

# 基于随机网络演算的 LTE 网络端到端时延分析

陈 昕<sup>1)</sup> 张 磊<sup>2)</sup> 向旭东<sup>3)</sup> 万剑雄<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(北京信息科技大学信息管理学院 北京 100101)

<sup>2)</sup>(北京信息科技大学计算机学院 北京 100101)

<sup>3)</sup>(北京科技大学计算机与通信工程学院 北京 100083)

**摘 要** 长期演进计划 LTE(Long Term Evolution)由第三代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project,3GPP)提出,是下一代高速无线网络通信的重要标准.LTE 网络中的数据传输性能评价是学术界与工业界重要问题.但是,无线信道的时变性使得 LTE 网络中性能评价的复杂度大大增加.文中利用随机网络演算对 LTE 网络中不同数据流的到达和服务进行建模,建立了对 LTE 网络进行数据传输时端到端(End-to-End,E2E)时延分析的框架,并通过数值分析验证了所建立框架的有效性.

**关键词** 随机网络演算;长期演进计划;服务质量;性能评价;LTE

**中图法分类号** TP393 **DOI 号**: 10.3724/SP.J.1016.2012.00046

## A Stochastic Network Calculus Approach for the End-to-End Delay Analysis of LTE Networks

CHEN Xin<sup>1)</sup> ZHANG Lei<sup>2)</sup> XIANG Xu-Dong<sup>3)</sup> WAN Jian-Xiong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Information Management, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101)

<sup>2)</sup>(School of Computer, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101)

<sup>3)</sup>(School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract** Long Term Evolution (LTE), which was proposed by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP), is an important standard in future wireless network communication. However, the time-varying characteristic of wireless channel capacity in LTE networks poses big challenges in performance analysis. In this paper, we construct a framework of analyzing stochastic End-to-End (E2E) delay of the LTE network by modeling the arrival model and service model using Stochastic Network Calculus (SNC). Numerical analyses are conducted to prove the effectiveness of the framework.

**Keywords** stochastic network calculus; long term evolution; quality of service; performance evaluation; LTE

## 1 引 言

近年来,各种新应用(比如移动电视、多媒体在

线游戏和 Web 2.0 等)和无线网络服务的快速发展,使得用户对无线网络中各种实时应用的需求日益增长.因此,第三代合作伙伴计划组(The 3rd Generation Partnership Project,3GPP)在 2004 年底

收稿日期:2011-08-26;最终修改稿收到日期:2011-11-04.本课题得到国家自然科学基金面上项目(60973107)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2011CB311809)、北京市教委科技发展计划面上项目(KM200910772016)及科研水平提高项目(5028123601)资助.

陈 昕,男,1965 年生,教授,中国计算机学会(CCF)高级会员,主要研究领域为计算机网络及其性能评价、网络安全、航电网络. E-mail: chenxin@mail. tsinghua. edu. cn. 张 磊,女,1986 年生,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络及其性能评价. 向旭东,男,1986 年生,博士研究生,主要研究方向为网络性能评价. 万剑雄,男,1982 年生,博士研究生,主要研究方向为最优控制与航电网络.

经过认真讨论制定了长期演进计划 LTE(Long Term Evolution). LTE 的无线接入网称为演进的通用无线通信系统地面无线接入网(Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN), LTE 主要致力于无线接入网的演进,其目的是满足未来无线宽带服务,为用户提供高速率、低时延的数据传输服务,和更好的用户体验.

LTE 项目是第三代移动通信技术(3G, 3rd-Generation)的演进,改进了 3G 的空中接口技术,其关键技术包括:采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)和多输入多输出(Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO). LTE 以期基于 IP 的实时数据流提供端到端(End-to-End, E2E)的服务质量(Quality of Service, QoS)<sup>[1]</sup>. 语音通信作为一种实时业务将主要通过网络电话(Voice over IP, VoIP)来实现,可以更好地与其它多媒体业务结合.

MIMO 技术通过高频谱利用率和链路可靠性提供高数据吞吐量和链路范围,在现代无线通信中得到广泛应用,比如 IEEE 802.11n、LTE 和 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)等. MIMO 可以工作在以下几种模式:

(1)空间复用模式,即通过在多个天线上并行发送多个数据流获得复用增益来提高峰值速率和小区吞吐量;

(2)空间分集模式,即通过在多个天线上重复发送一个数据流的不同版本来获得分集增益来改善小区的覆盖;

(3)空分多址模式,即多个并行数据流用于多个用户来提高系统用户容量;

(4)波束赋形模式:利用空间信道的强相关性,利用波的干涉原理产生强方向性的方向图,从而提高信噪比,增加系统容量或覆盖范围. 本文假设 MIMO 工作在空间复用模式.

本文在分析研究随机网络演算<sup>[2-3]</sup>的基础上,结合 LTE 网络数据流的特点,通过采用合适的到达模型和服务模型,建立对 LTE 网络进行数据传输时性能分析的框架,并利用该框架分析 LTE 网络中贯穿数据流的随机 E2E 时延. 随机网络演算作为尚在演进的一种网络分析工具,可以分析计算机网络的随机服务保证,并且得到了广泛的应用<sup>[4-8]</sup>.

