

基于 QoS 有序竞争的 4G-LTE 同步 RAN/CN 过载融合控制

李 骞¹, 孙瑞志¹, 朱坤华², 席 磊²

(1 中国农业大学 信息与电气学院, 北京 100080; 2 河南牧业经济学院 自动化学院, 河南 郑州 450000)

摘 要: 针对 4G-LTE 系统中, 提出一种基于服务质量(QoS)有序竞争的 LTE 同步无线接入网/核心网过载融合控制策略。首先, 对无线接入网和核心网分别进行考虑, 充分考虑类别设备的接受数量和最大同步机器类型通信活跃设备数量, 利用激活状态的马尔可夫链稳态概率和访问类别限制策略, 分别设计了无线接入网和核心网过载控制策略; 其次, 通过考虑类别服务质量、每个 eNB 容许负载的最大值以及设备的可接受数量, 实现了 RAN 过载和 CN 过载的融合控制; 最后, 通过实验分析验证了所提方法有效性。

关键词: 4G-LTE 系统; 有序竞争; 无线接入网; 核心网; 过载控制

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)06-0008-06

4G-LTE Synchronous RAN/CN Overload Fusion Control Based on QoS Ordered Competition

LI Qian¹, SUN Rui-zhi¹, ZHU Kun-hua², XI Lei²

(1 College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100080, China;

2 College of Automation, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In the 4G-LTE system, here proposed the 4G-LTE synchronous RAN/CN overload fusion control based on QoS ordered competition. Firstly, the wireless access network and the core network was considered separately, full consideration of the categories of equipment acceptance and the maximum amount of synchronous machine type communication active number of devices, here used the activation state of the Markov chain state probability and access class restriction strategies to design radio access network and the core network overload control strategy; Secondly, by taking into account the quality of the class service, the maximum value of each eNB allowable load and the acceptable number of devices, the fusion control of RAN overload and CN overload is realized; Finally, the experimental results show that the proposed method is effective.

Key words: 4G-LTE system; orderly competition; wireless access network; core network; overload control

1 引言

机器对机器通信被认为是物联网的基本组成部分,其目的是通过互联网延长通信距离^[1]。机器对机器通信被称为以第四代移动通信技术^[2](4th Generation Partnership Project, 4G)为载体的机器类通信(Machine-Type Communication, MTC)^[3-5]。MTC用最少的人际交往支持各种自动化系统,具备广泛的应用前景,长期演进^[6](Long Term Evolution,

LTE)/LTE 升级版(LTE-A)网络是很好的工具,可令 MTC 基础设施具有更高的游离覆盖率,并支持更为高速的数据传输。但是当前针对 LTE 网络的研究多是针对下行链路的优化,而大量 MTC 设备部署对于 LTE 上行链路处理能力提出了挑战^[7]。为缓解 MTC 设备无线接入网(Radio Access Network, RAN)过载和核心网(Core Network, CN)问题提出一些改进方案^[8-9],相继提出用于改善 4G^[10]。但目前解决方案^[11]多是分别针对 RAN 过载

收稿日期: 2016-10-30; 修回日期: 2016-11-15

基金项目: 河南省重大专项(141100110800); 河南牧业经济学院科技创新团队(HUAHE201506)

或 CN 过载问题开展研究的,但是 RAN 过载和 CN 过载作为系统性问题,应该进行综合考虑,这需要完没解决 RAN 过载和 CN 过载之间存在的参数耦合问题,具有一定的难度^[12].

对此,本文在分别设计 RAN 过载和 CN 过载控制策略基础上,通过考虑类别 I 的服务质量(Quality of service, QoS),以及每个 eNB 容许负载的最大值,然后结合类别 II 中设备的可接受数量,实现了 RAN 过载和 CN 过载的融合控制,仿真结果验证了方法的有效性.

2 系统模型与问题描述

图 1 给出了基于 MTC 的 LTE 的简化系统模型,其中 RAN 和 CN 组成部分由点划线分开^[13-14].

