

LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议

杨柳, 范平志, 郝莉

(西南交通大学 信息编码与传输省重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 提出了一种 LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议。采用贝塔分布对事件驱动 M2M 业务建模, 通过统计一段时隙内的随机接入前导码空闲比来估计信道流量, 从而设计控制因子进行流量控制。建模分析了采用该协议的系统吞吐量和时延性能, 与目前在 LTE 系统中的随机接入协议的性能进行了对比。结果表明, 该随机接入协议能够很好地估计系统负载, 通过控制因子减少碰撞, 从而显示出更好的系统性能。

关键词: 机器对机器; 事件驱动; LTE; 流量控制

中图分类号: TN914.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)12-0053-09

Flow control random access protocol for event-driven machine-to-machine traffics in LTE network

YANG Liu, FAN Ping-zhi, HAO Li

(Provincial Key Lab of Information Coding & Transmission, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A flow control random access protocol for event-driven machine-to-machine traffics in LTE network is proposed. The beta distribution is adopted to model the event-driven M2M traffics. This protocol uses the random access preamble free ratio in a fixed number of slots to estimate the channel load and calculate the flow control factor to control the flow. The throughput performance of the proposed protocol is modeled and analyzed, and compared with the random access protocol in LTE system. It is shown that the proposed protocol performs much better because it can estimate the system load accurately in most situations and reduce collision by flow control factor.

Key words: machine to machine; event-driven; LTE; flow control

1 引言

M2M(machine-to-machine)通信指机器与机器之间的通信形式, 在这种通信形式中, 机器能自动完成整个通信过程^[1]。M2M 通信近年来发展迅猛, 在很多领域中得到了广泛的应用, 例如电子医疗^[2]、智能电网^[3]、没有人为干预的多媒体娱乐与休闲等。在实际环境中, M2M 通信具有和传统的 H2H 业务不同的一些特点: M2M 业务节点每次传输的数据分组都是非常小的, 但是传输数据的频率高于 H2H

节点; M2M 的节点数大大多于 H2H 的节点数; M2M 设备的移动性低、处理能力弱; M2M 业务对时延的需求并不是非常严格^[4,5]等。

在 LTE 系统中, 由于单一区域内 M2M 终端数量巨大, 决定了其只能采用基于竞争的随机接入方式, 而且当海量 M2M 终端在事件驱动时, 会几乎同时发起随机接入, 造成网络拥塞, 系统性能明显恶化, 数据分组丢失严重, 造成的时延无法忍受。因此, 必须设计新的接入算法, 引入流量控制机制来解决事件驱动 M2M 业务造成的短时间内业务猛

收稿日期: 2013-08-05; 修回日期: 2014-05-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2014AA01A707); 国家自然科学基金资助项目(61271245); 教育部重大基金资助项目(311031); 中央高校基本科研业务费专题基金资助项目(SWJTU12ZT02/2682014ZT11)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Programme of China (863 Program) (2014AA01A707); The National Natural Science Foundation of China (61271245); Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (311031); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (SWJTU12ZT02/2682014ZT11)

增的业务冲突,以保证数据的有效传输。由于 M2M 业务和传统 H2H 业务在业务特点、模型构建、目标需求等方面有很多不同,近年来,一些研究成果专门针对 M2M 业务的流量控制方法进行了研究^[6-15]。

目前,针对 M2M 业务量巨大的流量控制解决方案是采用群组广播的方式(GA, group paging)^[16]。在群组广播方式中,基站通过发送广播信息激活数量巨大的 M2M 设备同时向基站发送数据分组。没有接收到广播信息的 M2M 设备是不能发送数据分组的。在 LTE 系统中被激活的 M2M 设备遵循竞争随机接入流程进行随机接入,如果发送失败的用户采用退避方式等待重发。

群组广播机制类似于文献[11]中提到的群组随机接入(GRA, group random-access)的方式,2 种机制都允许一群用户同时进行随机接入。不同的是,群组广播机制中,M2M 设备的数量是有限且已知的。

在各种面向 M2M 业务的流量控制随机接入协议的设计中,常常需要估计系统中的负载,从而通过不同的流量控制方式,例如流量控制因子、退避算法和功率逐步增长,来达到减少信道中同时传输的数据分组的个数,提高传输成功概率,提高系统性能的目的。

文献[6]提出了一种针对事件驱动 M2M 业务的 ATL S-MACA(adaptive traffic load slotted multiple access collision avoidance)流量控制接入算法,采用载波侦听的方式统计周期内的信道占用率估计信道流量,通过控制发送概率进行流量控制。但该算法采用泊松分布的方式对事件驱动 M2M 业务建模,这不符合实际情况。

文献[7]提出了一种针对事件驱动 M2M 业务的快速自适应流量控制机制,该机制已知同时发送数据分组的 M2M 设备总数,采用贝塔分布对事件驱动 M2M 业务建模,通过统计过去一段时隙内信道是空闲还是发生碰撞,从而估计阻塞的数据分组个数,该机制中统计窗口在 50 个时隙左右,因此称为快速自适应,但是该机制没有考虑到 LTE 系统中没有将信道资源分别分配给 M2M 业务和传统的 H2H 业务,不能通过信道状态估计信道流量,而且该机制一直在进行统计,会消耗基站更多的资源。文献[15]在文献[7]的基础上进一步进行研究,采用中断式泊松过程对事件驱动

