

基于随机网络演算的无线多跳网延迟边界分析

喻莉 罗晶晶* 姜烈 张婕
(华中科技大学武汉光电国家实验室 武汉 430074)

摘要: 端到端延迟作为无线多跳网 QoS 中最重要的参数之一, 其边界分析的准确性直接影响到无线多跳网的 QoS 保障, 而其中流量场景的复杂性导致了分析的难度大幅增加。在综合考虑了无线多跳网流量场景中存在流量直接传输, 流量汇聚和流量分裂的特性后, 该文运用 3 种流量算子对系统进行建模, 并首次结合随机网络演算提出一种分析无线多跳网延迟边界的方法。仿真结果表明, 理论边界可以准确地预测无线多跳网的延迟情况, 且明显优于确定性延迟上界。

关键词: 无线多跳网; 流量算子; 随机网络演算; 随机延迟边界

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)04-0933-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01029

Stochastic Delay Boundary Analysis of Multi-hop Wireless Networks Based on Stochastic Network Calculus

Yu Li Luo Jing-jing Jiang Lie Zhang Jie

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To guarantee the QoS of multi-hop wireless networks, it is necessary to analyse the delay bound of the system. Based on stochastic network calculus, this paper models traffic flowing scenarios of multi-hop wireless networks utilizing three flow operators and proposes a general analysis method for the delay performance. The method simplifies the analysis of complex traffic flowing scenarios and is capable of deriving the delay bound of different traffic flowing scenarios. Applying the method to a traffic flowing scenario, the method can accurately estimate the probability distribution of the actual delay. Furthermore, the analytical bound is very close to the simulation results and is obviously superior to the deterministic upper delay bound.

Key words: Multi-hop wireless networks; Traffic flow operators; Stochastic network calculus; Stochastic delay bound

1 引言

无线多跳网的多跳技术可以提高网络吞吐量和降低传输功耗, 因此近年来得到了广泛的发展和应用。但是, 多跳中继的应用却带来了额外的延迟。端到端延迟作为无线多跳网 QoS 中最重要的参数之一, 其边界分析的准确性直接影响到无线多跳网的 QoS 保障。目前无线单跳网的延迟性能分析方法已较为完善, 大体思路是运用节点到达流和离开流的信息来估计数据流在节点中的延迟。而在多跳网中, 由于中间节点的离开流很难描述, 并且存在数据流汇聚等情况, 单跳网的延迟分析方法无法直接应用于多跳网中。网络演算可以有效地克服传统统计理

论的这种缺陷, 运用最小加代数、到达曲线和服务曲线直观地分析网络的延时性能^[1-3]。目前大多数文献均致力于运用确定性网络演算分析无线多跳网最坏情况下的端到端延迟上界^[4-6], 然而无线多跳网处于最坏情况的概率非常低, 且确定性网络演算忽略了业务流的统计复用和无线多跳网的“随机服务质量”特性, 这样就导致了端到端延迟边界的过高估计。随机网络演算允许延迟的包络以一定的概率不受边界约束, 所以适合分析具有“随机服务质量”的无线多跳网。

近年来越来越多的文献开始运用随机网络演算分析无线多跳网的延迟边界。文献[7]考虑了 IEEE 802.11 协议的特征, 推导了无线自组网中突发流量的随机延迟边界, 文献[8]在无线 mesh 网络中考虑了一个带加性高斯白噪声的瑞利衰落信道以及最大多普勒频移的流动包模型, 推导了系统的端到端随机延迟边界, 文献[9]基于无线 mesh 网络的随机特

2012-08-10 收到, 2012-12-07 改回

国家自然科学基金重点项目(61231010), 国家自然科学基金(60972016), 湖北省杰出青年基金(2009CDA150)和国家 863 计划项目(2009AA01Z205)资助课题