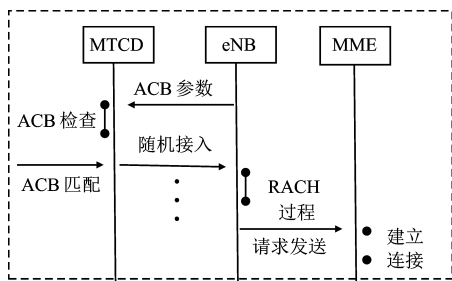


图 1 基于 MTC 的 LTE 的简化系统模型

在 RAN 中,每个区域中的 eNB 通过 S1 接口请求对 MTC 设备和 CN 进行中继. 在每个区域中,考虑存在两种类型的 MTC 设备情形:事件触发不协调 MTC 和事件触发协调 MTC,分别命名为类别 I 和类别 II. 类别 I 包括的应用有消费电子,车队管理等. 在类别 I 中,每个设备监视环境,并定时将数据发送到基站. 类别 II 包含大量的设备,如智能电表等,并周期性的将其数据发送到基站. 为满足类别 I 设备的服务质量,这些设备与类别 II 设备相比具有更高的网络资源使用优先级.

在类别 I 的数据传输模型中,每个装置以一定概率被触发或者在事件数据发送过程中被触发. 由于极低的接入延迟和类别 I 的流量高传输成功率要求,假定类别 I 的每个设备具有的队列为 1,可表示为 N_1^1 . 由于新到达的数据包包含最新监测资料,因此队列中的等待数据包将被忽略. 类别 I 设备的传输模型可表示为一个两状态 Markov 链^[15],见图 2 所示.

假定如果有一个数据包 π_1 要发送,则类别 I 的每个设备均处于激活状态. 当设备处于活跃状态,其向 eNB 发送请求指令,并以概率 p_{ACB}^1 通过 PRACH 建立链接. 假定在设备成功概率比预定阈值 P_0 大

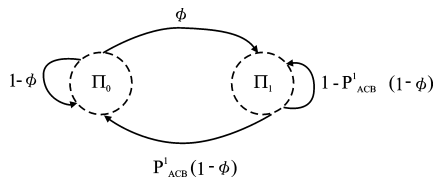


图 2 类别 I 的 MTC 传输模型

情况下,类别 I 设备的服务质量 QoS 能够满足.

利用 Beta 分布建立大量类别 II 设备的到达调度的相关流量模型. 该分布模型对 N_2^1 个类别 II 设备进行流量融合,其在固定时间 T_A 以关联方式到达. Beta 概率密度函数的参数设定为: $\alpha = 3, \beta = 4$ 和 $T_A = 10$ s. 则利用参数 α 和 β 可定义 Beta 分布为:

$$p_{ACB}^1 g(t) = \frac{t^{\alpha-1} (T_A - t)^{\beta-1}}{T_A^{\alpha+\beta-1} \text{beta}(\alpha, \beta)} \quad (1)$$

式中, $\text{beta}(\alpha, \beta)$ 为 Beta 函数. 在激活时间内,类别 II 的每个设备以概率 P_{ACB}^2 与其他设备进行数据交流. 没有任何时间限制,这意味着在接下来的交流中会出现设备数据碰撞概率. 对于类别 II 的 MTC 设备并不限定重传尝试数目.

3 RAN 和 CN 过载控制方案

3.1 控制方案描述

为了区分 LTE 内部 RAN 和 CN 的 MTC 过载控制问题的优缺点,这里提出了三个不同的机制: RAN 过载控制, CN 过载控制和同步 RAN 和 CN 过载控制. 图 3 给出一个简化的消息传递过程.

(1) RAN 过载控制机制. 在 eNB 中只考虑 RAN 约束以计算所有 MTC 类别的 ACB 概率. 如图 3(a)所示,在这种情况下, eNB 以自适应的方式进行 ACB 因子广播,以此来获得 MTC 设备接入概率. 在这种机制下,如果从多个区域的请求数量大于 MME 的服务容量, HTC 设备的请求将在 CN 中被丢弃.

(2) CN 过载控制机制. 图 3(b)中, eNB 通过已经从 MME 接收到的通知消息,确定为 CN 的提供负载,见图 4(b)所示. 为了防止 CN 处于过载状态,如果接收到的请求的数目超过了允许提供给 CN 的最大容量,则 eNB 拒绝在 RAN 中 MTC 设备的过度接收请求. 由于在该机制中不考虑 RAN 约束,这可能会危及 RAN 中高优先级流量的服务质量 QoS.

