

机器类通信流量建模与过载控制

简鑫, 曾孝平, 贾云健, 杨俊逸, 贺渊

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030)

摘要: 机器类通信 (或 MTC 通信) 定义为通过蜂窝网络进行数据传输的机器通信, 作为未来泛在网络的重要组成部分, 具有广阔的应用前景和市场潜力。为评估 MTC 接入时的网络性能, 以 3GPP 参考流量模型和 G/M/1 队列模型的通解为基础, 为 MTC 通信建立 Beta/M/1 队列模型; 通过推导形状参数为任意正整数的 Beta 分布的概率生成函数的解析解, 给出 Beta/M/1 模型性能评估的求解过程; 利用数值分析, 给出 Beta/M/1 模型的主要特征。为解决 MTC 接入时系统面临的过载问题, 提出了 3 个解决办法, 分别是: 1) 不同属性终端间聚类; 2) 改变 MTC 终端到达时间间隔分布; 3) 分段均匀随机退避算法。所提 Beta/M/1 模型及分段均匀随机退避算法可作为物联网/MTC 通信/海量终端入网性能分析及过载控制的参考模型。

关键词: 物联网; 泛在网络; 机器与机器通信; 机器类通信; Beta 分布; 流量建模; 过载控制

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)09-0123-09

Traffic modeling for machine type communication and its overload control

JIAN Xin, ZENG Xiao-ping, JIA Yun-jian, YANG Jun-yi, HE Yuan

(The College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Machine type communications (MTC), defined as machine to machine communication over cellular mobile network, is an integral part of future ubiquitous network and has broad application prospects and market potentials. To carry out the performance analysis of network in context of MTC applications, a Beta/M/1 queue model was proposed for modeling the network with MTC applications and its full performance analysis were given out by deducing the analytical expression of Beta distribution's moment generation function, in which the shape parameters of Beta distribution are assumed to be integer. In addition, to handle the congestion caused by mass concurrent data and signaling transmission from many MTC devices, three overload control measures were also presented, that is: 1) inter-class grouping techniques; 2) reshaping the inter-arrival time distribution of MTC devices; 3) segment-wise uniform back-off scheme. The Beta/M/1 model and segment-wise uniform back-off scheme proposed here can be used as a preliminary model for different MTC application scenarios and serve as a fundamental traffic model and overload control method for future ubiquitous network.

Key words: Internet of thing; ubiquitous network; machine-to-machine communication; machine type communication; Beta distribution; traffic modeling; overload control

1 引言

机器与机器 (M2M, machine-to-machine) 通信是指利用自动控制及网络通信等技术, 在没有人干预的情况下实现机器与机器之间自主数据通信

与信息交互的一系列技术或技术组合的总称^[1]。它为各种终端设备在系统之间、网络之间以及远程实体之间实时建立通信连接、传输数据提供了一种有效途径。3GPP (the 3rd generation partnership project) 则将通过蜂窝网络进行数据传输的 M2M 通信称之为

收稿日期: 2012-12-17; 修回日期: 2013-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61171089)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61171089)

为 MTC 通信或机器类通信。与传统人与人 (H2H, human to human) 通信相比, MTC 通信具有终端数量巨大、数据量小、定时通信、时延不敏感、终端具有较低移动性等典型特征, 其应用领域将包括智能电网、智能交通、智能家居、无线传感器网络等, 是新兴物联网与未来泛在网络不可或缺的重要组成部分^[2,3]。

经典移动蜂窝网起源于 H2H 通信并参照其业务特性进行优化与改进。MTC 业务的引入将极大地冲击现有移动蜂窝技术, 因此包括 3GPP 最新 LTE/LTE-A 标准在内的移动蜂窝技术均需参照 MTC 特性进行相应的改进与优化。目前, 国内外关于 MTC 的学术研究尚处于起步阶段, 有限的研究成果主要集中于 MTC 基本应用问题, 如市场预测、支撑平台、业务管理、终端模块等^[4]。根据 3GPP 标准化进程相关讨论^[5-9], 可总结出目前关于 MTC 通信的主要研究领域和技术难点为: 1) 从物联网及 MTC 的广泛应用中准确抽象出低成本 MTC 的业务模型及设计指标; 2) 理清各参数对网络容量、频谱利用率以及非 MTC 终端的影响, 确定可调参数集; 3) 海量 MTC 终端接入时, 如何平衡非 MTC 和 MTC 之间的通信质量要求。为评估 MTC 接入时的网络性能, 3GPP technical report (TR) 37.868 提出 2 类参考流量模型, 它们分别是: 1) 参考流量模型 1, 假设 MTC 终端的到达时间间隔分布服从 $[0, T]$ 内的均匀分布, 用于模拟 MTC 终端以非同步的方式接入网络的场景; 2) 参考模型 2, 假设 MTC 终端到达时间间隔服从 $[0, T]$ 内的 Beta 分布, 用于模拟 MTC 终端以高度同步的方式接入网络的极端场景^[5]。

经典 Markov 队列模型, 由于其简单性和无后效性, 被长期用于随机业务建模^[10-13]。这类模型包括最简单的 $M/M/1$ 模型以及新近的更为复杂的 MAP (markov arrival process) 模型、MMPP (markov-modulated poisson process) 模型等^[11]。上述各类模型经过建模优化与应用改进, 均希望最大程度模拟终端入网时的实际情形, 然而, 由于它们均蕴含终端到达速率服从泊松分布的假设, 将不再适用于 MTC 业务估计与流量建模, 更为可取的方案是采用 $G/M/1$ 模型的通解形式。令 G 为 Beta 分布, 便可给出 MTC 接入网络时的求解过程与性能评估。然而, 由于 Beta 分布的复杂性, 仍然无法给出形状参数为任意数值的 Beta 分布的有效解。本文首先假设 MTC