本文第 2 节简要介绍 MIMO 技术和随机网络演算;第 3 节运用随机网络演算建立到达模型和服

务模型并分析数据流的 E2E 时延;第 4 节通过数值分析贯穿数据流的 E2E 时延,验证所建立模型的有效性;最后一节总结全文.

## 2 理论基础

### 2.1 随机网络演算

随机网络演算<sup>[3]</sup>作为尚在演进的一种网络分析工具,是分析网络系统随机服务保证的理论,该理论的 2 个核心概念是随机到达曲线(Stochastic Arrive Curve, SAC)和随机服务曲线(Stochastic Service Curve, SSC). 前者刻画达到数据流特征,后者则刻画对数据流的服务特征.

在本文中,假设所有的到达曲线和服务曲线是非负广义递增函数,所有的界限函数都是非负广义递减函数. 记  $A(t)$ 、 $A^*(t)$  和  $S(t)$  分别为到达过程、离开过程和服务过程,分别表示系统在时间间隔  $(0, t]$  内的累积到达、输出和服务量,并且假设  $A(0) = A^*(0) = S(0) = 0$ .

SAC 和 SSC 的定义如下.

**定义 1.** 如果对所有的  $0 \leq s \leq t, x \geq 0$ , 均有

$$P\{\sup_{0 \leq s \leq t} A(s, t) - \alpha(t-s) > x\} \leq f(x) \quad (1)$$

成立,则称数据流  $A$  具有界限函数为  $f$  的 v.b.c. 随机到达曲线  $\alpha$ , 记为  $A \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ .

**定义 2.** 如果对所有  $t, x \geq 0$ , 均有

$$P\{A \otimes \beta(t) - A^*(s) > x\} \leq g(x) \quad (2)$$

成立,则称系统  $S$  为数据流  $A$  提供界限函数为  $g$  的弱随机服务曲线  $\beta$ , 记为  $S \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$ .

本文主要关注的 QoS 度量是时延. 下面是具有 v.b.c. 到达曲线的数据流通过提供弱 SSC 的系统所具有的性质.

**定义 3.** 系统  $S$  在时刻  $t$  的时延定义为

$$D(t) = \inf\{d \geq 0; A(t) \leq A^*(t+d)\} \quad (3)$$

**定理 1.** 如果系统  $S$  的输入数据流  $A$  具有 v.b.c. 随机到达曲线  $A \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ , 且系统  $S$  为输入数据流  $A$  提供弱随机服务曲线  $S \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$ , 则对所有  $t, x \geq 0$ , 系统的随机延迟上界为

$$P\{D(t) > h(\alpha+x, \beta)\} \leq f \otimes g(x) \quad (4)$$

其中,  $h(\alpha(t), \beta(t))$  表示  $\alpha(t)$  和  $\beta(t)$  之间的最大水平距离, 定义为

$$h(\alpha, \beta) \equiv \sup_{s \geq 0} \{\inf\{d \geq 0; \alpha(s) \leq \beta(s+d)\}\} \quad (5)$$

**定理 2.** 如果系统  $S$  的输入数据流  $A$  具有 v.b.c.

随机到达曲线,即  $A \sim_{\text{vb}} \langle f, \alpha \rangle$ , 系统  $S$  为输入数据流  $A$  提供弱随机服务曲线, 即  $S \sim_{\text{ws}} \langle g, \beta \rangle$ , 则对所有  $\theta > 0$ ,  $A^*$  具有 v.b.c. 随机到达曲线  $A^* \sim_{\text{vb}} \langle f \otimes g^\theta, \alpha_\theta \otimes \beta_{-\theta} \rangle$ , 其中  $\alpha_\theta(t) = \alpha(t) + \theta \cdot t$ ,  $\beta_{-\theta} = \beta(t) - \theta \cdot t$ ,  $g^\theta(x) = g(x) + \frac{1}{\theta} \int_x^\infty g(y) dy$ .

**定理 3.** 如果一条数据流经过由  $N$  个系统串联而成的网络, 且系统  $n (n=1, 2, \dots, N)$  为其输入数据流提供随机服务曲线  $S^n \sim_{\text{ws}} \langle g^n, \beta^n \rangle$ , 那么整个网络为该数据流提供随机服务曲线  $S \sim_{\text{ws}} \langle g, \beta \rangle$ . 其中对任意  $\theta, \theta_1, \dots, \theta_N > 0$

$$\beta(t) = \beta^1 \otimes \beta^2_{-\theta} \otimes \dots \otimes \beta^N_{-(N-1)\theta}(t),$$

$$g(x) = g^{1, \theta_1} \otimes g^{2, \theta_2} \otimes \dots \otimes g^{N, \theta_N}(x),$$

其中

$$\beta^N_{-(n-1)\theta}(t) = \beta^n(t) - (n-1)\theta t, \quad n=1, \dots, N,$$

$$g^{n, \theta_n}(x) = g^n(x) + \frac{1}{\theta_n} \int_x^\infty g^n(y) dy, \quad n=1, \dots, N-1,$$

$$g^{N, \theta_N}(x) = g^N(x).$$

**定理 4.** 如果系统  $S$  的输入数据流  $A$  是由数据流  $A_1$  和  $A_2$  组成的聚合流, 且数据流  $A_2$  具有 v.b.c. 随机到达曲线  $A \sim_{\text{vb}} \langle f, \alpha \rangle$ , 系统  $S$  为数据流  $A$  提供服务曲线  $\beta$ , 则系统  $S$  为数据流  $A_1$  提供弱随机服务曲线  $S_1 \sim_{\text{ws}} \langle f_2, \beta - \alpha_2 \rangle$ .