M2M 业务建模,仍然采用信道忙闲状态来估计系统流量。

文献[8]提出了一种 LTE 系统的流量自适应 M2M 接入控制算法,该算法通过统计一段时隙内的随机接入前导码空闲比来估计系统流量,但该文献也采用了泊松分布的方式对事件驱动 M2M 业务建模,而且统计窗口需要至少 500 个时隙,由于统计窗口内不能采取流量控制,因此会造成数据分组的严重堵塞情况,降低系统性能。

文献[13]中给出了在已知同时发送数据分组的 M2M 设备总数的前提下,采用泊松平稳过程对 M2M 业务进行建模,对信道中成功传输和发生碰撞的数据分组数量进行估计。

综上,目前 LTE 系统中针对 M2M 业务的流量控制的研究成果主要有 2 个突出的分歧点。

1) 采用何种分布来对事件驱动 M2M 业务进行建模。

泊松分布更适合对平稳过程的 H2H 业务进行建模,而贝塔分布和中断式泊松过程这些脉冲式分布过程更适合对通信流量具有激增和锐减特性的事件驱动 M2M 业务进行建模。

2) 使用何种参数对系统流量进行估计。

通常在进行流量估计时,多采用通信资源被占用的情况来估计系统的忙闲状态,例如信道占用比或者前导码空闲比。在 LTE 系统中,采用前导码空闲比更合适,因为用于基于竞争的随机接入的随机接入前导码总数是固定的,为了最大化系统容量,前导码需要被合理地分配给 M2M 业务和传统的 H2H 业务^[5],根据前导码分配方案可以很容易计算出前导码空闲比。

基于以上研究现状,本文提出一种 LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议,通过群组广播方式激活巨大数量的 M2M 设备进行数据分组传输,M2M 设备的数量已知,采用贝塔分布对事件驱动 M2M 业务建模,通过统计一段时隙内的随机接入前导码空闲比来估计信道流量,从而设计控制因子,进行流量控制。

2 流量控制随机接入协议系统模型

2.1 系统参数

本文研究的系统环境是 LTE 系统。在系统中存在一个基站、少量 H2H 设备和大量 M2M 设备,H2H 设备和 M2M 设备均通过共享信道进行随机接

入。随机接入协议采用的是 LTE 系统中使用的 Slotted ALOHA 协议, 时间被划分为单独的时隙, 传输一个数据分组的时间等于或小于一个时隙的长度, 每个时隙的长度为 1 ms。在本文中信道负载 G 指的是平均每个时隙内需要传输的数据分组数, 吞吐量 S 表示平均每个时隙内被成功发送的数据分组个数, 时延 D 表示每个数据分组从生成到成功发送平均所需要的时隙数。

在 LTE 系统中, 有 2 种随机接入方式: 一种是基于竞争的随机接入过程; 另一种是非竞争的随机接入过程。每个小区内可用的随机接入前导码的总数为 64 个, 其中大部分用于基于竞争的随机接入过程, 余下部分用于非竞争的随机接入过程, 例如切换。而用于基于竞争的接入前导码又被分配给 H2H 业务和 M2M 业务。本文中分配给 M2M 业务用于基于竞争的随机接入过程的前导码数据量是总数的一部分, 用 P 来表示。

在基于竞争的随机接入过程中, 当多个用户节点选择相同的随机接入前导码进行竞争随机接入时, 就会产生冲突。产生冲突后, 节点会进行退避重发, LTE 系统中采用的退避算法为均匀退避算法, 退避窗口大小用 W_{backoff} 表示。

2.2 事件驱动的 M2M 业务流量模型

本文研究的是 LTE 系统中由事件驱动的 M2M 业务。当基站向 M2M 设备发送群组广播信息, 驱动事件被检测到, 数量巨大的 M2M 设备几乎同时被激活, 并且尝试进行随机接入, 每个 M2M 设备发送的数据量通常很小。因此该业务的通信流量表现为短时间内激增, 之后锐减。

在本文中, 假设 N 个 M2M 设备在非常短的时延 T 内被触发后进行随机接入, M2M 业务的数据分组之间没有优先级区别。为了简化场景, 假设每个设备被触发后只需发送一个数据分组, 成功发送后即暂时停止生成数据。

为了描述这种突发性的 M2M 通信业务, 不能采用通常用来描述平稳随机过程的泊松分布。在文献[17]中提出, 突发性的 M2M 通信业务特征符合贝塔分布, 其概率密度函数 $f(x)$ 为

$$f(t) = \frac{t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1}B(\alpha, \beta)}, t \in [1, T] \quad (1)$$

其中, $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 t^{\alpha-1}(1-t)^{\beta-1} dt$ 为贝塔函数。此外, 在文献[17]中给出当 $\alpha=3$, $\beta=4$ 时, 该分布最符合实际情况。因此可以重写 $f(x)$

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{t^{\alpha-1}(T-t)^{\beta-1}}{T^{\alpha+\beta-1}B(\alpha, \beta)} \\ &= \frac{t^2(T-t)^3}{T^6 \int_0^1 t^2(1-t)^3 dt} \\ &= \frac{60t^2(T-t)^3}{T^6}, t \in [1, T] \end{aligned} \quad (2)$$

图 1 所示为 $T=500$ 时, 符合式(2)的服从贝塔分布的概率密度, 从图中可以看出, 事件驱动 M2M 业务的通信流量表现为短时间内激增, 之后锐减的曲线形式。