(3) 同步 RAN 和 CN 过载控制. 图 3(c)中, eNB 同时考虑 RN 和 CN 的限制来决定 MTC 设备的竞争数量. 在这种机制下, eNB 根据 MTC 活跃设备数

量、RAN 可用资源数目、类别 I 所需 QoS 和从 MME 接收到的通知消息, 计算并广播动态 ACB 概率。

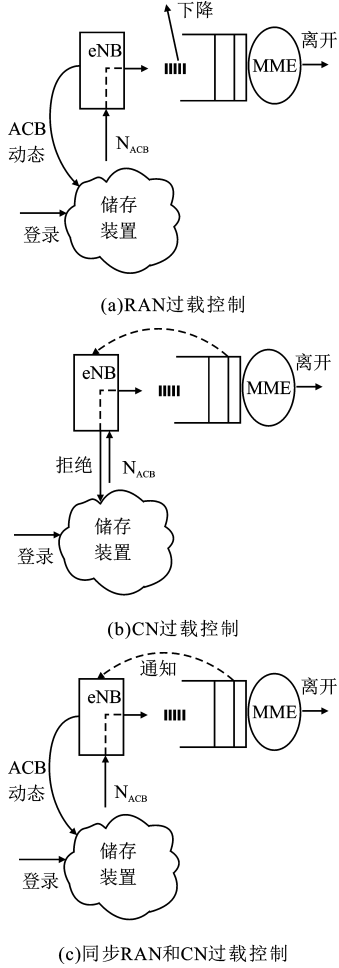


图 3 MTC 网络域的三个过载控制方案

3.2 RAN 过载控制

令 $\bar{N}_{ACB}^1$ 表示被允许参与竞争的类型 I 设备的接受数量。利用 RAN 中给定的 M 个可用资源, 资源的选取概率可计算如下:

$$P_M = \frac{M}{\bar{N}_{ACB}^1} \quad (1)$$

为最大限度地提高资源的利用效率, 每个资源必须平均由一个 MTC 设备选取, 即 $P_M = 1$, 因此 $\bar{N}_{ACB}^1 = M$ 。如果 MTC 设备竞争数量大于 / 小于 M , 则会发生过载 / 利用不充分情况。为了避免这个问题, ACB 概率用来维持 MTC 设备的竞争数量接近于 M 。由于类别 I 的设备登录是时间独立的, 则以最大限度资源利用率将可用资源分配给类别 I 的 MTC 设备。类别 I 的 ACB 概率最佳值可计算为:

$$p_{ACB}^1 = \frac{\bar{N}_{ACB}^1}{N_1} = \frac{\bar{N}_{ACB}^1}{N_1 \Pi_1} \quad (2)$$

式中, N_1 代表类别 I 有源器件的预期数量, Π_1 是处于激活状态的马尔可夫链稳态概率:

$$\Pi_1 = \frac{\phi}{\phi + p_{ACB}^1(1 - \phi)} \quad (3)$$

为计算 p_{ACB}^1 , 利用 M 替换 $\bar{N}_{ACB}^1$ 取值, 可得:

$$p_{ACB}^1 = \begin{cases} \frac{M\phi}{\phi(N_1^1 + M) - M}, & M < N_1^1\phi \\ 1, & M \geq N_1^1\phi \end{cases} \quad (4)$$

如果激活设备数量小于 M , 则 $p_{ACB}^1 = 1$ 。这意味着, 随机发起的接入不存在限制。类别 I 的活跃设备的成功概率 P_{sc}^1 , 可通过除以成功传输请求预期数量获得, 可表示为 N_{sc}^1 除以 N_1 :

$$P_{sc}^1 = N_{sc}^1 / N_1 \quad (5)$$

式中, N_{sc}^1 可计算为:

$$N_{sc}^1 = MP_{M,sc}^1 \quad (6)$$

式中, $P_{M,sc}^1$ 表示给定的资源选择概率, 其计算形式为:

$$P_{M,sc}^1 = \left[\frac{p_{ACB}^1 N_1}{1} \right] \frac{1}{M} \left(1 - \frac{1}{M} \right)^{p_{ACB}^1 N_1 + \bar{N}_{ACB}^2 - 1} \quad (7)$$

