

# 基于时空相关性的非平稳网络链路丢包率估计\*

周伟, 陈凯云, 费高雷, 胡光岷

(电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

**摘要:** 现有网络层析成像的研究大多假设链路状态在测量周期内保持不变, 因此难以捕获网络链路状态参数的时变特征。打破传统链路丢包率估计方法对链路状态平稳的假设, 提出一种基于时空相关性的网络链路时变丢包率估计方法。该方法使用状态转移矩阵描述链路丢包率的时空相关性并进行估计, 然后利用最小二乘法修正先验估计结果, 以获得链路时变丢包率估计结果。NS-2 仿真结果验证了提出的方法能有效追踪链路丢包率的变化, 且优于平稳链路丢包率估计方法。

**关键词:** 网络层析成像; 非平稳; 时空相关性; 丢包率

**中图分类号:** TP393.04      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2013)02-0557-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.066

## Estimation of non-stationary network internal loss based on temporal and spatial correlation

ZHOU Wei, CHEN Kai-yun, FEI Gao-lei, HU Guang-min

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communication Ministry of Education, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Most existing works of network tomography assumed that link states remained constant during measurement period, with the result that the time-varying characteristics of link state parameters could not be captured. This paper presented a temporal and spatial correlation based time-varying network link loss rate estimation method by releasing the stationary link state assumption. It used the state transition matrix to describe the temporal and spatial correlation of link loss rates, and estimated the link loss rates. It applied the least square algorithm to revise the prior estimates in order to obtain the time-varying link loss rates. NS-2 simulation results show that the proposed method is capable of tracking the variation of link loss rates effectively, and is superior stationary link loss rate estimation method.

**Key words:** network tomography; non-stationary; temporal and spatial correlation; loss rates

### 0 引言

随着网络技术的快速发展,网络的规模越来越大和复杂性越来越高,为了更好地设计、控制和管理网络,就需要实时、准确地掌握网络内部性能参数,如链路时延、链路丢包率等。传统方法通常通过网络内部节点协作获取网络内部性能参数,但协作会给网络的安全和性能带来负面影响,因此很多网络内部节点都不愿意协作,从而导致传统方法在实际应用中失效。

与传统方法不同,网络层析成像<sup>[1-3]</sup>通过在网络边缘节点之间主动地发送探测包,或被动地收集端到端信息,来获得路径性能参数,然后利用统计学的方法推断网络内部性能参数。该技术的最大优点是不需要网络内部节点的协作就可以获得网络内部性能参数,因此自提出以来就受到了国内外学术界的广泛关注,成为了网络测量领域的重要研究内容之一。

根据网络内部性能参数的统计特性,现有的网络层析成像方法可分为平稳和非平稳两类。平稳网络层析成像<sup>[4-6]</sup>通常假设网络链路状态在较长一段时间内平稳,内部性能参数在这段时间内保持不变,但实际网络流量的高突发性使得网络链

路状态会频繁发生改变,因此平稳方法所得的估计结果与真实情况不符。非平稳网络层析成像<sup>[7-9]</sup>抛弃了网络链路状态在一段较长时间内平稳的假设,估计时变的网络内部性能参数,因此可以获得更准确的估计结果。

本文研究非平稳的网络链路丢包率估计问题,以估计网络链路时变丢包率。针对该问题,本文提出了一种基于时空相关性的网络链路时变丢包率估计方法,分以下两个阶段对链路时变丢包率进行估计。

a) 训练阶段。通过发送探测包获得每条链路上时变传输概率的估计值,然后利用这些估计值计算链路传输概率估计的状态转移矩阵,获得链路传输概率的时空相关性。

b) 估计阶段。为估计某一时刻的链路传输概率,在不发送探测包的条件下,根据状态转移矩阵和上一时刻链路传输概率的估计值,计算出当前时刻链路传输概率的先验估计值,再根据路径传输概率和链路传输概率之间的约束关系,采用最小二乘法修正先验估计值,从而计算出链路传输概率的估计值。最后根据链路传输概率和链路丢包率之间的关系,估计出链路时变丢包率。

