

LTE-A 飞蜂窝网络自相似业务流的端到端时延边界分析

司 远 陈 昕 刘宗奇

(北京信息科技大学计算机学院网络文化与数字传播北京市重点实验室 北京 100101)

摘 要 LTE-A 是一种 4G 移动通信标准,可满足移动数据业务对传输带宽的要求。为解决移动通信网络中室内信号质量较差的问题,LTE-A 标准采用飞蜂窝技术作为室内无线接入解决方案。针对 LTE-A 飞蜂窝网络的时延边界问题,运用随机网络演算方法分析业务流的自相似性质和 MIMO 信道的时变特性,构建了 LTE-A 飞蜂窝网络中自相似业务流的随机到达与随机服务模型。围绕所构建的到达与服务模型,运用有效带宽理论和 chernoff 界方法,给出了自相似业务流的端到端时延边界。NS3 仿真验证表明,在信道带宽和业务流优先级等指标不同的情形下,所给出的理论端到端时延边界与仿真时延的偏差在 2ms 以内,较为准确有效,可为确保 LTE-A 飞蜂窝网络的服务质量提供依据。

关键词 LTE-A 飞蜂窝,随机网络演算,自相似流,时延边界

中图法分类号 TP319 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.015

Bounding End to End Delay for Self-similar Traffic in LTE-A Femtocell Networks

SI Yuan CHEN Xin LIU Zong-qi

(Beijing Key Laboratory of Internet Culture and Digital Dissemination Research, Computer School,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract LTE-A is a fourth-generation radio communication standard which provides high data rates to mobile users. LTE-A adopts femtocell technology to enhance the quality of service (QoS) experienced by indoor users. To derive the end-to-end delay bound of LTE-A femtocell networks, a stochastic network calculus method was proposed. First, stochastic traffic and service curves are constructed to model respectively the self-similar mobile traffic and MIMO channels in LTE-A femtocell networks. Then, effective bandwidth and Chernoff bound approaches are employed to obtain the theoretical end-to-end delay bound. Simulations by NS3 show that the deviation between the theoretical and simulation upper bounds on delay is within 2 milliseconds. This paper provided some fresh insight into QoS provisioning in LTE-A femtocell networks.

Keywords LTE-A femtocell, Stochastic network calculus, Self-similar traffic, Delay bound

1 引言

随着手机电视、在线游戏、视频会议等新业务的出现,用户对移动网络传输带宽的需求不断增加。第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)提出了 LTE-A 移动通信网络标准,使用正交频分多址(OFDMA, Orthogonal Frequency Division Multiple Access)和多人多出(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)等物理层技术,以期提高频谱利用效率,增大网络传输带宽,为用户提供高速、低时延的移动通信服务^[1]。

目前移动通信网络主要以宏蜂窝实现信号覆盖,受到通信距离及障碍物等因素的影响,位于宏蜂窝边缘的室内移动用户所接收到的信号强度无法满足需求。据统计^[2],50%的语音呼叫及70%以上的数据传输业务发生在室内,45%的用户因室内信号强度弱,而无法得到有保障的服务。3GPP 针对这一问题,提出了 LTE-A 飞蜂窝网络架构。在 LTE-A 飞

蜂窝网络中,移动设备通过飞蜂窝基站(FBS, Femtocell Base Station)接入 LTE-A 移动网络。FBS 是一种小型的室内基站,仅覆盖室内区域,可有效提高室内的信号强度,降低宏蜂窝的负载^[3],还具有低功耗的优点^[4]。

LTE-A 飞蜂窝网络正逐渐被运营商和用户接受,其服务质量(QoS, Quality of Service)保障问题已成为移动通信领域的一个热点^[5,6]。端到端时延是网络 QoS 的重要指标,建立 LTE-A 飞蜂窝网络中业务流的端到端时延分析模型,可以给出网络的理论端到端时延边界。通过分析这一边界与网络参数的关系,可为保障 LTE-A 飞蜂窝网络的 QoS 提供参考。

随机网络演算理论(SNC, Stochastic Network Calculus)是网络系统性能评价的重要理论之一^[7],文献[8,9]分别使用 SNC 分析了软件定义网络和混合无线网络业务流的时延边界。SNC 使用随机到达曲线分析业务流的到达模型,并使用随机服务曲线分析网络的服务模型。在使用 SNC 构造 LTE-A 飞蜂窝网络端到端时延分析模型时,需建立相应的业务到达

到稿日期:2014-03-13 返修日期:2014-07-21 本文受国家自然科学基金面上项目(61370065)资助。

司 远(1990—),男,硕士生,主要研究领域为无线网络与安全,E-mail:tcwyl30@163.com;陈 昕(1965—),男,教授,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;刘宗奇(1989—),男,硕士生,主要研究领域为计算机网络性能评价。

模型与网络服务模型。

LTE-A 飞蜂窝网络中,业务流具有自相似性质^[10],传统的泊松和马尔科夫业务到达模型不能描述这一特性,而常速率或 on-off 服务模型也难以描述 LTE-A 飞蜂窝网络中 MIMO 信道的时变特性。针对业务到达模型的构建,文献[11-13]使用分型布朗运动(fBm, fractal Brownian motion)描述无线网络环境下业务到达的自相似性质。然而, fBm 不能体现业务到达的重尾特性^[14],这一特性会对网络性能产生负面影响。文献[15]提出了一种 Pareto 业务到达模型,可描述具有重尾特性的自相似业务流。针对服务模型的构建,文献[16]使用马尔科夫信道服务模型描述 MIMO 无线信道的时变特性,并使用矩母函数(MGF, Moment Generation Function)对模型进行了分析。

