

# 分布式环境下动态网络时延矩阵正则化重建

王 聪, 张凤荔, 杨晓翔

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731)

**【摘要】**时延矩阵的重建是延迟敏感型应用优化的重要基础。在深入探讨分布式网络环境下一类基于矩阵分解的非梯度下降重建算法鲁棒性的基础上,分析了时延序列抖动对算法中的不适定与病态问题反演求解的强烈影响。为了降低这种影响,在引入正则化项改善系数矩阵谱特征的基础上,提出了一种时延序列的中值-卡尔曼时空联合滤波框架以抑制抖动污染,并通过统计特征的提取实现了拓扑突变感知,从而提高动态环境下的时延矩阵重建的性能。实验结果表明,滤波重建算法可在保留时延序列主要统计特征的基础上有效避免时延噪声造成的性能损失,并提供平稳的时延估计服务,始终将应力系数保持在较低的水平上。

**关键词** 滤波器; 网络测量; 矩阵重建; 正则化方法

**中图分类号** TP3936.01

**文献标志码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2014.06.022

## A Distributed Regularization Method for Latency Matrix Completion in the Wild

WANG Cong, ZHANG Feng-li, and YANG Xiao-xiang

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Latency matrix completion is an important foundation of latency-sensitive applications optimization. On the basis of the in-depth discussion of the robustness of a kind of matrix-factorization based non-gradient descending completion methods, this paper analyzes the significant impact to the intrinsic ill-posed and ill-conditioned inverse problems in the methods caused by the oscillations of the latency sequences. To mitigate the impact and improve the performance of the matrix completion methods in the wild, a regularization factor is introduced to improve the spectrum signature of the coefficient matrix, a median-Kalman filter, a time-spatial federated filtering scheme, is proposed to smooth the latency sequences, and then the topology mutation is obtained through extracting the statistic characters of the latency sequences. The experiments show that our method can avoid the performance degradation caused by noises without losing the major characteristics of the latency sequences, provide robust latency estimation capability, and keep the stress coefficient at a low level about 0.13 during the whole life cycle of the network.

**Key words** filter; internet measurement; matrix completion; regularization method

时延敏感型应用在网络环境下占据重要地位,诸多互联网应用性能,包括内容分发<sup>[1]</sup>、电子竞技<sup>[2-3]</sup>、云计算<sup>[4-5]</sup>及洋葱路由<sup>[6]</sup>等都强烈依赖于实体间的传输时延。点对点的测量虽然能准确感知时延矩阵的任一元素,却因为其 $O(n^2)$ 的测量负载而无法广泛地部署。如何利用有限的、不完整的测量数据尽可能精确地填充和重建时延矩阵,一直是一个热点研究领域。

文献[7]提出时延矩阵具备明显的近似稀疏性,即矩阵仅有少量的特征值具有较大的模,而这种稀疏特征已在文献[8]中得到了理论上的深入分析与阐

述。按照文献[8]的观点,虽然时延矩阵缺失元素的填充是一个欠定问题,但在施加必要的稀疏性约束以限制模型复杂度后,该问题一般可得到唯一的可行解<sup>[9]</sup>。这种约束通常为矩阵的零范数或迹范数的极小化约束。然而在具体的应用环境,如对等网络或分布式控制系统中,时延矩阵通常由全体网络节点共同维护,难以抽取一个全局一致的时延矩阵映像。折中方法是给出一个能满足重建矩阵稀疏性约束的零范数先验估计,并将重建矩阵的左右特征向量分布在全网中,使得每个参与计算的节点均持有一个行向量和列向量,节点可通过向量的点积运算

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2014-05-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA010706); 国家自然科学基金(61133016)