**定理 5.** 考虑  $N$  条具有到达过程  $A_i(t) (i=1, 2, \dots, N)$  的数据流及其组成的聚合流  $A(t)$ . 若  $\forall i$ ,  $A_i \sim_{\text{vb}} \langle f_i, \alpha_i \rangle$ , 则  $A \sim_{\text{vb}} \langle f, \alpha \rangle$ , 其中  $\alpha(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t)$ ,  $f(x) = f_1 \otimes \dots \otimes f_N(x)$ .

**定理 6.** 记  $Z = \sum_{i=1}^n X_i$  为  $n$  个随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$  之和, 无论  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是否相互独立,  $Z$  的互补累积分布函数都有下式成立

$$\bar{F}_Z(z) \leq \bar{F}_{X_1} \otimes \dots \otimes \bar{F}_{X_n}(z) \quad (6)$$

**定理 7.** 如果系统采用的调度策略是优先级调度 (Strict Priority, SP), 服务器所提供的服务为  $S(t)$ ,  $i < j$  表示数据流  $i$  的优先级比  $j$  高, 并且在同一种数据流中采用先进先出 (FIFO) 的策略. 记  $A_j(t)$  为数据流  $j$  的到达过程, 则对  $j=1, \dots, n$  数据流  $j$  的服务曲线  $\beta_j$  为

$$\beta_j = \left[ S(t) - \sum_{i=1}^{j-1} A_i(t) \right]^+ \quad (7)$$

为了简化最小加卷积的计算, 引入如下引理<sup>[9]</sup>.

**引理 1.** 任何正数  $a_k, b_k, k=1, 2, \dots, K$ , 对于任意  $x \geq 0$ , 则有

$$\inf_{x_1+x_2+\dots+x_K=x} \sum_{k=1}^K a_k e^{-b_k x_k} = e^{-\frac{x}{\omega}} \prod_{k=1}^K (a_k b_k \omega)^{\frac{1}{b_k}} \quad (8)$$

$$\text{其中 } \omega = \sum_{k=1}^K \frac{1}{b_k}.$$

## 2.2 MIMO

在 LTE 中, MIMO 的空间复用模式下, 用户设备 (User Equipment, UE) 端多个接收天线和 eNodeB (evolved Node B) 端多个发送天线相结合可以提高峰值速率和小区容量. 信道矩阵的每个元素表示 MIMO 中每个天线对之间的信道增益和相位等信息, 即对于一个  $M \times N$  MIMO 系统, 对应一个有  $N \times M$  个元素的矩阵  $\mathbf{H}_{N \times M}$ .  $M \times N$  MIMO 系统的容量可以表示为<sup>[10]</sup>

$$C_{\text{MIMO}} = E \left[ \log_2 \left[ \det \left( \mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right) \right] \right] \quad (9)$$

其中:  $\mathbf{I}_N$  是  $N$  维单位向量,  $[\cdot]^*$  表示矩阵的转置,  $\rho = \frac{P}{N_0}$  是接收天线接收到的信噪比.

图 1 是一个  $2 \times 2$  MIMO 系统, 其中  $h_{ij}$  表示发送端  $j$  到接收端  $i$  的信道增益信息.

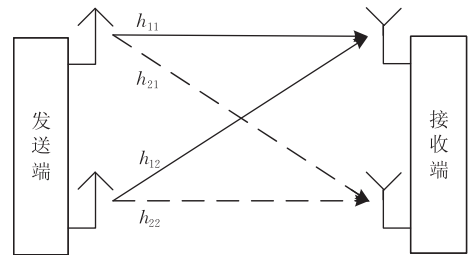


图 1  $2 \times 2$  MIMO 系统

本文利用马尔可夫链 (Markov chain) 来描述无线网络的环境信息. 假设每个空间信道是独立同分布的 Gilbert-Elliott (GE) 信道. 为了便于描述, 假设每个信道只有 2 种状态: good (g) 状态或 bad (b) 状态. 记  $S(h_{n,m})$  为信道  $(n, m)$  的状态, 则有  $S(h_{n,m}) \in \{g, b\}, \forall m, n=1, 2, \dots, M$ . 若  $S(h_{n,m}) = g$  表明天线对之间的信道状态很好; 若  $S(h_{n,m}) = b$  表示信道受到某种阻碍.