近年来针对 LTE-A 飞蜂窝网络的研究大多局限在自相似业务到达模型或 MIMO 信道服务模型中的某一方面, SNC 作为网络性能评价理论,考虑了业务流的随机突发特性与网络的随机服务特性,可准确评价无线网络的性能。然而,在 SNC 的相关研究中,针对自相似业务到达模型与 MIMO 信道服务模型的分析较少。本文在研究 SNC 理论^[7]和 LTE-A 飞蜂窝网络架构^[17]的基础上,首先运用 Pareto 到达模型描述 LTE-A 飞蜂窝网络中业务流的重尾自相似特性,并使用 SNC 理论构造该到达模型的随机到达曲线;其次运用马尔科夫信道模型描述 MIMO 无线信道的时变特性,并使用 SNC 理论构建该信道模型的随机服务曲线;最后建立了 LTE-A 飞蜂窝网络的端到端时延边界分析模型,给出了网络的理论端到端时延边界。仿真实验结果表明,在不同网络参数设置下,所给出的理论时延边界与仿真时延的偏差不超过 2ms。

2 自相似业务流到达模型

SNC 理论使用 v. b. c 到达曲线给出在 $(0, t]$ 时间段内业务流到达量的随机上界, gSBB 到达曲线是一种特殊的 v. b. c 到达曲线,可用于分析具有重尾特性的自相似业务到达模型。

定义 1(v. b. c 到达曲线)^[7] 到达曲线是业务流累积到达数据量的上界,以 $A(t)$ 表示业务流的到达过程,若对于任意 $t, x \geq 0$, $A(t)$ 满足

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

则称业务流 $A(t)$ 具有违约概率函数为 $f(x)$ 的 v. b. c 到达曲线 $\alpha(t)$, 记作 $A(t) \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ 。其中 $f(x)$ 是单调不减的非负函数, $\alpha(t)$ 是单调不减的非负函数,且当 $x < 0$ 时, $f(x) = 1$, 当 $t < 0$ 时, $\alpha(t) = 0$ 。

定义 2(gSBB 到达曲线)^[14] 若对于任意 $t, x \geq 0$, 业务流 $A(t)$ 满足

$$\Pr\{\sup_{0 \leq s \leq t} \{A(s, t) - \rho(t-s)\} > x\} < f(x) \quad (2)$$

则称 $A(t)$ 具有违约概率函数为 $f(x)$ 的 gSBB 到达曲线 ρt , 记作 $A(t) \sim_{vb} \langle f, \rho t \rangle$, 其中 ρ 为常量, 函数 $f(x)$ 的定义同上。由定义 1 可知, gSBB 到达曲线是一种特殊的 v. b. c 到达曲线。

根据定义 2, 可建立 pareto 业务流模型的 gSBB 到达曲线。在 Pareto 模型中, 信源所发送的第 i 个数据包的长度记为 L_i , L_i 为独立同分布的 Pareto 随机变量, 其互补累积分布函数为

$$\Pr(L_i > x) = \left(\frac{x}{b}\right)^{-a}, x > b \quad (3)$$

假设信源以恒定速率 λ 发送数据包, 则该信源产生的业务流的到达过程可表示为

$$A(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} L_i \quad (4)$$

其中, $n(t) = \lfloor \lambda t \rfloor$, 表示 t 时刻到达的数据包的总量, 该到达过程可以近似地看作 Hurst 指数 $H = 1/\alpha$ 的自相似过程。

定理 1 在 Pareto 业务流模型中, 若业务流 $A(t)$ 的参数 λ, α, b 已知, 则 $A(t)$ 具有 gSBB 到达曲线

$$A(t) \sim_{vb} \langle f, \rho_\theta t \rangle \quad (5)$$

其中, $f(x) = \inf_{1 < \delta < 1 + \frac{\rho}{\delta}} \left\{ \left(\frac{\rho_\theta}{\delta} - \rho \right)^{-aH} \frac{\delta^{aH(1-H)}}{aH(1-H)\log\delta} \right\} \times \lambda x^{-a(1-H)}$, $\rho_\theta = \rho + \theta$, $\rho = \lambda E[L]$, $\epsilon > 0$, $\theta > 0$, $\delta > 1$, 且均为常数。

证明: 由广义中心极限定理可知, 随着变量数目增加, 多个独立同分布的随机变量之和趋近于 α -stable 分布 S_α 。令 c_α

$$= \left(\frac{2\Gamma(\alpha) \sin \frac{\pi\alpha}{2}}{\pi} \right)^{-1/\alpha}, \text{ 当 } n(t) \rightarrow \infty \text{ 时, 下式成立}^{[15]}:$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n(t)} L_i - n(t)E[L]}{c_\alpha n^{1/\alpha}} \rightarrow S_\alpha \quad (6)$$

当 t 足够大时, 可近似地认为 $n(t) = \lambda t$ 。

由式(6)可知, $A(t) = \lambda t E[L] + c_\alpha (\lambda t)^{1/\alpha} S_\alpha$ 。根据 S_α 的性质可知, $\Pr(S_\alpha > \sigma) = (c_\alpha \sigma)^{-a}$ 。因此, $A(t)$ 满足

$$\Pr\{A(s, t) - \lambda E[L](t-s) > t^{1/\alpha} x\} < \lambda x^{-a} \quad (7)$$

