**4 基于随机网络演算的物联网业务流量建模与分析方法**

近年来，物联网通信发展迅猛，无需人为干预便可实现机器与机器的相互通信，而M2M作为其主要表现形式，在智能家居、视频监控、智慧电网等多个领域中得到广泛应用。现有网络是根据传统H2H业务设计和优化的，而大量M2M终端产生数据流的涌入势必会给网络带来冲击和影响[1]。在该背景下，研究M2M业务的流量模型和网络性能对优化实际网络中的网络配置和资源分配等具有指导意义。

目前，国内外对M2M的学术研究尚处于起步阶段，对M2M业务流的数学建模和基于特定网络模型的性能评价的研究较少[2]。针对M2M业务流的特性，3GPP TR 37.868提出了到达过程分别服从均匀分布和Beta分布的用于描述M2M流非同步入网和同步入网时的两类参考模型[3]，这不同于对人与人(Human to Human,H2H)业务建立的自相似流量模型。文献[4]和[5] 在3GPP提出的业务模型基础上，分别建立了业务到达满足受Beta分布调制的复合泊松过程和CMMPP的仿真模型，在一定程度上弥补了3GPP 模型不够精确的缺点，成为较为通用的仿真模型。可见，M2M业务虽发展迅速但现阶段仍缺乏规范的流量模型，并且缺少对应的理论分析。

此外，在对M2M业务建模与分析的领域中，现有的分析模型局限于利用传统排队论建立用于网络性能评估及系统优化的队列模型，如文献[6]为M2M小数据业务建立了IPP/G/1/K排队系统模型以分析IEEE802.11DCF网络模型的排队特性；文献[7]为研究海量M2M终端同步入网时对网络造成的影响，建立了Beta/M/1队列模型，结果表明M2M终端的接入必然会增加系统平均逗留时间和平均等待时间；文献[8]对事件驱动型M2M业务进行建模，并分析了该业务流在流量控制随机接入协议下的系统吞吐量和时延性能。然而，对于当前日益复杂的网络形态和业务流特征来说，通过随机网络演算（Stochastic Network Calculus, SNC）建立具有QoS保障的界模型更为适用[9]。SNC是一种基于最小加代数运算的理论，分别使用随机到达曲线和随机服务曲线来表征到达数据流的特征以及网络提供给业务流的服务能力，该理论不仅可以更加准确的分析系统模型，同时也可以用来预测和分析网络性能。

针对基于M2M流量特性和特定网络场景的性能分析模型匮乏的现状，本文将运用SNC理论，在分析M2M业务特性的基础上，以M2M通信网络架构为研究场景，分别使用随机到达曲线和随机服务曲线描述业务流的到达过程以及网络向数据流提供服务的能力，并基于随机到达曲线和随机服务曲线推导出M2M业务流的端到端性能，为M2M业务在通信系统的开发和部署提供参考。

4.1 系统模型

4.1.1 网络场景

本文研究的M2M通信网络场景如图1所示，其中 M2M终端将实时采集的信息就近接入到无线接入点，接入点汇聚所有上传信息，通过承载网转发数据到所属的服务器，经服务器处理和分析的数据再上报给订阅用户，或者无需经由服务器直接转发给终端，实现M2M终端之间直接通信。

针对物联网终端发包次数频繁，小数据通信的特性，这里选用回程网作为业务流的承载网络以减少不必要的传输时延。在该场景中，接入点汇聚的M2M业务流经由多个路由器传输以实现端到端通信，因此可将回程网中的路由器抽象成多节点串联为业务流提供服务，如图2所示。其中将本文的研究对象，即贯穿整个回程网络的M2M业务流称为贯穿流，同时，由于非M2M业务的数据流也会经由路由器和M2M业务共同竞争资源，称其为竞争流。本文将重点分析图2模型下M2M业务流的端到端性能，为判断现有网络架构能否保障M2M业务的服务质量提供依据。



图1 M2M业务流网络场景



图2 多节点串联的端到端性能分析模型

4.1.2 CMMPP流量模型

网络性能评估的有效性依赖于用来表征M2M业务特性的流量模型的合理性。已知M2M通信的主要特征是上行流量占优、终端数目多、业务模式多样，除此之外，多终端在短时间和短距离范围内产生业务流的行为具有同步性，即M2M突发性事件的驱动会对周围其他非突发性业务造成影响，使得一定区域内M2M终端产生的聚合业务流呈现出同步模式，然而，3GPP提出的两种参考模型并不能体现这一特性。