式中, $\bar{N}_{ACB}^2$ 表示类别 II 中允许参加竞争的设备数。为满足类别 I 设备的 QoS 要求, 这些设备的成功概率应该大于 P_0 。因此, $\bar{N}_{ACB}^2$ 可通过在式(6)中用 P_0 替换 P_{sc}^1 获得:

$$\bar{N}_{ACB}^2 = \left[\left(1 - p_{ACB}^1 N_1 + \frac{\ln(P_0 / p_{ACB}^1)}{\ln((M-1)/M)} \right) \right] \quad (8)$$

式中, $x^+ = \max\{x, 0\}$, 由于类别 II 设备的登录具有时间依赖性, 因此类别 II 新登录设备期望数量可表示为 a_2 , 其在每帧中变化。为了控制类别 II 中的大量类别, p_{ACB}^2 可计算为:

$$p_{ACB}^2(k) = \min \left\{ 1, \frac{\bar{N}_{ACB}^2}{N_2(k)} \right\} \quad (9)$$

式中, $N_2(k)$ 为在帧 k 中类别 II 活跃设备期望数量, 可计算如下:

$$N_2(k) = a_2(k) + N_2(k-1) - N_{sc}^2(k-1) \quad (10)$$

式中, $N_{sc}^2(k-1)$ 可计算如下:

$$N_{sc}^2(k-1) = (p_{ACB}^2(k-1) N_2(k-1) - 1) \left(1 - \frac{1}{M} \right)^{p_{ACB}^2 N_1 + p_{ACB}^2(k-1) N_2(k-1) - 1} \quad (11)$$

式中, N_{sc}^2 最大值 $N_{sc, \max}^2$ 可通过利用 $\bar{N}_{ACB}^2$ 替换 $p_{ACB}^2(k-1)N_2(k-1)$ 获得:

$$N_{sc, \max}^2 = (\bar{N}_{ACB}^2) (1 - \frac{1}{M})^{p_{ACB}^1 N_1 + p_{ACB}^2 (k-1) N_2 (k-1) - 1} \quad (12)$$

因为所有的 N_T^2 类别 II 设备在 $[0, T]$ 内是活跃的, 则在第 k 帧的类别 II 设备登录数量可计算为:

$$a_2(k) = N_T^2 \int_{t_{k-1}}^{t_k} g(t) dt \quad (13)$$

式中, t_{k-1} 和 t_k 是帧的开始和结束时间.

3.3 CN 过载控制

在 CN 过载控制中, 令 $N_2^{\max}$ 为类别 II 中最大同步 MTC 活跃设备数量. 设定的 ACB 概率值应该接近于 $M/N_2^{\max}$ 以保证在不发生拥塞崩溃前提下, 负载运行充分. 为确定拒绝请求的数量 $N_{R,i}^2$, 可以从成功发送的请求数量 $N_{s,i}^2$ 中减去 $N_{L,i}^2$ 获得:

$$N_{R,i}^2(k) = [N_{s,i}^2(k) - N_{L,i}^2(k)]^+ \quad (14)$$

式中, $N_{L,i}^2(k)$ 可通过在 eNB 中使用接收的 MME 二进制反馈计算获得. $N_{L,i}^2(k)$ 的计算形式为:

$$N_{L,i}^2(t + \Delta t) = N_{L,i}^2(t) + \theta \Delta t I(y = 0) - \sigma \Delta t N_{L,i}^2(t) I(y = 1) \quad (15)$$

式中, I 是指标函数, $\theta > 0$ 和 $\sigma \in (0, 1)$, 则 Q 值的变化量为:

$$Q(t + \Delta t) = [Q(t) + (N_{L,1}^2(t) + N_{L,2}^2(t)) \Delta t - D \Delta t]^+ \quad (16)$$

式中, D 指的是 MME 节点固定的服务率. 如果 $\Delta t \rightarrow 0$, 则系统动力学可通过以下的非线性微分方程进行建模:

$$\dot{N}_{L,i}^2(t) = \frac{\theta}{1 + e^{v(Q(t) - Q_0)}} - \frac{\sigma N_{L,i}^2(t)}{1 + e^{v(Q_0 - Q(t))}}, i = 1, 2 \quad (17)$$

$$\dot{Q}(t) = [N_{L,1}^2(t) + N_{L,2}^2(t) - D]^+ \quad (18)$$

式中, $\dot{x}(t)$ 表示 $x(t)$ 的时间导数. 上述第一式为控制规则模型, 第二式反映的是 MME 的队列长度, 表示 MME 服务率和输入流量的差异.