终端接入网络的场景可以通过 Beta/M/1 模型进行合理近似, 接着通过推导形状参数为任意正整数的 Beta 分布的概率生成函数的解析形式, 给出 Beta/M/1 模型性能评估的求解过程, 利用数值分析, 给出 Beta/M/1 模型的主要特征。结果显示: 当到达时间间隔服从 Beta 分布时, 系统平均逗留时间和等待时间将大大增加, 网络性能急剧恶化; 该结论与文献[3,5,14~17]的研究发现一致。

为解决 MTC 接入时网络性能恶化的问题, 文献[3]提出信令批处理的思想, 主要研究如何解决“大量相似信令”的问题, 以期降低信令开销。文献[14]提出基于 PID (proportional-integral-differential) 控制器的选择性准入方案。文献[15,16]提出资源预分配的随机信道接入方案。文献[17]提出 H2H 与 M2M 前导码共享机制, 提高了系统接入概率。本文基于 Beta/M/1 模型特性, 阐述了 3GPP 提案的工作机理; 从数学角度提出一个可完全解决该问题的基本思路; 通过适当简化与折中, 提出“分段均匀随机退避算法”。蒙特卡洛仿真表明: 该算法可有效降低随机信道申请的冲突概率, 将系统有效吞吐量提高 2%~5%, 代价是接入时延增加 100~200 个分组时延, 但该时延对于具有时延容忍性的 MTC 业务是可接受的。

综述, 本文所提 Beta/M/1 模型及分段均匀随机退避算法可作为物联网/MTC 通信/海量终端入网性能分析及过载控制的参考模型。

2 Beta/M/1 模型的建立与求解

MTC 通信的到达时间间隔分布将服从 Beta 分布。传统 Markov 队列模型及其改进型将不再适用于该场景, 因而需要采用更为通用的 $G/M/1$ 模型。令 G 为 Beta 分布, 可得到适用于 MTC 通信的 Beta/M/1 模型。

2.1 $G/M/1$ 模型的通解

设顾客到达时间间隔的概率分布为 $f_A(x)$, 均值为 $1/l$; 服务时间间隔服从均值为 $1/m$ 的指数分布, 则平均逗留时间 $E(T_s)$ 、平均等待时间 $E(W)$ 可表示为^[10-13]

$$E(T_s) = \frac{1}{m(1-B)}, \quad E(W) = \frac{B}{m(1-B)} \quad (1)$$

其中, $E(T_s), E(W)$ 是关于 B 的增函数。 B 由下述方程确定^[11]。

$$B = M_A (mB - m) \tag{2}$$

其中, $M_A(u) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ux} f_A(x) dx$ 为概率生成函数 $f_A(x)$ 的生成函数。由于 $M_A(0) = 1$, 则 $B = 1$ 是式 (2) 的特解而不予考虑; 当 $0 < r = l/m < 1$ 时, 式 (2) 在 $B \in (0, 1)$ 内具有唯一解^[11]。该通解给出了到达时间间隔服从任意分布的具体求解过程, 但是由于 $M_A(u)$ 的复杂性和非线性, 其解析解依然难以获得。

2.2 Beta/M/1 模型的求解

由于均匀分布是形状参数 $a = 1, b = 1$ 的 Beta 分布且 $[0, T]$ 范围内的函数均可由 $[0, 1]$ 范围内的函数通过尺度变换得到, 因此本节将重点关注区间为 $[0, 1]$ 的 Beta 分布的通解。为采用 $G/M/1$ 通解形式进行分析, 由式(2)可知关键在于给出 Beta 分布的概率生成函数 $M_A(u)$ 的解析形式。

Beta 分布的概率密度函数 $f_A(x)$ 可表示为^[18]

$$f_A(x) = \frac{x^{a-1}(1-x)^{b-1}}{B(a,b)}, x \in [0, 1], a > 0, b > 0 \tag{3}$$

其中, $B(a,b) = \frac{G(a+b)}{G(a)G(b)} = \int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1} dx$ 为 B 函数或第一类欧拉积分。Beta 分布的概率生成函数为^[18]

$$M_A(u) = {}_1F_1(a, a+b, u) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a^{(k)}}{(a+b)^{(k)}} \frac{u^k}{k!} \tag{4}$$

其中, $a^{(k)} = a(a+1)L(a+k-1)$ 为上升阶乘; 若 a 为整数, $a^{(k)} = (a+k-1)!/(a-1)!$; ${}_1F_1(a,b,u)$ 表示具有形状参数为 a, b 的第一类合流超几何函数。尽管许多常见函数都可以表示为第一类合流超几何函数的特殊形式, 如指数函数、贝塞尔函数、误差函数等^[18,19], 对于任意形状参数的第一类合流超几何函数仍没有统一的解析表达形式。然而, 若第一类合流超几何函数的形状参数 a, b 为整数, 结合以下 2 个定理, 可得出其解析表达式进而完成 Beta/M/1 模型的性能评估。

定理 1 设 n 为任意正整数, 具有形状参数 $a = 1, b = n + 1$ 的第一类合流超几何函数可表示为

$${}_1F_1(1, n+1, u) = \frac{n!}{u^n} \left[e^x - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{u^k}{k!} \right] \tag{5}$$

证明

$$\frac{n!}{u^n} \left[e^x - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{u^k}{k!} \right] = \frac{n!}{u^n} \left[\sum_{k=0}^{\infty} \frac{u^k}{k!} - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{u^k}{k!} \right]$$

$$\begin{aligned} &= n! \sum_{k=n}^{\infty} \frac{u^{k-n}}{k!} \\ \text{let } (k-n=l) &= n! \sum_{l=0}^{\infty} \frac{u^l}{(l+n)!} \\ &= n! \sum_{l=0}^{\infty} \frac{u^l}{(l)!(l+1)L(l+n)} \\ &= n! \sum_{l=0}^{\infty} \frac{u^l}{(l)! n!(n+1)^{(l)}} \\ &= \sum_{l=0}^{\infty} \frac{u^l}{(l)!(n+1)^{(l)}} = {}_1F_1(1, n+1, u) \end{aligned}$$