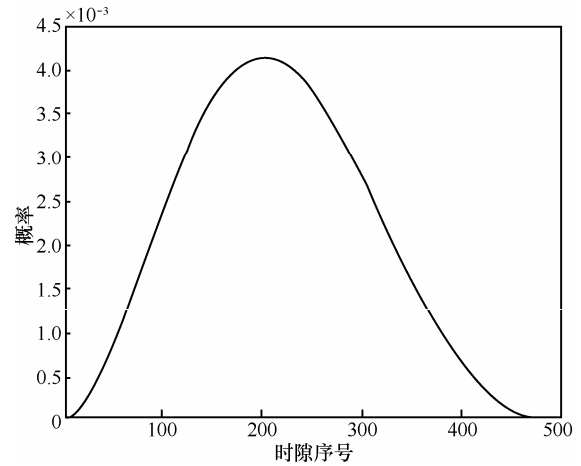


图 1 事件驱动 M2M 业务流量模型

3 LTE 系统中事件驱动 M2M 业务系统性能

本节研究在 LTE 系统中不采用流量控制方式下, 系统的吞吐量和时延性能。

由于事件驱动 M2M 业务符合如式(2)所示的贝塔分布, 退避算法为均匀退避算法, 退避窗口大小为 W_{backoff} , 因此可以分析得出每个时隙内的数据分组个数 $G_{\text{LTE}}(t)$ 为

$$G_{\text{LTE}}(t) = \begin{cases} \text{当前时隙的新数据分组数} + \frac{[1, t-1] \text{时隙内已生成的数据分组数} - \text{已成功发送的数据分组数}}{\text{退避窗口 } W_{\text{backoff}}}, t \in [1, T] \\ \frac{[1, T] \text{时隙内已生成的数据分组数} - \text{已成功发送的数据分组数}}{\text{退避窗口 } W_{\text{backoff}}}, t \in [T+1, +\infty) \end{cases}$$

在 $t \in [1, T]$ 时隙内, 当前时隙新生成的数据分组个数可表示为 $\frac{60Nt^2(T-t)^3}{T^6}$, $[1, t-1]$ 时隙内已生成的数据分组总数可表示为 $\int_1^{t-1} \frac{60Nt^2(T-t)^3}{T^6} dt$, 已成功发送的数据分组数 NS_{LTE} 可以由基站统计获得, 在 $t \in [T+1, +\infty]$ 时隙内, $[1, T]$ 时隙内已生成的数据分组总数为 N , 因此 $G_{\text{LTE}}(t)$ 可表示为

$$G_{\text{LTE}}(t) = \begin{cases} \frac{60Nt^2(T-t)^3}{T^6} + \int_1^{t-1} \frac{60Nt^2(T-t)^3}{T^6} dt - NS_{\text{LTE}}, & t \in [1, T] \\ \frac{N - NS_{\text{LTE}}}{W_{\text{backoff}}}, & t \in [T+1, +\infty) \end{cases} \quad (3)$$

在某一个时隙 t , 共有 $G_{\text{LTE}}(t)$ 个数据分组需要进行发送, 每个数据分组从 P 个随机接入前导码中随机选择一个进行随机接入, 成功的概率是其他数据分组都选择其他随机接入前导码的概率。若某数据分组选择随机接入前导码没有发生冲突, 则认为发送成功。因此, 时隙 t 的随机接入成功率 $P_{\text{succ}_{\text{LTE}}}(t)$ 可表示为

$$P_{\text{succ}_{\text{LTE}}}(t) = \left(1 - \frac{1}{P}\right)^{G_{\text{LTE}}(t)-1} \quad (4)$$

$G_{\text{LTE}}(t)P_{\text{succ}_{\text{LTE}}}(t)$ 表示在时隙 t 内成功传输的数据分组个数, 发送每个数据分组平均所需时隙等于数据分组总数 N 除以平均每个时隙内成功传输的数据分组个数。通过累加的方式即可求得发送成功所需要的总时隙数 T_{total} , 且 T_{total} 符合下式

$$\sum_{t=1}^{T_{\text{total}}} G_{\text{LTE}}(t)P_{\text{succ}_{\text{LTE}}}(t) = N \quad (5)$$

因此, LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的吞吐量性能 S_{LTE} 为

$$S_{\text{LTE}} = \frac{N}{T_{\text{total}}} \quad (6)$$

LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的平均负载 G 为

$$G = \frac{N}{T} \quad (7)$$

根据吞吐量的定义, 结合式(6)和式(7)可以推导出事情驱动 M2M 业务的平均接入成功率 $P_{\text{succ}_{\text{LTE}}}$ 为

$$P_{\text{succ}_{\text{LTE}}} = \frac{S_{\text{LTE}}}{G} = \frac{T}{T_{\text{total}}} \quad (8)$$

由文献[18]可知, 每次重传的平均时隙数可表示为 $(W_{\text{backoff}} + 3)/2$ 。由接入成功率的概念可知, 平均重传次数为 $1/P_{\text{succ}_{\text{LTE}}} - 1$ 。LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的随机接入时延 D 等于每次重传的平均时隙数乘以平均重传次数, 再加上第一次发送数据时的发送时隙和发送成功后的确认时隙 2 个时隙, 可表示为

$$D_{\text{LTE}} = 2 + \left(\frac{1}{P_{\text{succ}_{\text{LTE}}} - 1}\right) \times \frac{W_{\text{backoff}} + 3}{2} \quad (9)$$