**收稿日期:** 2012-07-08; **修回日期:** 2012-08-16      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60872033)

**作者简介:** 周伟(1987-),男,四川广安人,硕士研究生,主要研究方向为网络层析成像(zw010215@163.com);陈凯云(1985-),男,硕士,主要研究方向为网络层析成像;费高雷(1982-),男,讲师,主要研究方向为计算机通信网、网络层析成像;胡光岷(1966-),男,教授,博导,主要研究方向为计算机通信网、网络行为学与安全。

### 1 网络链路时变丢包率估计

#### 1.1 链路丢包率估计

考虑一个给定源节点和多个目的节点的逻辑树模型  $T = (V, E)$ ,  $T$  表示节点  $V$  和链路  $E$  的集合, 节点  $V$  由源节点  $S$ 、内部节点和目的节点  $D$  组成。用  $P(S, D_i)$  表示源节点  $S$  到目的节点  $D_i$  的路径, 路径  $P(S, D_i)$  上的链路集合用  $\{e_{i,1}, e_{i,2}, \dots, e_{i,K}\}$  表示,  $K$  为该路径上的链路总数。

通常把链路丢包率估计<sup>[10]</sup>问题转换为链路传输概率估计问题。链路传输概率是一条链路上数据包成功传输的概率, 它与链路丢包率之和为 1, 因此估计得到链路传输概率, 可同时获得链路丢包率。本文以后部分主要讨论对链路传输概率的估计问题。

假设  $S$  向  $D_i$  发送的探测包数目为  $s_i$ ,  $D_i$  收到的探测包数为  $r_i$ , 则路径  $P(S, D_i)$  上的传输概率  $p_i = r_i/s_i$ 。容易知道路径传输概率为组成该路径的所有链路的传输概率之积, 设链路  $e_n$  的传输概率为  $\alpha_n$ , 则  $p_i = \prod_{n=1}^K \alpha_n$ , 等式两边同时取对数得到下面的和式

$$\lg p_i = \sum_{n=1}^K \lg \alpha_n \tag{1}$$

对于  $T$  中从源节点到每一个目的节点的路径都可以获得式(1)形式的等式, 联立这些等式可得以下线性方程:

$$Y = AX \tag{2}$$

其中:  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_M)^T$  表示从源节点到目的节点测量得到的  $M$  条路径传输概率的对数向量;  $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$  表示需要估计的  $N$  条链路传输概率的对数向量;  $A$  是路由矩阵, 若第  $i$  条路径包含  $j$  条链路, 则  $A_{i,j} = 1$ , 否则  $A_{i,j} = 0$ 。

对于树状拓扑, 由于从源节点到目的节点的路径条数要远小于链路条数, 即  $M < N$ , 因此式(2)欠定, 该方程没有唯一解。为了求得各链路的传输概率, 本文采用单播的背靠背包进行端到端测量, 然后利用背靠背包的性质获得扩展方程。

选择一对目的节点  $D_i$  和  $D_j$ , 用  $\langle i, j \rangle$  表示源节点  $S$  分别发往  $D_i$  和  $D_j$  的背靠背包组, 其中  $i$  包发往  $D_i$ ,  $j$  包发往  $D_j$ 。用  $B$  表示路径  $P(S, D_i)$  和路径  $P(S, D_j)$  的分支节点, 用  $\{e_{i,b}, e_{i,b+1}, \dots, e_{i,k}\}$  表示  $B$  到  $D_i$  的路径  $P(B, D_i)$  上的链路集合, 用  $p(i|j)$  表示路径  $P(B, D_i)$  上的传输概率。

利用背靠背包, 路径  $P(B, D_i)$  的传输概率可以表示为以下形式:

$$p(i|j) = \beta(i|j) \frac{r_{i,j}}{r_j} \tag{3}$$

其中:  $r_{i,j}$  表示  $i$  包和  $j$  包都被目的节点接收的背靠背包组的个数;  $r_j$  表示  $D_j$  节点接收到  $j$  包的背靠背包组个数;  $\beta(i|j)$  表示已知背靠背包组中  $j$  包被  $B$  节点接收的条件下,  $i$  包也被  $B$  节点接收的概率,  $\beta(i|j)$  表明了背靠背包组的相关性。

通常背靠背包组中的两个包的发送时间间隔十分短暂, 可以认为它们在经过的共享路径上具有相同的传输行为, 即它们可能一起被传输成功或一起被丢弃, 因此通常把  $\beta(i|j)$  值假设为 1<sup>[11]</sup>, 则式(3)中的路径传输概率  $p(i|j)$  为  $r_{i,j}/r_j$ 。