在 GE 信道中, 记  $p_{gb} (p_{bg})$  为 good (bad) 状态转换到 bad (good) 状态的概率, 则信道处于 good 状态的稳态概率为

$$k = \frac{p_{bg}}{p_{bg} + p_{gb}} \quad (10)$$

这里, 不考虑自动重传机制. 若与某一发送天线相关的信道都处于 bad 状态时, 则需要发送的数据将重定向到其它发送天线.

由于每个天线对之间的信道都是 2 个状态的

GE 信道, 则对于  $M \times N$  的 MIMO 系统来说, 马尔可夫链中将有  $2^{N \times M}$  个状态. 随着天线数目的增加, 状态个数会以指数递增. 故在本文中根据信道的状态来进行计算. 具体方法是, 对于  $N \times N$  的 MIMO 系统来说, 则分别计算有  $n(0, 1, \dots, N)$  个天线对之间的信道处于 good 状态的稳态概率  $\pi$ , 记  $R_i (i=0, 1, \dots, N \times N)$  为状态  $i$  的速率, 则信道容量为

$$C = \sum_{i=0}^{N \times N} R_i \cdot \pi_i \quad (11)$$

其中,  $R_i = \bar{C}_i$ ,  $\bar{C}_i$  是由式(9)得到的状态  $i$  的容量.

### 3 LTE 网络性能分析

本节在分析研究随机网络演算的基础上, 结合 LTE 网络数据流的特点, 通过采用合适的到达模型和服务模型, 建立对 LTE 网络进行数据传输时性能分析的框架, 并利用该框架分析 LTE 网络中贯穿数据流的随机 E2E 时延.

#### 3.1 LTE 网络拓扑

LTE 网络中的业务可划分为 2 类: 实时业务和非实时业务. 流媒体、VoIP 等实时业务, 能容忍一定量的数据丢失, 但对时延敏感; 而网页浏览和文件传输服务等非实时业务, 主要关注的是吞吐量.

在如图 2 中的 LTE 网络场景中, 其核心网络(Core Network, CN), 即系统架构演进(System Architecture Evolution, SAE)中部署有不同的服务器, 提供实时和非实时服务. 在核心网络的边缘是移动性管理实体和网关(Mobility Management Entity/Gateway, MME/GW)<sup>[11]</sup>. 图中从右至左穿过有线核心网络的数据流称为贯穿流, 而只是流经有线核心网络的数据流称为交叉流. 贯穿流和交叉流分别可能既包含实时数据流又包含非实时数据流.

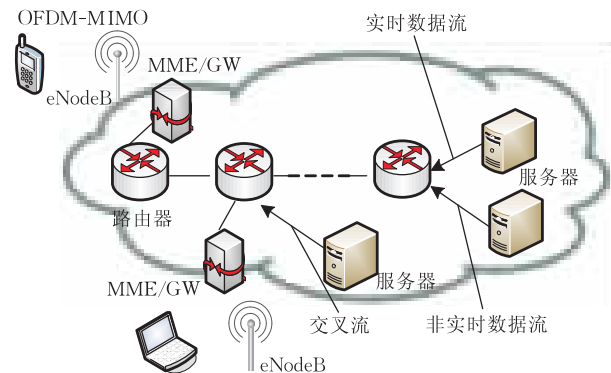


图 2 LTE-SAE 网络

本文主要分析 LTE-SAE 网络架构中贯穿流的随机 E2E 时延.

#### 3.2 流量模型

本文中, 假设数据流的到达过程  $A(t)$  是具有界限函数为  $f$ , 速率为  $\rho$  的 v.b.c. 随机到达曲线, 即  $A(t) \sim_{\text{vb}} \langle f, \rho t \rangle$ , 则对所有  $0 \leq s \leq t, x \geq 0, P\left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} A(s, t) - \rho(t-s) > x \right\} \leq f(x)$  成立.

记  $N_{1t}$  和  $N_{2t}$  分别为贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流的数目.

根据所采用的到达过程, 记  $A_{i,1t}$  为贯穿实时数据流  $i$  的到达过程, 表示为  $A_{i,1t} \sim_{\text{vb}} \langle f_{1t}^i, \rho_{1t}^i t \rangle$ , 其中  $f_{1t}^i(x) = a_i e^{-b_i x}$ .

同理, 记  $A_{j,2t}$  为贯穿非实时数据流  $j$  的到达过程, 表示为  $A_{j,2t} \sim_{\text{vb}} \langle f_{2t}^j, \rho_{2t}^j t + \sigma_{2t}^j \rangle$ , 其中  $f_{2t}^j(x) = m_j e^{-n_j x}$ .

基于上述每条贯穿实时数据流  $S_{1t}$  的到达曲线, 应用定理 5, 可得所有贯穿实时数据流聚合到达过程  $A_{1t}$ , 即  $A_{1t} \sim_{\text{vb}} \langle f_{1t}, \alpha_{1t} \rangle$ , 其中  $f_{1t} = f_{1t}^1 \otimes \dots \otimes f_{1t}^{N_{1t}}$ ,  $\alpha_{1t}(t) = \sum_{i \in S_{1t}} (\rho_{1t}^i t + \sigma_{1t}^i)$ .

