量低于 15 000 个时曲线性能相近,这是由于 MTC 数量低于 15 000 个时,未超过最佳效率点

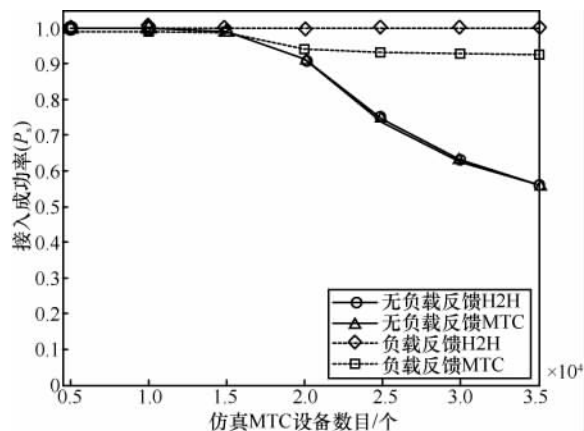


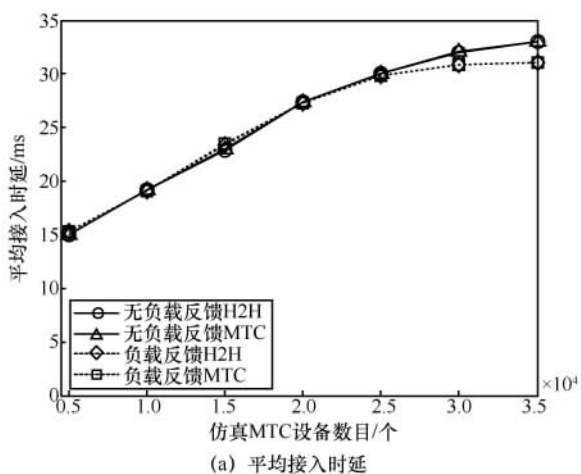
图3 不同MTC负载时H2H/MTC接入成功率

对应负载,负载反馈机制还未启用;超过15 000个时,负载反馈机制下的曲线仅轻微下降,MTC设备在数量达30 000个时成功率仍有92.79%,而无负载反馈控制机制的H2H/MTC的接入成功率下降到62.43%左右。说明负载反馈控制调节了MTC的突发流量对网络产生了冲击,控制了网络负载处于最佳效率点附近。

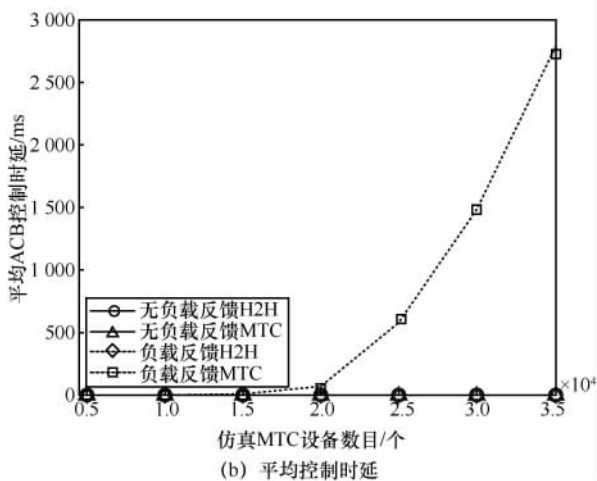
图4(a)显示在负载反馈机制启用后,负载反馈控制的接入时延略低于无负载控制的接入时延,因为负载反馈控制了接入网络的负载,使得网络中重传用户数目减少。随着MTC设备数量增加,图4(b)中负载反馈下MTC控制时延呈现快速增长趋势,这是因为负载反馈控制需要降低控制参数 p_m ,使得更多的MTC设备退避,但对网络中H2H用户无影响。对于MTC的时延容忍性,在MTC设备低于30 000个时,平均控制时延仍低于1.5 s。图5为H2H/MTC的平均前导传输次数,可以看出负载反馈机制启用后,H2H/MTC的平均前导传输次数也存在轻微的降低,MTC设备数量从20 000个到30 000个时,平均前导传输次数降低了13.6%,有效减少MTC设备的功率消耗。