其中, 倒数第三行至倒数第四行, 利用了如下恒等式: $1^{(l)} = 1 \times 2 \times \dots \times l = l!$; $n!(n+1)^{(l)} = 1 \times 2 \times \dots \times n \times (n+1) \times (n+2) \times \dots \times (n+l) = (n+l)!$ 。证毕。

定理 2 ${}_1F_1(a,b,u)$ 的微分性质^[18]为

$$\frac{d}{du} {}_1F_1(a,b,u) = \frac{a}{b} {}_1F_1(a+1,b+1,u) \tag{6}$$

定理 1 由本文证明, 定理 2 的详细证明见文献 [18]。利用定理 1 和定理 2, 可给出形状参数 a, b 为任意正整数的 Beta 分布的概率生成函数的解析形式, 过程如下:

- 1) 令 $n = b$, 利用定理 1, 可得 ${}_1F_1(1, b+1, u)$;
- 2) 利用定理 2, 求 ${}_1F_1(1, b+1, u)$ 的 $a-1$ 阶微分, 可得 $C \times {}_1F_1(a, a+b, u)$, C 为微分过程的累计常数项。 ${}_1F_1(a, a+b, u)$ 即为 $Beta(a, b)$ 分布的概率生成函数, 将其代入式 (2) 求根再代入式 (1) 即可完成 Beta/M/1 模型的性能评估。

2.3 应用—3GPP TR 37.868 提案模型的求解

为描述该过程, 本节以 3GPP TR 37.868 参考流量模型为例, 简要介绍其具体实现过程。

参考模型 1 假设 MTC 终端到达时间间隔服从均匀分布, 也即 $Beta(1,1)$ 分布; 由式 (5) 可直接得其概率生成函数为

$$M_A(u) = {}_1F_1(1, 2, u) = \frac{e^u - 1}{u} \tag{7}$$

参考模型 2 假设 MTC 终端到达时间间隔服从 $Beta(3,4)$ 分布, 其概率生成函数为 ${}_1F_1(3,7,u)$ 。首先, 利用定理 2, 可得

$${}_1F_1(3,7,u) = \frac{6}{2} \times \frac{d}{du} {}_1F_1(2,6,u) = \frac{6}{2} \times \frac{5}{1} \times \frac{d^2}{du^2} {}_1F_1(1,5,u) \tag{8}$$

接着, 利用定理 1 可得

$${}_1F_1(1,5,u) = \frac{4!}{u^4} \left[e^u - \sum_{k=0}^3 \frac{u^k}{k!} \right] = \frac{4!}{u^4} \left(e^u - 1 - u - \frac{u^2}{2} - \frac{u^3}{6} \right) \tag{9}$$

将式 (9) 代入式 (8) 并做二阶微分, 可得

$$M_A(u) = {}_1F_1(3,7,u) = \frac{6!}{2} \times \left[e^u (u^2 - 8u + 20) - 20 - 12u - 3u^2 - \frac{1}{3}u^3 \right] / u^6 \tag{10}$$

将式 (7) 与式 (10) 代入式 (2) 求得 $B \in (0,1)$ 内的根, 再将该根代入式 (1) 即可完成 3GPP TR 37.868 提案模型的性能分析。形状参数为任意正整数的 Beta 分布的性能分析, 可类比该过程逐一实现。

3 Beta/M/1 模型数值性能评估

尽管定理 1 和定理 2 给出了形状参数为任意正整数的 Beta 分布的概率生成函数 $M_A(u)$ 的解析形式, 但仍然无法给出式 (2) 的解析求根公式, 因为 $M_A(u)$ 一般都较为复杂, 只能依赖于数值算法完成式 (2) 的求根过程。

3.1 3GPP 提案模型与 M/M/1 模型性能对比

由于 $E(T_s)$, $E(W)$ 是关于 B 的增函数, 本节首先对比 3GPP TR 37.868 提案模型与经典 M/M/1 模型 B 的变化情况。图 1 为 B 随平均服务时间 $1/\mu$ 的变化情况, 结果显示: 1) 当到达速率服从泊松分布 (即到达时间间隔服从指数分布) 时, B 与 $1/\mu$ 服从严格的线性关系^[7]; 2) 当到达时间间隔服从均匀分布时, B 的增长速率快于 $1/m$ 的增长, 这意味着 Uniform/M/1 模型的 $E(T_s)$, $E(W)$ 将大于 M/M/1 模型; 3) 当到达时间间隔服从 Beta 分布时, B 的增长速率整体上快于 M/M/1 模型与 Uniform/M/1 模型的增长速率; 但分别在 $1/m = 0.160$ 和 $1/m = 0.225$ 时, 其 B 值低于二者。由此可得, 当 MTC 终端到达时间间隔服从 Beta 分布时, B 值将急剧增加, 进而增加系统平均逗留时间和平均等待时间。通过增加系统服务速率 m 可适当缓解该增长过程。然而从运营商的角度, 增加系统服务速率 m 意味着系统利用率的降低, 由此带来的成本提升与低效率是极不可取的。因此针对该问题 3GPP TR 37.868 也给出了相应的措施^[5]。

接着, 将图 1 所得 B 指代入式 (1), 可得 M/M/1 模型、Uniform/M/1 模型与 Beta/M/1 模型的 $E(T_s)$, $E(W)$ 。为了更直观形象地反应 MTC 终端接入网络的性能恶化情况, 不直接画出 $E(T_s)$, $E(W)$ 曲线,

而是画出 Beta/M/1 模型与 Uniform/M/1 模型相对于 M/M/1 模型的比值的变化的情况。如图 2 所示, MTC 通信将使系统平均逗留时间与平均等待时间急剧增加, 可能超过 100 倍或更多。这也意味着 MTC 接入时更多的接入冲突与随机退避, 该现象已被文献[3,14,15]验证。图 1 与图 2 仅画出 $1/m = 0.5$ 的曲线是因为 $1/m$ 增加将使 B 趋近于 1, 一方面导致数值求根算法不稳定, 一方面使图 2 中的比值趋于无穷大, 详见下一节。