同理, 所有贯穿非实时数据流  $S_{2t}$  聚合到达过程  $A_{2t}$  为  $A_{2t} \sim_{\text{vb}} \langle f_{2t}, \alpha_{2t} \rangle$ , 其中  $f_{2t} = f_{2t}^1 \otimes \dots \otimes f_{2t}^{N_{2t}}$ ,  $\alpha_{2t}(t) = \sum_{j \in S_{2t}} (\rho_{2t}^j t + \sigma_{2t}^j)$ .

#### 3.3 服务模型

在无线接入网中, 用户设备和 eNodeB 之间由 MIMO 系统提供服务, 其信道容量可根据有关的参数, 通过式(11)分析得到.

核心网络采用优先级调度, 每个路由器  $d$ , 提供的服务速率为  $R$ , 且工作保留(Work Conserving), 即只要路由器中有数据需要处理, 路由器就以速率  $R$  提供服务, 其服务模型如图 3 所示. 假设实时数据流具有优先级 1, 其优先级高于具有优先级 2 的非实时数据流. 输入队列  $q_1$  和  $q_2$  分别用于缓冲实时数据流和非实时数据流, 每个队列内部采用 FIFO 调度算法. 如果队列溢出, 则到达的分组就被丢弃, 不作任何处理.

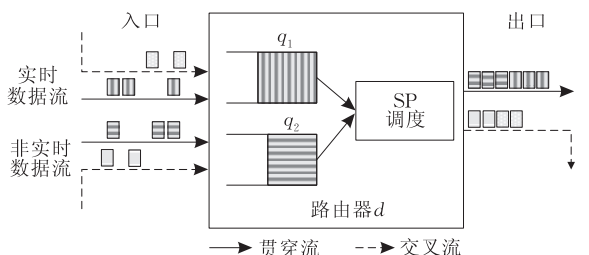


图 3 服务模型

假设每一个路由器的输入数据流之间是相互独立的. 这里假设聚合交叉实时数据流集合  $S_{1c}^d$  的到达过程是  $A_{1c}^d \sim_{vb} \langle f_c^d, \alpha_{1c}^d \rangle$ , 其中  $f_c^d = ke^{-ax}$ ,  $\alpha_{1c}^d = \sum_{i \in S_{1c}^d} \rho_{i,1c}^d t$ .

同理, 聚合交叉非实时数据流集合  $S_{2c}^d$  的到达过程是  $A_{2c}^d \sim_{vb} \langle f_c^d, \alpha_{2c}^d \rangle$ , 其中  $f_c^d = ke^{-ax}$ ,  $\alpha_{2c}^d = \sum_{j \in S_{2c}^d} \rho_{j,2c}^d t$ .

根据 SP 的特性, 每个路由器  $d$  为所有实时数据流提供的服务曲线是  $\beta_{1t}^d = Rt$ , 记  $S_{1t}^d$  为路由器  $d$  的所有输入的实时数据流, 则每个路由器为所有的非实时数据流提供的服务曲线是  $\beta_{2t}^d = (R - \sum_{i \in S_{1t}^d} \rho_{i,1}^d) t$ .

根据定理 4, 路由器  $d$  为  $S_{1t}$  提供弱随机服务曲线  $S_{1t}^d \sim \langle f_c^d, \beta_{1t}^d \rangle$ , 为  $S_{2t}$  提供弱随机服务曲线  $S_{2t}^d \sim \langle f_c^d, \beta_{2t}^d \rangle$ , 其中

$$\beta_{1t}^d = \beta_{1t}^d - \alpha_{1c}^d = (R - \sum_{i \in S_{1c}^d} \rho_{i,1c}^d) t,$$

$$\beta_{2t}^d = \beta_{2t}^d - \alpha_{2c}^d = (R - \sum_{i \in S_{1t}^d} \rho_{i,1}^d - \sum_{j \in S_{2c}^d} \rho_{j,2c}^d) t.$$

### 3.4 核心网络时延分析

为了简化 LTE-SAE 架构的时延分析, 将整个核心网络看作一个单一的黑盒子. 贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流的随机时延上界描述如下.

**命题 1.** 考虑如图 2 中的核心网络, 输入流  $S_{1t}$  和  $S_{2t}$  伴随着  $S_{1c}^d$  和  $S_{2c}^d$  穿过路由器  $d$ . 基于 v.b.c 流量模型和 SP 服务模型, 可得核心网络中  $S_{1t}$  和  $S_{2t}$  的随机时延上界为

$$P\left\{D_{1t,cn} > \frac{x}{r_{1t,\theta}}\right\} \leq f_{1t} \otimes g_{1t}(x) \quad (12)$$

$$P\left\{D_{2t,cn} > \frac{x}{r_{2t,\theta}}\right\} \leq f_{2t} \otimes g_{2t}(x) \quad (13)$$

其中  $r_{1t,\theta} = \min_{1 \leq n \leq N} \left\{ \beta_{1t}^n - \left[ \sum_{i \in S_{1c}^n} \rho_{i,1c}^n - (n-1)\theta \right] t \right\}$ ,

$$r_{2t,\theta} = \min_{1 \leq n \leq N} \left\{ \beta_{2t}^n - \left[ \sum_{i \in S_{2c}^n} \rho_{i,2c}^n - (n-1)\theta \right] t \right\},$$