记 $\lambda E[L]$ 为 ρ , $1/\alpha$ 为 H , 式(7)可转化为

$$\Pr\{A(s, t) - \rho(t-s) > t^H x\} < \lambda x^{-a} \quad (8)$$

令 $t_n = \epsilon \delta^n$, 当 $t - t_n < s < t - t_{n-1}$ 时, $A(t)$ 满足

$$A(s, t) - \rho_\theta(t-s) \leq A(t - t_n, t) - \rho_\theta t_{n-1} \quad (9)$$

结合定义 2 及式(9), 即可推导出 $A(t)$ 的 gSBB 到达曲线:

$$\begin{aligned} & \Pr\left\{\sup_{0 \leq s \leq t} \{A(s, t) - \rho_\theta(t-s)\} \geq x\right\} \\ & \leq \Pr\left\{\sup_{-\infty \leq n \leq +\infty} \{A(t - t_n, t) - \rho_\theta t_{n-1}\} \geq x\right\} \\ & \leq \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \Pr\{A(t - t_n, t) - \rho_\theta t_{n-1} > x\} \\ & \leq \frac{1}{H(1-H)\log\delta} \int_{\frac{\rho_\theta - \rho}{\delta}}^{+\infty} \frac{\rho_\theta^{aH} H x^{1-H}}{\delta^{H(1-H)}} \lambda y^{-a-1} dy \\ & \leq \inf_{1 < \delta < 1 + \frac{\rho}{\delta}} \left\{ \left(\frac{\rho_\theta}{\delta} - \rho \right)^{-aH} \frac{\delta^{aH(1-H)}}{aH(1-H)\log\delta} \right\} \times \lambda x^{-a(1-H)} \end{aligned}$$

根据定义 2, 式(5)成立。

3 LTE-A 飞蜂窝网络服务模型

SNC 理论使用弱服务曲线给出路由器向输入业务流提供服务的随机下界。由 Lindley 不等式与最小加代数性质可知, 业务流到达量与路由器提供服务的最小加卷积必定小于业务流离开量, 这是弱服务曲线的理论基础。为了获取整个网络服务能力的随机下界, 还需根据业务流聚合、余留服务、服务串联等 SNC 定理对网络中各路由器的服务能力进行整合。

定义 3(最小加卷积)^[7] $X(t), Y(t)$ 为关于 t 的函数, X, Y 的最小加卷积定义为

$$X \otimes Y(t) = \inf_{0 \leq s \leq t} \{X(s) + Y(t-s)\} \quad (10)$$

定义 4(弱服务曲线)^[18] 服务曲线给出路由器向输入业

务流提供的下界,以 $D(t)$ 表示业务流离开路由器 S 的过程,若对于任意 $t \geq 0$ 及 $\sigma \geq 0$, $D(t)$ 满足

$$\Pr(A \otimes \beta(t) - D(t) > x) \leq g(x) \quad (11)$$

则称路由器 S 向 $A(t)$ 提供违约概率函数为 $g(x)$ 的弱服务曲线 $\beta(t)$, 记作 $S(t) \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$ 。其中 $g(x)$ 是单调不减的非负函数, $\beta(t)$ 是单调不减的非负函数, 且当 $x < 0$ 时, $g(x) = 1$, 当 $t < 0$ 时, $\beta(t) = 0$ 。

定理 2(业务流聚合定理)^[18] 路由器 S 处, 若输入业务流 $A(t)$ 由多条业务流 $A_1(t) \sim_{vb} \langle f_1, \alpha_1 \rangle, A_2(t) \sim_{vb} \langle f_2, \alpha_2 \rangle \dots A_N(t) \sim_{vb} \langle f_N, \alpha_N \rangle$ 聚合而成, 则 $A(t)$ 具有如下 v. b. c 到达曲线:

$$A(t) \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle \quad (12)$$

其中, $f = f_1 \otimes f_2 \otimes \dots \otimes f_N(x), \alpha = \sum_{n=1}^N \alpha_n(t)$ 。

定理 3(服务余留定理)^[21] 路由器 S 有两条输入业务流 $A_1(t) \sim_{vb} \langle f_1, \alpha_1 \rangle$ 及 $A_2(t) \sim_{vb} \langle f_2, \alpha_2 \rangle$, 若 S 对聚合业务流 $A(t)$ 提供弱服务曲线 $S(t) \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$, 则 S 对业务流 $A_1(t)$ 和 $A_2(t)$ 提供如下弱服务曲线:

$$\begin{aligned} S_1(t) &\sim_{ws} \langle f_2 \otimes g, \beta - \alpha_2 \rangle \\ S_2(t) &\sim_{ws} \langle f_1 \otimes g, \beta - \alpha_1 \rangle \end{aligned} \quad (13)$$

定理 4(服务串联定理)^[7] 由 N 个路由器串联形成的网络中, 若路由器 $n(1 \leq n \leq N)$ 向输入业务流 $A(t)$ 提供弱服务曲线 $S^n(t) \sim_{ws} \langle \beta^n, g^n \rangle$, 则整个网络向 $A(t)$ 提供弱服务曲线

$$S^{Net}(t) \sim_{ws} \langle \beta^{Net}, g^{Net} \rangle \quad (14)$$

其中, $\beta^{Net}(t) = \beta^1 \otimes \beta^2 \otimes \beta^3 \otimes \dots \otimes \beta^{N-(N-1)\theta}(t), g^{Net}(x) = g^{1,\theta_1} \otimes \dots \otimes g^{N-1,\theta_{N-1}} \otimes g^N(x), \beta^{n-(n-1)\theta}(t) = \beta^n(t) - (n-1)\theta t, g^{n,\theta_n}(x) = g^n(x) + \frac{1}{\theta_n} \int_x^\infty g^n(y) dy, \theta, \theta_1, \dots, \theta_{N-1}$ 为任意大于 0 的常数。