为了描述这种特性，本文选用了文献[5]中提出的CMMPP模型对M2M数据流进行建模。CMMPP模型的思想是将N个M2M终端分别建模为对应的N个MMPP模型，所有MMPP模型都只受到一个主过程的影响，此主过程好比引起室内一连串报警器终端报警的火源，将其表示为一个与时间有关的全局变量。之后，通过为每个终端分配一个常参数,所有终端都与这个主过程产生关联，即对每个终端而言都有变量。表征数据流空间上的相关性（越接近于1，相关性越高），表征数据流在时间上的相关性，这样便体现了多终端产生的数据流同时在时间和空间上具有相关性。

此时第个终端在时刻状态的转移矩阵用全局转移概率矩阵和的凸组合表示为

 (4.1)

对于每个MMPP模型，目前只考虑两种状态regular和alarm，因而 和均为二阶的矩阵，表示为

 (4.2)



图3 和的状态转移图

其中，和分别代表了终端完全相关和完全不相关的两种极致情况，前者表示alarm（regular）状态一旦触发就立刻恢复到regular（alarm）状态的情况，后者表示alarm状态总不会被触发的情况，如图3所示。

为了和3GPP描述M2M数据流同步入网的流量模型一致，CMMPP模型中令，，即满足Beta分布。其中，当为正整数时，， Beta分布的均值为，和两个形状参数可以控制Beta分布的性质。

4.2 基于CMMPP的网络模型分析

在使用SNC理论分析网络提供的服务保障时，需要用到随机到达曲线和随机服务曲线这两个核心概念，前者刻画了到达数据流的特征，后者刻画了网络对数据流提供的服务能力[10]。因此，本节将分别对CMMPP流量特性和回程网提供的服务进行数学建模，最终得到端到端性能参数。

4.2.1 业务随机到达曲线

对业务到达过程统计特性的描述等价于随机到达曲线的确定，它是运用SNC理论的第一步。目前常用的随机流量模型有两个版本，记时间内数据到达系统累积量为，则以流量为中心（t.a.c，traffic-amount-centric）的模型[11]表示为

 (3)

其中，是该流量模型的随机到达曲线，它描述了业务到达流量的上界，是一个广义递增函数记为，该流量上界有可能被超过，但被超过的概率受边界函数的限制，且。而虚拟积压表示为，则另一种以虚拟积压为中心（v.b.c，virtual-backlog-centric）的随机流量模型表示为

 (4)

t.a.c流量模型比v.b.c流量模型更为通用，可以描述很多类型的数据流，这是因为

 (5)

因此，本文将以t.a.c流量模型作为参考模型，采用基于矩母函数的SNC方法构造 CMMPP模型的随机到达曲线。首先考虑到达过程受限于，即，它等价于。再利用切诺夫边界可将式（3）变为

 (6)

由上式右半部分可以看出，满足的任意都是随机到达曲线，此时对应为，是任意大于等于0的自由参数。由此可见，求解的矩母函数是得出随机到达曲线的关键。

单个终端产生的数据流的到达过程可以用到达累积分组的总长度表示，即 ，其中是时间内到达的分组总数，表示每个分组的长度且独立同分布。记regular和alarm两种状态下数据分组到达速率分别为和，从而得到的矩母函数：

 (7)

由于

 (8)

其中。又根据上节的式(1)和式(2)，可知

 (9)

由此得出连续时间MMPP的最小生成矩阵：

 (10)

所以

 (11)

再以时刻的作为平稳分布，记，将其和式（11）代入式（8），并假设分组定长为，求得

 (12)

上式的结果可令倒数第二步中得到，于是求得数据流的到达过程的随机到达曲线

 (13)