其中,  $N$  是输入路由器  $d$  的数据流数目, 对于  $n = 1, \dots, N-1$ ,

$$g_{1t}(x) = g_{2t}(x) = f_c^{2,\theta_2} \otimes \dots \otimes f_c^{N,\theta_N}(x),$$

$$\begin{aligned} f_c^{n,\theta_n}(x) &= f_c^n(x) + \frac{1}{\theta_n} \int_x^\infty f_c^n(y) dy \\ &= \left(1 + \frac{1}{a}\theta_n\right) \cdot ke^{-ax}, \end{aligned}$$

$$f_c^{N,\theta_N}(x) = f_c^N(x) = ke^{-ax}.$$

证明. 由定理 3 可知, 整个核心网络为  $S_{1t}$  提供弱随机服务曲线  $S_{1t} \sim \langle g_{1t}, \beta_{1t} \rangle$ , 对  $n = 1, \dots, N-1$ ,

$$\begin{aligned} \beta_{1t}(t) &= \beta_{1t}^1 \otimes \beta_{1t,-\theta}^2 \dots \otimes \beta_{1t,-(N-1)\theta}^N(t) \\ &= \min_{1 \leq n \leq N} \left\{ \beta_{1t}^n - \left[ \sum_{i \in S_{1c}^n} \rho_{i,1c}^n - (n-1)\theta \right] t \right\} \\ &= r_{1t,\theta} \end{aligned} \quad (14)$$

$$g_{1t}(x) = f_c^{2,\theta_2} \otimes \dots \otimes f_c^{N,\theta_N}(x),$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } f_c^{n,\theta_n}(x) &= f_c^n(x) + \frac{1}{\theta_n} \int_x^\infty f_c^n(y) dy \\ &= \left(1 + \frac{1}{a}\theta_n\right) \cdot ke^{-ax}, \end{aligned}$$

$$f_c^{N,\theta_N}(x) = f_c^N(x) = ke^{-ax}.$$

已知  $A_{1t} \sim_{vb} \langle f_{1t}, \alpha_{1t} \rangle$  和式 (14), 利用定理 1, 可得  $S_{1t}$  在核心网络中的随机时延上界是

$$P\{D_{1t,cn} > h(\alpha_{1t} + x, \beta_{1t})\} \leq f_{1t} \otimes g_{1t}(x) \quad (15)$$

根据式 (5), 有

$$h(\alpha_{1t} + x, \beta_{1t}) = \frac{x}{r_{1t,\theta}} \quad (16)$$

成立.

将式 (16) 代入式 (15) 的左端, 即可得到式 (12).

同理, 可证式 (13).

证毕.

### 3.5 接入网时延分析

根据无线信道的随机特征和时变性, 可采用随机系统进行建模. 在无线接入网中假设对实时数据流和非实时数据流不进行区分, 而是公平调度.

**命题 2.** 在无线接入网中, 假设无线信道为贯穿数据流提供弱随机服务曲线  $S \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$ , 其中  $g(x) = ue^{-vx}$ ,  $\beta = Ct$ . 记  $D_{an}$  为贯穿数据流在接入网中的随机时延. 可得贯穿流在接入网中的随机时延上界为

$$P\left\{D_{an} > \frac{x}{C}\right\} \leq f \otimes g(x) \quad (17)$$

其中,  $f(x) = f_{1t} \otimes g_{1t}^{\theta'} \otimes f_{2t} \otimes g_{2t}^{\theta''}$ ,  $g_{1t}^{\theta'}(x) = g_{1t}(x) + \frac{1}{\theta'} \int_x^\infty g_{1t}(y) dy$ ,  $g_{2t}^{\theta''}(x) = g_{2t}(x) + \frac{1}{\theta''} \int_x^\infty g_{2t}(y) dy$ .

证明. 考虑输入流  $S_{1t}$  和  $S_{2t}$  在 MME/GW 的输出. 由定理 2,  $S_{1t}$  的输出为  $A_{1t}^* \sim_{vb} \langle f_{1t} \otimes g_{1t}^{\theta'}, \alpha_{1t,\theta'} \otimes \beta_{1t,-\theta'} \rangle$ , 其中

$$\alpha_{1t,\theta'} = \alpha_{1t}(t) + \theta' t = \left( \sum_{i \in S_{1t}} \rho_{i,1t}^i + \theta' \right) t,$$

$$\beta_{1t,-\theta'} = \beta_{1t}(t) - \theta' t = (r_{1t,\theta} - \theta') t,$$

$$g_{1t}^{\theta'}(x) = g_{1t}(x) + \frac{1}{\theta'} \int_x^\infty g_{1t}(y) dy;$$

$S_{2t}$  的输出为  $A_{2t}^* \sim_{vb} \langle f_{2t} \otimes g_{2t}^{\theta''}, \alpha_{2t,\theta''} \otimes \beta_{2t,-\theta''} \rangle$ ,