从上式中可以看出, 在事件驱动 M2M 的情况下, 由于 M2M 设备数量巨大, 每个时隙生成的新数据分组和退避的旧数据分组产生的数据会很大, 因此在事件驱动 M2M 业务中, $P_{\text{succ}_{\text{LTE}}}(t)$ 会非常小, T_{total} 会非常大, 最终导致吞吐量 S_{LTE} 非常小, 时延 D_{LTE} 非常高。所以, 非常有必要针对事件驱动 M2M 业务控制流量, 提高系统性能。

4 流量控制随机接入协议设计

在本节中, 讨论流量控制随机接入协议中接入控制因子的设计。根据 LTE 系统中随机接入前导码在随机接入过程中的作用以及 Slotted ALOHA 协议的原理, 当平均每个时隙随机接入的数据分组个数等于随机接入前导码数量时, 系统取得最大性能。因此, 本文提出的流量控制随机接入协议的设计思想是在随机接入的数据分组个数大于前导码个数时进行调控, 调控的目标是平均每个时隙接入的数据分组个数等于随机接入前导码数量, 并且希望长期稳定地获得接近上限的系统性能。

4.1 接入控制因子设计

首先设计新的退避算法, 令统计窗口 $[1, W_{\text{es}}]$ 内只有新数据分组产生。在该时间内, LTE 系统中的随机接入前导码被接入节点随机选择, 每个随机接入前导码没被选择的概率即空闲比为 $((P-1)/P)^{G(t)}$, 其中 $G(t)(t \in [1, W_{\text{es}}])$ 表示时隙 t 产生的新数据分组个数, 结合式(2), 时隙 t 中随机接入前导码的空闲比 $r(t)$ 可表示为

$$r(t) = \left(\frac{P-1}{P} \right)^N \frac{60t^2(T_{es}(t)-t)^3}{(T_{es}(t))^6} \quad (10)$$

其中, $T_{es}(t)$ 表示根据 $r(t)$ 估计的时延 T 的估值。

通过如下推导, 可得

$$\begin{aligned} r(t) &= \left(\frac{P-1}{P} \right)^N \frac{60t^2(T_{es}(t)-t)^3}{(T_{es}(t))^6} \\ N \frac{60t^2(T_{es}(t)-t)^3}{(T_{es}(t))^6} &= \log \frac{P-1}{P} r(t) \\ \left(\frac{T_{es}(t)-t}{(T_{es}(t))^2} \right)^3 &= \frac{\log \frac{P-1}{P} r(t)}{60Nt^2} \\ \frac{T_{es}(t)-t}{(T_{es}(t))^2} &= \sqrt[3]{\frac{\log \frac{P-1}{P} r(t)}{60Nt^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

令 $m = \sqrt[3]{\frac{\log \frac{P-1}{P} r(t)}{60Nt^2}}$, 式(11)可表示为

$$m(T_{es}(t))^2 - T_{es}(t) + t = 0 \quad (12)$$

解式(12)这个一元二次方程, 可得

$$G_{es}(t) = \begin{cases} \frac{\text{当前时隙的新数据分组数} + [1, t-1] \text{时隙内已生成的数据分组数} - \text{已成功发送的数据分组数}}{\text{退避窗口 } W_{\text{backoff}}}, & t \in [W_{es} + 1, T_{es}] \\ \frac{[1, T] \text{时隙内已生成的数据分组数} - \text{已成功发送的数据分组数}}{\text{退避窗口 } W_{\text{backoff}}}, & t \in [T_{es} + 1, +\infty) \end{cases}$$

在 $[W_{es} + 1, T_{es}]$ 区间内, 每个时隙新生成的数据分组个数估值可表示为 $\frac{60Nt^2(T_{es}-t)^3}{T_{es}^6}$, $[1, t-1]$ 时隙内已生成的数据分组总数估值可表示为 $\int_1^{t-1} \frac{60Nt^2(T_{es}-t)^3}{T_{es}^6} dt$, 已成功发送的数据分组数 NS 可以通过基站统计获得, $[1, T_{es}]$ 时隙内已生成的数据分组总数估值为 N , 因此 $G_{es}(t)$ 可表示为

$$G_{es}(t) = \begin{cases} \frac{\frac{60Nt^2(T_{es}-t)^3}{T_{es}^6} + \frac{60N}{T_{es}^6} \int_1^{t-1} t^2(T_{es}-t)^3 dt - NS}{W_{\text{backoff}}}, & t \in [W_{es} + 1, T_{es}] \\ \frac{N - NS}{W_{\text{backoff}}}, & t \in [T_{es} + 1, +\infty) \end{cases} \quad (15)$$

$$T_{es}(t) = \frac{1 + \sqrt{1 - 4mt}}{2m} \quad (13)$$

从式(2)中可以看出, 每个时隙新生成的数据分组个数可以由时延 T 唯一确定。因此, 可在统计区间 $[1, W_{es}]$ 内统计随机接入前导码的空闲比 $r(t)$, 并根据式(13)计算出每个时隙的 $T_{es}(t)$, 求平均之后得到时延 T 的估值 T_{es} ,

$$T_{es} = \frac{1}{W_{es}} \sum_{t=1}^{W_{es}} \frac{1 + \sqrt{1 - 4t^3 \sqrt{\frac{\log \frac{P-1}{P} r(t)}{60Nt^2}}}}{2 \sqrt[3]{\frac{\log \frac{P-1}{P} r(t)}{60Nt^2}}} \quad (14)$$

由于事件驱动 M2M 业务的流量是突发式的, 并非平稳流量, 因此要知道每个时隙内需要传送的数据分组数量 $G(t)$, 才能进行流量控制, 但 $G(t)$ 对于基站和用户而言均是未知的, 因此, 要设计接入控制因子, 首先要对 $G(t)$ 进行估计。通过式(14)在计算得到时延 T 的估值 T_{es} 后, 进一步对 $G(t)$ 进行估计。

