

WSN 中单数据流端到端延迟上界研究*

李翠^{1,2}, 巨永锋¹, 李雪¹

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064; 2. 江西赣粤高速公路股份有限公司, 南昌 330025)

摘要: 在 WSN 中采用独立分析(SFA)法求得的单数据流端到端延迟上界有时比整体分析(TFA)法求得的总数据流端到端延迟上界要大,这不符合物理意义。针对这一问题,分析了现有 TFA 法与 SFA 法在数据流服务分配机制上的差别,并指出这两种方法求得的延迟上界不具有可比性。随后在修正流经节点数据流输出上界的基础上,推导出与 TFA 法数据流服务分配机制相匹配的单数据流端到端延迟上界表达式。公式推导与数值分析结果均表明,本方法求得的单数据流端到端延迟上界能够被 TFA 法总数据流端到端延迟上界所包络,符合物理意义且更精确。

关键词: 无线传感器网络; 网络微积分; 延迟上界; 单数据流; 服务速率

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1820-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.057

Research on single flow end-to-end delay upper bound in WSN

LI Cui^{1,2}, JU Yong-feng¹, LI Xue¹

(1. School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Jiangxi Ganyue Expressway Co., Ltd., Nanchang 330025, China)

Abstract: Present research shows that the single flow end-to-end delay upper bound got by separate flow analysis(SFA) method is sometimes greater than the bound of total flow by total flow analysis(TFA) method in WSN, which is out of physical meanings. Aiming at the above problem, this paper firstly analyzed the difference in data flow's service allocation mechanism between current TFA and SFA, with pointing out that the delay bounds got by these two methods were incomparable. Finally, on the basis of the improved output bound of a data flow traversing a node, it deduced the expression of single flow end-to-end delay upper bound, which accorded with the data flow's service allocation mechanism of TFA. Both of the derived expression and numerical results illustrate that the single flow end-to-end delay upper bound got in this paper, which can be bounded by the bound of total flow by TFA, is physically significant and more accurate.

Key words: wireless sensor network(WSN); network calculus; delay upper bound; single flow; service rate

0 引言

近年来,有关无线传感器网络(WSN)的研究越来越受到关注^[1]。其中,在实时传输应用领域(如环境监测、火灾预警和医疗监护等)^[1~3],利用网络微积分^[4,5]求解数据传输的延迟上界成为研究热点^[6~14]。

目前,基于网络微积分求解网络数据流端到端延迟上界的方法有两种:

a)整体分析(TFA)法^[6~10]。该方法首先分别计算流经单个节点的总数据流的延迟上界,然后将传输路径上各节点的延迟上界进行累加。TFA 法求得的总数据流端到端延迟上界较宽松,但计算简单,适用于包括 WSN 在内的各种网络。

b)独立分析(SFA)法^[9,11~15]。该方法先对每个节点配置严格服务曲线,再求解各节点提供给单数据流的剩余服务曲线,进而获得单数据流端到端延迟上界。SFA 法求得的单数据流端到端延迟上界具有不确定性,需要通过优化才能获得最小值,同时,因受到节点严格服务曲线的制约,因此 SFA 法在 WSN 中的应用具有一定局限性。

本文对 WSN 深入分析了 TFA 法和 SFA 法在数据流服务分配机制上的差别,指出了现有 SFA 法在 WSN 中应用的局限性,并在修正流经节点数据流输出上界^[10]的基础上,最终获得与现有 TFA 法服务分配机制相对应的单数据流端到端延迟上界表达式。

1 网络微积分背景知识

网络微积分是一种基于最小加代数理论的队列管理数学工具。它主要用于网络建模和定量分析。与传统的队列管理理论相比,网络微积分更加关注网络性能的最坏情形而非一般情形。利用它可以求解节点缓冲区容量需求、网络传输延迟以及节点带宽需求等一些基本属性。相关定义如下:

定义 1 广义增函数。对于 $\forall s \leq t$, 若 $f(s) \leq f(t)$ 均成立, 则称 f 为广义增函数。

定义 2 广义增函数集合。若 $F = \{f(t) | f(t) = 0, \forall t < 0; f(s) \leq f(t), t \in [0, +\infty]\}$, 则称 F 为广义增函数集合。

定义 3 最小加卷积。对于 $\forall f, g \in F$, 函数 f 和 g 的最小加卷积运算为

收稿日期: 2012-09-21; 修回日期: 2012-11-11 基金项目: 西安市科技局工业应用技术研发项目(CXY1120)

作者简介: 李翠(1981-), 女, 山西壶关人, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络(licui1981@yeah.net); 巨永锋(1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为智能控制、无线传感器网络; 李雪(1980-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、智能测控、图像处理。

$$(f \otimes g)(t) = \inf_{0 \leq s \leq t} \{f(t-s) + g(s)\} \quad (1)$$

定义4 最小加反卷积。对于 $\forall f, g \in F$, 函数 f 和 g 的最小加反卷积运算为

$$(f \oslash g)(t) = \sup_{s \geq 0} \{f(t+s) - g(s)\} \quad (2)$$

定义5 到达曲线。给定一个广义增函数 $\alpha \in F$, 若输入流的累积函数 R 对任意时刻 s 和 t 均满足

$$R(t) - R(s) \leq \alpha(t-s) \Leftrightarrow R \leq R \otimes \alpha \quad (3)$$

其中, $0 \leq s \leq t$, 则称 α 是 R 的到达曲线。

定义6 服务曲线。给定一个广义增函数 $\beta \in F$, 对于一个系统 S 和流经 S 的流, 在输入端和输出端该流的累积函数分别为 R 和 R^* , 当且仅当

$$R^*(t) \geq R(s) + \beta(t-s) \Leftrightarrow R^* \geq R \otimes \beta \quad (4)$$

其中, $0 \leq s \leq t$, 则称 β 是 S 为数据流提供的服务曲线。

定义7 严格服务曲线。给定一个广义增函数 $\beta \in F$, 对于一个系统 S 和流经 S 的流, 在任意繁忙时段 $[t, t+u]$, 输出端该流的累积函数 R^* 满足

$$R^*(t+u) - R^*(t) \geq \beta(u) \quad (5)$$

其中, $u \geq 0$, 则称 β 是 S 为数据流提供的严格服务曲线。严格服务曲线是服务曲线的特例。

在已知数据流到达曲线 α 和服务曲线 β 后, 可以得出如下几个定理。

定理1 积压上界。假设到达曲线为 α 的数据流通过一个所提供服务曲线为 β 的系统 S , 那么对任意时间 t , 系统 S 中积压的数据满足

$$R(t) - R^*(t) \leq v(\alpha, \beta) = \sup_{s \geq 0} \{\alpha(s) - \beta(s)\} \quad (6)$$

定理2 延迟上界。假设到达曲线为 α 的数据流通过一个所提供服务曲线为 β 的系统 S , 那么对任意时间 t , 数据流在 S 中的延迟满足

$$d(t) \leq h(\alpha, \beta) = \sup_{s \geq 0} \{\beta^{-1}(\alpha(t)) - t\} \quad (7)$$

定理3 输出上界。假设到达曲线为 α 的数据流通过一个所提供服务曲线为 β 的系统 S , 那么输出上界为

$$\alpha^*(t) = \alpha(t) \oslash \beta(t) \quad (8)$$

定理4 假设系统 S_1 和 S_2 提供的服务曲线分别为 β_1 和 β_2 , 系统 S_1 和 S_2 串联后提供的总服务曲线为 β , 则 $\beta = \beta_1 \otimes \beta_2$ 。