*通信作者: 罗晶晶 luojingjing1989@gmail.com

性,利用随机网络演算构造了无线 mesh 网络单节点和多节点的流量模型。然而这些研究^[7-9]均是在具体的某种无线多跳网中和诸多前提条件下分析相应的延迟边界,其方法具有一定的局限性和特殊性。于是一些研究^[10-12]开始针对所有的无线多跳网进行延迟性能分析。文献[10]假设无线多跳网为多个节点串联的系统,流量模型为 EBB(Exponentially Bounded Burstiness)模型,运用随机网络演算推导出的系统服务曲线,分析了系统随机延迟边界与节点数的尺度关系。由于其分析的流量场景只有最简单的节点间直接传输的情况,且导入的流量模型具有特殊性,因此它的结论有一定局限性;文献[11]考虑了无线多跳网中流量汇聚的特点,运用网络演算分析了单个流的端到端延迟边界,然而无线多跳网中的流量场景是较复杂的,仅考虑流量汇聚的情况仍然相对单一;文献[12]在一个多个节点串联的系统中分析了重尾自相似流量的延迟性能边界,虽然文中到达曲线和服务曲线的形式具有较大的参考价值,但其建立的流量场景仍然相对简单。以上研究^[10-12]均是针对所有的无线多跳网,但这些方法都只考虑了无线多跳网流量场景的部分特点,适用的场景有限。因此,如何通过更全面地考虑无线多跳网流量场景的特点来适用更多更复杂的场景,并结合随机网络演算准确分析无线多跳网的随机延迟边界是本文研究的重点。

本文将全面考虑无线多跳网流量场景的特性,并将这些特性转化成便于分析的 3 种流量算子:流量传输算子、流量汇聚算子和流量分裂算子^[13],联合运用 3 种算子对流量场景进行建模,然后提出了基于随机网络演算的无线多跳网延迟性能分析方法。该方法可以简单直观地分析无线多跳网中多流量多节点的复杂流量场景,且仿真结果表明,该方法可以准确有效地预测系统的延迟情况。本文余下部分组织如下:第 2 节简单介绍了随机网络演算的相关理论;第 3 节运用随机网络演算推导了每种算子的随机延迟边界;第 4 节在第 3 节的基础上提出了无线多跳网延迟性能分析的方法,并运用该方法分析了 LFSN 流量在无线多跳网中的随机延迟边界;第 5 节是本文的仿真,验证了理论边界的准确性和有效性;第 6 节是本文的总结。

2 随机网络演算理论

运用累积函数定义到达过程,服务过程和离开过程,即数据流在时间间隔 $[0, t]$ 内的数据量的累积。定义 $A(t)$ 为到达过程, $A^*(t)$ 为离开过程, $S(t)$ 为节点的服务过程。且对于 $0 \leq s \leq t$, $A(s, t) = A(t) - A(s)$, $A^*(s, t) = A^*(t) - A^*(s)$, $S(s, t) = S(t) - S(s)$ 分

别表示时间间隔 $[s, t]$ 内每个过程的数据量。在随机网络演算中,允许这些过程以一定的概率违背约束条件。约束条件和违背概率函数分别在两个函数集 F 和 F^* 中定义,其中 F 为非负广义递增函数集, F^* 为非负广义递减函数集。

定义 1 最小加卷积^[14]:定义函数 f 和 g 的最小加卷积 \otimes 运算为

$$(f \otimes g)(t) = \begin{cases} \inf_{0 \leq s \leq t} \{f(t-s) + g(s)\}, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

定义 2 随机到达曲线^[14]:给定函数 $\alpha \in F$ 和 $f \in F^*$,若对于任意 $t \geq 0$ 和 $x \geq 0$,到达过程 $A(t)$ 满足:

$$P \left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} [A(s, t) - \alpha(t-s)] > x \right\} \leq f(x) \quad (2)$$

则称 $\alpha(t)$ 为 $A(t)$ 的随机到达曲线,违背概率函数为 $f(x)$,表示为 $A \sim_{ub} \langle f, \alpha \rangle$ 。

定义 3 随机服务曲线^[14]:给定函数 $\beta \in F$ 和 $g \in F^*$,若对于任意 $t \geq 0$ 和 $x \geq 0$,到达过程 $A(t)$ 和离开过程 $A^*(t)$ 满足:

$$P \left\{ \sup_{0 \leq s \leq t} [A \otimes \beta(s) - A^*(s)] > x \right\} \leq g(x) \quad (3)$$