在 $t > W_{es}$ 区间内, 即统计窗口之后的每个时隙内的数据分组数量估值 $G_{es}(t)$ 为

$$\begin{aligned} \text{其中, } \int_1^{t-1} t^2(T_{es}-t)^3 dt & \\ &= \int_1^{t-1} t^2(T_{es}^3 - 3T_{es}^2t + 3T_{es}t^2 - t^3) dt \\ &= \int_1^{t-1} (T_{es}^3t^2 - 3T_{es}^2t^3 + 3T_{es}t^4 - t^5) dt \\ &= \left. \frac{T_{es}^3t^3}{3} - \frac{3T_{es}^2t^4}{4} + \frac{3T_{es}t^5}{5} - \frac{t^6}{6} \right|_1^{t-1} \\ &= \frac{T_{es}^3(t-1)^3}{3} - \frac{3T_{es}^2(t-1)^4}{4} + \frac{3T_{es}(t-1)^5}{5} - \\ &\quad \frac{(t-1)^6}{6} + \frac{3T_{es}^3}{3} - \frac{3T_{es}^2}{4} + \frac{3T_{es}}{5} - \frac{1}{6} \end{aligned} \quad (16)$$

推导得每个时隙的数据分组数量估值 $G_{es}(t)$, 根据协议设计目标, 在随机接入的数据分组个数大于前导码个数时进行流量控制, 小于或等于前导码数量时控制因子则为 1。流量控制的目标是平均每

个时隙接入的数据分组个数等于随机接入前导码数量, 即可计算控制因子 $Q(t)$ 为

$$Q(t) = \begin{cases} 1, & G_{es}(t) \leq P \\ \frac{P}{G_{es}(t)}, & G_{es}(t) > P \end{cases} \quad (17)$$

4.2 流量控制随机接入协议设计算法

LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议的工作流程如下。

1) 在事件驱动 M2M 业务传输开始时, 基站在统计窗口 $[1, W_{es}]$ 内统计随机接入前导码的空闲比 $r(t)$, 根据式(14)求得时延 T 的估值 T_{es} 。

2) M2M 设备在统计窗口 $[1, W_{es}]$ 内发送数据分组时, 如果选择随机接入前导码发生冲突, 则退避等待重发, 退避算法为均匀退避算法, 退避窗口为 $[W_{es} + 1, W_{es} + W_{backoff}]$, 采用该退避算法保证统计窗口内只产生新数据分组, 没有退避的旧数据分组, 从而简化估计算法。

3) 根据 T_{es} 和式(15)计算每个时隙内的数据分组数量估值 $G_{es}(t)$ 。

4) 根据式(17)计算控制因子 $Q(t)$, 并在每个时隙的开始通过基站向小区内的 M2M 设备广播。

5) M2M 设备根据接收到的控制因子 $Q(t)$ 进行随机接入, 每个 M2M 设备在发送数据分组前, 先随机生成一个 0 到 1 之间的数值, 与 $Q(t)$ 进行比较, 若小于等于 $Q(t)$, 则发送数据分组, 若大于 $Q(t)$, 则根据步骤 2) 的退避算法进行退避等待重发, 直到发送成功为止。

5 仿真结果与分析

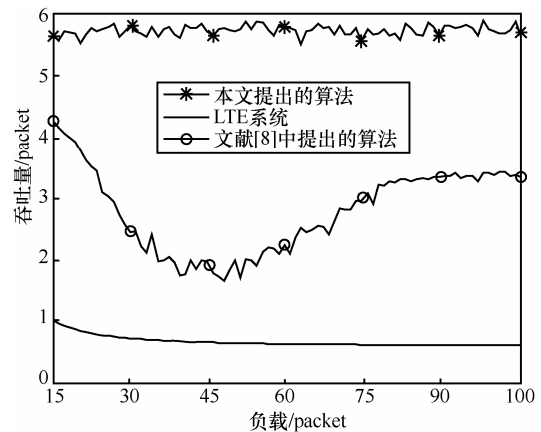
本节将给出在 LTE 系统采用事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议的系统吞吐量和时延性能, 并与 LTE 系统以及文献[8]提出的算法系统性能进行比较。此外, 还将分析该流量控制随机接入协议中统计窗口以及退避窗口变化时导致系统性能变化的规律。

仿真环境为 LTE 系统, 采用 Slotted ALOHA 协议, 每个时隙长度为 1 ms, M2M 设备的数量 N 为 30 000, 由于事件驱动 M2M 业务的负载通常较大, 将其变化范围设为 $[15, 100]$, 低负载情况不涉及。在每次事件驱动时, N 个 M2M 设备被激活并生成数据分组, 几乎同时向基站发送, 数据分组的生成符合式(2)所示的贝塔分布。每个设备只需发送一次数据分组, 发生冲突后退避重传, 不设最大退避次数。分配给 M2M 设