定理5 剩余服务曲线。假设某数据流 A 由 2 股单数据流 A_1 和 A_2 组成(到达曲线分别为 α_1 和 α_2)。 A_1 和 A_2 以任意顺序流经系统 S , 系统 S 提供严格服务曲线 β 为数据流 A 服务, 则有

$$\beta^1 = [\beta - \alpha_2]^+ \quad (9)$$

其中: $[x]^+ = \max(0, x)$ 。若 $\beta^1 \in F$, 则称 β^1 为 A_1 的剩余服务曲线。值得注意的是, β 必须是严格服务曲线, 否则式(9)不能成立^[5]。

2 流量模型与属性界限

2.1 感应数据到达曲线与节点服务曲线

假设 WSN 中传感器节点均为同构, 监测区域具有比较平均的数据突发率, 每个节点均能感应并接收到监测数据, 从平均的角度看, 可以认为不同的节点具有相同的监测数据量。监测数据输入对应节点(即源节点)经整形后满足漏桶管制(leaky bucket regulated)^[9], 其到达曲线表示为

$$\alpha_s(t) = \alpha_{rs, bs}(t) = r_s t + b_s \quad (10)$$

其中: r_s 和 b_s 分别为每个节点感应范围内监测数据的平均速率和突发数据大小, b_s 又称为漏桶容量。

因节点是同构的, 故假定每个节点均具有相同的服务能力, 其基于速率—延迟的服务曲线为

$$\beta_s(t) = \beta_{R_s, T_s}(t) = R_s \cdot (t - T_s)^+ \quad (11)$$

其中: R_s 为节点服务速率, 且 $R_s \geq r_i$; T_s 为数据在节点缓冲区中的最大调度延迟; $(x)^+ = \max(0, x)$ 。为保证网络服务质量, 往往要求 $R_s \geq r_i$, 因此 β_s 并非严格服务曲线。

2.2 TFA 法与 SFA 法服务分配机制分析

定义监测数据从源节点传输到基站形成的数据流为单数据流。在 WSN 中, 数据流往往需要通过其他节点多跳转发才能抵达基站。数据流往基站方向汇聚并呈现不均匀状态, 因此节点越靠近基站, 流经该节点的单数据流就越多。故定义流经节点的所有单数据流之和为流经该节点的总数据流。

目前, 求解数据流延迟上界的两种方法分别是 TFA 和 SFA。对于网络中的某一传输路径, 可以将其作为一个只接受数据流汇聚的系统, 系统内任一节点的输出数据全部往下一跳父节点传送。这个假定符合 WSN 中数据流往基站汇聚的规律。通常, 从源节点到基站形成的任意传输路径都是非封闭的系统, 路径中每个节点都有新的数据流输入, 各节点需要为流经它的总数据流而非仅为某一单数据流提供服务。因此, 不能把传输路径当做串联系统, 并直接利用定理 4 来进行总数据流的端到端延迟上界分析, 而应该采用 TFA 法, 先分别计算流经单个节点的总数据流的延迟上界, 然后再将传输路径上各节点的延迟上界进行累加, 最终得到端到端延迟上界。

如果能求得某单数据流流经传输路径上每个节点的剩余服务曲线(即该单数据流所独享的服务曲线), 那么对该单数据流而言, 这些仅提供相应剩余服务曲线的节点就形成了一个封闭的串联系统。这个串联系统只接受始发节点处该单数据流的输入, 该单数据流的传输是在这个封闭的串联系统内进行的, 因此可以直接利用定理 4 和 5 来获得这个串联系统提供给该单数据流的等效服务曲线, 进而通过定理 2 得到单数据流的端到端延迟上界。文献[6]指出, 基于定理 2、4 和 5 的 SFA 法求得的端到端延迟上界可能比 TFA 法求得的延迟上界大, 但并未分析原因。这与 TFA 法总数据流延迟上界能够包络 SFA 法单数据流延迟上界的常理相互矛盾。