通过对这些非线性方程在平衡点 $(N_{L,i}^2, Q^*)$ 附近进行线性逼近, 平衡点可通过 $\dot{Q} = 0$ 和 $\dot{N}_{L,i}^2 = 0$ 获得, $i = 1, 2$. 因此可得:

$$Q^* = Q_0 - \frac{\ln \sigma D / n \theta}{v}, N_{L,i}^2 = \frac{D}{n} \quad (19)$$

式中, n 表示单元格的数目. 因此, 对于给定的 Q^* 和 $N_{L,i}^2$, 线性化的系统动力学方程为:

$$\begin{cases} \delta \dot{N}_{L,i}^2(t) = -I_N \delta N_{L,i}^2(t) - I_Q (\delta Q(t) - Q_0) \\ \delta \dot{Q}(t) = n \delta N_{L,i}^2(t) \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\delta N_{L,i}^2 \triangleq N_{L,i}^2 - N_{L,i}^{2*}$, $\delta Q \triangleq Q - Q^*$. I_N 和 I_Q 分别为 $\dot{N}_{L,i}^2$ 相对于 $N_{L,i}^2$ 的导数, 以及 Q 在平衡点处的导数, 分别表示为:

$$I_N = \frac{n \sigma \theta}{\sigma D + n \theta}, I_Q = \frac{v \theta D}{n \theta + \sigma D} \quad (21)$$

整个系统的传递函数可表示为:

$$T(s) = \frac{n I_Q}{s^2 + s I_N + n I_Q} \quad (22)$$

3.4 RAN 和 CN 的同步过载控制

上述两节分别给出 RAN 和 CN 的过载控制方法, 在文中将对 RAN 和 CN 过载进行同步控制. 通过考虑类别 I 从 MME 中直接接收到的 QoS 信息, 每个 eNB 用于计算类别 II 设备的 ACB 概率, $p_{ACB,i}^2$. 通过考虑类别 I 的 QoS, 每个 eNB 设定 $N_{sc, \max}^2$ 作为在帧 k 中 MME 容许负载的最大值:

$$N_{L,i}^2(k) = \min((N_{L,i}^2(k-1) + \theta), N_{sc, \max}^2) I(y = 0) + (N_{L,i}^2(k-1) - \sigma N_{L,i}^2(k-1)) I(y = 1) \quad (23)$$

式中, $N_{sc, \max}^2$ 代表类别 II 中设备的最大传输请求, 可根据类别 I 的 QoS 进行计算.

令 $\bar{N}_{ACB,i}^2$ 表示类别 II 中设备的可接受数量, 可对 RAN 和 CN 中的设备竞争数量进行约束. 因此, 通过使用 $N_{L,i}^2(k)$ 的计算值, 可查询 $\bar{N}_{ACB,i}^2$ 取值:

$$N_{L,i}^2(k) = \left(\bar{N}_{ACB,i}^2(k) \right) \left(1 - \frac{1}{M_i} \right)^{N_{ACB,i}^2(k) + N_1 P_{ACB}^1 - 1} \quad (24)$$

$$p_{ACB,i}^2(k) = \min \left(1, \frac{2 \bar{N}_{ACB,i}^2(k)}{N_{2,i}(k)} \right) \quad (25)$$

式中, $N_{2,i}(k)$ 在帧 k 中类别 II 中设备的活跃数量. 那么 RAN 和 CN 的同步过载控制过程如算法 1 所示.

算法 1: RAN 和 CN 的同步过载控制

输入: $M, \phi, N_T^1, N_T^2, P_0, \sigma, \theta$

输出: $p_{ACB}^1, p_{ACB}^2(k)$

1. 设定 $N_{L,i}^2(1) = 0$;
2. 根据式(4) 计算 p_{ACB}^1 ;
3. 根据式(8) 计算 $\bar{N}_{ACB}^2$;
4. 根据式(12) 计算 $N_{sc, \max}^2$;
5. for $j = 1; k$ do

6. 根据式(23) 计算 $N_{L,i}^2(k)$;
7. 根据式(24) 计算 $p_{ACB,i}^2(k)$;
8. 根据式(10) 计算 $N_2(k)$;
9. 根据式(24) 更新 $N_2(k)$;
10. endfor

融合控制策略与单独控制策略相比,在类别Ⅰ的成功传输数量均值、类别Ⅱ的请求数量均值以及MME的队列长度和所需信令消息数量上具有优势,见表1所示.