引理 1 $\forall Kx^{-\alpha} < 1, \alpha' < \alpha, Kx^{-\alpha}$ 满足:

$$Kx^{-\alpha} \leq K\alpha' x^{-\alpha'} \quad (15)$$

引理 2 令 $\bar{K} = (K_1 + K_2 + \dots + K_n)/n$, 则 $\sum_{i=1}^n K_i x_i^{-\alpha}$ 满足以下不等式约束:

$$\min_{x_1 + x_2 + \dots + x_n = x} \sum_{i=1}^n K_i x_i^{-\alpha} \leq n^{\alpha} \bar{K} x^{-\alpha} \quad (16)$$

图 1 为 LTE-A 飞蜂窝网络下行链路数据通信示意图。业务流由因特网中的业务信源产生, 通过 PGW(Packet Gateway)网关进入 LTE-A 核心网, 并由 SGW(Service Gateway)网关转发给相应接入网中的 FBS, 最后由 FBS 发送至移动设备。该业务流在传输途中贯穿整个 LTE-A 飞蜂窝网络, 记为贯穿流。网络中, 贯穿流之外的数据流记为交叉流。假设网络中每个路由器处均存在交叉流, 并且交叉流的优先级高于贯穿流。由于 LTE-A 飞蜂窝网络中的业务多为非对称业务, 下行业务多于上行业务, 因此针对 LTE-A 飞蜂窝网络下行链路向贯穿流提供服务的能力进行建模分析。

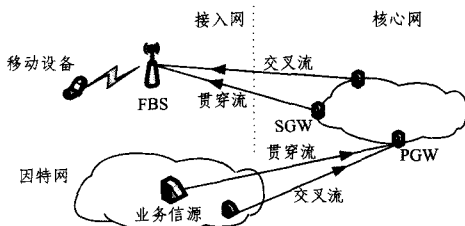


图 1 LTE-A 飞蜂窝网络下行链路通信示意图

由图 1 可知, 移动设备与 FBS 之间使用 MIMO 无线信道通信, 而飞蜂窝基站、核心网和因特网之间通过有线链路传输数据。有线链路的服务能力可使用较为简单的常速率服务模型描述, 而 MIMO 无线信道的时变特性可通过马尔科夫信道模型描述。

3.1 常速率服务模型

假设有线链路带宽为 C , 考虑路由器有 N_c 条输入交叉流, 第 n 条交叉流的数据包到达速率为 λ_n , 且包长 L_n 满足 $\Pr(L_n > x) = (\frac{x}{b_n})^{-a_n}, x > b_n$, 根据定理 1, 该交叉流 $A_n(t)$ 的 gSBB 到达曲线为

$$A_n(t) \sim_{vb} \langle f_n, \rho_{n,\theta_n} t \rangle \quad (17)$$

其中, $\rho_n = \lambda_n E[L_n], \rho_{n,\theta_n} = \rho_n + \theta_n, \lambda_n' = \lambda_n \inf_{1 < \delta < 1 + \frac{\theta_n}{\rho_n}} \{ (\frac{\rho_n + \theta_n}{\delta}) - \rho_n \}^{-a_n H} \frac{\delta^{a_n H(1-H)}}{a_n H(1-H) \log \delta}, f_n(x) = \lambda_n' x^{-a_n(1-H)}$ 。

由定理 2 可知, 聚合交叉流的 gSBB 到达曲线为

$$A_N(t) \sim_{vb} \langle f_N, \rho_{N,\theta_N} t \rangle \quad (18)$$

其中, $f_N = f_1 \otimes f_2 \otimes \dots \otimes f_{N_c}, \rho_{N,\theta_N} = \sum_{i=1}^{N_c} \rho_i, \theta_i, f_N$ 可通过引理 1、引理 2 求解。

聚合交叉流 $A_N(t)$ 确定后, 根据定理 3 可知, 有线链路向贯穿流 $A(t)$ 提供弱服务曲线

$$S(t) \sim_{ws} \langle f_{N_c}, (C - \rho_{N,\theta_N}) t \rangle \quad (19)$$

3.2 马尔科夫信道模型

假设 LTE-A 飞蜂窝网络中, 飞蜂窝基站与移动设备均采用基于空分复用的 MIMO 技术, 且 MIMO 信道如图 2 所示。

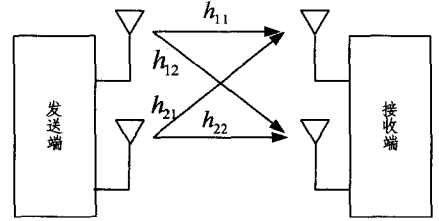


图 2 2x2 MIMO 信道

图 2 中, h_{nm} 表示 FBS 的第 m 个发送天线与移动设备的第 n 个接收天线之间的信道。假设该 2x2 MIMO 信道的子信道为瑞利衰落信道, 则其虚拟信道增益矩阵 H 可表示为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, h_{nm} 服从复高斯分布 $cn(0, v_{nm})$ 。该 MIMO 信道的平均容量为