则称服务节点为到达过程提供随机服务曲线 $S \sim_{sc} \langle g, \beta \rangle$ 。

定理 1 随机延迟边界^[14]:若到达过程 A 满足 $A \sim_{ub} \langle f, \alpha \rangle$,服务节点的随机服务曲线为 $S \sim_{sc} \langle g, \beta \rangle$,则对于任意 $t \geq 0$ 和 $x \geq 0$,到达过程 A 在时刻 t 的延迟 $D(t)$ 满足:

$$P \{D(t) > x\} \leq f \otimes g \left(\inf_{s \geq 0} [\beta(s) - \alpha(s-x)] \right) \quad (4)$$

定理 2 节点串联定理^[14]:在一个 N 个节点串联的系统中,若每个节点 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 对到达过程提供随机服务曲线 $S^n \sim_{sc} \langle g^n, \beta^n \rangle$,则系统的随机服务曲线为 $S \sim_{sc} \langle g, \beta \rangle$ 。其中 $\beta(t) = \beta^1 \otimes \beta^2 \otimes \dots \otimes \beta^N(t)$, $g(x) = g^1 \otimes g^2 \otimes \dots \otimes g^N(x)$ 。

3 系统模型

在如图 1 所示的无线多跳网流量场景中,两个节点之间的通信是单跳或者多跳的,每个节点既是终端、接入设备,也是路由器。3 个源节点 S_1 , S_2 和 S_3 产生的数据流经过中间节点到达目的节点,其中中间节点作为路由器处理和转发分组数据。路由节点有多个邻居节点,只要在传输范围内均可以选择跟邻居节点进行通信。因此节点 1 可能会处理来自两个源节点 S_1 , S_2 的数据流,节点 2 则直接将数据流传输给某个节点,节点 3 可能会将数据流转发

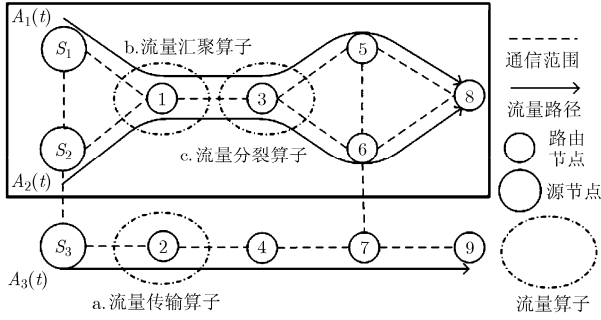


图 1 系统模型

给多个邻居节点。所以无线多跳网的流量场景存在直接传输、汇聚和分裂 3 种情况。因此，本文将以上 3 种流量特性转化成便于分析的 3 种流量算子：流量传输算子、流量汇聚算子和流量分裂算子，运用 3 种算子对该流量场景进行建模，并在第 4 节联合利用 3 种算子对无线多跳网的随机延迟边界进行分析。在这一小节，本文将首次运用随机网络演算分别推导随机到达流经过 3 种算子处理后的随机延迟边界。每种算子的推导分别如下：

(1)流量传输算子 在流量传输算子中，节点只接收一条数据流，然后输出一条数据流(如图 2(a)所示)。节点无损，有一个缓存队列，数据流在队列中按照 FIFO 规则接受服务，当队列不为空时，节点以恒定速率提供服务。假设节点的服务速率为 C ，即服务曲线 $\beta(t) = Ct$ 。 $A(t)$ 表示 t 时刻到达过程的累积流量，且 $A \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ 。根据定理 1 和式(1)，可以推导出 $A(t)$ 在时刻 t 的随机延迟边界为

$$\begin{aligned}
 &P\{D(t) > x\} \\
 &\leq f \otimes g \left(\inf_{s \geq 0} [\beta(s) - \alpha(s - x)] \right) \\
 &= \inf_{0 \leq u \leq x} \left\{ f \left(\inf_{s \geq 0} [\beta(s) - \alpha(s - x)] - u \right) + g(u) \right\} \\
 &= \inf_{0 \leq u \leq x} \left\{ f \left(\inf_{s \geq 0} [\beta(s) - \alpha(s - x)] - u \right) \right\} \\
 &= f \left(\inf_{s \geq 0} [\beta(s) - \alpha(s - x)] \right) \\
 &= f \left(\inf_{s \geq 0} [C(s + x) - \alpha(s)] \right) \tag{5}
 \end{aligned}$$