作者简介: 王聪(1981-), 男, 博士生, 主要从事IP网络测量与增强技术方面的研究。

补全与自身相关的时延矩阵元素。这种方法具备3个优良特性: 1) 能很方便地转化成线性的凸优化问题; 2) 能较好地处理三角违例(triangle inequality violations, TIVs)现象; 3) 适合处理非对称路由问题<sup>[10]</sup>。文献[11]提出基于矩阵分解的时延矩阵重建算法雏形, 但网络的不均匀性使得边缘节点坐标计算须对病态矩阵求逆, 导致计算精度不尽如人意<sup>[12]</sup>, 因此一直未能引起重视。文献[13]在此基础上提出基于Tikhonov正则化方法(或岭回归, 二者具有相同的数学形式)实现最小均方误差有偏估计的DMF算法。文献[14]进一步提出改进算法DMFSGD, 数值解的稳定性才得到显著的提升。而Phoenix算法继承了这一思路, 并通过非负约束赋予向量更可解释的物理意义<sup>[15]</sup>。但无论是DMF还是Phoenix的考察范围都仅限于静态矩阵, 而真实网络中节点间的传输时延是不稳定的, 对静态矩阵的研究显然不能完全拟合真实环境。目前时延抖动特性对矩阵重建的影响还未引起广泛关注, 现有的少量研究也仅限于考察抖动对梯度下降类算法的影响<sup>[16-18]</sup>。

为提高动态网络环境下时延矩阵重建数值解的稳定性, 本文讨论了传输时延的统计学特性及时延抖动对矩阵重建算法的影响, 力图以可接受的资源代价, 在保留时延序列主要统计学特征的前提下提供尽可能平稳的时延序列, 令时延矩阵的重建和估计更加普适和稳定。

## 1 时延矩阵重建的病态问题

### 1.1 时延矩阵重建算法概述

首先梳理分布式环境下时延矩阵重建的理论基础。具有 $P$ 个节点的网络存在 $P \times P$ 维的时延矩阵 $\mathbf{D}$ , 其中元素 $d_{i,j}$ 表示从节点 $i$ 到 $j$ 的传输时延。然而受限于测量和计算代价, 多数情况下 $\mathbf{D}$ 会缺失部分数据而变成不完整矩阵 $\mathbf{D}'$ 。时延矩阵重建的目的在于利用 $\mathbf{D}'$ 提供的不完整信息计算矩阵 $\mathbf{D}$ 的良好拟合矩阵 $\hat{\mathbf{D}}$ 。全局一致的不完整矩阵稀疏填充已在文献[19-20]中得到详细讨论。为了满足分布式环境的要求, 需给定矩阵 $\hat{\mathbf{D}}$ 的零范数先验估计 $N$ 以确保稀疏性, 于是零范数的极小化约束可松弛为等式约束, 时延矩阵的重建转化为如下最优化问题求解:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{\mathbf{D}}} & \left( \left\| P_{\Omega}(\hat{\mathbf{D}} - \mathbf{D}') \right\|_{\text{F}}^2 \right) \\ \text{s.t.} & \left\| \hat{\mathbf{D}} \right\|_0 = N \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\Omega$ 表示矩阵 $\mathbf{D}'$ 所有未缺失元素的下标子集;  $P_{\Omega}$ 表示 $\Omega$ 上的投影算子, 即只取 $\hat{\mathbf{D}} - \mathbf{D}'$ 在 $\Omega$ 中的

对应元素进行计算;  $\left\| \cdot \right\|_{\text{F}}$ 表示矩阵的Frobenius范数;  $\left\| \cdot \right\|_0$ 表示矩阵的零范数, 即矩阵的非零特征值个数。矩阵 $\hat{\mathbf{D}}$ 可表示为矩阵 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 的乘积:

$$\hat{\mathbf{D}} = \mathbf{U}\mathbf{V}^{\text{T}} \quad (2)$$

则 $d_{i,j}$ 可用矩阵 $\hat{\mathbf{D}}$ 的对应元素 $\hat{d}_{i,j}$ 拟合:

$$d_{i,j} \approx \hat{d}_{i,j} = \mathbf{u}_i \mathbf{v}_j^{\text{T}} \quad (3)$$