$$C = E\{\log_2[\det(I_2 + \rho H H^* / 2)]\} \quad (21)$$

对于单条瑞利衰落信道, 可使用二状态马尔科夫信道模型描述其性质, 如图 3 所示。

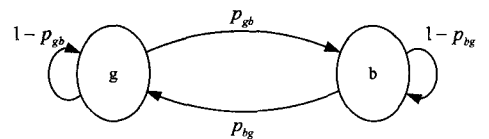


图 3 马尔科夫信道模型

假设信道有 g, b 两种状态, 信道处于 g 状态时, $h_{nm} \sim cn(0, v_g)$; 处于 b 状态时, $h_{nm} \sim cn(0, 0)$ ^[16]。信道由 g 状态到

b 状态的转移概率记为 p_{gb} , 由 b 状态到 g 状态的转移概率记为 p_{bg} , 则信道处于 g 状态的稳态概率 η_g 可表示为

$$\eta_g = \frac{p_{bg}}{p_{gb} + p_{bg}} \quad (22)$$

在此基础上, 由 4 条瑞利衰落信道组成的 MIMO 信道也可使用马尔科夫信道模型描述。记子信道 h_{mn} 的状态为 $S(h_{mn})$, $\forall m, n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $S(h_{mn}) \in \{g, b\}$, 则在马尔科夫信道模型中, MIMO 信道的状态 s 可表示为

$$s = [S(h_{11}), \dots, S(h_{NN})] \in \{g, b\}^{1 \times N^2} \quad (23)$$

由式(23)可看出, 该 MIMO 信道共有 2^{N^2} 个状态, 状态空间随着 N 增大呈指数增长。为避免状态空间爆炸, 根据 MIMO 信道中正在进行数据传输的信道数目对马尔科夫链进行状态聚合。假设发送端的每个天线只能同时在一路上信道上传送数据, 且在同一时段内, 接收端只能对一条信道上传输的信号进行解码, 则对于 $N \times N$ MIMO 信道, 可能有 $0, 1, \dots, N$ 条信道同时在进行数据传输。因此, 聚合后的状态空间可表示为

$$\{s_i' | i=1, 2, \dots, N+1\} \quad (24)$$

以 R_i' 表示信道处于状态 s_i' 时的平均频谱效率, 则有

$$R_i' = \frac{1}{|S_i'|} \sum_{s \in S_i'} C_s \quad (25)$$

C_s 可根据式(21)求解。

以 η_{s_i}' 表示系统处于状态 s_i' 的稳态概率, η' 表示由所有 η_{s_i}' 组成的概率向量。在图 2 所示的 MIMO 信道中, 由瑞利衰落信道的性质可知

$$\eta' = [(1-\eta_k)^4, 4(1-\eta_k)^3\eta_k + 4(1-\eta_k)^2\eta_k^2, 2(1-\eta_k)^2\eta_k^2 + 4(1-\eta_k)\eta_k^3 + \eta_k^4] \quad (26)$$

因此, 可以使用图 4 所示的三状态马尔科夫信道模型描述该 MIMO 信道的时变特性。

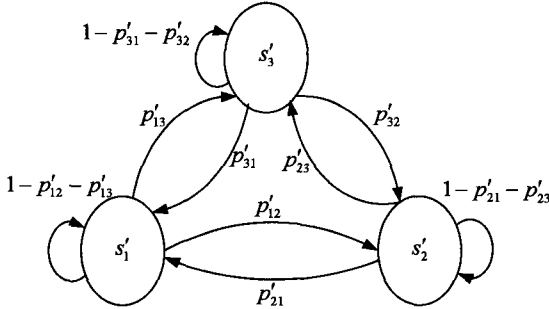


图 4 三状态马尔科夫信道模型

SNC 理论中, 通过随机服务曲线分析服务模型。文献[16]使用矩母函数分析三状态马尔科夫信道模型, 文献[18]使用有效带宽理论建立二状态马尔科夫信道模型的弱服务曲线。结合这两种方法, 可构造三状态马尔科夫信道模型的弱服务曲线。

定理 5 若 2×2 MIMO 信道的子信道带宽 B 已知, 则该 MIMO 信道向贯穿流提供弱服务曲线

$$S_{\text{mimo}}(t) \sim_{ws} \langle g_{\text{mimo}}, \beta_{\text{mimo}} \rangle \quad (27)$$

其中, $\beta_{\text{mimo}}(t) = B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log[(\eta H(-\theta')Q)^{t-s-1} H(-\theta') * I]$, $g_{\text{mimo}}(x) = e^{-\theta'x}$ 。Q 表示相应的三状态马尔科夫信道模型的转移概率矩阵, $\theta' > 0$, R_i' 定义同式(25), $H(\theta')$ 表示由 $e^{\theta'R_i'}$ 组成的对角矩阵。

证明: 结合有效带宽理论与定义 4 可知:

$$\beta_{\text{mimo}}(t) \leq B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log E[e^{-\theta'R'(s,t)}]$$

而上式中, 右半部分满足如下约束:

$$B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log E[e^{-\theta'R'(s,t)}]$$

$$= B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log E[e^{-\theta'R'(0,t-s)}]$$

$$= B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log[(\eta H(-\theta')Q)^{t-s-1} H(-\theta') * I]$$

可令 $\beta_{\text{mimo}}(t) = B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log[(\eta H(-\theta')Q)^{t-s-1} H(-\theta') * I]$, 由最小加卷积性质可知, 在 $(0, t]$ 时间段内存在 t_0 , 使得

$$\begin{aligned} A \otimes \beta(t) - D(t) &\leq A(t_0) + \beta(t-t_0) - D(t) \\ &= \beta(t-t_0) - [D(t) - D(t_0)] \\ &= \beta(t-t_0) - S(t_0, t) \end{aligned} \quad (28)$$