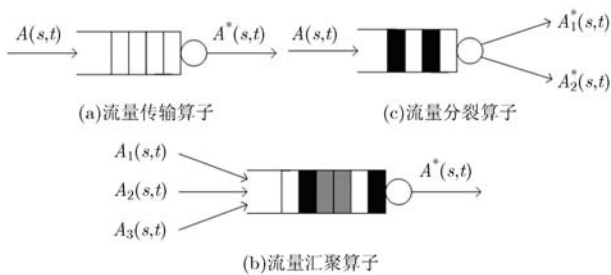


图 2 3 种流量算子

(2)流量汇聚算子 在流量汇聚算子中，节点负责汇聚和转发流量，多条数据流在节点汇聚后输出一条数据流(如图 2(b)所示)。假设数据流之间互相独立，且共享节点带宽，因此需要选择一个服务策略来为每条数据流分配带宽。由于本文分析的流量是非均匀的、突发的，因此本文选择权重比例分配策略^[15]来进行带宽分配。

权重比例分配策略综合考虑了单条流的到达速率和所分配的权重这两个因素来进行带宽分配。若有 N 条数据流，且数据流 $i(i = 1, 2, \dots, N)$ 的到达速率为 ρ_i ，假设数据流 i 所分配的权重为 ω_i ，则分配给数据流 i 的带宽为

$$C_i = \frac{\omega_i \rho_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i \rho_i} C \tag{6}$$

假设数据流 i 在 t 时刻的累计到达流 $A_i(t)$ 满足 $A_i \sim_{vb} \langle f_i, \alpha_i \rangle$ ，节点为数据流 i 提供的服务曲线为 $\beta_i(t) = C_i t$ ，则根据式(5)，可以推导出数据流 i 在时刻 t 的随机延迟边界为

$$P\{D_i(t) > x\} \leq f_i \left(\inf_{s \geq 0} [C_i(s + x) - \alpha_i(s)] \right) \tag{7}$$

(3)流量分裂算子 在流量分裂算子中，节点负责接收和分配流量，单条数据流经过节点后分裂成多条数据流(如图 2(c)所示)。该算子可以将单个链路的流量分摊给多个链路，从而达到均衡负载和提高资源利用率的目的。在流量分裂机制中，每条分裂出的数据流经过不同的路径到达目的节点。本文选择平均流量分裂(Even Traffic Splitting, ETS)机制进行分析，即分裂因子 γ_j 均等。

假设一条数据流在节点中被分裂成 M 个离开流，给第 $j(j = 1, 2, \dots, M)$ 条离开流 A_j^* 分配一个分裂因子 $\gamma_j(\sum \gamma_j = 1)$ ，即数据流沿着 A_j^* 所在的路径传输的概率为 γ_j 。在这种机制下，设 A_j 为离开流 A_j^* 在节点中的到达流。

若到达流 $A(t)$ 满足 $A \sim_{vb} \langle f, \alpha \rangle$ ，节点服务速率为 C ，则离开流 A_j^* 对应的到达流 A_j 满足 $A_j \sim_{vb} \langle f_j, \gamma_j \alpha \rangle$ ，且该到达流在节点中以速率 C 接收服务，即 $\beta_j(t) = Ct$ 。

由式(5)，可以推导出到达流 A_j 在时刻 t 的随机延迟边界为

$$P\{D_j(t) > x\} \leq f_j \left(\inf_{s \geq 0} [C(s + x) - \gamma_j \alpha(s)] \right) \tag{8}$$