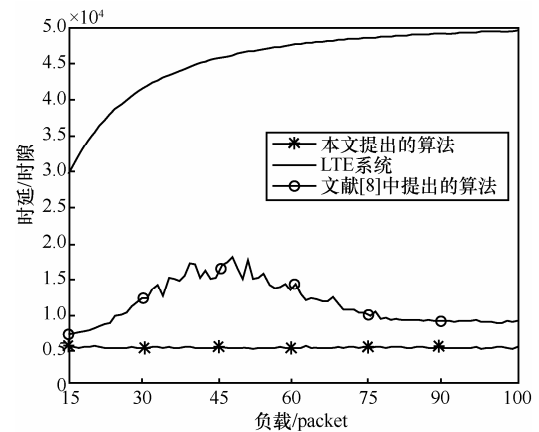
备终端用于随机接入的前导码数量 P 为 18。

5.1 事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议系统性能

如图 2 所示分别为事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议的吞吐量性能和时延性能, 其中, 仿真参数退避窗口 $W_{backoff}$ 为 240 个时隙, 统计窗口 W_{es} 为 100 个时隙。文献[8]中, 认为 M2M 业务在短时间内服从泊松分布过程, 其统计区间最小为 500 个时隙, 本文对比时, 取其统计窗口为 500 个时隙, 并根据其算法, 当统计时隙窗口中所有接入前导码均被使用时, 令空闲前导码数量至少为 1, 系统负载的估计值 G_{es2} 、随机接入前导码数量 P_2 与接入前导码空闲比 r_2 之间的关系为 $G_{es2} = -P_2 \ln r_2$ 。



(a) 吞吐量性能



(b) 时延性能

图 2 事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议的系统性能

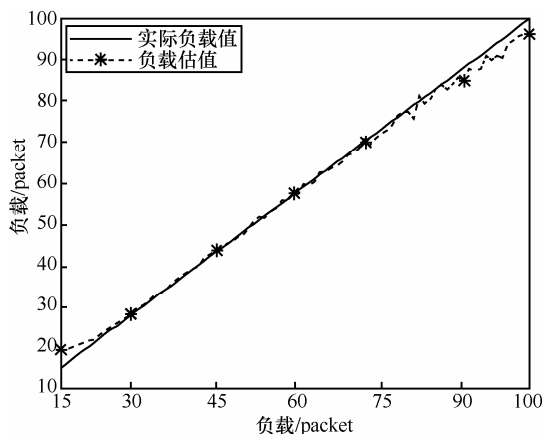
从图中可以看出, 采用本文提出的流量控制随机接入协议的系统性能相比 LTE 系统不采用流量控制的情况以及文献[8]中提出的算法有明显改善。此外, 从图中还可看出, 本文提出的算法随着负载变化时, 吞吐量和时延保持相对稳定, 而不像 LTE

系统和文献[8]提出的算法的系统性能有明显的变化幅度, 这证明控制因子能够保持使信道中传输的数据分组数量变化幅度从长期平均来看保持稳定。

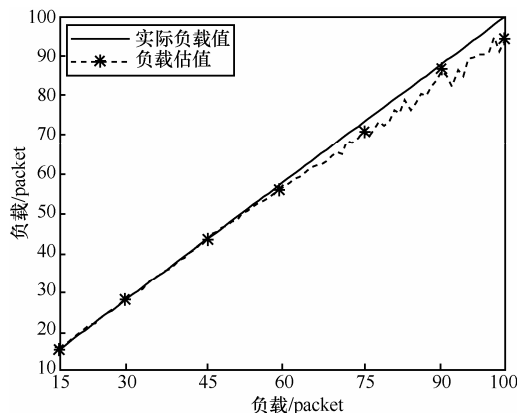
文献[8]提出的算法相比 LTE 系统有一定的性能改善, 但由于该算法使用平稳的泊松过程对突发流量的 M2M 业务进行建模, 在估计系统负载时就有一定偏差, 负载越大, 统计的偏差就越大。而且, 该算法考虑系统负载为平稳状态, 因此只计算一次控制因子, 当 M2M 业务的负载发生突增和锐减时, 控制因子也不发生变化, 因此对系统的流量控制改善程度不如本文提出的算法。

5.2 负载估值与实际负载值的比较

如图 3 所示为负载估值与实际负载值的比较, 退避窗口 W_{backoff} 为 240 个时隙, 其中, 图 3(a)中统计窗口 W_{es} 为 50 个时隙, 图 3(b)中统计窗口 W_{es} 为 100 个时隙。从图中可以看出, 本文提出的服从贝塔分布的事件驱动 M2M 业务的负载估值与真实负载值的误差很小, 这也保证了控制因子的有效性, 并且统计窗口相比系统总体时延所占比例很小, 只有 1%~2%左右。



(a) 统计窗口为 50 个时隙



(b) 统计窗口为 100 个时隙

图 3 不同统计窗口时负载估值与实际负载值比较

此外, 还可以看出, 当统计窗口相对较小时, 负载估值与真实值在系统重载时偏差更小, 轻载时偏差更大, 统计窗口相对较大时, 负载估值与真实值在系统轻载时基本无偏差, 重载时偏差更大, 从总体而言, 在中度负载的情况下, 偏差程度是比较理想的。