表 1 算法对比			
指标	RNA 过载控制	CN 过载控制	融合过载控制
类别Ⅰ成功传输数量均值	可保证	不可保证	可保证
类别Ⅱ的请求数量均值	不可保证	可保证	可保证
MME的队列长度	不可保证	可保证	可保证($N_q^2(k) > N_q^1(k)$)
所需信令消息数量	中度	中度	高度

4 实验分析

在这一部分中,对所提 MTC 设备过载控制算法性能表现进行对比分析,类别Ⅰ和类别Ⅱ的流量根据两状态马尔可夫链模型生成,见图2所示.在区域1和2中类别Ⅱ的突发流量登录时间分别为0 s和3 s,而类型Ⅰ的独立时间独立流量在后台运行.在系统中,每个类别Ⅰ的MTC设备可以概率 p_{acb}^1 发送其请求.同时,每个MTC设备可以概率 p_{acb}^2 参与随机接入过程.实验中有关系统参数设置:类别1设备登录概率 $\phi = 0.03$,类别Ⅰ设备总量 $N_T^1 = 400$,类别Ⅱ设备总量 $N_T^2 = 10\ 000$,缓冲区大小 $B = 160$;队列长度阈值 $Q_0 = 80$,MME服务率 $D = 14$,类别Ⅰ请求成功概率 $P_0 = 0.7$,区域1和区域2的资源数量 $M_1 = 100$ 、 $M_2 = 150$.类别Ⅱ设备在区域1和区域2的登录缓冲时间 $T_1 = 0$ s和 $T_2 = 3$ s,定义稳定时间 $\gamma = 0.8$ s.对比机制选取单独RAN和单独CN过载控制策略.实验平台选取:matlab2013a.

由于所提机制假定在CN类别设备中存在预留资源,则eNB仅考虑RAN中的可用资源数量,来计算 p_{ACB}^1 (以类别Ⅰ为例).图4给出类别设备的接入概率与类别流量的成功数据传输数量均值间的关系.

根据图4所示实验结果可知,随着类别设备的

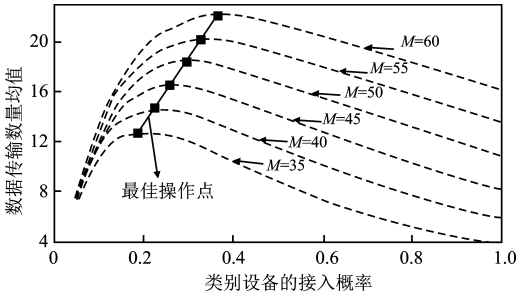
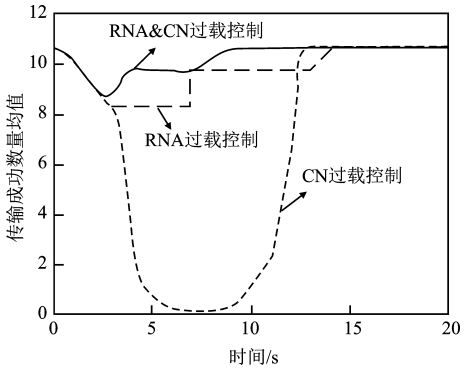


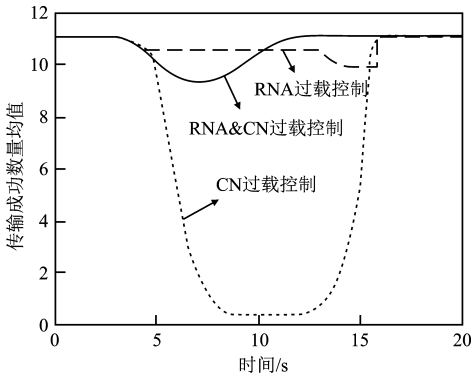
图 4 类别设备接入概率与成功数据传输量

接入概率的增加,类别流量的成功数据传输数量均值呈现先增加后降低的趋势,因而在成上行通道的拥堵,进而在成处理能力的下降,因此选取合适的最佳工作点具有非常重要的研究意义.同时可看出在资源数值 $M=35\sim60$ 情况下,类别流量的成功数据传输数量均值呈现单调增加的趋势,表明资源越多,数据传输量也越多.