结合 chernoff 界方法和式(28), 可进一步推导出相应的违约概率函数:

$$\begin{aligned} \Pr\{A \otimes \beta_{\text{mimo}}(t) - D(t) > x\} &\leq \Pr\{e^{\theta'(\beta(t-t_0) - S(t_0, t))} > e^x\} \\ &\leq e^{-\theta'x} E[e^{\theta'(B \cdot t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-s)} \log E[e^{\theta'R'(s,t)}] - S(t_0, t))}] \\ &= e^{-\theta'x} E[e^{\theta'(t \cdot \frac{1}{-\theta'(t-t_0)} \log E[e^{-\theta'R'(t_0, t)}] - S(t_0, t))}] \\ &\leq e^{-\theta'x} \end{aligned}$$

根据定义 4 可知, 相应违约概率函数为 $g_{\text{mimo}}(x) = e^{-\theta'x}$, 即式(27)成立。

假设各路路由器的输入交叉流参数与有线链路服务模型中一致。结合定理 3 可知, MIMO 无线信道向贯穿流 $A(t)$ 提供的弱服务曲线

$$S_M(t) \sim_{ws} \langle f_{N_c} \otimes g_{\text{mimo}}, \beta_{\text{mimo}}(t) - \rho_{N_c, \theta_{N_c}}(t) \rangle \quad (29)$$

4 LTE-A 飞蜂窝网络时延边界分析模型

SNC 理论中, 通过随机到达曲线与随机服务曲线, 可给出网络的随机端到端时延边界。

定义 5(时延) 系统在 t 时刻的时延 $W(t)$ 定义为:

$$W(t) = \inf\{d; A(t-d) \leq D(t)\} \quad (30)$$

定理 6^[21] 假设输入业务流具有 v. b. c 到达曲线 $A(t) \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$, 路由器 S 向 $A(t)$ 提供弱服务曲线 $S(t) \sim_{ws} \langle g, \beta \rangle$, 则时延 $W(t)$ 满足如下约束:

$$\Pr\{W(t) > h(\alpha + x, \beta)\} \leq f \otimes g(x) \quad (31)$$

其中, $h(\alpha, \beta)$ 为曲线 α 与 β 的最大水平距离, 可表示为

$$h(\alpha, \beta) = \sup_{s \geq 0} \{\inf\{d \geq 0 | \alpha(s) \leq \beta(s+d)\}\}$$

在图 1 给出的场景中, 对业务信源及移动设备间的信道和服务器进行抽象后, 可得到图 5 所示的 LTE-A 飞蜂窝网络端到端时延分析模型。

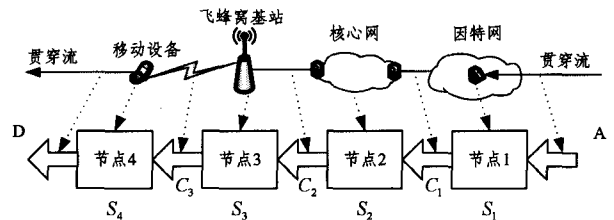


图 5 LTE-A 飞蜂窝网络端到端时延分析模型

时延分析模型中的数学符号与 LTE-A 飞蜂窝网络中物理实体的映射关系如表 1 所列。

表 1 映射关系

数学符号	物理实体	约束因素
A	贯穿流到达总量	贯穿流突发特性
S ₁	因特网到核心网的通信能力	有线链路 C ₁
S ₂	核心网到接入网的通信能力	有线链路 C ₂
S ₃	飞蜂窝基站到移动设备的通信能力	MIMO 信道 C ₃
S ₄	移动设备的接收能力	移动设备性能
D	贯穿流接收总量	随机服务曲线

假设移动设备对业务流的处理不造成额外时延,即 $S_4(t) \sim_{ws} \langle 0, \infty \rangle$ 。

定理 7 当 LTE-A 飞蜂窝网络中,到达模型与服务模型符合式(5)、式(19)、式(29)所示的约束时,可给出贯穿流的端到端时延边界

$$\Pr\{W(t) \geq x\} \leq f \otimes g^{\text{Net}}((\beta_{\text{mimo}}(t)/t - \rho_{N_c, \theta_{N_c}} - 2\theta')x) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} g^{\text{Net}} &= g^{1, \theta_1'} \otimes g^{2, \theta_2'} \otimes g^{3, \theta_3'} \otimes g^4(x) \\ &= (f_N(x) + \frac{1}{\theta_1'} \int_x^\infty f_N(y) dy) \otimes (f_N(x) + \frac{1}{\theta_2'} \int_x^\infty f_N(y) dy) \otimes (f_N \otimes g_{\text{mimo}}(x) + \frac{1}{\theta_3'} \int_x^\infty f_N \otimes g_{\text{mimo}}(y) dy) \end{aligned} \quad (33)$$

证明:根据定理 4 可知,整个网络向业务流提供弱服务曲线 $S^{\text{Net}}(t) \sim_{ws} \langle \beta^{\text{Net}}, g^{\text{Net}} \rangle$,其中 g^{Net} 如式(33)所示:

$$\beta^{\text{Net}} = \beta^1 \otimes \beta^{2-\theta'} \otimes \beta^{3-2\theta'} \otimes \beta^{4-3\theta'}(t) = \beta_{\text{mimo}}(t) - \rho_{N_c, \theta_{N_c}} t - 2\theta'$$