其中

$$\alpha_{2t,\theta''} = \alpha_{2t}(t) + \theta'' t = \left( \sum_{i \in S_{2t}} \rho_{i,2t}^i + \theta'' \right) t$$

$$\beta_{2t, -\theta''} = \beta_{2t}(t) - \theta''t = (r_{2t, \theta} - \theta'')t,$$

$$g_{2t}^{\theta''}(x) = g_{2t}(x) + \frac{1}{\theta''} \int_x^{\infty} g_{2t}(y) dy.$$

根据定理 5, 无线接入网的输入聚合流的到达过程为  $A^* \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ , 其中

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \alpha_{1t, \theta'} \oslash \beta_{1t, -\theta'}(t) + \alpha_{2t, \theta''} \oslash \beta_{2t, -\theta''}(t) \\ &= \alpha_{1t, \theta'}(t) + \alpha_{2t, \theta''}(t), \end{aligned}$$

$$f(x) = f_{1t} \otimes g_{1t}^{\theta'} \otimes f_{2t} \otimes g_{2t}^{\theta''}.$$

由  $A^* \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ ,  $S \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$ , 根据定理 1, 贯穿流在无线接入网的时延上界为

$$P\{D_{an} > h(\alpha + x, \beta)\} \leq f \otimes g(x) \quad (18)$$

根据式(5), 有

$$h(\alpha + x, \beta) = \frac{x}{C} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)的左端, 即可得式(17).

证毕.

### 3.6 E2E 时延分析

命题 1 和命题 2 分别分析出贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流在核心网络和无线接入网络中的随机时延上界, 下面的命题 3 描述了贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流的随机 E2E 时延上界.

**命题 3.** 条件如命题 1 和命题 2, 记  $D_{1t}$  和  $D_{2t}$  分别为贯穿流  $S_{1t}$  和  $S_{2t}$  的随机 E2E 时延, 则贯穿流  $S_{1t}$  和  $S_{2t}$  的随机 E2E 时延上界为

$$\begin{aligned} P\{D_{1t} > d\} &= P\{D_{1t, cn} + D_{1t, an} > d\} \\ &\leq P\{D_{1t, cn} > d\} \otimes P\{D_{1t, an} > d\} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P\{D_{2t} > d\} &= P\{D_{2t, cn} + D_{2t, an} > d\} \\ &\leq P\{D_{2t, cn} > d\} \otimes P\{D_{2t, an} > d\} \end{aligned} \quad (21)$$

其中  $D_{1t, an} = D_{2t, an} = D_{an}$ .

证明. 显然  $D_{1t} = D_{1t, cn} + D_{1t, an}$ , 根据定理 6 可得

$$\bar{F}_{D_{1t}}(d) \leq \bar{F}_{D_{1t, cn}} \otimes \bar{F}_{D_{1t, an}}(d)$$

或者

$$P\{D_{1t, cn} + D_{1t, an} > d\} \leq P\{D_{1t, cn} > d\} \otimes P\{D_{1t, an} > d\} \quad (22)$$

由命题 1 和 2, 通过计算式(22)的右端, 易得式(20). 同理可得式(21). 证毕.

上述所建立的框架, 对 LTE 网络中的贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流的随机 E2E 时延上界进行了分析. 如果将该框架应用于实际的 LTE 网络中, 只要对实际应用环境进行分析, 即可得到上述各个参数, 可以简化 LTE-SAE 架构的性能分析, 保证贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流的随机 E2E 时延.

## 4 数值验证

为验证上述 LTE-SAE 网络性能分析框架的有效性, 本节进行有关的数值分析.

这里, 假设所有与到达曲线和服务曲线相关的界限函数为  $e^{-x}$ , 参数  $\theta, \theta'$  和  $\theta''$  设为 1.

考虑下面的网络场景:

在核心网络中, 路由器为 2 个, 每个路由器的容量为 100 Mbps; 贯穿实时数据流的到达速率为 200 pkts/s, 其中每个数据包的大小为 128 Bytes; 贯穿非实时数据流的到达速率为 100 pkts/s, 其中每个数据包的大小为 256 Bytes; 这里有贯穿实时数据流和交叉实时数据流个数分别为 100, 贯穿非实时数据流和交叉非实时数据流个数分别为 50; 每个交叉流的到达速率为 200 pkts/s, 每个数据包的大小为 128 Bytes.

在无线接入网中, 假设天线为  $2 \times 2$  的 MIMO 系统, 使用频率为 20 MHz 的信道, 信噪比设定为 25 dB, 下行链路提供的速率可达到 100 Mbps. 假设在 GE 信道中, 从 good 状态转换到 bad 状态的转移概率  $p_{gb} = 0.1$ , 从 bad 状态到 good 状态的转移概率  $p_{bg} = 0.01$ . 各个状态的速率随着信道矩阵的变化而变化, 依据马尔可夫链, 按照式(11)计算出信道的容量为 90.909 Mbps.