与式(2)同理, 可以得到如下方程:

$$\lg p(i|j) = \sum_{n=b}^K \lg \alpha_n \tag{4}$$

将式(3)(4)代入到方程(2)中, 就得到扩展后的方程组,

从而求出各条链路传输概率的估计值。

#### 1.2 链路时变传输概率估计模型

首先定义链路时变传输概率: 对于树状拓扑中除根节点以外的任一节点  $n$ , 用  $f(n)$  表示其父节点, 数据包从  $f(n)$  发送到  $n$ , 对应的链路为  $e$ , 则链路  $e$  的时变传输概率表示为

$$x_e(t) = \frac{r_n(t - \Delta t, t)}{s_{f(n),n}(t - \Delta t, t)} \tag{5}$$

那么, 链路  $e$  的时变丢包率为

$$\gamma_e(t) = 1 - x_e(t) \tag{6}$$

其中:  $s_{f(n),n}(t - \Delta t, t)$  表示在测量时间  $(t - \Delta t, t]$  内  $f(n)$  向  $n$  发送的包数目;  $r_n(t - \Delta t, t)$  表示在相同时间内  $n$  收到来自  $f(n)$  发出的包数目;  $\Delta t$  为统计时间。

与定义链路时变传输概率同理, 可定义路径时变传输概率, 即将上述的  $f(n)$  和  $n$  分别设为路径的起点和终点。根据路径传输概率和链路传输概率之间的关系, 可以建立路径时变传输概率和链路时变传输概率之间的系统方程:

$$Y(t) = AX(t) \tag{7}$$

其中,  $Y(t)$  和  $X(t)$  分别表示在  $t$  时刻的各路径传输概率和各链路传输概率。

### 2 基于时空相关性的链路时变丢包率估计

#### 2.1 链路传输概率的时空相关性

实际中, 各链路传输概率在时空上具有相关性。链路传输概率的空间相关性是指链路之间的传输概率具有相关性, 即某条链路传输概率的变化可能会影响其他链路的状态<sup>[12]</sup>; 另一方面, 由于链路丢包一般由网络中的突发性流量引起, 而现有的很多研究都表明网络流量具有时间相关性<sup>[13]</sup>, 这使得链路上相近时刻的传输概率也具有相关性。

对于  $t$  时刻, 用  $X(t)$  表示在该时刻的各链路传输概率, 用  $X(t+1)$  表示在下一时刻的各链路传输概率。本文考虑一个简单的模型, 假设链路传输概率在时间和空间上是线性相关的, 那么可以建立相邻两个时刻之间的链路传输概率的状态方程:

$$X(t+1) = CX(t) \tag{8}$$

其中:  $C$  表示状态转移矩阵。由上式知, 矩阵  $C$  的对角元素表示了对应链路传输概率在时间上的相关性, 而每一行的非对角元素反映了链路传输概率在空间上的相关性。

#### 2.2 训练阶段

这一阶段的目的是通过发送背靠背包获取到链路传输概率的估计值来计算链路传输概率的状态转移矩阵。

为了获取链路传输概率的估计值, 在发送背靠背包时, 统计源节点到目的节点各路径的传输概率和分支节点到目的节点各路径的传输概率, 根据对应的路由矩阵, 利用扩展后的方程式(2), 计算得到各链路传输概率的估计值。

状态转移矩阵  $C$  表明了链路在时空上的相关性, 对于  $N$  条链路,  $C$  可以表示为

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_N]^T \tag{9}$$

其中:  $C_i = [c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N}]$ ,  $1 \leq i \leq N$ 。

对于  $k$  时刻,  $1 \leq k \leq T - 1$ ,  $T$  为训练阶段的时刻数, 各条链路的传输概率  $X_k$  表示为  $X_k = [x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,N}]^T$ , 其中,  $x_{k,i}$  为该时刻第  $i$  条链路的传输概率。根据式(8), 可以定义误差

函数:

$$\sigma(k, i) = (x_{k+1, i} - C_i X_k)^2 \quad (10)$$

根据式(10),可以定义均值函数,即在  $T$  个时刻内,求误差的平均值,可表示为

$$J(X|C_i) = \frac{1}{T-1} \sum_{k=1}^{T-1} \sigma(k, i) = \frac{1}{T-1} \sum_{k=1}^{T-1} (x_{k+1, i} - C_i X_k)^2 \quad (11)$$