4 无线多跳网的延迟性能分析

4.1 无线多跳网延迟边界分析方法

上一节分别推导了 3 种流量算子对应的随机延迟边界，本小节将针对一个具体的无线多跳网流量

场景,运用3种流量算子对系统进行建模,并联合随机网络演算提供一种直观准确分析多个独立随机到达流在无线多跳网中传输的随机延迟边界的方法。

以图1中的流量场景为例,由于数据流 A_3 的传输路径为目前分析最为普遍的多节点串联路径,且分析此类路径的方法无法直接应用于数据流 A_1 和 A_2 的延迟边界分析中,因此本文选择分析 A_1 和 A_2 的延迟边界。观察图1中方框内的流量场景, A_1 和 A_2 在系统中的传输路径为:源节点 S_1 和 S_2 分别产生两条数据流 A_1 和 A_2 , A_1 和 A_2 在节点1汇聚,然后在节点3分裂成两条数据流,两条数据流分别经过节点5和节点6传输后到达节点8。

延迟边界分析的步骤如下:

(1)建模数据流的传输路径:由于节点 S_1 和 S_2 生成的数据流模型相同,节点3的分裂机制为ETS,因此,对 A_1 的传输路径进行如下建模: A_1 经过节点1的汇聚算子、节点3的分裂算子和节点5的传输算子后到达目的节点8,同理, A_2 经过节点1的汇聚算子、节点3的分裂算子和节点6的传输算子后到达目的节点8。而在其他流量场景中,数据流模型不同,分裂机制不同,数据流传输路径的建模也不同。

(2)求出每条数据流的系统服务曲线:假设路由节点 $j = (1, 3, 5, 6)$ 的随机服务曲线满足 $S^j \sim_{sc} < 0, \beta^j >$, 节点的服务速率为 C , 由定理2,并结合步骤(1)中的数据流的传输路径,系统为数据流 $A_i (i = 1, 2)$ 提供的服务曲线为 $S_i \sim_{sc} < 0, \beta_i >$ 。其中 $\beta_1 = \beta^{11} \otimes \beta^{31} \otimes \beta^5$, $\beta_2 = \beta^{12} \otimes \beta^{32} \otimes \beta^6$, $\beta^{11} = \beta^{12} = Ct/2$, $\beta^{31} = \beta^{32} = Ct$, $\beta^5 = \beta^6 = Ct$ 。

(3)求出每条数据流的系统随机延迟边界:若 A_i 满足 $A_i \sim_{vb} < f_i, \alpha_i >$, 由式(5)和步骤(2)可以得出,数据流 $A_i (i = 1, 2)$ 在系统中的随机延迟边界为

$$P\{D_i(t) > x\} \leq f_i \left(\inf_{s \geq 0} [\beta_i(s+x) - \alpha_i(s)] \right), \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

4.2 方法应用

在图1所示的无线多跳网中导入基于LFSN (Linear Fractional Stable Noise)模型^[16]的数据流,然后运用该方法推导数据流 A_1 和 A_2 的随机延迟边界。

选择LFSN模型中的K-Model^[16]作为数据流模型,则 $A \sim_{vb} < f, \alpha >$, 其中

$$\begin{cases} \alpha(t) = \rho t \\ f(x) = \min(1, C_M x^{-\alpha(1-H)}) \end{cases}$$

$$C_M = c_1^\alpha \int_R \sup_{t \in N} \left[\frac{(t-x)_+^{H-1/\alpha} - (-x)_+^{H-1/\alpha}}{1 + (\rho - c_2)t} \right]^\alpha dx$$

c_1 为尺度参数, c_2 为流量的平均值, H 为自相似系数, α 为特征指数。

A_1 和 A_2 在系统中的传输路径如图1所示,假设两条数据流随机到达曲线相同,节点的服务曲线为 $\beta^j = Ct (j = 1, 3, 5, 6)$ 。令 $\omega_1 = \omega_2$, 且节点3的分裂因子满足 $\gamma_1 = \gamma_2$, 按照本文提出的无线多跳网延迟边界的分析方法,可以推导出 $A_i (i = 1, 2)$ 的随机延迟边界为