根据上述的参数设置和计算结果, 应用命题 1 和引理 1, 可以得到贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流在核心网络中的时延界限分别为

$$P\{D_{1t, cn} > d\} \leq 3.78e^{-6.83d} \quad (23)$$

$$P\{D_{2t, cn} > d\} \leq 3.78e^{-3.14d} \quad (24)$$

利用命题 2 和引理 1, 可以得到贯穿数据流在接入网中的随机时延界限为

$$P\{D_{an} > d\} \leq 4.656e^{-18.182d} \quad (25)$$

然后, 计算贯穿数据流的 E2E 随机时延界限. 根据式(23)和式(25), 运用命题 3 得到贯穿实时数据流的 E2E 时延界限为

$$P\{D_{1t} > d\} \leq 7.209e^{-4.975d} \quad (26)$$

同理可得, 贯穿非实时数据流的 E2E 时延界限为

$$P\{D_{2t} > d\} \leq 5.707e^{-2.681d} \quad (27)$$

图 4 描绘了上述分析结果所表示的贯穿实时数据流和贯穿非实时数据流的随机端到端时延上界.

从图 4 中可以看出, 数据流的可允许时延违约概率是端到端时延的递减函数, 从而与随机网络演算理论中的定义相符. 从图 4 也可以看出, 当时延违约概率相同时, 实时数据流的随机 E2E 时延小于非

实时数据流的随机 E2E 时延,这是由于在上述所建立的框架中,对贯穿实时和非实时数据流通过采用优先级调度的调度规则进行了区分,说明了上述的建模框架是合理的、可行的,有效地保证了贯穿实时数据流和非实时数据流的随机 E2E 时延。

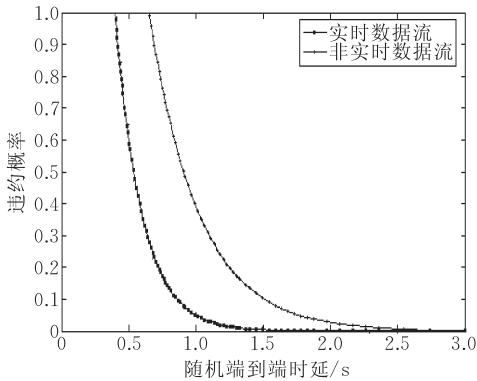


图 4 贯穿数据流的随机 E2E 时延

## 5 结 语

本文主要以 3GPP 的长期演进计划和系统架构演进为背景,在分析研究随机网络演算的基础上,结合 LTE 网络数据流的特点,对 LTE 网络拓扑进行分析,采用合理的到达模型和服务模型,并在此基础上,提出了分析 LTE 网络中的贯穿数据流的端到端时延的框架,并进一步通过数值分析证明了该框架的有效性。

### 参 考 文 献

[1] 3GPP TSG RAN TR 23.882 v8.0.0, 3GPP System Archi-



**CHEN Xin**, born in 1965, professor. His research interests include the performance evaluation of computer networks, network security, and avionics networks.

### Background

This paper analyzes the stochastic performance bound in LTE networks. To the best of our knowledge, the work is the first which use SNC to conduct performance analysis in LTE. This work is partly supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60973107), the National

structure Evolution; Report on Technical Options and Conclusions, 2008

- [2] Jiang Y. A basic stochastic network calculus//Proceedings of the ACM SIGCOMM'06. Pisa, Italy, 2006: 123-134
- [3] Jiang Y M, Liu Y. Stochastic Network Calculus. London: Springer, 2008
- [4] Xie J, Jiang Y M. Stochastic service guarantee analysis based on time-domain models//Proceedings of the Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS). London, UK, 2009: 1-12
- [5] Wang K, Lin C. SRD service: A stochastic network calculus approach for differentiation analysis//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2010 (ICC 2010). Cape Town, South Africa, 2010: 1-5
- [6] Dutta N, Misra I S. Use of service curve for resource reservation in wired-cum-wireless scenario. International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), 2010, 7(2): 87-93
- [7] Xiang X D, Chen X, Wan J X. A framework for performance analysis of FAN in wired-cum-wireless networks; A stochastic network calculus approach//Proceedings of the 2010 Globecom Workshop on Management of Emerging Networks and Services (MENS 2010). Miami, FL, 2010: 631-635
- [8] Ridouard F, Scharbag J L, Fraboul C. Stochastic network calculus for end-to-end delays distribution evaluation on an avionics switched Ethernet//Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Vienna, Austria, 2007: 559-564
- [9] Ciucu F, Burchard A, Liebeherr J. A network service curve approach for the stochastic analysis of networks. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2005, 33(1): 279-290
- [10] Tse D, Viswanath P. Fundamentals of Wireless Communication. New York: Cambridge University Press, 2005
- [11] Khan F. LTE for 4G Mobile Broadband. New York: Cambridge University Press, 2009

**ZHANG Lei**, born in 1986, M. S. candidate. Her research interests include computer networks and the performance evaluation of networks.

**XIANG Xu-Dong**, born in 1986, Ph. D. candidate. His research interests include the performance evaluation of networks.

**WAN Jian-Xiong**, born in 1982, Ph. D. candidate. His research interests include optimal control in large scale system and avionics networks.

Basic Research Program (973 Program) of China (No. 2011CB311809), the Scientific Research Common Project of Beijing Municipal Commission of Education (No. KM200910772016) and the Scientific Research Level Improvement Project (No. 5028123601).