为求式(11)的最小值,分别对  $c_{i,1}, c_{i,2}, \dots, c_{i,N}$  求偏导,则得到如下方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial J(X|C_i)}{\partial c_{i,1}} = -\frac{2}{T-1} \sum_{k=1}^{T-1} x_{k,1} (x_{k+1, i} - C_i X_k) = 0 \\ \frac{\partial J(X|C_i)}{\partial c_{i,2}} = -\frac{2}{T-1} \sum_{k=1}^{T-1} x_{k,2} (x_{k+1, i} - C_i X_k) = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial J(X|C_i)}{\partial c_{i,N}} = -\frac{2}{T-1} \sum_{k=1}^{T-1} x_{k,N} (x_{k+1, i} - C_i X_k) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

解上述线性方程组可以得到  $C_i$ 。同理可以求出  $C_1, C_2, \dots, C_N$ ,从而估计出  $C$ 。

### 2.3 估计阶段

这一阶段的目的是通过背景流量采用最小二乘法<sup>[14]</sup>来估计链路传输概率。

用  $\hat{X}_0$  表示估计阶段初始时刻的链路传输概率的估计值,它等于训练阶段链路传输概率  $X$  的平均值;用  $\hat{X}_{k-1}$  表示在估计阶段  $k-1$  时刻链路传输概率的估计值;用  $X_k^-$  表示先验估计,即在估计阶段  $k$  时刻的各链路传输概率的估计初值。则有

$$\hat{X}_0 = E[X] \quad (13)$$

$$X_k^- = C \hat{X}_{k-1} \quad k \geq 1 \quad (14)$$

用  $Y_k$  表示在估计阶段  $k$  时刻获取到的各路径传输概率的观测值,用  $X_k$  表示在估计阶段  $k$  时刻的各链路传输概率,那么需要估计的链路传输概率就是利用最小二乘法求解下式的最优估计:

$$\hat{X}_k = \arg \min_{X_k} \| X_k - X_k^- \|^2 \quad \text{s.t.} \quad Y_k = AX_k \quad (15)$$

根据式(15)求出各链路传输概率的估计值,这些估计值在一定程度上符合真实链路传输概率的波动规律。

### 3 仿真

为了验证本文估计方法的有效性,采用 NS-2<sup>[15]</sup>对如图 1 所示的拓扑结构进行仿真。图中 0 为源节点,4~7 为目的节点,1~3 为内部节点,所有节点采用队尾丢包模式(drop tail)。link1~link7 为需要关注的链路,所有链路为 FIFO 队列,各链路参数设置如表 1 所示。仿真过程分为以下两阶段。

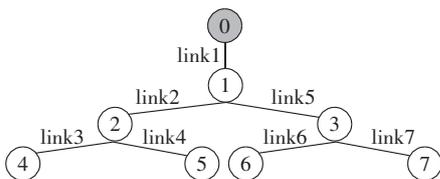


图 1 网络拓扑结构

a) 训练阶段。用 CBR(constant bit rate)形式的 UDP 流来模拟背靠背包,包组中每个包大小为 50 Byte,包组发送间隔为 1 ms,包间发送间隔为 1 ns。

b) 估计阶段。通过背景流量来估计链路丢包率,背景流量由 70 条 UDP 流和 70 条 TCP 流组成。其中 UDP 流为路

级 Pareto UDP 流,发包大小为 1 000 Byte,burst 时间为 200 ms, idle 时间为 200 ms,速率为 0.5 Mb,流启动和终止时间随机; TCP 流为路径级 FTP 应用 TCP 流,发包大小为 1 200 Byte,发送速率为 0.2 Mb,流启动和终止时间也随机。

表 1 各链路参数

链路(link)	1	2	3	4	5	6	7
带宽/Mbps	50	20	10	10	20	10	10
延迟/ms	10	10	10	10	10	5	5
队列长度	50	30	20	20	30	20	20

仿真中,首先通过源节点 0 向目的节点对(4,5),(5,6)和(6,7)发送背靠背包组,计算出链路传输概率的状态转移矩阵和估计阶段初始时刻链路传输概率的估计值。然后通过背景流量采用最小二乘法估计出各链路在估计阶段的传输概率,最终得到各链路在估计阶段的丢包率。