究其原因, 在于两种方法对单数据流采用了不同的节点服务分配机制。对于 TFA 法, 流经某节点的总数据流为 $\alpha_i(t) = (1 + N_{i, \text{child_all}})(r_s t + b_s)^{[10]}$, 延迟上界为 $D_{i, \text{max}} = \frac{(1 + N_{i, \text{child_all}})b_s}{R_i} + T_i^{[10]}$ 。可以看出, 节点是以服务速率 R_i 先处理总数据流的突发数据 $(1 + N_{i, \text{child_all}})b_s$, 然后再以服务速率 r_i (因 $R_i \geq r_i$) 处理总数据流的其余输入。这个服务过程以先进先出(FIFO)的原则进行处理, 各单数据流平均分享节点的服务, 只有在处理完相同时刻的各单数据流之后, 节点才会接着处理下一时刻的数据。如果 WSN 未对感应数据进行优先级的预先设置, 这种节点服务方式是合理的, 而节点最大调度延迟 T_i 也能够包络单数据流的最大延迟。

与 TFA 法单数据流平均分享节点服务不同, SFA 法适用于有优先级区别的数据流。假定流经某节点 i 的总数据流包

括单数据流 A_1 和其他数据流 A_2 , 数据流 A_2 可能是其他单数据流之和。对于 SFA 法, 将式(9)进行扩展得到该节点提供给 A_1 的剩余服务曲线为

$$\beta_{i,\theta}^1(t) = (R_i - r_2) \left[t - \left(\frac{b_2 + r_2(T_i - \theta)}{R_i - r_2} + T_i \right) \right]^+ \times 1\{t > \theta\} \quad (12)$$

其中: $\theta \geq 0$ 且 θ 是可以优化的参数, 对于 WSN, 应该取 $\theta = 0^{[9]}$ 。式(9)和(12)反映出数据流 A_2 比数据流 A_1 具有更高的优先级。节点 i 以最高服务速率 R_i 处理完突发数据 b_2 之后, 再以服务速率 r_2 保证 A_2 后续输入数据的处理, 同时再用多余的服务速率 $(R_i - r_2)$ 给 A_1 提供服务。可以看出, 节点提供给单数据流 A_1 的剩余服务曲线 $\beta_{i,\theta}^1$ 服务速率降低的同时, 等效最大调度延迟却有所增大, 由此便可能造成 SFA 法计算所得端到端延迟上界比 TFA 法更大。文献[9]的方法 2 提供了利用 SFA 法进行延迟上界计算的步骤, 尽管算例表明其端到端延迟上界比 TFA 法的更小, 但针对 SFA 法有两个问题值得探讨:

a) 文献[9]中求解单数据流的剩余服务曲线是以各节点为各自的总数据流提供严格服务曲线为前提, 这造成每个节点都需要根据自身拓扑位置和总数据流流量来配置不同的服务速率。而在同构 WSN 中, 节点服务速率均相同, 可以随机布置, 除少数靠近基站的节点可能提供严格服务之外, 大部分节点的服务能力都有较大富余。因此式(9)和(12)只适用于服务速率异构且需进行确定性位置部署的 WSN, 具有极大的局限性。

b) 组成数据流 A_2 的各单数据流的优先级问题。数据流 A_2 不一定是单数据流, 可能由多条单数据流组成。式(12)体现了数据流 A_2 作为整体优先占用了节点提供的服务, 但组成 A_2 的各单数据流却平均分享了 A_2 所占用的服务, 并没有体现出 A_2 中各单数据流之间具有优先级差别。可以看出, 只将单数据流 A_1 排除在其他单数据流平均分享节点服务的集合之外是不合理的。因此, 直接在 WSN 中应用定理 5 来求解单数据流的剩余服务曲线值得商榷。

事实上, 因为两种方法采用了不同的数据流服务分配机制, 所以这两种方法的计算结果并不具有可比性, 这造成 TFA 法端到端延迟上界不一定能包络 SFA 法端到端延迟上界。