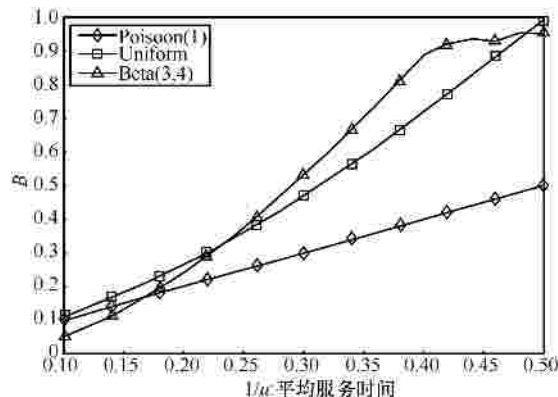


图 1 3GPP 提案模型与 M/M/1 模型的 B 曲线

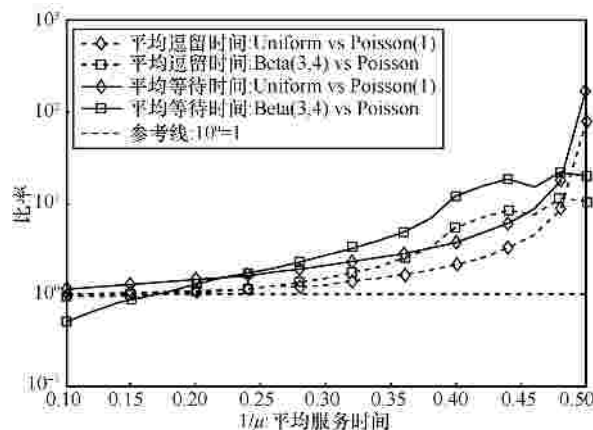


图 2 3GPP 提案模型与 M/M/1 模型 $E(T_s), E(W)$ 比值对比

3.2 Beta/M/1 模型的性能评估

3GPP 标准化组织根据实际工程经验建议采用 Beta(1,1) 和 Beta(3,4) 分别模拟 MTC 通信 2 类典型场景。然而, 仍有必要将其推广, 研究 Beta/M/1 模型的主要特征, 为将来可能遇到的物联网/泛在网/海量终端入网时的场景提供建模依据。

本节以低阶 Beta/M/1 模型为基础, 推导形状参数分别为 (1, 1), (2, 2), (3, 3), (1, 2), (1, 3), (2, 1), (3, 1) 的低阶 Beta 分布的概率生成函数, 将其代入式 (2) 求根, 以寻找 Beta/M/1 模型的基本特性。结果如图

3 所示：1) 所有 Beta/M/1 模型的 B 值增长速率均快于 $M/M/1$ 模型，但均存在某一点使得当 $1/\mu$ 小于该值时， B 的值会小于 $M/M/1$ 模型，若运营商希望通过降增加系统服务速率 μ 缓解系统过载问题，这些点可作为参数设定的参考点；2) 所有 Beta/M/1 模型的 B 值随着 $1/\mu$ 的增加均趋于 1，将 B 值首次趋于 1 的点定义为非稳定点，一方面是因为这将导致数值求根算法不稳定，更为重要的是实际中这些点可能对应系统崩溃的场景，因为 B 值趋于 1，则 $E(T_s), E(W)$ 趋于无穷，这将是允许的；3) 非稳定点所对应的 $1/\mu$ 值与相应的 Beta 分布的均值相等，图 3 中从左往右这些值分别为 0.25、0.33、0.5、0.67、0.75，这是因为对于 $M/M/1$ 模型，当 $1/m < 1$ 时， B 在 $(0,1)$ 内具有唯一解，对于 Beta/M/1 模型， $1/m < E(X)$ 或 $1/E(X) < m$ 时， B 在 $(0,1)$ 内具有唯一解，更进一步，因为 Beta(a, b) 分布的均值为 $a/(a+b)$ 恒小于 1，各类 Beta/M/1 模型总先于 $M/M/1$ 模型达到非稳定点，即总有 Beta/M/1 模型的 B 曲线位于 $M/M/1$ 模型的上方，该结论可部分解释 Beta/M/1 的 B 曲线增长较快的原因；并给出 MTC 通信造成系统过载的数理解释；4) 如图 3 圆圈位置所示，Beta(1,1)、Beta(2,2)、Beta(3,3) 具有相同均值，随着 a, b 的增加，尽管非稳定点的位置保持不变，但 B 曲线却随之下移，即 $E(T_s), E(W)$ 减小；5) Beta(a, b) 的 B 曲线一定程度上与 Beta(a, a) 或 Beta(b, b) 的 B 曲线对称，这是因为 Beta(a, b) 与 Beta(b, a) 均值之和为 1 且关于 0.5 对称的结果；6) 如果 $a < b$ ，增加 b 将降低 Beta(a, b) 的均值，进而是其 B 曲线沿着左上方移动，这意味着 $E(T_s), E(W)$ 的增加；如果 $a > b$ ，增加 a 将增加 Beta(a, b) 的均值，进而是其 B 曲线沿着右下方移动，这意味着 $E(T_s), E(W)$ 的减小。

实际应用中，若希望通过实测数据所得的样本数据、样本均值、样本方差，寻找一个适用于实测场景的 Beta/M/1 模型，以上结论可作为建模与估计的先验模型。它不仅适用于 3GPP 提案，也适用于未来可能遇到的物联网/泛在网/海量终端入网时的场景。由于 Beta(1,1) 模拟的是 MTC 终端非同步接入时的场景，若需要模拟海量终端同步入网的场景，由经验可知同步接入所带来的时延将会大于非同步接入，因而所选择 Beta 分布的 B 曲线最好位于 Beta(m, m) 线条的左上方。这也验证了 3GPP 参考模型 2 (即 Beta(3,4) 分布) 的有效性。