图 2 是任意选取的三条链路在估计阶段的时变丢包率估计结果。图中包含三条链路的实际的时变丢包率(实际丢包率)和估计的时变丢包率(估计丢包率)曲线(左图),实际的时变丢包率和用平稳方法估计出的 10 个时刻内的丢包率均值曲线(右图)。

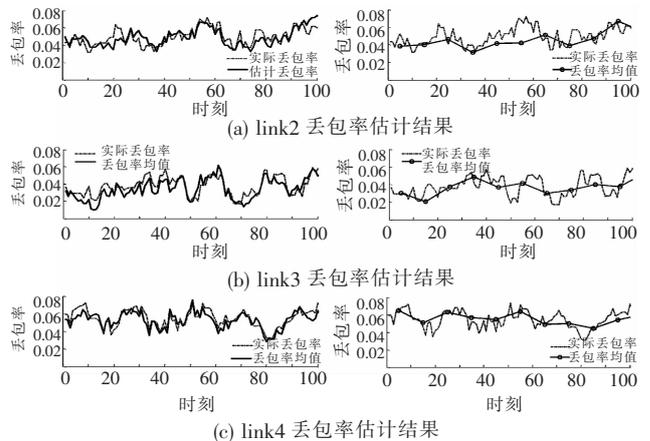


图 2 链路时变丢包率估计结果

从图 2 可以看出,链路实际丢包情况具有明显的时变特征,同时估计出的链路丢包率能有效地逼近实际的链路丢包率,而用平稳方法估计出的结果较平滑。两者相比,本文方法估计出的时变丢包率能更好地反映链路丢包率的时变特性;其他四条链路丢包率估计结果类似,说明本文方法的估计结果能更真实地反映实际网络链路丢包率的时变特性。

为了衡量本文估计方法的性能,定义均方根相对误差 RMSRE(root-mean-square relative error)来表示链路丢包率的估计值与实际值的整体偏差程度:

$$\text{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{x(i) - \hat{x}(i)}{x(i)} \right|^2} \quad (16)$$

其中: $M$  为统计时刻总数; $x(i)$  为时刻  $i$  的链路丢包率的实际值; $\hat{x}(i)$  为该时刻链路丢包率的估计值。计算出各条链路 RMSRE 值和 RMSRE 均值,如表 2 所示。

表 2 各链路丢包率的均方根相对误差

链路	1	2	3	4
RMSRE	0.164 3	0.133 5	0.241 5	0.128 7
链路	5	6	7	均值
RMSRE	0.121 5	0.147 5	0.200 2	0.162 5

由表 2 可以看出,RMSRE 值保持在 20% 左右,反映了链路丢包率的估计值与实际值之间的整体偏差较小,说明本文提出的方法具有较好的估计精度。(下转第 581 页)

估系统通常面临重复开发和建设的问题,存在开发成本高、不易部署的特点。

本文分析了卫星通信网评估系统的组成要素,将其抽象为评估者、评估对象、评估数据、评估约束、评估指标、评估方法、评估模型、评估结果等部分,利用 RDF/OWL 本体表示语言和 Protégé 本体建模工具构建了卫星通信网评估本体 SCNEO,对其中的要素和评估过程进行了形式化表示,最后对基于 SCNEO 所构建的评估系统的构建流程进行了设计,将其应用到一次评估任务中,证明了基于 SCNEO 的评估系统具有自适应能力。

