



综述

机器类通信流量建模与接入控制研究进展

简 鑫, 曾孝平

(重庆大学通信工程学院 重庆 400030)

摘 要: 简要介绍了机器类通信的发展历史、业务特征及面临的技术挑战。采用分类对比的方法, 重点介绍了海量机器类终端同步入网时机器类通信流量建模与接入控制的国内外研究进展。结合 ITU 和 ITC 建议的完善新业务流量分析理论的工作流程, 阐述了“机器类通信业务特征分析、流量建模、接入控制”3 个方面亟待解决的核心问题, 以期为承载网络的性能评估和优化设计提供解决思路, 为物联网和泛在网的推广应用及标准化工作提供参考。

关键词: 物联网; 机器类通信; 流量建模; 接入控制

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015160

Traffic Modeling and Access Control for Machine Type Communications: A Comprehensive Survey

Jian Xin, Zeng Xiaoping

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

Abstract: The historical development, traffic characteristics, potentials and challenges of machine type communications (MTC) were introduced. A comprehensive survey on the traffic modeling and access control for the concurrent data transmission from massive MTC devices was made. With the recommendations on traffic engineering suggested by International Telecommunication Union (ITU) and International Teletraffic Congress (ITC), some important issues and key problems in the fields of traffic characteristics analysis, traffic modeling and access control for MTC were summarized, in order to provide engineers and researchers insights on the improved performance analysis and enhanced access control for carrier network, which would promote the deployment and standardization of MTC and internet of things.

Key words: internet of things, machine type communication, traffic modeling, access control

1 引言

机器与机器(machine-to-machine, M2M)通信是指利用

自动控制及网络通信等技术, 在没有人为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; 它为各种终端设备在系统之间、网

收稿日期: 2015-04-15; 修回日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 91438104), 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No. 106112015CDJXY160002)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 91438104), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 106112015CDJXY160002)

论文引用格式: 简鑫, 曾孝平. 机器类通信流量建模与接入控制研究进展. 电信科学, 2015160

Jian X, Zeng X P. Traffic modeling and access control for machine type communications: a comprehensive survey. Telecommunications Science, 2015160



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^[1-3]。3GPP 将通过蜂窝网络进行数据传输的 M2M 通信称为机器类通信 (machine type communication, MTC), 即学术界和业界熟知的移动 M2M 通信或蜂窝 M2M 通信^[2-4]。MTC 正在快速成为改变移动通信市场的生力军, 其应用领域涵盖安全监测、货物跟踪、智能支付、医疗保健、远程监控、智能测量、消费电子等重要行业, 是未来物联网 (internet of things, IoT) 与泛在网 (ubiquitous network) 不可或缺的重要组成部分^[5]。2013 年 5 月, 美国权威咨询机构麦肯锡将物联网列为“决定未来经济的 12 大颠覆技术”, 预计到 2025 年其潜在经济价值将达到 2.7~6.2 万亿美元, 对制造、医保、采矿运营成本的节省最高可达 36 万亿美元^[6]。2014 年 10 月与 2015 年 3 月, 政府工作报告也明确指出将进一步推进并扩大移动互联网、物联网、大数据等信息消费, 即“互联网+行动计划”^[7], 这意味着物联网与 MTC 具有广阔的市场前景。然而美国 Forrester 也曾预测: 到 2020 年世界上物物互联的业务与 H2H (human to human) 业务相比将达到 30:1^[8]; 3GPP TR 37.868 指出, 单个小区内 MTC 终端个数将可能达到 5 000~30 000^[4]。承载如此大规模的 MTC 业务将给参照 H2H 业务特性设计的移动蜂窝网带来巨大挑战^[9-12]。为保障物联网与 MTC 的快速推广和普及, 有必要给出海量 MTC 终端同步入网时承载网络的性能评估办法及现有接入控制机制的优化策略, 即必须完善 MTC 的流量分析理论。因此本文期望通过综述近年国内外关于海量 MTC 终端同步入网时其流量建模与接入控制的研究进展, 发现“MTC 业务特征分析、流量建模、接入控制”3 个方面亟待解决的关键问题, 以便为后续研究提供参考。

2 机器类通信的发展历史、现状与前景

考虑到 MTC、M2M 通信、物联网和泛在网之间的密切联系, 本文将 MTC 放到物联网这个大框架下回溯其发展历史、现状和前景。

(1) 国际层面

1999 年, 物联网概念被首次提出^[13]; 2005 年 11 月, 国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 发布“ITU 互联网报告 2005: 物联网”, 给出物联网的确切定义^[14]; 2008 年 11 月, 美国 IBM 提出“智慧地球”概念^[15]; 2009 年 6 月, 欧盟发布“物联网—欧洲行动计划”公告^[16]; 2009 年 8 月, 日本提出“智慧日本: i-Japan”计划^[17]; 2012 年 7 月, oneM2M 论坛成立, 以期通过各国的协作实现全球范

围内的 IoT/M2M 通信^[18]。

(2) 国家层面

2006 年 2 月, “国家中长期科学与技术发展规划 (2006-2020 年)”将“传感器网络”列为重点研究方向^[19]。2009 年 8 月, 物联网被正式列为国家五大新兴战略性产业之一, 写入政府工作报告, 即“感知中国”^[20]。2014 年 10 月和 2015 年 3 月, 政府工作报告再次强调将“进一步推进并扩大移动互联网、物联网、大数据等信息消费”^[7]。2010-2014 年, 国家“新一代宽带移动无线通信网重大专项——物联网与泛在网”和国家自然科学基金委员会就面向物联网的异构网络融合、多网络多终端协同、大容量高效无线传输、服务资源与调度、网络建模与性能评价、非确定性数据建模、群组认证协议、跨层优化设计和安全机制等问题, 资助了清华大学、吉林大学、西安电子科技大学、重庆邮电大学、南京邮电大学、北京邮电大学、北京交通大学等团队的科学研究, 考察了物联网典型应用领域的核心科学与技术问题^[21]。上述课题大多还没有完全结题, 仍处于技术攻坚阶段, 是未来几年的热点研究方向。

(3) 标准化层面

自 2007 年以来国际标准化组织也积极开展物联网与 M2M 通信的讨论。欧洲电信标准协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 从典型物联网用例入手, 完成了 M2M 通信的业务需求分析、概要层体系结构设计以及相关数据模型、接口和过程的定义, 以期制定一个水平化的、不针对特定 M2M 应用的端到端标准化解决方案^[22-24]。IEEE 802.16p/e/m 标委会分析了引入 M2M 后无线局域网 (WLAN) 面临的承载压力和改进思路^[25]。中国通信标准化协会 (China Communication Standards Association, CCSA) 也发布了适应我国国情的移动 M2M 业务研究报告, 调研了 M2M 业务的现状、前景与典型行业应用以及当前 M2M 应用模式存在的问题与解决方案^[3]。3GPP 在分析 M2M 业务需求的基础上, 重点研究移动通信系统的优化技术与安全技术, 以保证现有系统能适应 M2M 通信的特点, 并将通过蜂窝网络进行数据传输的 M2M 通信称为 MTC^[1,4]。2009 年 9 月, 3GPP SA#45 全会启动名为“Network Improvements for Machine Type Communications”的工作组 (study item), 以深入研究 M2M 通信对 3GPP 网络的影响及网络优化方案^[26-28]。2011 年 9 月, 在 3GPP RAN#53 全会上, 经全球电信移动运营商投票, MTC 以 26 票获得 RAN WG1 工作组与下行 MIMO 共同排名第 4 的优