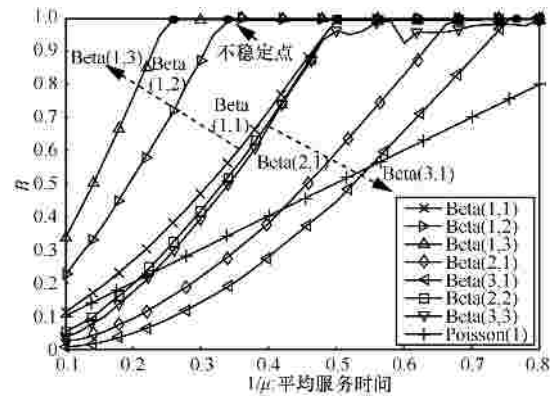


图 3 低阶 Beta/M/1 模型的 B 曲线

4 MTC 通信过载控制

MTC 通信的引入必然带来系统平均逗留时间与平均等待时间增加，因此有必要给出相应的应对措施。文献[3,5,14~17]分别从不同角度为“MTC 接入网络时的系统过载问题”提供各自的参考意见。本节则基于 Beta/M/1 模型的基本特性，给出相应的理解与解决方案。

4.1 分组接入及数量控制机制

为解决 MTC 接入时，系统面临的过载问题，3GPP 提出以下几个研究方向^[5]：1) group-based mechanism；2) time controlled policy；3) access class barring (ACB) 与 extend access barring (EAB) 等。3GPP 各提案的共性是基于组特性的数量控制机制，主要目标是控制准入时段内申请随机接入的 MTC 终端数目。一旦该数目得到控制，就可一定程度上改变终端的数据突发特性（主要是减小突发性），从而将到达时间分布由具有高同步特征的 Beta 分布调整为具有非同步特征的均匀分布或泊松分布（当然也可能是同步特征较低的 Beta 分布），其调制程度取决于数目控制的力度。

3GPP 提案虽然给出了基于组特性的数量控制机制，但并未给出具体的分组方案。本小节拟提出以下思想：常规分组方案（含 3GPP 提案）是将具有同类属性的 MTC 终端聚类并统一处理，如将智能抄表、智能交通、环境监测系统终端分为 3 类，然后分类受控接入。但是一般情况下具有相同属性的终端其数据传输时间的相关性，远远大于不同属性终端间的数据传输时间的相关性。因而同属性终端聚类将增加数据传输的突发性，使 Beta/M/1 模型的 B 曲线移向左上方；若将具有不同属性的终端进行聚类，则有可能降低该突发性，使 Beta/M/1 模型

的 B 曲线移向右下方移动, 达到提高海量终端接入时的网络性能。

4.2 纯数学解决方案—改变接入分布

先前的讨论说明 $\text{Beta}(a, b)$ 分布的均值 $E[x] = \frac{a}{a+b} = \frac{1}{1+b/a}$, 减小 b/a 可令 $\text{Beta}/M/1$ 的 B 曲线向右下方移动, 当 b/a 趋于 0 时, $E[x]$ 趋于 1, 非稳定点也趋于 1, 即使相应的 B 曲线靠近均匀分布或泊松分布的 B 曲线, 从而解决因 B 值增大带来的 $E(T_s)$ 、 $E(W)$ 增长问题。

若 MTC 终端到达时间间隔分布为 $\text{Beta}(a, b)$ 且 $a < b$, 通过先增加 a 再减小 b , 可以逐渐使相应的 B 曲线由图 3 的左上方不断移动到右下方。以形状参数为 $(1,3)$ 、 $(2,3)$ 、 $(3,3)$ 、 $(3,2)$ 、 $(3,1)$ 的 Beta 分布演示该过程: 图 4 为形状参数为 $(2,3)$ 、 $(2,2)$ 、 $(3,3)$ 、 $(3,2)$ 的 B 曲线, 形状参数为 $(1,3)$ 、 $(3,1)$ 的 B 曲线见图 3; 对比可知相应的 B 曲线确实从左上方不断移动到右下方, 降低了 B 值, 也即降低了 $E(T_s)$ 、 $E(W)$, 为提高网络性能的可靠技术手段。

尽管该方法给出了解决 MTC 接入时网络性能恶化的美好前景, 那如何实现呢? 定理 3 及 Beta 分布的数学特性, 可以给出其数学实现方式, 详见表 1。涉及的数学操作包括 Beta 分布概率生成函数复数域乘积与微分或 Beta 分布概率密度函数时域自变量乘除运算。

该解决方案的数学实现相对简单, 但工程实现究竟该如何呢? 本文未能找到与之对应的工程实现方案, 望有关研究者能给出相应的工程实现方案; 因为该思路可任意调节 MTC 终端的到达时间间隔分布, 从理论上完美解决 MTC 通信带来的系统过载问题。

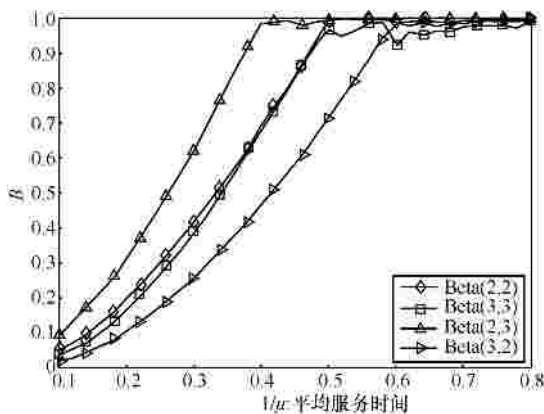


图 4 $a = 2, b = 3$ 组合的 $\text{Beta}/M/1$ 模型的 B 曲线

定理 3 ${}_1F_1(M, N, u)$ 的微分性质^[18]