$$\begin{aligned} & P\{D_i(t) > x\} \\ & \leq f_i \left(\inf_{s \geq 0} [\beta_i(s+x) - \alpha_i(s)] \right) \\ & = \min \left(1, C_{Mi} \left(\inf_{s \geq 0} [\beta_i(s+x) - \alpha_i(s)] \right)^{-\alpha(1-H)} \right) \\ & = \min \left(1, C_{Mi} \left(\inf_{s \geq 0} \left[\left[\frac{1}{2} C(s+x) \right] \otimes (C(s+x)) \right. \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \left. \otimes (C(s+x)) - \alpha_i(s) \right] \right)^{-\alpha(1-H)} \right) \\ & = \min \left(1, C_{Mi} \left(\inf_{s \geq 0} \left[\frac{1}{2} C(s+x) - \alpha_i(s) \right] \right)^{-\alpha(1-H)} \right), \\ & \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (10)$$

5 仿真结果分析

本节的目标是通过NS2仿真4.2节的流量场景,得到实际的延迟分布曲线,从而与本文的理论延迟边界(式(10))进行比较分析。仿真图1中无线多跳网的流量场景,并导入3条参数相同的LFSN数据流。源节点 S_1 , S_2 和 S_3 每单位时刻(时间间隔为1 s)按照LFSN模型生成一定的流量,分别产生3条数据流LFSN1, LFSN2和LFSN3。在系统中分别跟踪LFSN1和LFSN2每单位时刻流量的延迟情况进行统计分析,得到相应的延迟分布曲线。

接下来进行仿真参数和理论边界参数的设置。为了使LFSN模型生成的流量更接近实际流量,由对实际采集的网络流量数据集OctExt.TL进行的估算来设定仿真流量的参数^[16]: $\alpha = 1.63$, $H = 0.80$, $c_1 = 100$, $c_2 = 39$ 。LFSN模拟算法中的参数设置为: $m = 128$, $M = 2048$, $N = 4097$, $a = 1$, $b = 0$, $\beta = 1$ 。数据流的到达速率 $\rho = 10$ kbps, 突发流量 $\sigma = 5$ kbit, 节点的服务速率 $C = 1$ Mbps。同时将参数 c_1 , c_2 , α , H , ρ , C 的值代入到式(10)中得到具体的理论边界。

分别跟踪两条数据流的延迟后,得到如图3所示的延迟分布图。其中横坐标表示单位时间计数,纵坐标表示每单位时间数据流的延迟。观察图3(a)和图3(b)可知,宏观上,LFSN1和LFSN2的延迟分布情况大体相同,说明了具有相同模型参数的数据流延迟分布较一致;微观上,LFSN1和LFSN2每单位