先级,成立名为“Provision of Low-Cost MTC UEs Based on LTE”工作组,开始正式标准化工作以保证 M2M 终端制造商和网络运营商从 2G 向 4G 网络演进中的商业利益^[4]。遗憾的是,2013 年至今 3GPP 关于 MTC 的标准化工作几乎停滞,现阶段 oneM2M 论坛是推动物联网或 MTC 标准化工作的主要机构,于 2015 年 2 月发布了第一个全球范围内 M2M 技术标准^[18]。

简言之,MTC 作为物联网和泛在网的重要组成部分,存在诸多待完善之处,在未来几年仍将是国内外学术界与产业界共同关注的焦点。

3 机器类通信的业务特征及技术挑战

与 H2H 通信相比,MTC 具有应用类型繁多、业务模式多样、终端数量巨大、小数据通信且上行占优、白昼特性明显和周期性同步通信、会话持续时间短、终端移动性低等典型特征^[5]。参考文献[29]是目前唯一的较为详尽的关于 MTC 业务特征或流量特征的实测报告。数据样本来自美国某移动运营商 2010 年 8 月某一周的运营数据。数据采集对象包括智能手机业务与六大类 MTC 业务,分别是资产跟踪、建筑安保、车队管理、调制解调器、与环境或能源相关的测量应用、远程医疗。报告从流量大小与昼夜特性、会话持续时间、终端移动性、网络性能等方面分析了 MTC 与 H2H 通信流量特性的差别及面临的技术挑战。

(1) 流量大小

每台 MTC 终端的平均通信量远远小于每台智能手机的平均通信量。然而由于总通信量与终端数目成正比,随着 MTC 终端数量的不断增加,运营商将面临如何承载海量小数据终端的技术挑战。与 H2H 通信相比,MTC 上行数据与下行数据的比值较大。这是因为 MTC 终端的主要任务是通过自动传感技术实时监测环境信息并将其上传到承载网络,其行为更像“内容生产商”而不是“内容消费商”。该现象与互联网和移动通信领域以用户为中心的内容生产方式恰好相反,对目前以“下行占优”的非对称网络设计思路提出了质疑。

(2) 昼夜特性

与 H2H 通信类似,MTC 也表现出明显的昼夜特性。只不过 MTC 的繁忙时间对应“人们工作的时间”,而 H2H 通信的繁忙时间却对应“人们醒着的时间”。由于两者的繁忙时间在一定程度上相互重叠,如何制定合适的分流机制与资源共享机制,是保证通信质量的关键。通过更细微的时

序分析发现:MTC 具有周期性的同步通信特征。海量 MTC 终端的周期性同步入网将给运营商和蜂窝网的设计带来极大的挑战,急需 MTC 专属的通信协议与更为合理的流量随机化方法。

(3) 会话持续时间

MTC 与 H2H 通信会话级的特性也有较大差别。最重要的就是 MTC 的会话持续时间远远小于 H2H 通信。所考察的六大类 MTC 应用中,80% 的 MTC 终端的会话持续时间小于 5 min。这表明:如果仅仅用通信的比特量来衡量 MTC 的资源分配策略将有失偏颇,因为这并没有完全考虑短时小数据通信和控制开销的不匹配特性。

(4) 终端移动性

除资产追踪与车辆管理应用以外,大多数 MTC 终端倾向于集中在一个较小的地理范围内,表现出较低的移动性。因此 MTC 流量的空间分布表现出相对集中的现象,并且可以清晰地分辨出高低流量区域。这种相对集中的特性一方面给网络优化带来了便利,如网络调优局部化、较为简单的终端移动性管理方案等;另一方面也给高流量地区带来了更多的网络拥塞。

(5) 网络性能

参考文献[29]主要监测了往返时延和无线接入端的分组丢失率两个性能指标。结果显示:MTC 的往返时延和分组丢失率均大于 H2H 通信。一方面是因为 MTC 一般都采用较为简单的通信制式,另一方面则源于 MTC 广泛的室内应用。室内 MTC 终端的增强通信机制是保障 MTC 应用推广的关键。

MTC 的前期研究多围绕业务需求、功能架构、示范应用等方面展开,缺乏对关键共性问题的深入研究,相关的学术研究也尚处于起步阶段。然而结合上述讨论和标准化组织与学术界近年的聚焦点,仍可总结出目前 MTC 领域的研究重点和难点^[30]:从物联网及 MTC 的广泛应用中准确抽象出低成本、低功耗 MTC 的业务模型与设计指标;理清各参数对网络容量、频谱利用率以及非 MTC 的影响,确定可调参数集以实现网络调优;海量 MTC 终端同步入网时,如何平衡非 MTC 和 MTC 之间的服务质量要求 QoS。尽管这些问题都必须逐一解决,但它们的建模方法与求解思路差异明显,难以被单一论文全部涵盖。因此,针对上述三个难点,本文着重调研海量 MTC 终端同步入网时 MTC 流量建模与接入控制的国内外研究进展,以期为承载网络的性能评估和优化设计提供解决思路,为物联网和泛在网的



推广应用和标准化工作提供参考。

4 机器类通信流量建模的国内外研究现状

作为计算机通信网设计的基础,流量分析理论(traffic engineering or teletraffic science)的主要任务可概述为根据业务特性及服务质量要求,设计合理的资源分配与流量控制策略,以保证在一定范围内满足一定数量的终端运行一定类型的通信业务^[31]。排队论和网络演算理论是流量分析理论的两大基本数学工具,根据业务到达过程和服务过程的统计特性,分别依靠随机过程和最小加代数建立可用于网络性能评估及系统优化设计的队列模型和具有 QoS 保障的界模型^[31-34]。业务到达过程的统计描述是运用流量分析理论的第一步,受到学术界的广泛关注。目前较为成熟的统计模型有两类:一是为承载语音业务的电路交换网建立的齐次泊松过程;二是为承载多媒体业务的分组交换网建立的复合泊松过程。复合泊松过程是齐次泊松过程的自然推广,是到达速率为随机数或受随机过程调制的泊松过程,可在一定程度上描述分组交换网的重尾特性或长时自相关特性^[35]。基于齐次和复合泊松过程,排队论研究者分别建立了著名的爱尔朗语音业务模型和马尔科夫队列模型^[31];网络演算理论研究者分别提出了 EBB(exponentially bounded burstiness, 指数边界突发)和 SBB(stochastically bounded burstiness, 随机边界突发)模型^[36,37]。然而由 Palm 叠加定理可知:上述模型均蕴含到达过程服从泊松过程(多个独立点过程叠加)或状态驻留时间服从负指数分布的假设(半无穷区间的概率分布),难以描述海量 MTC 终端短时间内(有限区间内的概率分布)同步入网时(多个相关性点过程叠加)的瞬时突发特性^[31, 38, 39]。因此 3GPP TR 37.868 提出两类非泊松业务模型,令所有 MTC 终端在有限持续时间 $[0, T]$ 内被激活,参考模型 1 假设给定时刻的接入强度(即活跃终端数)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;参考模型 2 假设给定时刻的接入强度服从 $[0, T]$ 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^[28]。均匀分布是 Beta 分布的特例,该模型一定程度上可以描述海量 MTC 终端同步入网的瞬时突发特性。遗憾的是,3GPP 既没有给出所提业务模型的物理意义,也没有给出所提业务模型到达时间间隔和累计业务到达数的概率密度函数,难以采用队列模型和网络演算理论进行建模分析。因此,目前“3GPP TR 37.868-Annex A: Traffic Models