由定理 6 可知

$$\Pr\{W(t) \geq \frac{x}{\beta_{\text{mimo}}(t)/t - \rho_{N_c, \theta_{N_c}} - 2\theta'}\} \leq f \otimes g^{\text{Net}} \quad (34)$$

由式(34)易知,式(32)成立。

5 仿真验证

为验证上述 LTE-A 飞蜂窝网络端到端时延分析模型的有效性,对相关数值进行分析。仿真参数设置如表 2 所列^[19],交叉流参数与贯穿流相同,数量为 $N_c = 20$ 。

表 2 仿真参数设置

仿真参数	具体数值	代表含义
α	1.6	Pareto 分布参数
b	180Byte	Pareto 分布参数
λ	5000pkts/s	数据包平均到达速率
C	1 Gbps	核心网链路带宽
W	20MHz	MIMO 子信道带宽
P_{bg}	0.1	b 状态到 g 状态的转移概率
P_{gb}	0.01	g 状态到 b 状态的转移概率

本文使用仿真工具 Network Simulator 3 (NS3) 构建 LTE-A 飞蜂窝网络的仿真环境,对第 4 节中建立的 LTE-A 飞蜂窝网络端到端时延分析模型进行仿真验证,共采集了 10000 个数据包的时延数据。在分析对比理论时延边界和仿真结果时,需要确定 θ 的取值。当 $\theta \rightarrow \infty$ 时,业务流的到达曲线与网络的服务曲线将失去其随机特性,退化为确定网络演算。根据 $\beta_0 \leq C$ 等约束条件,可以选取合适的 θ ,获取最大复用增益^[20]。令 $\theta = 100000$, $\theta' = \theta_1' = \theta_2' = 1$ ^[21], $\theta_3' = 0.1008$, $\theta'' = 3149900$ 。理论端到端时延边界与仿真时延的关系如图 6 所示。

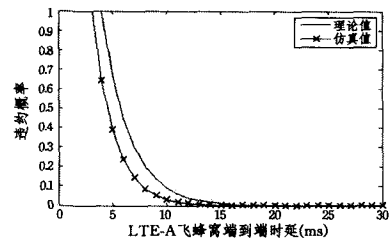


图 6 仿真与理论时延边界

由图 6 可以看出,随着时延增大,理论值与仿真值的违约概率均呈指数下降趋势。这是因为在式(32)中, $f(x)$ 、 $f_N(x)$ 和 $g_{\text{mimo}}(x)$ 均具有次可加性, $g_{\text{mimo}}(x) \leq f(x)$ 且 $g_{\text{mimo}}(x) \leq f_N(x)$,由最小加代数性质可知:关于 x 的两个函数 $\alpha(x)$ 和 $\beta(x)$ 满足

$$\alpha \otimes \beta = \alpha$$

其中, $\alpha \leq \beta$, α 、 β 具有次可加性。因此,所给出的理论端到端时延边界符合 $g_{\text{mimo}}(x)$ 的指数突发限制。理论端到端时延边界大于仿真时延,但偏差程度在 2ms 以内,说明所给出的理论时延边界贴近仿真时延,具有参考价值。

为证明所给出的 LTE-A 飞蜂窝网络端到端时延边界在不同条件下均具有参考价值,分别对到达和服务模型的参数作出调整。首先,改变 Pareto 分布参数,使 $b = 240$ Byte。此时,理论端到端时延边界与仿真时延的关系如图 7 所示。

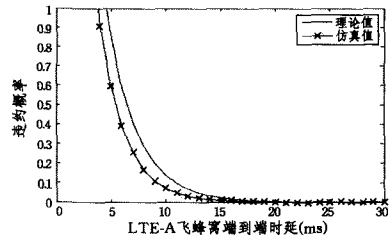


图 7 仿真与理论时延边界 ($b = 240$ Byte)

对比图 6 与图 7 可知,理论时延边界与仿真时延均有所增大。 $f \otimes g^{\text{Net}}((\beta_{\text{mimo}}(t)/t - \rho_{N_c, \theta_{N_c}} - 2\theta')x)$ 为 $(0, +\infty]$ 上单调不增的非负函数, b 增大时, $\rho_{N_c, \theta_{N_c}}$ 增大。因此,在同样的违约概率下,所给出的理论时延边界增大。仿真时延同样有所增大,且误差小于 2ms,证明式(32)所给出的时延边界是有效的。

在服务模型参数方面,改变 MIMO 子信道带宽,使 $W = 25$ MHz。理论时延边界与仿真时延的关系如图 8 所示。

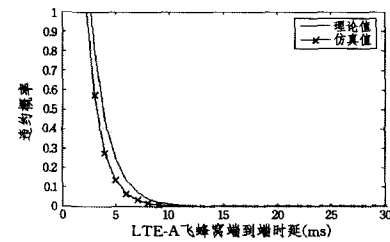


图 8 仿真与理论时延边界 ($W = 25$ MHz)

W 增大时, $\beta_{\text{mimo}}(t)$ 增大,由违约概率函数 $f \otimes g^{\text{Net}}((\beta_{\text{mimo}}(t)/t - \rho_{N_c, \theta_{N_c}} - 2\theta')x)$ 的单调不增性质可知,违约概率减小。MIMO 信道的服务能力越强,可容纳的交叉流越多;并且,随着 MIMO 信道的服务能力增强,违约概率减小。图 8 中,理论时延边界与仿真时延明显降低,且偏差程度仍在 2ms 之