2.3 单数据流端到端延迟上界

综合 2.2 节分析, 由于在同构 WSN 中, 感应数据一般不区分优先级, 节点采用 FIFO 模式进行队列管理, 且节点不一定提供严格服务曲线, 因此采用一种改进的 SFA 法求解与 TFA 法数据流服务分配机制相对应的单数据流剩余服务曲线。

采用改进的输出上界 $\alpha^*(t) = \alpha(t)^{[10]}$, 得到流经节点 i 的总数据流为

$$\alpha_i(t) = \alpha_s(t) + \sum_{j=1}^{N_{i, \text{child}}} \alpha_{\text{child}(i,j)}^*(t) \quad (13)$$

其中: $\alpha_{\text{child}(i,j)}^*(t)$ 是节点 i 第 j 个子节点的数据流输出上界, $N_{i, \text{child}}$ 是节点 i 的子节点数量。

各单数据流平均分享节点服务, 容易得到流经节点 i 的单数据流剩余服务曲线为

$$\beta_i^1(t) = R_i(t - T_i)^+ = \frac{R_i}{1 + N_{i, \text{child_all}}}(t - T_i)^+ \quad (14)$$

其中: $N_{i, \text{child_all}}$ 是以节点 i 为必经路由的所有其他节点数量, 即流经节点 i 的所有转发感应数据流的数量。

对于经过 H 跳从源节点抵达基站的单数据流, 根据定理

4, 结合式(14)得到仅为单数据流提供服务的封闭串联系统等效服务曲线为

$$\beta^1 = \beta_1^1 \otimes \beta_2^1 \otimes \cdots \otimes \beta_H^1 = R_{\min}^1(t - \sum_{i \in H} T_i) \quad (15)$$

其中: $R_{\min}^1 = \min(R_1^1, R_2^1, \dots, R_H^1)$ 。

将式(14)代入式(7)中, 得到单数据流端到端延迟上界为

$$D_{\text{all, max}} = \frac{b_s}{R_{\min}^1} + \sum_{i \in H} T_i \quad (16)$$

而 TFA 法得到的数据流端到端延迟上界^[10]为

$$D'_{\text{all, max}} = \sum_{i \in H} \left(\frac{(1 + N_{i, \text{child_all}})b_s}{R_i} + T_i \right) \quad (17)$$

比较式(16)和(17)可知:

$$D_{\text{all, max}} \leq D'_{\text{all, max}} \quad (18)$$

仅当 $H=1$ 时, 式(18)取等号。

3 数值分析

以图 1 所示某树型拓扑结构 WSN 为例进行数值分析。假定为同构 WSN, $r_s = 0.5$ kbps, $b_s = 0.25$ KB, $R_s = 40$ kbps, $T_s = 0.05$ s, 服务速率和节点缓冲区都足够大。节点 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{22} 、 S_{31} 、 S_{32} 和 S_{41} 的端到端延迟上界如表 1 所示。