for Machine Type Communications”相关章节仍为空白。

鉴于学术界还没有规范 MTC 业务到达过程的统计描述,现阶段 MTC 统计建模的仿真分析多于理论分析,有限的理论分析仍依赖于齐次或复合泊松过程,相关理论亟待进一步完善和扩展。基于齐次泊松过程,参考文献[40-42]研究了 LTE 接入网的承载压力及其改进办法。基于复合泊松过程,参考文献[43,44]给出按 MTC 终端数据传输状态进行行为建模的离散时间马尔科夫队列仿真模型。吉林大学的迟学芬团队开展了“机器类通信网络建模和性能评价”的专门研究,采用具有两个状态的 MMPP 和 MMBP 模型描述单个 MTC 终端的业务“突发性”,分析了无线局域网随机接入过程的主要性能指标^[45-47]。基于 3GPP 业务模型,参考文献[48]为承载 MTC 业务的 GSM/GPRS 网络建立接入强度受 Beta 分布调制的复合泊松过程的仿真模型。参考文献[49]为 MTC 终端建立到达速率受 Beta 分布调制的 MMPP4 仿真模型。重庆大学曾孝平团队在“华为公司创新研究计划项目”的资助下开展了“低成本 M2M 网络优化研究”,为 MTC 建立两类基于 Beta 分布的队列模型,并推导了整参 Beta 分布的概率生成函数,大大提高了解析求解 3GPP 业务模型的可能性^[50]。

综上所述,在发布相关参考模型之前,海量 MTC 终端同步入网的业务特性分析及统计建模仍是一个亟待完善的公开科学问题,是未来几年 MTC 领域的热点研究方向。

5 机器类通信接入控制的国内外研究现状

当海量 MTC 终端同步入网时,其瞬时突发性将造成承载网络严重的流量过载或网络拥塞,影响网络的各个关键节点,如 eNB、MME、HSS、服务网关、PDN 网关和 MTC 服务器等^[9-12]。如何缓解由 MTC 带来的系统过载或拥塞问题是目前的研究热点与难点^[11, 12]。尽管核心网与接入网的过载控制同等重要,但接入网的有效过载控制不仅可有效地避免核心网的进一步拥塞,而且简单易行。因此目前关于 MTC 过载控制的研究也多集中于接入网,核心网则侧重网络体系架构设计,本文重点调研接入网侧 MTC 过载控制的国内外研究进展。

为解决海量 MTC 终端同步入网时接入网面临的过载问题,3GPP 提出以下 6 个候选研究方向:分类接入机制(access class barring (ACB) scheme)、为 MTC 分配专属的随机接入信道资源(separate random access channel (RACH) resources for MTC)、动态分配随机接入信道资源

(dynamic allocation of RACH resources)、MTC 专属的退避机制 (MTC specific back-off scheme)、分时接入 (slotted access)、主动寻呼机制 (pull based scheme)^[28]。除 3GPP 提案之外, 各研究者提出的大部分接入控制方案也可被 3GPP

的 6 个候选方向所涵盖。因此, 本文将近年公开发表的 MTC 接入控制机制按照 3GPP 候选方向进行分类, 并简述其主要贡献, 以便为后续研究提供参考, 具体见表 1。

表 1“流量类型”栏中“√”表示该文有考虑 MTC 或 H2H

表 1 机器类通信接入控制的候选机制

候选机制		参考文献	评价指标				验证方法			流量类型		MTC 终端规模
3GPP 大类	子类		能耗	时延	RA 成功概率	吞吐量	试验	仿真	理论	MTC	H2H	
分类接入	原始 ACB	[51], [52]		√	√			√		√	√	30 000 个
	扩展 ACB(EAB)	[28], [53]			√			√		Beta		30 000 个
	动态 ACB(DAB)	[54]		√	√			√		√	√	37 396 个
		[55]			√			√		√		150 个
		[56]		√						Beta		1 000 个
		[40]		√		√		√	√	IPP		1 000 个/RA slot
	协作 ACB	[57]		√	√			√		泊松		30 000 个
		[58]		√		√		√	√	泊松		/
		[57], [59~61]		√		√		√	√	√		/
为 MTC 分配专属的 RACH 资源	前导码独立划分	[52]		√	√			√		√	√	30 000 个
	前导码共享机制	[62]				√		√	√	泊松	泊松	1 000 个/s
		[63]				√		√	√	√	√	100 个/RA slot
		[64]	√			√		√	√	Beta	泊松	30 000 个
	PDCCH 共享机制	[66]				√		√		√	√	1 400 个
	资源预分配	[54]		√	√			√		√	√	37 396 个
动态分配 RACH 资源	更多的接入时隙 自适应调整接入时隙数	[67]		√	√			√		Beta		1 000 个
		[52]		√	√			√		√		30 000 个
		[68]										/
		[69]		√		√		√	√	√		500 个
MTC 专属的退避机制	扩大退避区间	[52], [70]		√	√			√		Beta		30 000 个
	二项式退避	[45]		√	√	√		√	√	IPP		/
	分段均匀退避	[30]		√	√	√		√		Beta	泊松	5 000 个, 30 000 个
												30 000 个
		[70]		√				√		Beta		30 000 个
		[71]		√	√			√		√		1500 个/RA slot
	预退避机制	[72]		√	√			√		泊松		30 000 个
		[73]				√		√	√	√		2 000 个
												/
												/
分时接入	暂无具体方案											/
主动寻呼机制	非组特性的寻呼机制	[74]		√	√			√		√		8 000 个
		[75]			√			√		√		30 000 个
	基于组特性的寻呼机制	[42], [76]		√	√			√	√	泊松	泊松	1 000 个
其他	信令批处理机制	[10]		√				√		Beta		30 000 个
	基于分布式队列的 MAC	[11]										
		Msg3 用于小数据传输	[77], [78]		√			√		√		100 个/RA slot
		前导码预编码	[79]			√			√	√		/
	缓存 PRACH 信息	[80]		√	√			√		√		2 000 个
	共享 PUSCH 资源	[81]				√		√	√	泊松		30 000 个
		[82]				√		√		√	√	600 个
		[83]	√	√				√	√	√	√	/
		[84]		√		√		√		√	√	1 000 个
	分层多跳传输机制	[85]				√				√		/
		[86]	√	√	√			√	√	泊松		5 000 个
		[87]	√			√		√	√	√		100 个
	具有 QoS 保障的 MAC	[9], [88], [89]		√				√	√	泊松		/
	具有能耗感知的 MAC	[11]		√	√			√		√	√	1 500 个
		[90], [91]		√	√			√	√	均匀		30 000 个
		[92]		√	√			√	√	泊松		10 000 个
		[93]		√						泊松		/
		[94]		√	√	√		√	√	泊松	泊松	/
		[95]		√				√	√	√		/