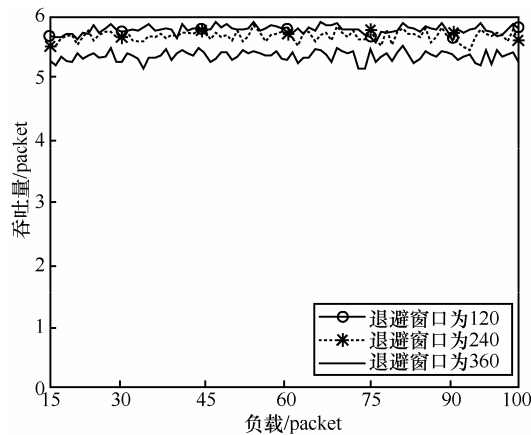
结合图 1 可以看出, 事件驱动 M2M 业务流量要经历流量由低到高的变化过程, 而前导码空闲比在流量低值和流量高值时统计值和理论值偏差会比较大, 而在流量中等的情况下偏差比较小。这就导致了当系统轻载且统计窗口较大时, 统计的时隙中会包含更多流量中等的情况, 从而偏差很小, 当系统轻载且统计窗口较小时, 统计的时隙中会包含更多流量低值的情况, 产生较大偏差。同理, 当系统重载且统计窗口较大时, 统计的时隙中会包含更多流量高值的情况, 产生较大偏差, 当系统重载且统计窗口较小时, 统计的时隙中会包含更少流量高值的情况, 偏差变小。但由于总体偏差不大, 为了避免统计窗口大小影响时延的增加, W_{es} 取 50 已经可以满足对系统负载的估值需要。

5.3 采用不同退避窗口的系统性能

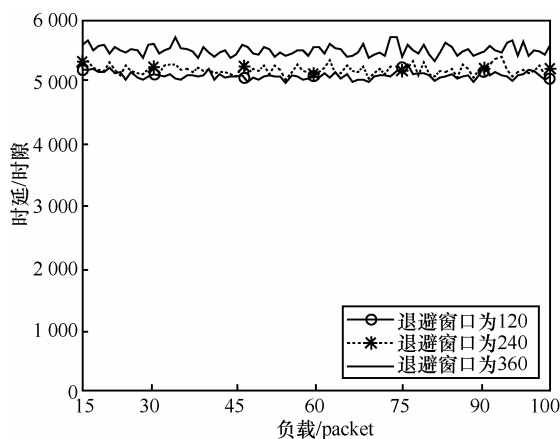
如图 4 所示为采用不同退避窗口大小时 M2M 业务流量控制随机接入协议的系统性能, 从图中可以看出, 退避窗口为 120 个时隙和 240 个时隙时系统性能差别不大, 退避窗口为 360 个时隙时, 系统性能有所下降。这是因为当退避窗口中等大小时, 碰撞之后的数据分组的重发频率可以增加采用控制因子前的数据分组总数大于随机接入前导码数量的概率, 若退避窗口太大, 则会降低采用控制因子前的数据分组总数大于随机接入前导码数量的概率, 导致部分时隙业务量不饱和, 因此会降低总体的吞吐量性能, 并由于退避窗口过大而造成等待时延的增加。因此, 在流量控制的前提下, 退避窗口不要选得过大。

5.4 事件驱动 M2M 业务吞吐量上限分析

LTE 系统中采用的是 Slotted ALOHA 协议, 当用户的随机接入服从泊松分布且负载量大于随机接入前导码数量 P 时, 该协议的最高吞吐量上限为 $0.368P$ 。本文仿真中取 P 为 18, 因此吞吐量的上限应该大致为 6.6 左右, 而本文提出的随机接入算法的没有达到该上限, 大约接近 6 左右, 这从图 5 当中可以得到解释。



(a) 吞吐量性能



(b) 时延性能

图 4 不同退避窗口时的系统性能

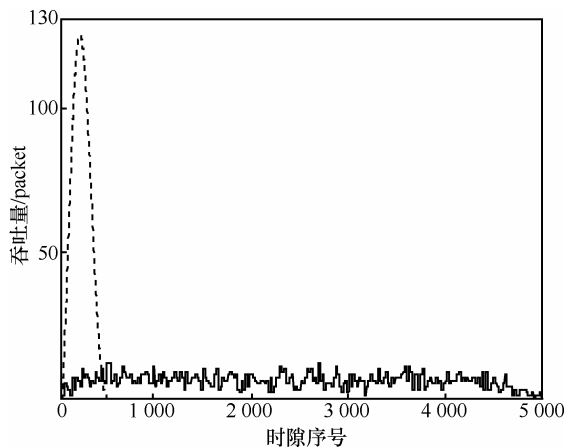


图 5 $G=60$ 时, 每个时隙的吞吐量变化

如图 5 所示为 $G=60$ 时每个时隙的吞吐量。传统的 H2H 业务服从泊松分布, 平均时间内的业务量保持平稳, 而事件驱动 M2M 业务服从贝塔分布。图 5 中虚线表示服从贝塔分布的新数据分组的业务量, 而实线表示采用流量控制随机接入协议后的实际吞吐量, 可以看出无论是数据分组的生成过程还

是数据分组的发送过程, 事件驱动 M2M 业务都经过一个数据量逐渐增长到上限, 再逐渐从上限降落到 0 的过程。这个过程中必然包含业务量不够饱满, 即负载量小于 P 的情况, 从而导致事件驱动 M2M 业务的随机接入协议的系统性能不能达到 H2H 业务的随机接入协议的上限, 这是由它们业务分布的不同特性造成的。

6 结束语

本文提出了一种 LTE 系统中事件驱动 M2M 业务的流量控制随机接入协议, 在该协议中, 使用贝塔分布模拟事件驱动 M2M 业务, 通过统计一定统计区间内的随机接入前导码的空闲比, 估计每个时隙内的数据分组数量, 从而设计根据负载变化的流量控制因子。相比已有的算法, 本文所提出的算法更符合实际情况, 所采用的参数也容易获得, 每次 M2M 业务的流量发生潮涌时, 仅需要对信道负载进行一次估计计算, 统计窗口也较小, 但在每个时隙基站都需要进行控制因子的计算并由基站进行广播, 因此, 采用该算法会造成周期性广播资源消耗以及小幅度的计算代价。仿真结果表明, 采用该随机接入协议可以明显改善 LTE 系统中事件驱动 M2M 业务造成的大量数据分组堵塞状况, 吞吐量和时延性能显著提高, 相比该算法带来的显著性能改善, 这样的代价显得非常值得。