且其概率边界函数，是任意大于0的自由参数。因此，记具有t.a.c随机到达曲线。

本文提出的方法同样适用于更多状态的CMMPP模型，只需将两个全局状态转移矩阵和改为对应于个状态下的阶矩阵即可。

4.2.2 随机服务曲线

对应于使用随机到达曲线描述业务流的到达特性，SNC同样提供了一种方法来描述系统向输入业务流提供服务的随机下界，即随机服务曲线，文献[11]给出了如下定义。

定义1（随机服务曲线）用表示时间内业务离开系统S的输出累积量，如果对所有的，均有

 (14)

则称系统S提供边界函数为的随机服务曲线，记为，这里运算符代表的是最小

加卷积，即

 (15)

由于回程网中的路由器服务能力比较恒定，可假设服务速率固定为，且维持在工作保留模式,即只要队列不为空，路由器就以恒定速率处理数据。此外假设路由器采用基于非抢占式优先级的调度方法，而每个队列内部采用FCFS方式进行数据转发，对溢出队列的数据分组不作处理，直接丢弃。通常用延迟服务系统来描述该模型，具体地，每个路由器为数据流提供总的服务曲线为，对应于随机服务

曲线。

本文假设网络中贯穿流数目为，每个路由器上均存在条竞争流，并且竞争流优先级大于贯穿流，这里竞争流用满足泊松分布的H2H业务代替。根据泊松流的特性，易知第条竞争流的随机到达曲线为，其中[12]。无论条流之间是否独立，都可以得到聚合竞争流的随机流量模型

 (16)

其中，，。同理，条聚合贯穿流的随机流量模型满足，其中，。

贯穿流在节点上获得的服务曲线与节点的通信容量、竞争数据流大小、竞争数据流同贯穿流的优先级以及采用的调度策略有关，在网络演算理论中依赖于剩余服务曲线的研究，其相关定理如下 。

定理1（剩余服务曲线）两条输入流以及组成的聚合流输入到路由器中，若路由器对聚合业务流提供服务曲线，则业务流和分别获得随机服务曲线：

 (17)



综合定理1和路由器提供的服务模型，可知路由器向条贯穿流提供服务曲线，又为了区分不同路由节点为贯穿流提供的服务能力，将其记为。接着，利用网络演算的串联特性可以简化得到回程网络中转发贯穿数据流的U个路由节点为贯穿流提供的服务曲线

 (18)

其中，，，

，，均为大于0的自由参数。

4.3 端到端时延分析模型

对网络QoS性能边界的分析有助于判断网络自身的属性是否能够满足数据流对QoS的要求，同时也能够为承载网络的性能评估和优化设计提供解决依据。本文将主要关注QoS性能中的端到端时延，文献[13]给出了服务曲线为符合t.a.c流量模型的数据流提供服务时时延具有的性质。

定义2（时延）系统在时刻的时延定义为：

 (19)

定理2（时延边界）设系统S的输入的随机到达曲线满足，在系统上获得的服务过程满足，则对于，无论到达过程是否独立于服务过程，时延满足

 (20)

其中，表示与之间的最大水平距离，即

 (21)

根据以上定义和性质，本文基于CMMPP模型的随机到达曲线以及回程网络中多路由节点传输数据流的随机服务曲线，推导了物联网环境下M2M业务流的端到端时延边界。

首先根据式（21），式（20）可转变为

 (22)

再利用最小加卷积运算，将CMMPP流量模型满足的，以及整个回程网络提供的服务代入式（22）得到：

 (23)

其中

 (24)

 (25)

同理，得到

 (26)

所以M2M业务流的端到端时延边界为

 (27)

4.4 数值结果分析

为了验证本文提出的物联网环境下M2M业务流在回程网中性能分析方法的正确性，并研究网络中M2M业务流端到端时延边界的影响因素，以下将进行相关数值分析。

分析过程中需要合理设置相关参数，在参考相关文献中所提性能参数的基础上，现将路由器的传输速率，贯穿回程网的M2M业务流的到达速率和数据包长以及泊松流到达速率的参数值设定如表1。我们默认贯穿流与竞争流的个数相等，，而Beta分布的参数选用3GPP TR 37.868[3]建议的值进行分析，符合M2M的一般应用场景。

**表1 参数设置**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 分析参数 | 具体数值 | 含义 | |
|  | 1Gbps~1.5Gbps | 路由器传输速率 | |
|  | 0.0033pkt/s | regular状态时M2M业务的到达速率 | | |
|  | 10pkt/s | alarm状态时M2M业务的到达速率 | |
|  | 120Bytes | M2M数据包的长度 | |
|  |  | | Beta分布的参数值 |
|  | 0.8Mbps | 泊松流的到达速率 | |