通信的影响,但没有明确指出采用的流量模型的类型。

6个候选研究方向详细介绍如下。

(1)分类接入

为直接控制接入网络的 MTC 终端总量,3GPP 建议将 LTE 协议中为 H2H 通信设计的 ACB 机制也作为 MTC 的准入机制^[51]。基于此,参考文献[52]通过计算机仿真评估了不同准入比例下 MTC 业务的接入时延与接入成功概率。为进一步改善准入效果,3GPP 又提出基于硬判决的扩展 ACB (EAB) 机制,但始终没有给出采用 ACB 与 EAB 时 MTC 准入比例的确定机制^[28,53]。为此,参考文献[54]提出基于随机接入成功概率与业务优先级确定准入比例的动态 ACB(DAB)机制;参考文献[55]提出一种由 PID 控制器根据核心网负载确定准入比例的 DAB 机制;参考文献[53,56]提出基于冲突概率和活跃 MTC 终端数的准入比例确定机制;参考文献[40]提出依据 MTC 终端接入历史调整准入比例的快速自适应接入控制机制 (fast adaptive S-ALOHA, FASA);参考文献[57]提出通过前导信号能量值估计活跃终端数再导出准入比例的自适应拥塞控制机制;参考文献[58]提出依据信道占用率、活跃 MTC 终端数和信道冲突占用时间调整准入比例的具有自适应负载控制的改进型 S-ALOHA、np-CSMA 和 MACA 协议。上述机制均是以更长的接入时延换取更高的接入成功概率,并且当 MTC 终端数量太大时存在过量抑制的现象,也无法很好地解决同步接入时的过载问题。为此,参考文献[59~61]提出宏蜂窝与微蜂窝共同确定 MTC 准入比例实现负载均衡的协作 ACB 机制,缩短了接入时延。ACB 机制实现简单、效果明显,但存在过度抑制与 QoS 无法保障等缺点,准入比例的设定直接影响整体性能。

(2)为 MTC 分配专属的 RACH 资源

为避免因 H2H 通信终端和 MTC 终端共享有限的随机接入信道(如前导码)造成过多的碰撞和退避,3GPP 建议为 MTC 分配专属的 RACH 资源。基于此,参考文献[52]通过计算机仿真评估了不同前导码分配比例下 MTC 的接入成功概率与时延。参考文献[62~65]提出 3 类前导码共享机制,分别是:H2H 通信使用所有前导码、MTC 仅使用一部分;MTC 使用所有前导码、H2H 仅使用一部分;H2H 和 M2M 均使用部分前导码,但两者存在交集。令 H2H 通信和 MTC 到达过程均为泊松过程,参考文献[62]对比分析了 3GPP 前导码划分机制与所提方案的吞吐量。令 H2H 通信到达过程为泊松过程、MTC 到达过程为 Beta 分布,参考文

献[64]对比分析了 3GPP 前导码划分机制与所提方案的吞吐量和能耗。参考文献[63,65]以最大吞吐量为目标,基于博弈论研究了固定共享比例时的负载均衡策略,但并没有研究其逆问题,即给定 H2H 与 MTC 接入强度时如何有效分配有限的随机接入资源。类比前导码共享机制,参考文献 [66] 提出以最大吞吐量为目标的 PDCCH(physical downlink control channel,物理下行控制信道)共享机制。除此之外,参考文献[54]还提出基于业务优先级的资源预分配策略;参考文献[67]为 GSM 网络提出基于分组大小和会话持续时间的资源预约策略。上述机制拟通过不断细分有限的共享资源以应对网络负荷的不断增加,仅在中小规模载荷时有效。

(3)动态分配 RACH 资源

为通过增加 RACH 资源改善接入性能,3GPP 建议根据网络的实时负载将部分数据平面的资源用于随机接入,但目前还没有具体可实施的方案。参考文献[52]通过计算机仿真简要评估了该方案的性能。参考文献[68]提出一种结合冲突概率和 ACB 的接入时隙数动态调整机制,遗憾的是,没有给出所提机制的性能分析。参考文献[69]根据 MTC 终端数量确定了 p-CSMA 竞争周期与传输周期的最优时长分配。

(4)MTC 专属的退避机制

为随机化接入冲突后 MTC 终端的重传时间,3GPP 建议为 MTC 引入专属的退避机制。参考文献[52,70]通过计算机仿真分析了不同退避区间下 MTC 业务的接入时延与接入成功概率。参考文献[45]提出一种基于二项式分布的大尺度退避算法。参考文献[30]提出一种基于 MTC 业务优先级的分段均匀退避算法。参考文献[70,71]提出 MTC 终端首次接入也需退避的预退避机制,以随机化海量 MTC 终端周期性同步入网时的入网时机。参考文献[72]为位置固定的 MTC 应用提出对比实测与预存的上行定时提前量 (uplink timing advance)是否一致的预退避机制;基于此,参考文献[73]融合 ACB 机制提出改进的准入机制。上述各方案的思路都是通过扩大 MTC 退避时间来尽量提高接入成功率,仅在小规模载荷时有效。

(5)分时接入

分时接入是指为 MTC 终端分配专属的接入时隙。目前没有具体可实施的方案,得到较少研究者的关注。

(6)主动寻呼机制

前 5 种候选机制均针对 MTC 终端首先发起通信的场

景,并仅在网络发生过载时才被动地采取接入控制机制(push based scheme)。主动寻呼机制(pull based scheme),即网络端根据网络负载决定准入的MTC比例,并通过寻呼(paging)机制唤醒这部分MTC终端,实现过载的主动管理^[28]。参考文献[74,75]分别提出基于ACB和EAB的寻呼机制。然而受限于寻呼信道(paging channel)的容量,该机制时延和信令开销较大,因此3GPP又提出基于组特性的主动寻呼机制^[76]。假设MTC和H2H通信业务流均服从泊松过程,参考文献[42]通过完整建模S-ALOHA从Msg1到Msg4各阶段的工作流程,分析了带组特性的寻呼机制的PRACH(physical random access channel,物理随机接入信道)的主要性能指标。基于组特性的主动寻呼机制通过控制每个分组内MTC终端数量实现过载控制,然而当每个组内MTC终端较大时仍存在过载控制的问题。该问题与不分组和主动寻呼机制的接入过载问题等效。

(7)其他

除3GPP提案之外,信令批处理^[100]、分布式队列^[111]、Msg3用于小数据传输^[77,78]、前导码预编码^[79]等优化机制也被提出。参考文献[80]还提出通过MTC终端存储上次成功接入时的PRACH信息来降低冲突概率。然而上述机制多停留于概念阶段或对现有标准修改较大,没有具体实施方案,也没经过完善的性能评估。针对数据平面的系统过载,参考文献[81]建议为周期性通信的MTC应用分配专属的PUSCH(physical uplink shared channel,物理上行共享信道)资源,但没有给出配比的确定方法。参考文献[82]根据H2H和M2M最大容忍时延为共享PUSCH资源提出一种改进的比例公平调度算法。参考文献[83]研究了同时满足系统总功耗和实时MTC业务时延要求的资源分配策略,完成了最优化建模,但没有很好地融入MTC业务特性。参考文献[84]提出MTC终端借用已分配给H2H终端的PUSCH资源进行数据传输的分布式算法。然而考虑到宽带移动通信数据平面拥塞的概率相对较小,这类研究的现实意义并不大。针对引入多跳传输的MTC,参考文献[85]给出两跳传输的流量预测办法并指出该机制可通过瞬时大数据换取较小的信令开销。参考文献[86]以提升小区边缘MTC终端性能为目标,给出采用排队论分析两跳传输的吞吐量、时延和能耗的计算办法。参考文献[87]以最小能耗为目标,给出两跳传输的成簇机制和最优资源分配策略。然而考虑到这需要为MTC终端引入额外的通信协议和射频前端,这类机制不利于降低MTC终端的成本,其推广应用还有待