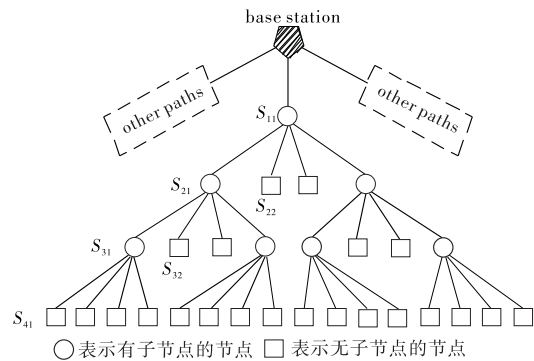


图 1 WSN 拓扑示意图

表 1 节点端到端延迟上界

节点	延迟上界	方法 1/s	方法 2/s	方法 3/s
S_{11}	$D_{1, \text{max}}$	/	0.23125	/
	$D_{\text{all, max}}$	0.23125	0.23125	0.35577
	$D_{1, \text{max}}$	/	0.13125	/
S_{21}	$D_{2, \text{max}}$	/	0.23125	/
	$D_{\text{all, max}}$	0.28125	0.36250	0.34237
	$D_{1, \text{max}}$	/	0.05625	/
S_{22}	$D_{2, \text{max}}$	/	0.23125	/
	$D_{\text{all, max}}$	0.28125	0.28750	0.40263
	$D_{1, \text{max}}$	/	0.08125	/
S_{31}	$D_{2, \text{max}}$	/	0.13125	/
	$D_{3, \text{max}}$	/	0.23125	/
	$D_{\text{all, max}}$	0.33125	0.44375	0.38393
S_{32}	$D_{1, \text{max}}$	/	0.05625	/
	$D_{2, \text{max}}$	/	0.13125	/
	$D_{3, \text{max}}$	/	0.23125	/
	$D_{\text{all, max}}$	0.33125	0.41875	0.39094
S_{41}	$D_{1, \text{max}}$	/	0.05625	/
	$D_{2, \text{max}}$	/	0.08125	/
	$D_{3, \text{max}}$	/	0.13125	/
	$D_{4, \text{max}}$	/	0.23125	/
	$D_{\text{all, max}}$	0.38125	0.50000	0.43394

注: 方法 1 指本文改进的 SFA 法, 方法 2 指文献[10] TFA 法, 方法 3 指文献[9] SFA 法; 以上数值计算均采用文献[10]改进的输出上界

由表 1 可知, 方法 1 求得的 $D_{\text{all, max}}$ 最小, 方法 3 求得的 $D_{\text{all, max}}$ 存在比方法 2 求得的 $D_{\text{all, max}}$ 更大或更小并存的情况。调

整参数为 $b_s = 0.10 \text{ KB}$, $T_s = 0.10 \text{ s}$, r_s 和 R_s 不变,则会出现方法3求得的 $D_{\text{all,max}}$ 为最大的情况(限于篇幅,本文未列出相关数据)。这说明方法3与方法2求得的 $D_{\text{all,max}}$ 大小关系不稳定,与WSN的配置参数紧密相关。由于方法1与方法2采用了相同的数据流服务分配机制,故方法1计算结果能被方法2包络。

4 结束语

本文深入分析了TFA法与SFA法在数据流服务分配机制上存在的差别,指出这两种方法计算结果不存在可比性,并指出现有SFA法应用于WSN存在较大局限性。本文提出的改进SFA法,是一种与现有TFA法数据流服务分配机制相匹配的单数据流端到端延迟上界求解方法。公式推导与数值计算结果均表明,本文的改进SFA法求解结果能够被TFA法求解结果包络,符合物理意义且更精确。下一步研究重点在于如何确定节点最大调度延迟并进行实验研究,以验证利用网络微积分在WSN中求解延迟上界的准确性。

参考文献:

- [1] YICK J, MUKHERJEE B, GHOSAL D. Wireless sensor network survey [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(12): 2292-2330.
- [2] HAJELA R, GARIMELLA R, SABNANI D. LCSD: leveling clustering and sectoring with dissemination nodes to perform energy efficient routing in mobile cognitive wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 177-182.
- [3] IAKYILDIZ I, MELODIA T, CHOWDHURY K. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 921-960.
- [4] CHANG C S, CRUZ R, BOUDEC J L, et al. A min, + system theory for constrained traffic regulation and dynamic service guarantees [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2002, 10(6): 805-817.
- [5] LeBOUDEC J L, THIRAN P. A theory of deterministic queueing systems for the Internet [C]// LNCS, vol 2050. Berlin: Springer-Verlag,

2001.