$\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 的行向量之间的计算无关, 因此可将其分布于全网共同维护: 令任一节点 $i$ 都持有矩阵 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 中对应的行向量 $\mathbf{u}_i$ 和 $\mathbf{v}_i$ , 只需获得其他节点持有的向量值, 即可计算与对方的近似时延, 大大减少了直接测量的资源开销。为保持命名一致, 称 $\mathbf{u}_i$ 和 $\mathbf{v}_i$ 为节点 $i$ 的坐标。对应的, 式(1)可分解为两个耦合子问题的联立:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{u}_i} \left( \sum_{(i,j) \in \Omega} (d_{i,j} - \mathbf{u}_i \mathbf{v}_j^{\text{T}})^2 \right) \\ \min_{\mathbf{v}_i} \left( \sum_{(i,j) \in \Omega} (d_{j,i} - \mathbf{u}_j \mathbf{v}_i^{\text{T}})^2 \right) \end{cases} \quad (4)$$

上式也可加入非负约束以避免 $\hat{\mathbf{D}}$ 出现负值元素。虽然式(1)的原始优化问题不是凸的, 但以上两个子问题却是光滑的凸优化问题, 具备良好的求解性质。即使在分布式环境下, 该问题也很容易通过轮换方向法交替更新 $\mathbf{u}_i$ 和 $\mathbf{v}_i$ :

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = (\mathbf{V}_j^{\text{T}} \mathbf{V}_j)^{-1} \mathbf{V}_j^{\text{T}} \mathbf{D}'_i \\ \mathbf{v}_i = (\mathbf{U}_j^{\text{T}} \mathbf{U}_j)^{-1} \mathbf{U}_j^{\text{T}} \mathbf{D}'_i \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{D}'_i$ 表示 $\mathbf{D}'$ 中第 $i$ 行的未缺失元素;  $(\mathbf{V}_j^{\text{T}} \mathbf{V}_j)^{-1} \mathbf{V}_j^{\text{T}}$ 和 $(\mathbf{U}_j^{\text{T}} \mathbf{U}_j)^{-1} \mathbf{U}_j^{\text{T}}$ 分别表示 $\mathbf{V}$ 和 $\mathbf{U}$ 中对应的行向量所组成系数矩阵的Moore-Penrose逆, 这也是IDES算法<sup>[11]</sup>的求解思路。

### 1.2 系数矩阵正则化处理

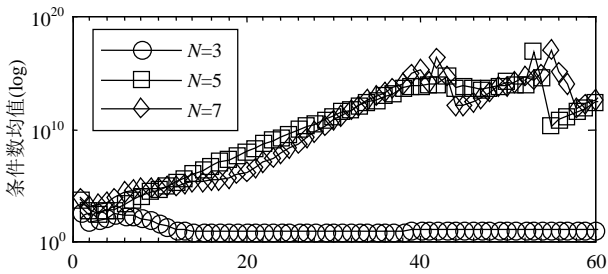
由于互联网时延空间中可能存在多子流形特征<sup>[21]</sup>, 使得预定义的 $N$ 难以保证最佳的拟合性。当 $N$ 过小时会造成逼近精度的剧烈下降, 而 $N$ 过大时又会导致维度冗余问题, 即拟合矩阵 $\hat{\mathbf{D}}$ 的谱中存在能量极小的元素, 加剧系数矩阵的病态性。对于网络边缘节点而言, 强烈的复共线性所导致的严重病态特征使得求逆运算无法进行。矩阵病态程度通常用条件数来衡量, 本文利用系数矩阵的谱范数计算条件数。 $\mathbf{V}_j^{\text{T}} \mathbf{V}_j$ 矩阵条件数演进如图1a所示, 随着 $N$ 的增加, 系数矩阵的条件数也急剧上升。当 $N=7$ 时, 节点系数矩阵的条件数均值上升到 $10^{10-20}$ 数量级, 不具备求得精确解的可能。