探讨。针对不同MTC业务的QoS需求,参考文献[9,88]提出基于组特性且具有QoS保障的准入机制;鉴于该机制仅与业务种类和最大时延抖动有关,参考文献[89]引入M/D/1队列模型,改进了其研究成果。尽管这方面的研究极其必要,但现阶段还缺乏面向MTC的具有QoS保障的流量模型,因此为MTC引入网络演算理论将是MTC流量分析领域未来的重点研究方向之一。针对MTC终端的低功耗需求,参考文献[11,90,91]结合3GPP参考模型给出定量分析随机接入时延和功耗的简化计算和仿真方法;据此参考文献[92]提出直接利用PUSCH进行随机接入,以期缩短随机接入流程、降低功耗和接入时延。参考文献[93]为实时监测类MTC业务提出两类低功耗的数据上传机制,但没有研究随机接入性能。参考文献[94]为随机接入过程提出功率攀升(power ramping)的对数递增方案。参考文献[95]提出通过延长非连续接收(discontinuous reception,DRX)静默期来降低MTC终端功耗。由于低功耗直接关乎MTC终端的可长期部署性,因此有必要探索具有高功率效率的随机接入机制以推广MTC的应用。

综上所述,可总结出MTC接入控制的研究进展:改进的接入控制机制虽然不同程度地考虑了MTC的业务特征,但大多数没有融入MTC流量建模的研究成果,即没有定量地融入MTC业务特征;理论分析较少且多限于齐次泊松假设,仿真分析虽多但仿真框架并不统一,如终端规模、流量类型等;多研究随机接入过程的吞吐量、冲突概率和时延指标,较少关注随机接入过程的能耗水平和QoS保障能力。因此研究“融入MTC流量特性并综合考虑随机接入过程性能指标、MTC终端能耗水平、MTC业务QoS需求的接入控制机制”仍将是未来几年MTC领域研究的热点和难点。

6 完善机器类通信流量分析理论的必要性

新业务和新应用的引入必然冲击现有流量分析理论。正如承载多媒体业务的互联网兴起时冲击承载语音业务的电路交换网的流量分析理论一样,面向MTC业务的流量分析理论也将对现有流量分析理论提出巨大挑战。图1为ITU-T WP3/2提出的完善新业务流量分析理论的工作流程,共包含4个基本要素,分别是:业务特性、服务质量要求、资源分配与流量控制、性能监测与评估。流量分析理论的基本任务可概述为根据业务特性及服务质量要求设计合理的资源分配与流量控制策略,性能监测与评估则用

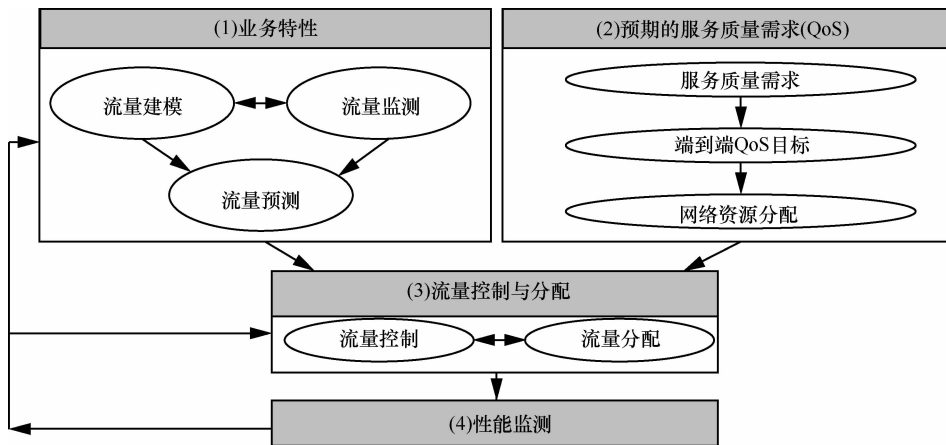


图1 完善新业务流量分析理论的工作流程(ITU-T WP3/2)

来验证上述策略的有效性^[31]。为完善面向 MTC 的流量分析理论,本文将分析“MTC 业务特征分析、流量建模、接入控制”3 个方面亟待解决的核心问题,以期为承载网络的性能评估和优化设计提供解决思路。

6.1 特征分析及其统计描述

无论是队列模型、具有 QoS 保障的界模型,还是后续接入控制机制的改进,都需要业务到达过程的统计特性作为建模输入。因此完善 MTC 流量分析理论的第一步是给出 MTC 业务到达过程的统计描述。若将业务到达过程抽象为点过程,重点关注的统计特性包含累计业务到达数和到达时间间隔的均值、概率密度函数及概率生成函数。海量 MTC 终端同步入网意味着短时间内大量 MTC 终端向网络同时发起会话请求。这类现象产生的原因往往是大量 MTC 终端正在进行相关事件检测,如电表数据周期性上传、地震火灾等突发事件告警、交通拥塞时路况与安全驾驶信息交互等。值得一提的是,2015 年春节联欢晚会微信红包“摇一摇”属于本文目标应用场景的第一个实际案例。MTC 现有流量模型多为队列模型且局限于齐次或复合泊松过程的理论范畴。这类模型蕴含到达过程服从泊松过程(多个独立点过程叠加)或状态驻留时间服从负指数分布(半无穷区间的概率分布)的假设,难以描述海量 MTC 终端短时间内(有限区间内的概率分布)同步入网时(多个相关性点过程叠加)的瞬时突发特性。目前半无限支撑区间内多个独立点过程叠加和聚合效应的研究较为成熟^[34, 38],而有限支撑区间内非独立点过程聚合效应的研究却几乎为空白。为适应新兴物联网、未来泛在网、MTC 的发展需求和业务特征,需要推广基于齐次或复合泊松过程的流量分析理论,突破海量 MTC 同步入网时其瞬时突发性的统计

描述方法,导出 MTC 业务到达过程累计业务到达数和到达时间间隔的概率密度函数和概率生成函数,以便为流量建模和过载控制提供基本组件。

6.2 流量建模

一旦得到海量 MTC 终端同步入网的统计描述方法,结合排队论、马尔科夫更新过程和网络演算理论,就可建立 MTC 专属的队列模型和具有 QoS 保障的界模型。

(1) 队列模型

队列模型按照建模方法可分为以下两类^[40]:第一类为聚合流量模型(aggregated traffic modeling),直接考虑所有 MTC 终端数据流的聚合效应。此处的聚合指不同 MTC 终端同类业务的聚合,而非不同 MTC 终端不同业务的聚合。前期研究表明,MTC 业务到达时间间隔的概率密度函数不再是负指数分布,因此需要引入 G/M/1 或 G/M/1/K 等更为通用的队列模型来建立 MTC 专属的聚合流量模型。第二类为源流量模型(source traffic modeling),先为单个 MTC 终端建立独立的队列模型,再考虑其聚合效应。MTC 现有源流量模型多按单个 MTC 终端数据传输状态进行行为建模,较少关注不同 MTC 队列间聚合效应的分析;各独立队列多采用状态驻留时间服从负指数分布的复合泊松过程。这类模型的标准解法是 Q 矩阵法,本质上是基于查普曼-柯尔莫哥洛夫公式(chapman kolmogorov equation)的稳态分析方法^[32]。3GPP 和笔者的前期研究均表明,各状态驻留时间不宜采用负指数分布。MTC 的瞬时突发性也质疑基于 Q 矩阵的稳态分析方法,因为在如此短暂的入网时间范围内,系统是否进入稳态仍需深入研究后才能定夺。因此本文建议为 MTC 引入状态转移概率和驻留时间可灵活调整的马尔科夫更新过程(MRP)并重点关注其瞬态分析;当研