此外，在分析理论时延边界时，需要确定各自由参数的值。而文献[14]指出各自由参数的选取都应当使得对应的概率边界函数尽可能小，且当自由参数趋向于无穷大时，业务流的到达曲线和网络的服务曲线将会失去其随机性退化为确定网络演算。因此，为了获取最大的复用增益，需要选取合适的值，令，。

图4给出了贯穿流和竞争流的到达曲线与传输时间的关系。终端在时开始产生数据，此刻到达曲线和均为0。由于到达曲线描述的是业务到达的累积数据量，因此都随时间的增大而增大。图中显示出当时，即同等终端数量下，H2H业务竞争流的到达流量大于M2M业务贯穿流的到达流量，虽然到达曲线表征流量上界，不是实际到达流量，但也从侧面验证了M2M业务流数据量小的特点。



图4 贯穿流和竞争流的到达曲线与传输时间关系

图5、6、7中横坐标表示时延标度，纵坐标表示时延大于的概率，即允许的时延违规概率。从各图中曲线变化可以看出，概率边界随着端到端时延的增大而递减，这与网络演算理论中随机时延边界的定义相符。

具体地，图5分析了回程网中路由节点个数对端到端时延的影响。当时，整个网络的性能分析映射为网络演算中单节点系统的研究，而时，整个网络对应为多节点串联系统的研究。该图展示了在概率边界一定的情况下，随着回程网中负责转发M2M数据的节点数目增多，端到端时延开始逐渐增大。因此在网络规划和设计中，为了减少传输时延，提高实时性，应当合理考虑路由转发决策，减少数据流在传输路径上的节点数。



图5 不同节点个数下概率边界与M2M业务流端到端时延关系

图6给出了优先级高于贯穿流的竞争数据流在总数据流中的占比对贯穿流端到端时延的影响。由于在非抢占式优先级的调度方法下，优先级高的竞争流会优先获得服务，造成贯穿流的时延增大。所以从图中观察到，当固定，而从30依次增大为50、70和90时，贯穿流（M2M业务流）的端到端时延明显增大。同时，随着总数据流和总数的增多，端到端时延增长的幅度在逐渐变小，这也表明了随机网络演算能够体现网络中数据流的统计复用，使得分析更加准确。



图6 贯穿流与竞争流在不同比例下概率边界与M2M业务流端到端时延关系

图7分析了描述终端间相关性的参数在不同情况下，违规概率边界和M2M业务流的端到端时延间的关系。考虑存在两种值：，，此时分析以下三种场景的时延边界：（1）所有终端具有高相关性，即；（2）所有终端具有低相关性，即；（3）一半终端，另一半终端。结果显示，当固定概率边界时，终端具有高相关性的场景1中M2M业务流时延最大，这是因为此场景下所有终端处于alarm状态的概率最大，单位时间内业务到达流量增多，导致端到端时延明显变大。与此同时，场景3和2的时延依次减少也是合理的。



图7 在不同情况下概率边界与M2M业务流端到端时延关系

4.5 本章小结

物联网环境下的业务流和传统互联网中的业务流的特性差异显著，因此有必要研究新的物联网业务模型并对其进行 性能分析。本文首先将物联网中机器与机器(M2M)业务流在回程网中的传输过程抽象为多节点串联模型，然后利用耦合马尔科夫调制泊松过程(CMMPP）对M2M业务流进行建模，体现M2M业务流在空间和时间上的相关性。接着运用随机网络演算理论推导该模型的到达曲线，并分析了网络传输业务流的服务曲线，得出M2M业务流的端到端时延边界，最后通过数值分析验证了结果的正确性。

本文运用SNC理论将回程网中多个路由节点联合提供服务给业务流的模型抽象为多节点串联模型，在此基础上，首先结合M2M业务流的特征求解了CMMPP模型的到达曲线，同时构造了多节点串联模型的服务曲线，接着在考虑M2M业务流和H2H业务流共存竞争资源的场景中，重点分析了M2M数据流端到端时延边界。本文数值分析中得到的端到端时延边界参数对分析网络能否为M2M业务流提供特定的服务保障具有一定的参考价值。

参 考 文 献

[1] NIYATO D, PING W, and DONG I K. Performance modeling and analysis of heterogeneous machine type communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(5):2836-2849.doi:[10.1109/TWC.2014.040714.131583](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.040714.131583).