Tikhonov正则化方法是处理病态矩阵反演求解

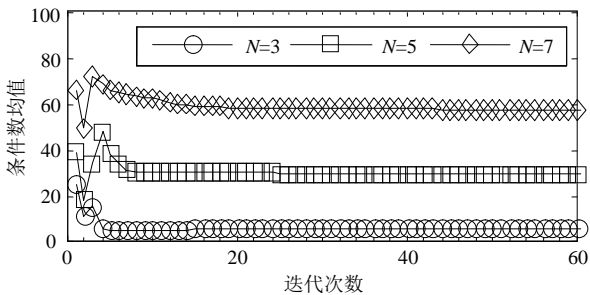
问题的经典算法, 最近才被应用于矩阵重建<sup>[20]</sup>。其基本思路为引入一个镇定泛函以改善矩阵的谱特征, 从而求得原问题的一个近似的正则化解。改进的正则化解虽然不具备最小二乘解的无偏性, 但它对病态数据的容忍能力远强于最小二乘解。式(4)的一个正则化解的解析形式为:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = (\mathbf{V}_j^T \mathbf{V}_j + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{V}_j^T \mathbf{D}'_i \\ \mathbf{v}_i = (\mathbf{U}_j^T \mathbf{U}_j + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{U}_j^T \mathbf{D}'_i \end{cases} \quad (6)$$

Tikhonov正则化方法和岭回归的区别仅在于正则化因子 $\lambda$ 的选取。若 $\lambda$ 的较优估计由实验给出<sup>[13]</sup>, 则消弭了这种区别。 $\mathbf{V}_j^T \mathbf{V}_j + \lambda \mathbf{I}$  矩阵条件数演进( $\lambda=100$ )如图1b所示, 可看出此时系数矩阵已变成一个良置(或近似良置)矩阵, 较原始矩阵更加稳定。因此求逆运算的稳定性可得到极大的改进, 静态时延矩阵重建的性能和计算精度得到了显著的提升。



a.  $\mathbf{V}_j^T \mathbf{V}_j$  矩阵条件数演进



b.  $\mathbf{V}_j^T \mathbf{V}_j + \lambda \mathbf{I}$  矩阵条件数演进( $\lambda=100$ )

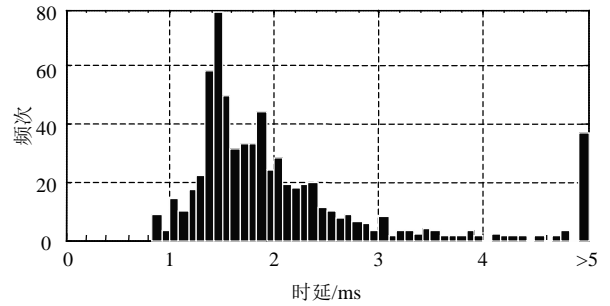
图1 系数矩阵病态特征分析

### 1.3 抖动对时延矩阵重建的影响

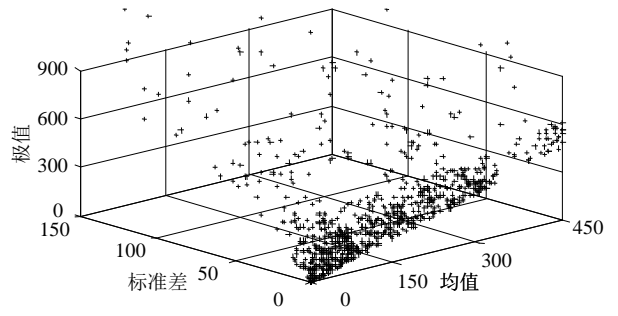
从式(6)可知正则化方法不存在梯度下降求解的缓冲过程, 因此对时延抖动会更加敏感。从理论角度看, 虽然正则化因子能部分改善矩阵病态特征, 但矩阵的逆算子是一个无界算子, 且正则化因子对矩阵谱的任意元素均呈等差放大作用, 当条件数过大时, 正则化因子对谱特征的改善有限, 时延序列的抖动对计算结果的扰动仍不可忽视。解决该问题可通过增大正则化因子 $\lambda$ 以抑制矩阵的病态特征, 然而过大的 $\lambda$ 必然意味着对最小二乘解的严重偏离, 并不利于矩阵重建精度的提升, 这一点已在文