图5给出三种对比控制策略在区域Ⅰ和区域Ⅱ中的成功数据传输数量均值随着时间指标的变化情况.



(a)区域1成功数据传输数量均值



(b)区域2成功数据传输数量均值

图 5 成功数据传输数量均值随着时间指标的变化

根据图5所示成功数据传输数量均值随着时间指标的变化请可知,融合过载控制机制和单独RNA

过载控制机制的 N_x^1 和 N_x^2 两个指标参数的取值均始终大于设定阈值 8.4,但是在单独 CN 过载控制策略中,由于存在类型 II 的设备登录的不可控性,导致其 N_x^1 和 N_x^2 两个指标参数在中期出现下降趋势.此外,融合过载控制机制的 N_x^1 和 N_x^2 两个指标参数要优于两种单独的过载控制机制.

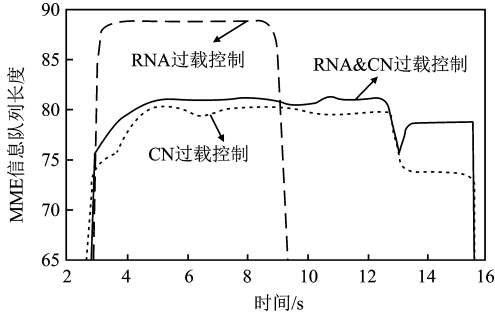


图6 MME 的平均队列长度

根据图6所示MME的平均队列长度对比情况可知,随着时间的增加融合过载控制机制和单独CN过载控制机制的队列长度均是先增加,后保持相对稳定,保持在设定阈值附近,这可以防止资源不足或MME的队列缓冲区溢出.但是单独RNA过载控制机制的平均队列长度先增加,后稳定一段时间后出现快速下降,并降低为0,原因在于MTC设备的请求在CN下降时出现MME缓冲溢出,无法实现很好的控制效果.同时,可看出融合过载控制机制要优于对比机制的控制效果.

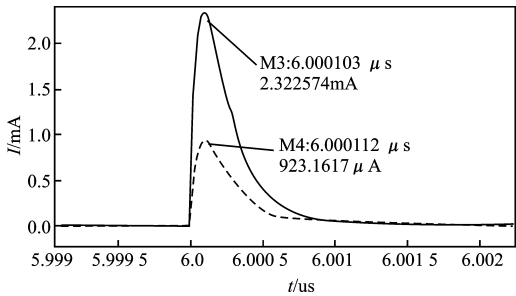
5 结束语

本文提出一种基于服务质量(QoS)有序竞争的LTE同步无线接入网/核心网过载融合控制策略,利用激活状态的马尔可夫链稳态概率和访问类别限制策略,分别设计了无线接入网和核心网过载控制策略,并基于类别服务质量、每个eNB容许负载的最大值以及设备的可接受数量,实现了RAN过载和CN过载的融合控制,实验结果验证了算法的有效性.上述算法的实现是采用matlab仿真平台进行实现的,如何在实际操作环境下进行算法的模拟实现,是下一步重点研究的方向.

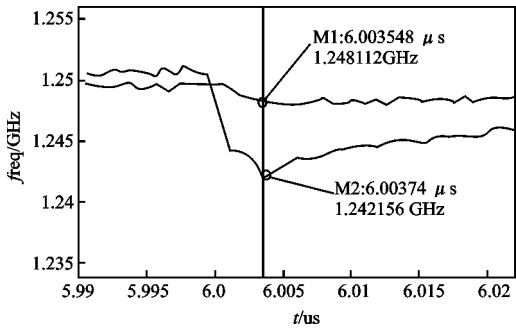
参考文献:

[1] 王群, 钱焕延. 一种面向物联网的M2M通信解决方案[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(11): 13-17.
 [2] Yali Wu, Guixia Kang, Yanyan Guo, et al. An improved random access scheme for M2M communications[J]. China Communications, 2016, 13(6): 12-21.