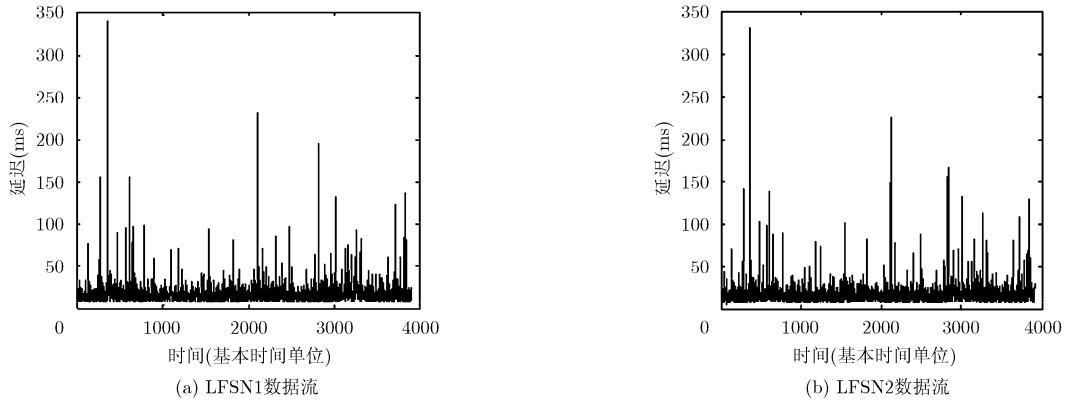


图3 LFSN1和LFSN2数据流的延迟仿真

时间数据流的延迟存在一定的差异，验证了数据流的随机性导致了延迟的随机性。根据仿真数据，LFSN1在系统中的延迟区间为7.5~339.3 ms，LFSN2在系统中的延迟区间为4.4~330.1 ms，经历较高延迟的概率较小，而两者最坏情况下的确定性延迟上界^[17]分别为 $D_1=549.6$ ms, $D_2=549.6$ ms，所以它是过高估计的。

图4是理论随机延迟边界与仿真得到的延迟分布曲线的对比图。图中，横坐标表示延迟标度 x ，纵坐标表示系统延迟 $D(t)$ 大于 x 的概率 $f(x)$ ，即违背概率。为了更直观地比较理论边界和仿真曲线，本文将图3中的两组延迟数据进行如下处理：分别统计出延迟大于每个延迟标度的概率，得到延迟与违背概率的关系，即图4中的两组仿真曲线，从而得到了与理论边界相同的形式。观察图4可知：首先，理论边界很好地约束了仿真曲线，当 $x \leq 12.53$ ms时，理论边界与仿真曲线几乎重合；当 $x > 12.53$ ms时，理论边界相对于仿真曲线给出了一个紧致の上界，其中，理论边界与仿真曲线的最大差距为14.32%，最小差距为0.01%，平均差距为5.14%，可见，理论边界可以准确地估计系统的延迟情况，验证了本文方

法的有效性；其次，由仿真曲线可知，延迟以较高概率分布在7~100 ms范围内，数据流经历较高延迟的概率较小，进一步说明了确定性延迟上界 D_1 和 D_2 过高估计了系统的延迟情况，因此，本文推导出的理论延迟边界相对于文献[17]中的确定性延迟上界更准确；再次，LFSN1和LFSN2数据流的随机性导致了两者每单位时间数据流的延迟的差异性(如图3所示)，而比较图4(a)和图4(b)中的仿真曲线，两者的总体延迟分布情况一致，同时两者的理论边界相同且很好地约束了仿真曲线，充分说明了该方法可以有效地克服数据流的随机性带来的预测延迟的不确定性，可以准确地估计无线多跳网的延迟分布。综上所述，该方法可以直观准确地分析无线多跳网的延迟性能，且相对于确定性延迟上界可以推导出更合理的随机延迟边界，有效地控制了资源配置浪费。由于篇幅有限，本文只分析和仿真了一个流量场景，但在无线多跳网的其他流量场景中，该方法同样适用。