献[13]中详细讨论。

从真实环境出发, 时延序列中的抖动现象十分普遍, 呈现出比静态矩阵丰富得多的统计学特性。



a. 原始时延序列统计直方图



b. 时延序列均值、标准差与极值的关系

图2 时延序列统计学特性

原始时延序列统计直方图如图2a所示, 时延序列中存在两种截然不同的噪声: 一种是近似服从高斯分布的零均值白噪声(white-noise), 一种是服从二项分布的盐噪声(salt-noise)。此外在表现为绝大多数情况下特定链路的传输时延会在某个常数值附近往复抖动, 而极少数情况下会出现极大延迟的毛刺。时延序列均值、标准差与数值的关系如图2b所示, 可看出多噪声叠加的现象不是偶然的, 虽然时延序列振幅的标准差普遍集中在20 ms以下, 但相当多的时延序列存在极度偏离均值的盐噪声。

## 2 抖动滤波与矩阵重建算法

显然, 将原始的、保留全部特征的时延序列代入矩阵重建过程是不必要也不合适的。如何保留序列中的有益特征是动态环境下时延矩阵重建的重要问题。矩阵重建要求时延序列尽可能平稳, 本文认为不包含盐噪声的时延序列最小均方误差估计是其最重要的有益统计特征。据前面结论可知, 序列抖动是两种不同类型噪声叠加的结果, 通过单一的滤波器完成对两种不同噪声的滤波处理是不现实的。在抖动抑制方面, 本文采用了两种滤波器的级联进行时空联合滤波: 首先利用中值滤波器清洗时延序列中显著异常的盐噪声, 然后将仅含有高斯白噪声

的时延序列输入卡尔曼滤波器进行过滤, 最终输出清洁时延序列的最小均方误差估计。

定义中值滤波器:

$$\hat{r}tt_{i,j}^{(k)} = \text{med}(\text{raw\_}r\text{tt}_{i,j}^{(k-m)}, \text{raw\_}r\text{tt}_{i,j}^{(k-m+1)}, \dots, \text{raw\_}r\text{tt}_{i,j}^{(k)}) \quad (7)$$

式中,  $\text{raw\_}r\text{tt}_{i,j}^{(k)}$  表示原始时延序列  $\text{raw\_}r\text{tt}_{i,j}$  的第  $k$  个元素;  $\hat{r}tt_{i,j}^{(k)}$  表示中值滤波器输出的对应的净化盐噪声的元素;  $m$  表示滤波器的滑动窗口尺寸;  $\text{med}(\cdot)$  算子取集合的中值元素。

设时延序列的高斯噪声  $\gamma_k \sim N(0, R)$ ,  $r\text{tt}_{i,j}^{(k)}$  后验估计误差的方差为  $P_k$ , 定义卡尔曼滤波器:

$$K_k = P_{k-1}(P_{k-1} + R)^{-1} \quad (8)$$

$$P_k = (I - K_k)P_{k-1} \quad (9)$$

$$r\text{tt}_{i,j}^{(k)} = r\text{tt}_{i,j}^{(k-1)} + K_k(\hat{r}tt_{i,j}^{(k)} - r\text{tt}_{i,j}^{(k-1)}) \quad (10)$$

下面讨论中值-卡尔曼滤波方案的一个潜在问题, 即对网络生命周期内可能发生的拓扑突变的处理。高斯白噪声的重要特点是序列围绕均值往复波动, 即  $P(\hat{r}tt_{i,j}^{(k)} > r\text{tt}_{i,j}^{(k)}) = P(\hat{r}tt_{i,j}^{(k)} < r\text{tt}_{i,j}^{(k)})$ , 显然拓扑结构突变所导致的时延序列变化并不满足该等式。换言之, 拓扑突变时时延序列出现在滤波值某一侧的概率会显著增加。可定义突变观测周期  $w$ , 周期性地通过对滑动窗口内  $\hat{r}tt_{i,j}^{(t)}$  与  $r\text{tt}_{i,j}^{(t)}$  大小关系的统计实现拓扑突变感知。