[3] 彭军, 马东, 刘凯阳, 等. 基于LTE D2D技术的车联网通信架构与数据分发策略研究[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 62-70.
 [4] Junwei Qiu, Yuchee Tseng. M2M encountering: collaborative localization via instant inter-particle filter data fusion[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(14): 5715-5724.
 [5] Mehaseb M A, Gadallah Y, Elhamy A. Classification of LTE uplink scheduling techniques: an M2M perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1310-1335.
 [6] Saehoon Kang, Wonyong Yoon. SDN-based resource allocation for heterogeneous LTE and WLAN multi-radio networks[J]. The Journal of Supercomputing, 2016, 72(4): 1342-1362.
 [7] Nasreddine Mallouki, Bechir Nsiri, Sofien Mhatli, et al. Erratum to: analysis of full volterra and sparse volterra nonlinear equalization for downlink LTE system[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 89(4): 1433-1433.
 [8] Jinho Choi. On the adaptive determination of the number of preambles in RACH for MTC[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(7): 1385-1388.
 [9] Osama Arouk, Adlen Ksentini. General model for rach procedure performance analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(2): 372-375.
 [10] Zehua Wang, Vincent W S Wong. Optimal access class barring for stationary machine type communication devices with timing advance information[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(10): 5374-5387.
 [11] 徐昶, 王聪, 刘灵雅, 等. 一种M2M网络中的能量有效媒体访问控制协议[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 277-280.
 [12] Jeffrey H Reed, Andrew W Clegg, Aditya V Padaki, et al. On the Co-Existence of TD-LTE and radar over 3.5 GHz band: an experimental study[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(4): 368-371.
 [13] Abdelmohsen Ali, Walaa Hamouda. Employing broadcast channel for frequency tracking in LTE-MTC systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(4): 436-439.
 [14] Tao Deng, Xian Wang, Pingzhi Fan, et al. Modeling and performance analysis of a tracking area list-based location management scheme in LTE networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6417-6431.



(a)两种结构 CP 电流脉冲比较



(b)两种结构注入点频率比较

图 7 加固前同加固后结果比较

加固电荷泵结构能够明显的减少辐射脉冲幅度和宽度,并改善注入时刻点 PLL 输出频率稳定度.

参考文献:

[1] Loveless T D, Massengill L W, Bhuva B L, et al. A single-event-hardened phase locked loop fabricated in 130 nm CMOS[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2012-2020.

[2] 贺朝会. 单粒子效应的研究现状和动态 [C] //第一届中国核技术及应用研究学术研讨会摘要文集. 北京, 2006: 12-13.

[3] Loveless T D. A radiation hardened by design charge pump for phase locked loop circuits[D]. Vanderbilt: Vanderbilt University, 2007.

[4] 赵振宇. 锁相环中单粒子瞬变效应的分析与加固[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

[5] Boulghassoul Y, Massengill L W, Sternberg A L, et al. Towards SETMitigation in RF digital plls: from error characterization to radiation hardening considerations[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006, 53(4): 2047- 2053.

[6] Loveless T D, Massengill L W, Holman W T, et al. Modeling and mitigating single-event transients in voltage-controlled oscillators [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007, 54(6):2561-2567.

[7] Messenger G C. Collection of charge on junction nodes from ion tracks [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6): 2024-2031.

[8] Quming Zhou, Kartik Mohanram. Cost-effective radiation hardening technique for combinational logic[J]. IEEE J. Solid-State Circuits, 2006, 25(1):155-166.

作者简介:

刘辉华 男,(1976-),博士. 研究方向为高速电路可靠性设计、混合集成电路设计. E-mail:lhhua@uestc.edu.cn.

李 平 男,(1957-),教授,博士生导师. 研究方向为混合集成电路设计、抗辐照加固.

徐小良 男,(1985-),硕士. 研究方向为 AD/DA.

张 宪 男,(1989-),硕士. 研究方向为时钟恢复.

(上接第 13 页)

[15] Yang Song, Jie Yang, Taicheng Yang, et al. Almost sure stability of switching markov jump linear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(9): 2638-2643.

作者简介:

李 骞 女,(1989-),博士研究生. 研究方向为农业数据处理与云计算. E-mail:jianghuiplinglyi@qq.com.

孙瑞志 男,(1964-),博士,教授. 研究方向为农业数据采集与处理技术.

朱坤华 女,(1974-),硕士,副教授. 研究方向为机器学习.

席 磊 男,(1971-),博士,教授. 研究方向为畜禽清洁生产与装备.