参考文献:

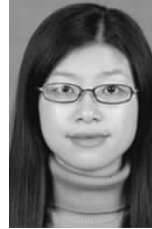
- [1] LEE K D, KIM S G. MAC PDU Signaling and operating methods for access class barring and back-off control for large-scale radio access network[P]. WIPO Patent 2012026714. 2012.
- [2] LEE K D, KIM S G, YI B K. Packet-level scheduling for implant communications using forward error correction in an erasure correction mode for reliable u-healthcare service[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(2): 160-166.
- [3] FARHANGI H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(1): 18-28.
- [4] CHENG J P, LEE C, LIN T M. Prioritized random access with dynamic access barring for RAN overload in 3GPP LTE-A networks[A]. GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)[C]. Houston, Texas, USA, 2011.368 - 372.
- [5] LEE K D, KIM S, YI B. Throughput comparison of random access methods for M2M service over LTE networks[A]. 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)[C]. Houston, TX,USA, 2011. 373-377.
- [6] WANG G, ZHONG X, MEI S, et al. An adaptive medium access control mechanism for cellular based machine to machine (M2M) communication[A]. 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS)[C]. Honolulu, Hawaii,

- USA, 2010.1-4.
- [7] WU H, ZHU C, LA R J, *et al.* Fast adaptive S-ALOHA scheme for event-driven machine-to-machine communications[A]. 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)[C]. Quebec City, Canada, 2012.1-5.
- [8] 李晓辉, 李丹. LTE 中的流量自适应 M2M 接入控制算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 46-50.
- LI X H, LI D. Adaptive admission control mechanism for M2M communication in LTE[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013,41(1):46-50.
- [9] NIKAEIN N, KREA S. Latency for real-time machine-to-machine communication in LTE-based system architecture[A]. Wireless Conference 2011-Sustainable Wireless Technologies (European Wireless)[C]. 2011.1-6.
- [10] THOMSEN H, PRATAS N K, STEFANOVIC C, *et al.* Analysis of the LTE access reservation protocol for real-time traffic[EB/OL]. arXiv preprint arXiv:1301.2427, 2013.
- [11] RUBIN I. Group random-access disciplines for multi-access broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1978, 24(5): 578-592.
- [12] WEI C H, CHENG R G, AL-TAEE F M. Dynamic radio resource allocation for group paging supporting smart meter communications[A]. 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications[C]. 2012.659-663.
- [13] WEI C H, CHENG R G, TSAO S L. Modeling and estimation of one-shot random access for finite-user multichannel slotted ALOHA systems[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(8): 1196-1199.
- [14] WEI C H, CHENG R G, TSAO S L. Performance analysis of group paging for machine-type communications in LTE networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7):3371-3382.
- [15] WU H, ZHU C, LA R J, *et al.* FASA: Accelerated S-ALOHA using access history for event-driven M2M communications[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2013,21(6): 1904-1917.
- [16] 3GPP Standard TR 37.868-2011. RAN Improvements for Machine-

type Communications[S]. 2011.

- [17] ZTE. R2-104662: MTC Simulation Results with Specific Solutions. 3GPP TSG RAN WG2 Meeting #71[S]. 2010.
- [18] 张兆丰. 移动随机接入研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.
- ZHANG Z F. Research on Mobile Random Access[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003.

作者简介:



杨柳 (1978-), 女, 四川达州人, 博士, 西南交通大学高级实验师, 主要研究方向为多址接入技术、数字媒体技术。



范平志 (1955-), 男, 四川广汉人, 博士, 西南交通大学教授, 主要研究方向为码分多址通信、多媒体宽带无线通信、信息与编码理论、信号设计与处理、专用移动通信、网络与信息安全。



郝莉 (1971-), 女, 北京人, 博士, 西南交通大学教授, 主要研究方向为多址接入技术、MIMO 检测与域编码、无线资源管理。

(上接第 53 页)

- [13] WANG Y P, HAN L, LI Y, *et al.* A new encoding based genetic algorithm for the traveling salesman problem[J]. Engineering Optimization 2006, 38(1):1-13.
- [14] REN Q, WANG Y P. A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem[J]. Computer and Operations Research, 2011, 39(10): 2291-2299.
- [15] ÖKULKARNI R V, RSTER F A, VENAYAGAMOORTHY G K. Computational intelligence in wireless sensor networks: a survey[J]. Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(1):68-96.
- [16] BÄCK T. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [17] REINELT G. TSPLIB—A traveling salesman library[J]. ORSA J. Comput, 1991, 3(3):376-384.
- [18] 李敏强, 寇纪淞, 林丹等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- LI M Q, KOU J S, LIN D, *et al.* The Basic Theory and Application of Genetic Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2003.

作者简介:



叶苗 (1977-), 男, 广西桂林人, 西安电子科技大学博士生、副教授, 主要研究方向为网络计算、进化算法、人工智能。

王宇平 (1961-), 男, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人工智能、网络和工程设计中的优化方法、最优化理论、数据挖掘。

魏静萱 (1981-), 女, 陕西西安人, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为进化算法、最优化理论与方法、人工智能等。