设 M, N, k 为任意正整数, 则

$$\frac{d}{du} [u^M {}_1F_1(M, N, u)] = M u^{M-1} {}_1F_1(M+1, N, u)$$

$$\frac{d^k}{du^k} [u^{M+k-1} {}_1F_1(M, N, u)] = (-1)^k (1-N)^k u^{N-1-k} {}_1F_1(M, N-k, u)$$

表 1 Beta 分布变换的数学操作

到达时间分布	均值	生成函数	数学运算	
			复域	时域
Beta(1,3)	1/4	$F(1,4,u)$	↓ 微分	乘自变量
Beta(2,3)	2/5	$F(2,5,u)$	↓ 微分	乘自变量
Beta(3,3)	3/6	$F(3,6,u)$	↓ 先乘积后微分	除自变量
Beta(3,2)	3/5	$F(3,5,u)$	↓ 先乘积后微分	除自变量
Beta(3,1)	3/4	$F(3,4,u)$		

附: 图中箭头表示由一个 Beta 分布到另一个 Beta 分布的变换, 仅起指示作用。

4.3 时延扩展—分段均匀随机退避算法

4.1 节与 4.2 节方案, 虽然从理论上解决了 MTC 入网时的系统过载问题, 但均离实际应用系统相距较远。本节以 3GPP-LTE 网络的实用化为背景, 提出“分段均匀随机退避算法”, 适当延长优先级较低的 MTC 终端的随机退避时间, 整体上增加到达时间间隔的均值, 变相的将非稳定点移向右端, 以期达到与 4.1 节与 4.2 节方案相似的效果, 因为随机退避时间可能是改变终端接入分布的唯一可选项。

随机退避算法是随机竞争接入中的一个重要环节: 当随机信道申请失败时, 终端等待固定时间 S , 然后在 $[0, T]$ 范围内生成一个随机数 T_i (一般采用均匀分布), 重新在 $S + T_i$ 时刻发送“随机接入前导码”申请所需无线资源。关于退避时间 T_i 的生成方式, 现行 LTE 系统采用“所有终端均采用同一均匀分布 $U(0, T)$ ”的方式, 不区分常规终端与 MTC 终端。该过程为时隙-ALOHA 协议的标准实现流程。

为解决海量 MTC 终端入网时带来的系统性能恶化, 本文基于 MTC 终端的组特性提出“分段均匀随机退避时间算法”, 基本思想如下。

- 1) 常规终端仍沿用基本协议所规定的均匀分布, 即 $T_i^{\text{Normal UE}} \in U(0, T)$; T 由基站广播消息设定。
- 2) MTC 终端则首先接收系统负载信息 $p_0 \in [0, 1]$

(p_0 表示系统忙闲程度, $p_0 = 0$ 表示完全空闲, $p_0 = 1$ 表示完全繁忙, p_0 越大则网络越忙); 利用系统负载信息 p_0 , 第 i 类 MTC 终端的退避时间可表示为

$$T_i^{MTC} = p_0 T + U\left(i \frac{(1-p_0)T}{C}, (i+1) \frac{(1-p_0)T}{C}\right) \quad (11)$$

系统负载信息 p_0 确定 MTC 终端的退避时间区间; C 表示 MTC 终端种类个数。如图 5(a)所示, 若采用该机制, 常规终端退避时间仍占用 $[0, T]$ 整个时间区间 (暂不考虑固定退避时间 S), MTC 终端则主要占用 $[p_0 T, T]$ 部分; 既满足常规终端的时延敏感性, 也一定程度上错开了常规终端与 MTC 终端的接入时机, 有利于提高随机信道申请的成功率。

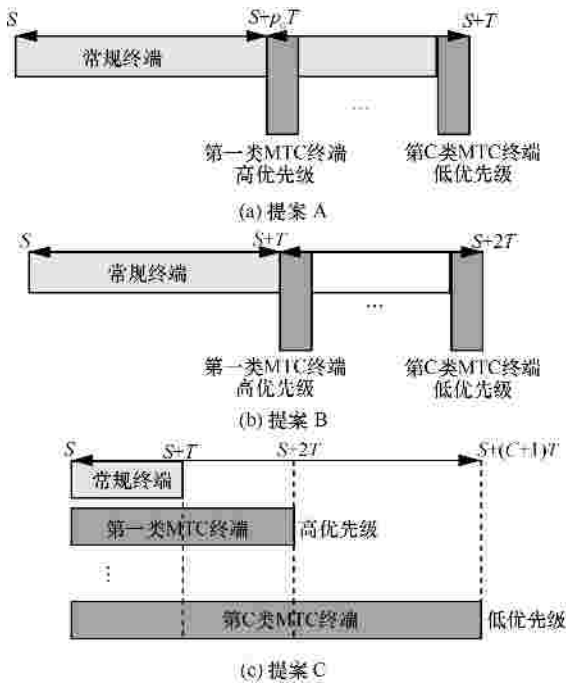


图5 分段均匀随机退避算法示意

然而, 当拥塞出现时, p_0 可能接近于 1 时, 使得区间 $[p_0 T, T]$ 较小, 可采用以下 2 种改进方式。

1) 将 MTC 终端退避时间扩展到 $[0, T]$ 之外, 例如 $[T, 2T]$ 范围内, 如图 5(b)所示, 第 i 类 MTC 终端的退避时间可表示为

$$T_i^{MTC} = T + U\left(i \frac{T}{C}, (i+1) \frac{T}{C}\right) \quad (12)$$

2) 以常规终端退避时间 T 为基准, 将 MTC 终端退避时间加倍, 如图 5(c)所示; 第 i 类 MTC 终端

的退避时间可表示为

$$T_i^{MTC} = U(0, k_i T) \quad (13)$$

其中, k_i 表示第 i 类 MTC 终端扩展因子, 图 5(c) 中 $k_i = i + 1$ 。该算法及其改进型通过增加 MTC 终端到达时间间隔, 改变终端接入分布, 进而缓解系统过载问题; 具体实现仅需 MTC 终端分类信息或优先级信息与系统负载信息, 代价是 MTC 终端接入时延的增加, 但该代价为保证常规终端的有效接入和系统性能是可取的。