5 结束语

由于支持机器类通信,LTE-A系统中将会存在大量MTC设备接入网络,并对原有H2H用户产生冲击。本文采用利用前导状态信息进行负载估计,根据估计值反馈调节MTC设备接入网络,减少了MTC负载超过最佳效率点后对H2H用户产生的影响。从仿真结果来看,所提反馈调节方案能有效估计当前负载,并能快速地根据负载实时变化调整控制参数,使系统工作与最佳效率点附近。以牺牲MTC设备部分控制时延的代价换取H2H/MTC设备高接



(a) 平均接入时延



(b) 平均控制时延

图4 不同MTC负载时H2H/MTC平均时延

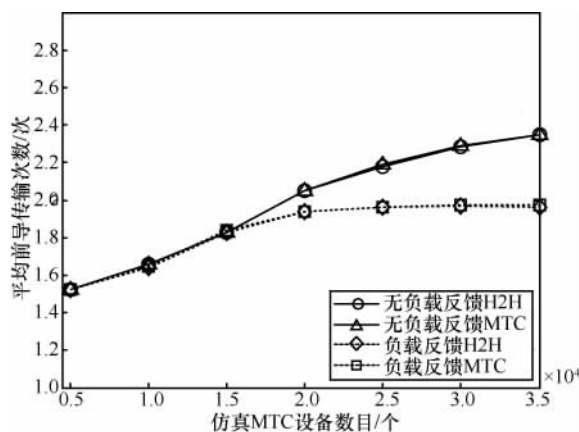


图5 不同负载时H2H/MTC平均前导传输次数

入成功率,较低的前导传输次数。改善了MTC设备数量十分巨大时对H2H用户产生的冲击,提升了网络的性能和稳定性。

参考文献:

- [1] 3GPP. Study on RAN improvements for machine type communication: TR37.868[S]. 2011.
- [2] 3GPP. Service requirements for machine-type communications: TS22.368 [S]. 2012.
- [3] LIEN S Y, CHEN K C, LIN Y. Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(4): 66-74.
- [4] CHENG J P, LEE C, LIN T M. Prioritized random access with dynamic access barring for RAN overload in 3GPP LTE-A networks[C]//2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), Dec 5-9, 2011, Houston, Texas, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 368-372.
- [5] LO A, LAW Y W, JACOBSSON M, et al. Enhanced LTE-advanced random-access mechanism for massive machine-to-machine(M2M) communications [C]//27th World Wireless Research Forum (WWRF) Meeting, Oct 18 -20, 2011, Dusseldorf, Germany. [S.l.:s.n.], 2011: 1-5.
- [6] AROUK O, KSENTINI A. General model for RACH procedure performance analysis [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 20(2): 1.
- [7] HSU Y H, WANG K, TSENG Y C. Enhanced cooperative access class barring and traffic adaptive radio resource management for M2M communications over LTE-A [C]//Signal and Information Processing Association Summit and Conference, Oct 29-Nov 1, 2013, Taiwan, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [8] HE H, DU Q, SONG H, et al. Traffic-aware ACB scheme for massive access in machine-to-machine networks [C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 8-12, 2015, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2015: 617-622.
- [9] PRATAS N K, THOMSEN H, STEFANOVIC C, et al. Code-expanded random access for machine-type communications[C]//2012 IEEE Globecom Workshops, December 3-7, 2012, Anaheim, California, USA. New Jersey: IEEE Press, 2012: 1681-1686.
- [10] 3GPP. Medium access control (MAC) protocol specification (release 8): TS36.321 V8. 2.0 [S]. 2008.
- [11] PIRO G, GRIECO L A, BOGGIA G, et al. Simulating LTE cellular systems: an open-source framework[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 498-513.
- [12] CHERKAoui S, STANICA R. LTE-A random access channel capacity evaluation for M2M communications[C]//2016 Wireless

Days (WD), March 23-25, 2016, Toulouse, France. New Jersey: IEEE Press, 2016: 1-6.

[作者简介]



段红光(1969-),男,重庆邮电大学高级工程师、硕士生导师,主要研究方向为新一代宽带移动通信核心芯片、协议栈及系统应用、宽带无线通信。



卢松品(1990-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为新一代宽带移动通信核心芯片、无线接入网、5G MTC 增强。



王利飞(1990-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为移动通信及无线接入网。



谭丹(1990-),女,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为 5G 双连接技术及无线接入网。



高江奇(1990-),男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为移动通信及无线接入网。