- [6] SCHMITT J B, ROEDIG U. Sensor network calculus: a framework for worst case analysis [C]//Proc of International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. 2005: 141-154.
- [7] SCHMITT J B, ROEDIG U. Worst case dimensioning of wireless sensor networks under uncertain topologies [C]//Proc of the 3rd IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc, and Wireless Networks, Workshop on Resource Allocation in Wireless Networks. 2005.
- [8] SCHMITT J B, ZDARSKY F A, ROEDIG U. Sensor network calculus with multiple sinks [C]//Proc of the IFIP Networking 2006, Workshop on Performance Control in Wireless Sensor Networks. 2006: 6-13.
- [9] KOUBA A, ALVES M, TOVAR E. Modeling and worst-case dimensioning of cluster-tree wireless sensor networks [C]//Proc of the 27th IEEE Real-time Systems Symposium. 2006: 412-421.
- [10] 李翠, 巨永锋. 基于网络微积分的WSN属性界限研究[J]. *传感器与微系统*, 2012, 31(10): 34-37.
- [11] LENZINI L, MINGOZZI E, STEA G. Delay bounds for FIFO aggregates: a case study [C]//LNCS, vol 2811. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 31-40.
- [12] LENZINI L, MARTORINI L, STEA G. A methodology for deriving per-flow end-to-end delay bounds in sink-tree DiffServ domains with FIFO multiplexing [C]//LNCS, vol 3280. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 604-614.
- [13] SCHMITT J B, ZDARSKY F A, FIDLER M. Delay bounds under arbitrary multiplexing: when network calculus leaves you in the lurch [C]//Proc of the 27th IEEE International Conference on Computer Communications. 2008: 1669-1677.
- [14] KIEFER A, GOLLAN N, SCHMITT B J. Searching for tight performance bounds in feed-forward networks [C]//LNCS, Vol 5987. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 227-241.
- [15] ZHANG Lian-ming, YU Jian-ping, DENG Xiao-heng. Modelling the guaranteed QoS for wireless sensor networks: a network calculus approach [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, 2011(1): 82-95.

(上接第1819页)

4 结束语

结合多种性能参数进行网络拓扑推测, 仅需适量的计算, 不会随着网络规模的增加复杂性急剧增加, 即可实现不同网络负载的拓扑推测。通过NS-2仿真验证了该算法推测逻辑网络拓扑的正确性、有效性和优越性。下一步研究需要把算法推广到网状或者更复杂的拓扑结构中。

参考文献:

- [1] CASTRO R, COATES M, LIANG G, et al. Network tomography: recent developments [J]. *Statistical Science*, 2004, 52(3): 499-508.
- [2] 赵洪华, 陈鸣. 基于网络层析成像技术的拓扑推断[J]. *软件学报*, 2010, 21(1): 133-146.
- [3] 李贵山, 蔡皖东. 一种快速网络拓扑推断方法[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(20): 11-12.
- [4] CACERS R, DUFFIELD N, HOROWITZ J, et al. Loss based inference of multicast network topology [EB/OL]. [2007-01-20]. <http://www.kiskeya.net/ramon/work/pubs/cdc99.pdf>.

- [5] 吴文佳, 张建中, 张元鹏. 基于丢包率的多播网络拓扑推断算法[J]. *计算机工程*, 2010, 36(1): 124-126.
- [6] LAWRENCE E, MICHAILIDIS G, NAIR V. Network delay tomography using flexi cast experiment [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 2006, 68(3): 785-813.
- [7] 李勇军, 蔡皖东, 王伟, 等. 基于端到端链路利用的网络拓扑发现算法研究[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(2): 837-843.
- [8] SHIH M, HERO A O. Hierarchical inference of unicast network topologies based on end-to-end measurement [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2007, 55(5): 1708-1718.
- [9] CASTRO R, COATES M, GADHIK M. Maximum likelihood network topology identification from edge-based unicast measurements [C]//Proc of ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2002: 11-20.
- [10] 李勇军, 蔡皖东, 王伟, 等. 基于Manhattan距离的网络拓扑推断方法研究[J]. *计算机科学*, 2006, 33(11): 31-33.
- [11] 赵洪华, 陈鸣, 仇小锋, 等. Tomography技术中的多参数网络拓扑推断[J]. *北京邮电大学学报*, 2008, 31(4): 24-28.