究不同 MTC 终端队列模型的聚合效应时,还应考虑因 MTC 终端执行相关事件监测带来的业务流之间相关性。

(2)具有 QoS 保障的界模型

为 MTC 和 H2H 提供差异化的 QoS 服务(diff-serv)是有限资源下网络优化的必然出路。关于 QoS 保障的研究一般采用网络演算理论(network calculus),即根据业务到达过程和服务过程的统计特性,建立相应的确定性 QoS 保障(deterministic performance guarantee)模型和统计 QoS 保障(stochastic performance guarantee)模型^[33,34]。目前 MTC 专属的 QoS 保障模型几乎仍为空白,面临的主要难点是 MTC 业务到达过程统计特性的有效描述,即业务到达曲线的确定。因此结合网络演算理论建立 MTC 专属的具有 QoS 保障的界模型,给出 H2H 业务和 MTC 业务共存时的差异化 QoS 保障机制是 MTC 领域未来需要突破的重点研究方向。

6.3 接入控制

海量 MTC 终端同步入网时,其瞬时突发性将造成承载网络严重的流量过载或网络拥塞,其中以资源稀少的接入网及控制平面最为突出。3GPP 主流标准(如 LTE/LTE-Advanced 等)的随机接入过程采用的是多信道 S-ALOHA 协议或其改进型。因此可将海量 MTC 入网时 LTE 网络的过载控制等效为“海量 MTC 终端同步入网时多信道 S-ALOHA 协议的稳定性分析、稳定化设计和高效设计”。

(1)多信道 S-ALOHA 协议的稳定性分析及改进

竞争类随机接入协议工作原理简单、工程可实现性强,往往在轻载传输负荷条件下运行良好;随着传输负荷增大,性能逐步下降,碰撞次数不断增多;当传输负荷很重时,可能随着信道利用率下降变得不稳定,这就可能造成分组传输时延呈指数形式增长以及网络服务崩溃,即使能够成功交付分组,也只能成功交付少数几个分组。现有竞争类随机接入协议多参照 H2H 业务特性设计,业务到达过程多假设为齐次泊松过程或贝努利过程,仅当承载多媒体业务时才引入复合泊松过程,网络负载往往仅考虑轻度或中度负载的情况^[34, 96]。当海量 MTC 终端同步入网时,齐次或复合泊松过程已不再适用,网络负载也远大于 H2H 应用场景(即系统必须超负荷运行),基于 H2H 业务特性的稳定性分析方法难以直接应用。为保障 3GPP 移动蜂窝网络可有效地承载 MTC 业务,必须完成海量 MTC 终端同步入网时多信道 S-ALOHA 协议的稳定性分析及设计。

(2)多信道 S-ALOHA 协议的高能效设计

低成本与低功耗是 MTC 推广应用以及 MTC 终端可长期部署的必备属性。3GPP 从简化物理层设计的角度出发,提出降低最大传输带宽、单射频链路、降低峰值速率、降低发射功率、半双工、减少工作模式、非连续接收等解决思路^[4],但没有提出针对随机接入过程的高能效设计方案。MTC 接入控制的文献也多关注随机接入过程的接入时延、吞吐量、接入成功概率等性能指标,较少关注随机接入过程的能耗水平,相关研究还有待进一步完善。以 LTE/LTE-Advanced 为例,其随机接入过程包含一个简单的线性功率攀升(power ramping)机制,即系统为每次重传增加固定偏移量的发射功率^[94, 97]。当海量 MTC 同步入网时,因随机接入冲突带来的重传次数将远大于网络轻载时的重传次数,使 MTC 终端的发射功率快速到达最大值,这与 MTC 终端低功耗需求相违背。更进一步说,现有功率控制机制大多仅与链路状态有关(如 SNR、重传次数等),没有融入 H2H 与 MTC 的差异化 QoS 需求。为平衡随机接入过程的主要性能指标、MTC 业务 QoS 需求和 MTC 终端能耗水平之间的不同需要,有必要研究海量 MTC 终端同步入网时多信道 S-ALOHA 协议的高能效设计。

7 结束语

机器类通信正在快速成为改变移动通信市场的生力军,在安全监测、货物跟踪、智能支付、医疗保健、远程监控、智能测量、消费电子等重要行业拥有广阔的市场前景,是物联网的重要组成部分。然而承载如此大规模的 MTC 业务将给参照 H2H 业务特性设计的移动蜂窝网带来巨大挑战。为保障物联网与 MTC 业务的快速推广和普及,有必要给出海量 MTC 终端同步入网时承载网络的性能评估办法及现有接入控制机制的优化策略,即必须完善 MTC 的流量分析理论。参照 ITU-T WP3/2 完善新业务流量分析理论的工作流程,根据 MTC 业务特性及服务质量要求设计合理的资源分配与流量控制策略是未来几年 MTC 领域研究的重点和难点。本文综述了近年国内外关于海量 MTC 终端同步入网时其流量建模与接入控制的研究进展,并总结了“MTC 业务特性分析、流量建模、接入控制”3 个方面亟待解决的核心问题,相关结论可为后续研究提供参考。

参考文献

- 1 3GPP TR 22.868. Study on Facilitating Machine to Machine Communication in 3GPP Network, 2007



- 2 田野, 赵谨波. 3GPP 机器与机器通信标准化进展. <http://www.docin.com/p-363437508.html>
Tian Y, Zhao J B. 3GPP machine and machine communication standardization progress. <http://www.docin.com/p-363437508.html>
- 3 中国通信标准化协会. 移动 M2M 业务研究报告, 2009
China Communications Standards Association (CCSA). Research Report of Mobile M2M Business, 2009
- 4 3GPP TR 36.888. Study on Provision of Low Cost MTC UEs Based on LTE. 2012
- 5 3GPP TS 22.368. Service Requirements for MTC, 2012
- 6 麦肯锡研究. 展望 2025: 决定未来经济的 12 大颠覆技术. <http://www.tiaozhanbei.net/article/14903/2015>
The McKinsey Study. Outlook 2025: 12 reverse technologies that decide the future of economy. <http://www.tiaozhanbei.net/article/14903/2015>
- 7 中国政府工作报告. 互联网+行动计划分析: 产业互联网的机遇和痛点. <http://www.chinabgao.com/freereport/65210.html>, 2015
Chinese Government's Annual Work Report. Analysis of internet and action plan: the opportunity and pain points of internet industry. <http://www.chinabgao.com/freereport/65210.html>, 2015
- 8 Chen Y, Yang Y L. Cellular based machine to machine communication with un-peer2peer protocol stack. Proceedings of the IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall, Anchorage, USA, 2009: 1~5
- 9 Lien S Y, Chen K C, Lin Y. Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(4): 66~74
- 10 Taleb T, Kunz A. Machine type communications in 3GPP networks potential, challenges, and solutions. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 178~184
- 11 Laya A, Alonse L, Alonso-Zarate J. Is the random access channel of LTE and LTE-A suitable for M2M communications: a survey of alternatives. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 4~16
- 12 Tauhidul Islam M, Taha A E M, Akl S. A survey of access management techniques in machine type communications. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 74~81
- 13 王保云. 物联网技术研究综述. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 1~7
Wang B Y. Review on internet of things. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(12): 1~7
- 14 International Telecommunication Union (ITU). ITU Internet Reports 2005: the Internet of Things, 2005
- 15 IBM. 智慧地球. <http://www.ibm.com>, 2015
IBM. Smart planet. <http://www.ibm.com>, 2015
- 16 Commission of the EUROPEAN Communities. COM(2009) 278 final. Internet of Things-An Action Plan for Europe, 2009
- 17 中国智慧城市网. 智慧日本: I-Japan 战略, <http://www.cnsen.com.cn/news/show-htm-itemid-1041.html>, 2013
China Smart City Network. Intelligence Japan: I-Japan strategy, <http://www.cnsen.com.cn/news/show-htm-itemid-1041.html>, 2013
- 18 One M2M. Standards for M2M and the Internet of Things. <http://www.onem2m.org/>, 2014
- 19 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006~2020 年). <http://scitech.people.com.cn/GB/1056/4091541.html>, 2006
State Council of the People's Republic of China. National Medium and Long-term Science and Technology Development Plan Outline (2006-2020). <http://scitech.people.com.cn/GB/1056/4091541.html>, 2006
- 20 感知物联网集团. 总理的“感知中国”情缘. <http://www.sensingnet.net/>
Sensing IoT Group. The prime minister's "experience China" affair. <http://www.sensingnet.net/>
- 21 中华人民共和国科技部. 关于组织“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项 2011-2014 年度课题申报的通知. <http://www.most.gov.cn/tztg/>
Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China. Notice of Organizing "New Generation Broadband Wireless Mobile Communication Network" National Science Major Projects Application of 2011-2014. <http://www.most.gov.cn/tztg/>
- 22 ETSI TR 102 691. Machine-to-Machine Communications(M2M): Smart Metering Use Cases, 2010
- 23 ETSI TS 102 689. Machine-to-Machine Communications(M2M): M2M Service Requirements, 2010
- 24 ETSI TS 102 690. Machine-to-Machine Communications(M2M): Functional Architecture, 2010
- 25 IEEE. IEEE 802.16's Machine-to-Machine (M2M) Task Group. <http://wirelessman.org/m2m/index.html>, 2011
- 26 3GPP TR 22.888. Study on Enhancements for Machine-Type Communications, 2012
- 27 3GPP TR 23.888. System Improvements for Machine-Type Communications, 2012
- 28 3GPP TR 37.868. Study on RAN Improvements for MTC, 2012
- 29 Shafiq M Z, Ji L, Liu A X, *et al.* A first look at cellular machine-to-machine traffic: large scale measurement and characterization. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2012, 40(1): 65~76
- 30 简鑫, 曾孝平, 贾云健等. 机器类通信流量建模与过载控制. 通信学报, 2013, 34(9): 123~131
Jian X, Zeng X P, Jia Y J, *et al.* Traffic modeling for machine type communication and its overload control. Journal of Communications, 2013, 34(9): 123~131