#### 参考文献:

- [1] RODDY D. 卫星通信[M]. 郑宝玉,译. 4版. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] FIGUEIRA J, GRECO S, EHRGOTT M. Multiple criteria decision analysis, state of the art surveys[M]. Boston: Springer Science + Business Media, Inc, 2005: 3-24.
- [3] BORST W N. Construction of engineering ontologies for knowledge sharing and reuse[D]. Enschede: University of Twente, 1997.
- [4] GUARINO N, OBERLE D, STAAB S. What is an Ontology? [M]// STAAB S, STUDER R. Handbook on Ontologies. 2nd ed. London: Springer, 2009.
- [5] De NICOLA A, MISSIKOFF M, NAVIGLI R. A software engineering approach to ontology building[J]. Information Systems, 2009, 34(2): 258-275.
- [6] NECHES R, FIKES R E, GRUBER T R, et al. Enabling technology for knowledge sharing[J]. AI Magazine, 1991, 12(3): 36-56.
- [7] GRUBER T R. A translation approach to portable ontology specifications[J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199-220.
- [8] GUARINO N. Formal ontology and information systems[C]//Proc of International Conference on Formal Ontology in Information Systems. Amsterdam: IOS Press, 1998: 3-15.
- [9] CORCHO O, FERNANDEZ-LOPEZ M, GOMEZ-PEREZ A. Methodologies, tools and languages for building ontologies: where is their meeting point? [J]. Data & Knowledge Engineering, 2003, 46(1): 41-64.
- [10] McGUINNESS D L, Van HARMELEN F. W3C recommendation, OWL Web ontology language overview[S]. 2004.
- [11] MIZOGUCHI R, KOZAKI K. Ontology engineering environments [M]//STAAB S, STUDER R. Handbook on Ontologies. 2nd ed. London: Springer, 2009: 315.
- [12] KHONDOKER R M, MUELLER P. Comparing ontology development tools based on an online survey[C]//Proc of the World Congress on Engineering. London: Springer, 2011: 188-192.
- [13] HORRIDGE M. A practical guide to building OWL ontologies using Protégé 4 and CO-ODE[R]. Manchester: University of Manchester, 2011.
- [14] HU Gu-yu, YUAN Wei-wei, NI Gui-qiang, et al. Earth station based tactical satellite communication system evaluation[C]//Proc of International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence. 2012: 2666-2671.
- [15] GAMPANELLA G, RIBEIRO R A. A framework for dynamic multiple-criteria decision making[J]. Decision Support Systems, 2011, 52(1): 52-60.

(上接第559页)

#### 4 结束语

本文针对平稳网络层析成像很难真实地反映链路丢包率的时变特征,提出了基于时空相关性的链路时变丢包率估计方法,并且利用 NS-2 进行仿真,得到的结果比用平稳方法估计出的结果能更好地逼近真实链路丢包率曲线,同时具有较好的估计精度,从而验证了本文估计方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] CASTRO R, COATES M, LIANG Gang, et al. Network tomography: recent developments [J]. Statistical Science, 2004, 19(3): 499-517.
- [2] ERIKSSON B, DASARATHY G, BARFORD P, et al. Toward the practical use of network tomography for Internet topology discovery[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2010: 1-9.
- [3] CHEN Ai-you, CAO Jin, BU Tian. Network tomography: identifiability and Fourier domain estimation[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2010, 58(12): 6029-6039.
- [4] DUFFIELD N G, LO PRESTI F, PAXSON V, et al. Network loss tomography using striped unicast probes[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2006, 14(4): 697-710.
- [5] FIROOZ M H, ROY S. Network tomography via compressed sensing [C]//Proc of IEEE GLOBECOM. 2010: 1-5.
- [6] GU Yu, JIANG Guo-fei, VISHAL S, et al. Optimal probing for unicast network delay tomography[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2010: 1-9.
- [7] COATES M J, NOWAK R D. Sequential Monte Carlo inference of internal delays in nonstationary data networks[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(2): 366-376.
- [8] IROLDI E A, FALOUTSOS C. Recovering latent time-series from their observed sums: network tomography with particle filters[C]//Proc of the 10th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2004: 30-39.
- [9] SOULE A, SALAMATIAN K, NUCCI A, et al. Traffic matrix tracking using Kalman filters [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Inference, 2005, 33(3): 24-31.
- [10] NGUYEN H X, THIRAN P. Network loss inference with second order statistics of end-to-end flows[C]//Proc of the 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2007: 227-240.
- [11] COATES M J, NOWAK R D. Network loss inference using unicast end-to-end measurement[C]//Proc of ITC Conference on IP Traffic, Modeling and Management. 2000: 1-9.
- [12] GHITA D, ARQYRAKI K, THIRAN P. Network tomography on correlated links [C]//Proc of the 10th Annual Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2010: 225-238.
- [13] ZHANG Yin, ROUGHAN M, WILLINGER W, et al. Spatio-temporal compressive sensing and Internet traffic matrices [C]//Proc of ACM SIGCOMM Conference on Data Communication. New York: ACM Press, 2009: 267-278.
- [14] KAILATH T, SAYED A H, HASSIBI B. Linear estimation[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [15] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 57-125.