[2] ALQAHTANI S A. Analysis and modelling of power consumption-aware priority-based scheduling for M2M data aggregation over long-term-evolution networks[J]. *IET Communications*, 2017, 11(2):177-184.doi: [10.1049/iet-com.2016.0468](https://doi.org/10.1049/iet-com.2016.0468).

[3] 3GPP TR 37.868. Study on RAN improvements for machine-type communications[R]. 2012.

[4] PAIVA R C D, VIEIRA R D, and SAILY M. Random access capacity evaluation with synchronized MTC users over wireless networks[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 2011:1-5. doi:[10.1109/VETECS.2011.5956587](https://doi.org/10.1109/VETECS.2011.5956587).

[5] LANER M, SVOBODA P, NIKAEIN N, *et al*. Traffic models for machine type communications[C]. Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems, Ilmenau, Germany, 2013:1-5.

[6] 王雅辉, 迟学芬.M2M小数据业务的IEEE 802.11WLAN分析模型[J]. 通信学报, 2011, 32(12):122-130.doi:[10.3969/j.issn.1000-436X.2011.12.016](http://dx.chinadoi.cn/10.3969%2fj.issn.1000-436X.2011.12.016).

WANG Yahui and CHI Xuefen. IEEE 802.11 WLAN analytical model for M2M small data service[J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(12):122-130. doi:[10.3969/j.issn.1000-436X.2011.12.016](http://dx.chinadoi.cn/10.3969%2fj.issn.1000-436X.2011.12.016).

[7] JIAN X, ZENG X, JIA Y, et al. Beta/M/1 Model for Machine Type Communication[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(3):584-587.

[8] 杨柳, 范平志, 郝莉. LTE系统中事件驱动M2M业务的流量控制随机接入协议[J]. 通信学报, 2014, 35(12):53-61. doi:[10.3969/j.issn.1000-436x.2014.12.007](http://dx.chinadoi.cn/10.3969%2fj.issn.1000-436x.2014.12.007)

YANG Liu, FAN Pingzhi, and HAO Li. Flow control random access protocol for event-driven machine-to-machine traffics in LTE network[J]. *Journal on Communications*, 2014, 35(12):53-61. doi:[10.3969/j.issn.1000-436x.2014.12.007](http://dx.chinadoi.cn/10.3969%2fj.issn.1000-436x.2014.12.007).

[9] BECKER N and FIDLER M. A Non-stationary Service Curve Model for Performance Analysis of Transient Phases[C]. IEEE Teletraffic Congress, Ghent, Belgium, 2015:116-124. doi: [10.1109/ITC.2015.21](https://doi.org/10.1109/ITC.2015.21).

[10] HUANG J, SUN Y, XIONG Z, *et al*. Modeling and Analysis on Access Control for Device-to-Device Communications in Cellular Network: A Network-Calculus-Based Approach[J].*IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3):1615-1626.doi: [10.1109/TVT.2015.2412154](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2412154).

[11] LIU Y and JIANG Y. Stochastic Network Calculus[M]. London, Springer, 2009:65-66.

[12] MAO S, PANWAR S S, MAO S, *et al*. A survey of envelope processes and their applications in quality of service provisioning[J]. *IEEE Communications Surveys* & *Tutorials*, 2006, 8(3):2-20.doi:[10.1109/COMST.2006.253272](https://doi.org/10.1109/COMST.2006.253272).

[13] Z. Li, Y. Gao, B. A. Salihu, et al. “Network calculus delay bounds in multi-server queueing networks with stochastic arrivals and stochastic services”. IEEE Global Communications Conference, San Diego, Dec. 2015.

[14] 李焕忠. 基于随机网络演算的性能分析技术研究[D].[博士论文].国防科学技术大学, 2011.

LI Huanzhong. A performance analysis approach based on stochastic network calculus[D]. [Ph.D. dissertation].National University of Defense Technology, 2011.