为评估该算法的基本性能, 本文利用文献[20]所给的仿真方法, 以 LTE-MTC 典型应用环境为背景, 做如下仿真, 主要系统参数设置如下: PRACH 带宽为 1.08 MHz、调制方式为 QPSK、固定基站高度为 32 m、设基站通信范围为 1400 m、固定终端发送功率为 24 dBm、基站接收灵敏度以能接收小区边缘用户信号为基准、信道衰减因子 $a = 3.5$ 、阴影衰落标准差 $b = 8$ dB。设准入时段内, 基站有效通信范围内存在 3 个种类的终端, 常规终端和 2 类 MTC 终端。各类终端业务模型和退避时间算法的仿真参数如表 2 所示, T_{int} 表示分组生成时间间隔的均值, 具体求解及表示可参考文献[20]。

图 6 描述了不同退避机制下的吞吐量关系。由图 6 可知: 1) 当 MTC 通信业务模型不满足泊松分布时, 系统吞吐量为低于理论值; 2) 分段均匀随机退避算法的 3 种变型均给出高于时隙 ALOHA 的系统吞吐量, 其值大概为 2%~5%; 3) 提案 A 给出吞吐量增加的最大值, 因为该提案退避时间区间最短。

图 7 描述了不同退避机制下的平均接入时延。由图 7 可知: 分段均匀随机退避算法的 3 种变型均给出高于时隙 ALOHA 的平均接入时延, 即以时延换吞吐量, 时延增加值大概为 100~200 个分组时延。

图 8 统计了所有终端冲撞次数的概率分布。由图 8 可知: 1) 分段均匀随机退避算法的 3 种变型均给出低于时隙 ALOHA 的冲撞概率; 2) 提案 B 冲撞概率改善效果最佳, 因为其最大程度的错开了各类终端的退避时间。图 9 统计了常规终端冲撞次数的概率分布。由图 9 可知: 分段均匀随机退避算法的 3 种变型均给出低于时隙 ALOHA 的冲撞概率, 其改善程度仍然以提案 B 最佳, 其次是提案 A。

表 2 分段均匀随机退避算法的仿真参数设置

终端类型	终端个数	前导码比特数 (LTE Format1)	流量模型		退避机制			
			理论模型	3GPP TR 37.868 提案模型 2	Slot ALOHA	提案 A	提案 B	提案 C
常规终端	2 000	28		Poisson(?)		U(0,Tint)	U(0,Tint)	U(0,Tint)
第一类 MTC 终端	4 000	28	Poisson(?)	Tint × Beta(3,3)	U(0,Tint)	U(0.5Tint,0.75Tint)	U(Tint,0.5Tint)	U(0,1.5Tint)
第二类 MTC 终端	4 000	28		Tint × Beta(4,4)		U(0.75Tint,1 Tint)	U(1.5Tint,Tint)	U(0,2Tint)