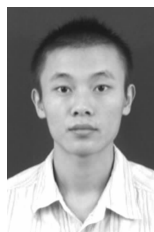
- 31 Iversen V B. ITU-D SG, Teletraffic Engineering Handbook, 2005
- 32 Ibe O. Markov Processes for Stochastic Modeling. New York: Academic Press, 2008
- 33 Chang C S. Performance Guarantees in Communication Networks. New York: Springer, 2000
- 34 Kumar A, Manjunath D, Kuri J. Communication Networking: An Analytical Approach. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2004
- 35 Arfeen M A, Pawlikowski K, Willig A, *et al.* Internet traffic modelling: from superposition to scaling. IET Networks, 2014, 3(1): 30~40
- 36 Yaron O, Sidi M. Performance and stability of communication networks via robust exponential bounds. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(3): 372~385
- 37 Starobinski D, Sidi M. Stochastically bounded burstiness for communication networks. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(1): 206~212
- 38 Daley D J, Vere-Jones D. An Introduction to the Theory of Point Processes. New York: Springer, 1988
- 39 Cheng R G, Wei C H, Tsao S L, *et al.* RACH collision probability for machine type communications. Proceedings of the IEEE 75th Vehicular Technology Conference, Yokohama, Japan, 2012: 1~5
- 40 Wu H, Zhu C, La R J, *et al.* FASA: accelerated S-ALOHA using access history for event-driven M2M communications. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(6): 1904~1917
- 41 Osti P, Lassila P, Aalto S, *et al.* Analysis of PDCCH performance for M2M traffic in LTE. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 6(9): 4357~4371
- 42 Wei C H, Cheng R G, Tsao S L. Performance analysis of group paging for machine-type communications in LTE networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7): 3371~3382
- 43 Niyato D, Wang P, Kim D. Performance modeling and analysis of heterogeneous machine type communications. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2836~2849
- 44 Nikaein N, Laner M, Zhou K J, *et al.* Simple traffic modeling framework for machine type communication. Proceedings of the 10th International Symposium on Wireless Communication Systems, Ilmenau, Germany, 2013: 783~787
- 45 王雅辉. IEEE 802.11 WLAN 中 M2M 业务服务质量的研究 (硕士学位论文). 吉林大学, 2011
Wang Y H. Research on the quality of service of M2M in IEEE 802.11 WLAN (master dissertation). Jilin University, 2011
- 46 孙珍奇. 海量 M2M 业务背景下 LTE 上行调度研究 (硕士学位论文). 吉林大学, 2012
Sun Z Q. Research on the LTE uplink scheduling with mass M2M service (master dissertation). Jilin University, 2012
- 47 吴迪. 基于串联排队网络理论的异质业务端到端网络性能分析模型的研究 (硕士学位论文). 吉林大学, 2013
Wu D. Research on end to end network analytical model with heterogeneous services arrival based on tandem queueing network theory (master dissertation). Jilin University, 2013
- 48 Paiva R C D, Vieira R D, Saily M. Random access capacity evaluation with synchronized MTC users over wireless networks. Proceedings of the IEEE 73rd Vehicular Technology Conference, Yokohama, Japan, 2011: 1~5
- 49 Laner M, Svoboda P, Nikaein N, *et al.* Traffic models for machine type communications. Proceedings of the 10th International Symposium on Wireless Communication Systems, Ilmenau, Germany, 2013: 651~655
- 50 简鑫. 机器类通信的队列模型与过载控制研究 (博士学位论文). 重庆大学, 2014
Jian X. Queue models and overload control for machine type communications (doctor dissertation). Chongqing University, 2014
- 51 3GPP R2-100182. Access Control of MTC Devices, 2010
- 52 3GPP R2-104662. MTC Simulation Results with Specific Solutions, 2010
- 53 Chou C M, Huang C Y, Chiu C Y. Loading prediction and barring controls for machine type communication. Proceedings of IEEE 2013 International Conference on Communications, Budapest, Hungary, 2013: 5168~5172
- 54 Cheng J P, Lee C H, Lin T M. Prioritized random access with dynamic access barring for RAN overload in 3GPP LTE-A networks. Proceedings of 2011 IEEE GLOBECOM Workshops, Houston, TX, USA, 2011: 368~372
- 55 Amokrane A, Ksentini A, Hadjadj-Aoul Y, *et al.* Congestion control for machine type communications. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications, Ottawa, Canada, 2012: 778~782
- 56 Duan S Y, Shah-Mansouri V, Wong V W S. Dynamic access class barring for M2M communications in LTE networks. Proceedings of 2013 IEEE Global Communications Conference, Atlanta, GA, USA, 2013: 4747~4752
- 57 周伟. 机器类型通信中随机接入信道的拥塞控制研究 (硕士学位论文). 中国科学技术大学, 2014
Zhou W. Research on congestion control of random access channel in machine type communications (master dissertation). University of Science and Technology of China, 2014
- 58 Wang G, Zhong X F, Mei S L, *et al.* An adaptive medium access control mechanism for cellular based machine to machine (M2M) communication. Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, Honolulu, HI, USA, 2010: 1~4