内。因此,在不同的 MIMO 子信道带宽下,式(32)所给出的理论时延边界依然有效。

结束语 本文主要解决 LTE-A 飞蜂窝网络中的端到端时延边界问题,在研究 SNC 相关理论的基础上,结合 LTE-A 网络数据流到达的自相似特性与 MIMO 信道的时变特性,首先使用 Pareto 到达模型描述 LTE-A 飞蜂窝网络中业务流的重尾自相似特性,并构造模型的 gSBB 到达曲线;其次运用马尔科夫信道模型以描述 MIMO 无线信道的时变特性,并构建模型的弱服务曲线;最后根据 LTE-A 飞蜂窝网络下行链路数据通信图建立网络的端到端时延边界分析模型,并给出了网络的理论时延边界。仿真实验结果表明:在不同参数设置下,此模型均可给出贴近仿真结果的端到端时延边界,偏差不超过 2ms,对保障 LTE-A 飞蜂窝网络 QoS 具有参考价值。

参考文献

- [1] De Domenico A,Calvanese Strinati E,Capone A. Enabling Green cellular networks:A survey and outlook[J]. Computer Communications,2014,37(1):5-24
- [2] Zahir T,Arshad K,Nakata A,et al. Interference management in femtocells[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013,15(1):293-311
- [3] Aijaz A,Aghvami H,Amani M. A survey on mobile data off-loading:technical and business perspectives[J]. IEEE Wireless Communications,2013,20(2):104-112
- [4] Andrews J G,Claussen H,Dohler M,et al. Femtocells: Past, present,and future [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(3):497-508
- [5] Tassi A,Khirallah C,Vukobratovic D,et al. Reliable rate-optimized video multicasting services over LTE/LTE-A[C]//2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE,2013:5078-5082
- [6] Biswas J,Liu R P,Ni W,et al. Joint channel and delay aware user scheduling for multiuser MIMO system over LTE-A network [C]//2013 IEEE/ACM 21st International Symposium on Quality of Service(IWQoS). IEEE,2013:1-8
- [7] Jiang Y. A basic stochastic network calculus [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review,ACM,2006,36(4): 123-134
- [8] Azodolmolky S,Wieder P,Yahyapour R. Performance Evaluation of a Scalable Software-Defined Networking Deployment[C]// 2013 Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN). IEEE,2013:68-74
- [9] Zhu Q,Yu L,Fang S. Per-flow end-to-end delay bounds in hybrid wireless network[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE,2013:2113-2118
- [10] 魏德宾,潘成胜,韩睿. 卫星网络业务自相似特性分析[J]. 计算机学报,2013,40(5):67-69
- [11] 倪锐,周武旸,卫国. 基于网络演算的无线蜂窝网建模及其业务匹配研究[J]. 通信学报,2010(7):33-39
- [12] Jiang L,Yu L,Dong Y,et al. Delay and backlog distribution analysis of Amplify-and-Forward cooperative channels: A stochastic network calculus perspective[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2013:2085-2090
- [13] Min G,Jin X. Analytical Modelling and Optimization of Congestion Control for Prioritized Multi-Class Self-Similar Traffic[J]. IEEE Transactions on Communications,2013,61(1):257-265
- [14] 喻莉,白云,朱光喜. 基于 LFSN 自相似流量模型的随机突发边界分析[J]. 通信学报,2010,31(5):16-21
- [15] Liebeherr J,Burchard A,Ciucu F. Non-asymptotic delay bounds for networks with heavy-tailed traffic[C]//2010 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE,2010:1-9
- [16] Mahmood K,Vehkaperä M,Jiang Y. Delay constrained throughput analysis of a correlated MIMO wireless channel[C]//IEEE Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). IEEE,2011:1-7
- [17] Kishiyama Y,Benjebbour A,Nakamura T,et al. Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems[J]. IEEE Wireless Communications,2013,20(1):12-18
- [18] Lin C,Deng Y,Jiang Y. On applying stochastic network calculus [J]. Frontiers of Computer Science,2013,7(6):924-942
- [19] 3GPP TR36. 814 V9. 0. 0[OL]. <http://www.docin.com/p-277723701.html>
- [20] Rizk A,Fidler M. On Multiplexing Models for Independent Traffic Flows in Single-and Multi-Node Networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management,2013,10(1):15-28
- [21] 陈昕,张磊,向旭东,等. 基于随机网络演算的 LTE 网络端到端时延分析[J]. 计算机学报,2012,35(1):46-52
- [11] Acharya T, Chattopadhyay S, Roy R. Energy-aware virtual backbone tree for efficient routing in wireless sensor networks [C]// Third International Conference on Networking and Services, Athens, Greece, 2007:19-25
- [12] Kim J,Yoon K,Lee S,et al. An m-EVBT algorithm for energy efficient routing in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication. New York, USA, 2009: 586-591
- [13] Kim J,Yoon K,Lee J H. ViTAMin: A Virtual Backbone Tree Algorithm for Minimal energy consumption in wireless sensor network routing[C]//2012 International Conference on Information Networking (ICOIN). The Patra Bali Resort and Villas Bali, Indonesia, 2012:1-3
- [14] Heinzelman W B,Chandrakasan A P,Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002,1(4):660-670
- [15] Wightman P M,Labrador M A. Atarraya: a simulation tool to teach and research topology control algorithms for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques, Rome, Italy, 2009:26-35

(上接第 69 页)