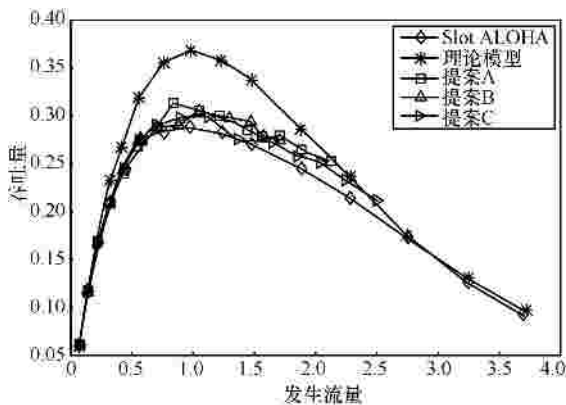


图 6 不同随机退避提案的吞吐量对比

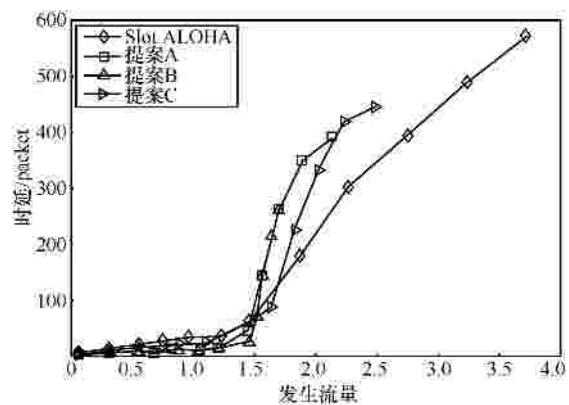


图 7 不同随机退避提案的接入时延对比

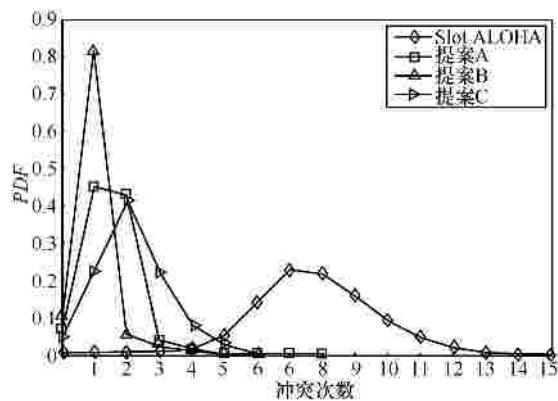


图 8 所有终端接入冲突次数的概率分布

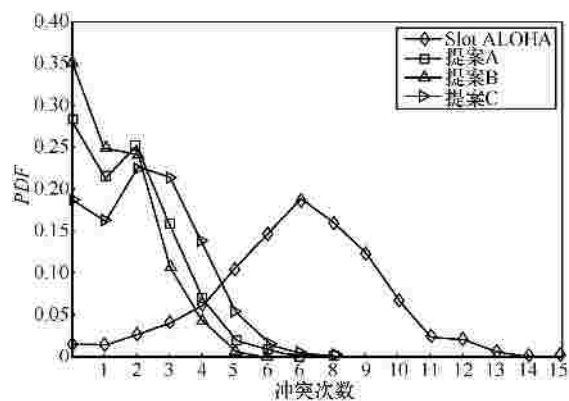


图 9 常规终端接入冲突次数的概率分布

5 结束语

为评估 MTC 接入时的网络性能，本文为 MTC 通信建立 Beta/M/1 队列模型，通过推导形状参数为任意正整数的 Beta 分布的概率生成函数的解析形式，给出 Beta/M/1 模型性能评估的求解过程；利用数值分析，给出 Beta/M/1 模型的主要特性。为解决 MTC 接入时系统面临的过载问题，本文提出 3 个解决办法，它们分别是：1) 不同属性终端间聚类；2) 改变 MTC 终端到达时间间隔分布；3) 分段均匀随机退避算法。前 2 个办法工程实现较难，针对第三个解决方案，本文利用蒙特卡洛方法评估了其主

性能，结果表明：该算法可有效降低随机信道申请的冲突概率，将系统有效吞吐量提高 2%~5%，代价是接入时延增加 100~200 个分组时延。

本文所提 Beta/M/1 模型及分段均匀随机退避算法可作为物联网/机器类通信/海量终端入网性能分析及过载控制的参考模型。考虑实际到达流的重尾特性，还可进一步分析 Beta 分布的自相关特性与长相关特性^[21,22]，完善相关理论及其在 MTC 通信中的应用。

参考文献：

[1] 3GPP TR 22.868. Study on Facilitating Machine to Machine Commu-

- nication in 3GPP Network[S]. 2007.
- [2] 3GPP TR 36.888. Study on Provision of Low Cost MTC UEs Based on LTE[S]. 2012.
- [3] TALEB T, KUNZ A. Machine type communications in 3GPP networks potential, challenges, and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2012,(3):178-184.
- [4] 王雅辉, 迟学芬. M2M 小数据业务的 IEEE 802.11 WLAN 分析模型[J]. 通信学报, 2011,32(12):122-130.
WANG Y H, CHI X F. IEEE 802.11 WLAN analytical model for M2M small data service[J]. Journal on Communications, 2011 32(12):122-130.
- [5] 3GPP TR 37.868. Study on RAN Improvements for Machine Type Communication[S]. 2011.
- [6] 3GPP TS 22.368. Service Requirements for Machine Type Communications[S]. 2012.
- [7] 3GPP TR 36.888. Study on Provision of Low Cost MTC UEs Based on LTE[S]. 2012.
- [8] 3GPP TR 23.888. System Improvements for Machine Type Communications[S]. 2012.
- [9] 3GPP TR 22.888. Study on Enhancements for Machine Type Communication[S]. 2012.
- [10] ZUKERMAN M. Introduction to queueing theory and stochastic tele-traffic models[EB/OL]. <http://www.ee.cityu.edu.hk/~zukerman/classnotes.pdf>, 2000.
- [11] ROSS S M. Introduction to Probability Models[M]. Singapore: Elsevier Academic Press, 2010.497-568.
- [12] OLIVER C I. Markov Process for Stochastic Modeling[M]. San Diego: Elsevier Academic Press, 2008.105-148.
- [13] COHEN J W. Applied Mathematics and Mechanics-The Single Server Queue[M]. Oxford: North-Holland Publishing Company, 1986.159-329.
- [14] AHMED A, KSENTINI A, HADJADJ-AOUL Y, *et al.* Congestion control for machine type communication[A]. Proc of IEEE ICC[C]. Ottawa, Canada, 2012. 778-782.
- [15] PAIVA R C D, WILHELM H, SAILY M, *et al.* Overload control method for synchronized MTC traffic in GERAN[A]. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. San Francisco, USA, 2011.1-5.
- [16] CHENG J P, LEE C H, LIN T M. Prioritized random access with dynamic access barring for RAN overload in 3GPP LTE-A networks[A]. IEEE GLOBECOM Workshops[C]. Houston, USA, 2011. 368-372.
- [17] LEE K D, KIM S, YI B. Throughput comparison of random access methods for M2M service over LTE networks[A]. IEEE GLOBECOM Workshops[C]. Houston, USA, 2011.373-377.
- [18] 刘式达, 刘式适. 特殊函数[M]. 北京: 中国气象出版社, 1988.
LIU S D, LIU S S. Special Functions[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1988.
- [19] ZHANG S J, JIN J M. Computation of Special Functions[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2011.
- [20] HARADA H, PRASAD R. Simulation and Software Radio for Mobile Communications[M]. London: London Artech House, 2002.
- [21] LI M, ZHAO W. Representation of a stochastic traffic bound[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(9):1368-1372.
- [22] LI M, ZHAO W. Visiting power laws in cyber-physical networking systems[EB/OL]. <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/302786>.

作者简介：



简鑫 (1987-), 男, 四川自贡人, 重庆大学博士生, 主要研究方向为复杂网络容量逼近技术、随机信号非正交化分离方法、统计学习、计算数学等。



曾孝平 (1956-), 男, 重庆人, 博士, 重庆大学教授、博士生导师, 主要研究方向为航空移动通信、下一代移动通信、生物信号处理等。



贾云健 (1976-), 男, 山西太原人, 博士, 重庆大学特聘研究员、博士生导师, 主要研究方向为无线通信理论与技术、多天线系统、新一代移动通信网络等。

杨俊逸 (1988-), 男, 湖南岳阳人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为航空移动通信、无线资源分配策略等。

贺渊 (1991-), 男, 四川广安人, 重庆大学硕士生, 主要研究方向为航空移动通信、网络信息论等。