- 59 Lien S Y, Liao T H, Kao C Y, *et al.* Cooperative access class barring for machine-to-machine communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(1): 27~32
- 60 黄铤, 田辉, 张杰等. 异构环境下基于 3GPP 的 M2M 业务分流算法. *中国通信*, 2013, 10(9): 65~71
- Huang Y, Tian H, Zhang J, *et al.* Rate allocation scheme for machine-to-machine service based on 3GPP in heterogeneous wireless networks. *China Communications*, 2013, 10(9): 65~71
- 61 李晓辉, 张妙, 李丹等. 具有 QoS 保障的多小区 M2M 负荷均衡算法. *北京邮电大学学报*, 2014, 37(4): 108~112
- Li X H, Zhang M, Li D, *et al.* A multicell load balancing algorithm for machine to machine communications under QoS guarantee. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2014, 37(4): 108~112
- 62 Lee K D, Kim S, Yi B. Throughput comparison of random access methods for M2M service over LTE networks. *Proceedings of Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Houston, TX, USA, 2011: 373~377
- 63 Pang Y, Chao S, Lin G, *et al.* Network access for M2M/H2H hybrid systems: a game theoretic approach. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(5): 869 ~ 872
- 64 Pourmoghadass A, Poonacha P G. Performance analysis of a machine-to-machine friendly MAC algorithm in LTE-Advanced. *Proceedings of International Conference on Advances in Computing Communications and Informatics (ICACCI)*, New Delhi, India, 2014: 99~105
- 65 刘涛. LTE 网络中 M2M 业务随机接入拥塞避免研究 (硕士学位论文). 西安电子科技大学, 2013
- Liu T. Research on congestion avoidance for random access in M2M of LTE system (master dissertation). Xidian University, 2013
- 66 Shin S Y, Triwicaksono D. Radio resource control scheme for machine-to-machine communication in LTE infrastructure. *Proceedings of International Conference on ICT Convergence*, Jeju Island, Korea, 2012:1~6
- 67 Paiva R C D, Wilhelm H, Saily M, *et al.* Overload control method for synchronized MTC traffic in GERAN. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, San Francisco, CA, USA, 2011: 1~5
- 68 Lo A, Law Y W, Jacobsson M, *et al.* Enhanced LTE-advanced random-access mechanism for massive machine-to-machine (M2M) communications. *Proceedings of the 27th Meeting of World Wireless Research Forum*, Düsseldorf, Germany, 2011: 580~586
- 69 Liu Y, Yuen C, Chen J, *et al.* A scalable hybrid MAC protocol for massive M2M networks. *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Shanghai, China, 2013: 250~255
- 70 3GPP R2-111916. Back-off Enhancements for RAN Overload Control, 2011
- 71 Jiang W, Wang X, Deng T. Performance analysis of a pre-backoff based random access scheme for machine-type communications. *Proceedings of International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid*, Taipei, China, 2014: 1~4
- 72 Ko K S, Kim M J, Bae K Y, *et al.* A novel random access for fixed-location machine-to-machine communications in OFDMA based systems. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16 (9): 1428~1431
- 73 Wang Z, Wong V W S. Joint access class barring and timing advance model for machine-type communications. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, Sydney, NSW, Australia, 2014: 2357~2362
- 74 3GPP R2-104870. Pull Based RAN Overload Control, 2010
- 75 Larmo A, Susitaival R. RAN overload control for machine type communications in LTE. *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Anaheim, CA, USA, 2012: 1626~1631
- 76 3GPP R2-104004. Group Paging for MTC Devices, 2010
- 77 Chen Y, Wang W. Machine-to-machine communication in LTE-A. *Proceedings of the IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, Ottawa, ON, Canada, 2010: 1~4
- 78 Zou W, Li Z, Wang H. Small data transmission at the detached machine-type-communication device. *Proceedings of the IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sydney, NSW, Australia, 2012: 13~17
- 79 Pratas N K, Thomsen H, Stefanovic C, *et al.* Code-expanded random access for machine-type communications. *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Anaheim, CA, USA, 2012: 1681~1686
- 80 Sheu S T, Chiu C H, Cheng Y C, *et al.* Self-adaptive persistent contention scheme for scheduling based machine type communications in LTE system. *Proceedings of International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (iCOST)*, Avignon, France, 2012: 77~82
- 81 Madueno G C, Stefanovic C, Popovski P. Reliable reporting for massive M2M communications with periodic resource pooling. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(4): 429~432
- 82 康桂华, 齐柏, 黄铜娟等. 基于 LTE 系统 M2M 业务传输的资源调度研究. *云南民族大学学报 (自然科学版)*, 2013, 22(5): 360~363
- Kang G H, Qi B, Huang T J, *et al.* Study on the resource scheduling in LTE system with M2M service transmission. *Journal of Yunnan Nationalities University (Nature Science Edition)*, 2013, 22(5): 360~363

- 83 Aijaz A, Tshangini M, Nakhai M, *et al.* Energy efficient uplink resource allocation in LTE networks with M2M/H2H co-existence under statistical QoS guarantees. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(7): 2353~2365
- 84 Bayat S, Li Y, Han Z, *et al.* Distributed massive wireless access for cellular machine-to-machine communication. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, NSW, Australia, 2014: 2767~2772
- 85 简鑫, 曾孝平, 张力等. 机器类通信业务建模与流量分析. *北京邮电大学学报*, 2013, 36(3): 74~78
Jian X, Zeng X P, Zhang L, *et al.* Service modeling and traffic analysis for machine type communications. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2013, 36(3): 74~78
- 86 Andreev S, Galinina O, Koucheryavy Y. Energy-efficient client relay scheme for machine-to-machine communication. *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Houston, TX, USA, 2011: 1~5
- 87 Ho C Y, Huang C Y. Energy-saving massive access control and resource allocation schemes for M2M communications in OFDMA cellular networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(3): 209~212
- 88 Lien S Y, Chen K C. Massive access management for QoS guarantees in 3GPP machine-to-machine communications. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(3): 311~313
- 89 Gotsis A G, Lioumpas A S, Alexiou A. M2M scheduling over LTE: challenges and new perspectives. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2012, 7(3): 34~39
- 90 Gerasimenko M, Petrov V, Galinina O, *et al.* Energy and delay analysis of LTE-Advanced RACH performance under MTC overload. *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Anaheim, CA, USA, 2012: 1632~1637
- 91 Gerasimenko M, Petrov V, Galinina O, *et al.* Impact of MTC on energy and delay performance of random-access channel in LTE-Advanced. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2013, 24(4): 366~377
- 92 Andreev S, Larmo A, Gerasimenko M, *et al.* Efficient small data access for machine-type communications in LTE. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Budapest, Hungary, 2013: 3569~3574
- 93 Fu H L, Chen H C, Lin P, *et al.* Energy-efficient reporting mechanisms for multi-type real-time monitoring in machine-to-machine communications networks. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, USA, 2012: 136~144
- 94 Tian H, Xu L L, Pei Y S, *et al.* Power ramping schemes for M2M and H2H co-existing scenario. *China Communications*, 2013, 10(3): 100~113
- 95 Tirronen T, Larmo A, Sachs J, *et al.* Reducing energy consumption of LTE devices for machine-to-machine communication. *Proceedings of IEEE Globecom Workshops*, Anaheim, USA, 2012: 1650~1656
- 96 Rom R, Sidi M. *Multiple Access Protocols: Performance and Analysis*. New York: Springer, 1990
- 97 Khan F. *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009

[作者简介]



简鑫,男,博士,重庆大学通信工程学院讲师,主要研究方向为统计数学、无线通信理论与技术、流量分析理论等。



曾孝平,男,博士,重庆大学通信工程学院院长、教授、博士生导师,主要研究方向为空天地一体化、下一代移动通信、生物信号处理等。