6 总结

本文为无线多跳网复杂的流量场景提供了一种

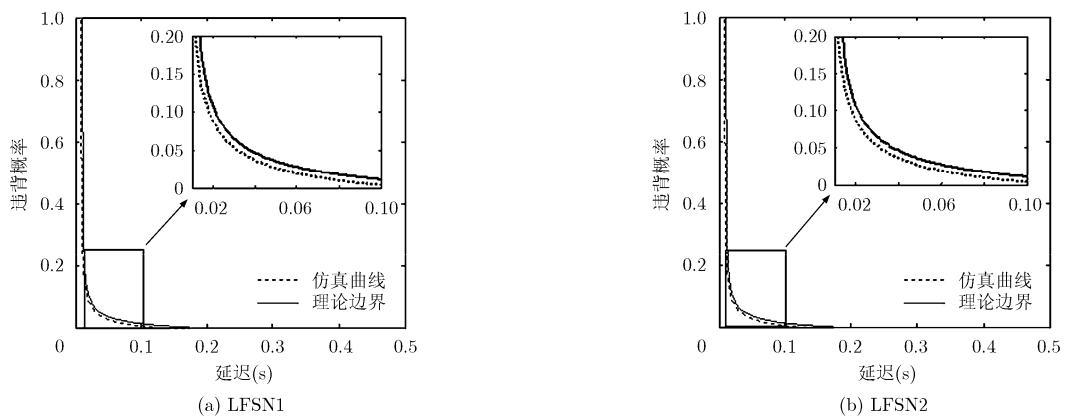


图4 理论随机延迟边界与仿真延迟分布曲线对比

直观准确的延迟边界分析方法。在综合考虑了无线多跳网流量场景中存在的流量直接传输、汇聚和分裂3种特性后,运用3种流量算子对系统进行建模,然后运用随机网络演算推导出系统的随机延迟边界。仿真结果验证了本文方法的准确性和有效性,且其推导出的延迟边界明显优于确定性延迟上界。该方法对无线多跳网的QoS保障问题有一定的参考价值,同时对无线多跳网传输策略的设计有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Burchard A, Liebeherr J, and Ciucu F. On superlinear scaling of network delays[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(4): 1043-1056.
 - [2] Ciucu F, Schmitt J, and Wang Hao. On expressing networks with flow transformations in convolution-form[C]. Proceedings of IEEE Infocom, Shanghai, 2011: 1979-1987.
 - [3] Yuan Yuan, Wu Kui, and Jia Wei-jia. Performance of acyclic stochastic networks with network coding[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(7): 1238-1245.
 - [4] Schmitt J B and Roedig U. Sensor network calculus-A framework for worst case analysis[C]. Proceedings of the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Marina del Rey, 2005: 141-154.
 - [5] Li Huan-zhong, Liu Xue, He En-bo, et al. End-to-end delay analysis in wireless network coding: a network calculus-based approach[C]. Proceedings of the International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), Minneapolis, 2011: 47-56.
 - [6] Avestimehr A S, Diggavi S N, and Tse D. Wireless network information flow: a deterministic approach[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2011, 57(4): 1872-1905.
 - [7] Abdrabou A and Zhuang W. Statistical QoS routing for IEEE 802.11 multihop ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(3): 1542-1552.
 - [8] Chen Yu, Chen Jia, and Yang Yang. Multi-hop delay performance in wireless mesh networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2008, 13(1): 160-168.
 - [9] 漆华妹, 陈志刚. 基于统计网络演算的无线mesh网络流量模型[J]. 通信学报, 2009, 30(7): 1-6.
 - Qi Hua-mei and Chen Zhi-gang. Traffic model for wireless mesh networks by statistical network calculus[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(7): 1-6.
 - [10] Ciucu F, Burchard A, and Liebeherr J. Scaling properties of statistical end-to-end bounds in the network calculus[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6): 2300-2312.
 - [11] Lenzini L, Martorini L, Mingozzi E, et al. Tight end-to-end per-flow delay bounds in FIFO multiplexing sink-tree networks[J]. *Performance Evaluation*, 2006, 63(9): 956-987.
 - [12] Liebeherr J, Burchard A, and Ciucu F. Delay bounds in communication networks with heavy-tailed and self-similar traffic[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(2): 1010-1024.
 - [13] Lee S J and Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), Helsinki, 2001: 3201-3205.
 - [14] Jiang Yu-ming. A basic stochastic network calculus[C]. Proceedings of ACM SIGCOMM, Pisa, 2006: 123-134.
 - [15] Zhang Hui. Service disciplines for guaranteed performance service in packet switching networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1995, 83(10): 1374-1396.
 - [16] Karasaridis A and Hatzinakos D. Network heavy traffic modeling using α -stable self-similar processes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(7): 1203-1214.
 - [17] She Hui-min, Lu Zhong-hai, Jantsch A, et al. Deterministic worst-case performance analysis for wireless sensor networks[C]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference(IWCMC), 2008: 1081-1086.
- 喻 莉: 女, 1970年生, 教授, 博士生导师, 武汉光电国家实验室(筹)宽带中心主任, 研究方向为计算机网络与多媒体通信。
- 罗晶晶: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为网络演算。
- 姜 烈: 男, 1988年生, 硕士生, 研究方向为网络演算。