综上所述, 可得动态环境下时延矩阵正则化重建算法及通信协议, 具体步骤如下:

1) 监听网络端口。收到节点  $j$  的消息时, 记录与  $j$  的双向传输时延  $\hat{d}_{i,j}$  和  $\hat{d}_{j,i}$ 、坐标向量  $\mathbf{u}_j$  和  $\mathbf{v}_j$  并更新邻居节点集合  $\Omega_j$ ;

2) 利用式(7)生成中值滤波时延序列  $\hat{r}tt_{i,j}^{(t)}$ ;

3) 若  $k/w = 0$ , 则转步骤4)启动拓扑突变检测;

4) 令  $\kappa = \left| \left\{ t \in [k-m+1, k] \mid \hat{r}tt_{i,j}^{(t)} > r\text{tt}_{i,j}^{(t)} \right\} \right|$ , 若  $\text{abs}(m-2\kappa) > \sigma$ , 则认为拓扑出现突变而转步骤5), 否则转步骤6)。其中  $|\cdot|$  表示集合的势,  $\sigma$  表示预定义的阈值;

5) 令  $r\text{tt}_{i,j}^{(k)} = \sum_{t=k-m+1}^k \hat{r}tt_{i,j}^{(t)} / m$ , 并重新初始化卡尔曼滤波器;

6) 按照式(8)~式(10)生成卡尔曼滤波时延序列  $r\text{tt}_{i,j}^{(k)}$ , 并令  $\hat{d}_{i,j} = r\text{tt}_{i,j}^{(k)}$ ,  $\hat{d}_{j,i} = r\text{tt}_{j,i}^{(k)}$ ;

7) 抽取  $\Omega_j$  中记录的邻居节点信息, 构造时延向量  $\mathbf{D}'_i$  和系数矩阵  $\mathbf{V}_j$  和  $\mathbf{U}_j$ ;

8) 按照式(6)更新  $\mathbf{u}_i$  和  $\mathbf{v}_i$ ;

9) 按式(3)利用  $\mathbf{u}_i$  和  $\mathbf{v}_i$  填充时延矩阵缺失元素。

便于计算, 步骤3)的拓扑感知过程可进一步简约: 当观测窗口内中值滤波时延序列均位于卡尔曼滤波序列的同一侧时, 即可认定拓扑发生突变。原因在于拓扑稳定状态下该事件发生概率很小, 例如当  $m=5$  时, 其概率仅为  $0.5^5 \approx 3.13\%$ 。

### 3 性能分析与实验

基于PlanetLab数据集分析动态网络环境下时延矩阵重建的性能<sup>[22]</sup>。相对于其他静态数据集而言, PlanetLab数据集的最大特点是保留了226个节点之间4h内共2 492 546条原始时延信息, 能更真实地模拟时延抖动对矩阵重建的影响。实验中取  $N=7$ , 并借助应力(Stress)系数评价时延矩阵重建的拟合度和稳定性:

$$\text{Stress} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P (d_{i,j} - \hat{d}_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P d_{i,j}^2}} \quad (11)$$

#### 3.1 滑动窗口对滤波性能的影响

影响算法性能的一个重要参数是滑动窗口尺寸  $m$ 。滑动窗口尺寸与均值-方差相关性如图3所示, 当  $m=3$  时最终生成的滤波序列尚有 20% 抖动幅度超过 5 ms; 而当  $m=5$  时, 这一比例则缩减到 15%; 当  $m$  进一步增大时, 时延序列的抖动情况并不能产生太大改进, 因此本文倾向于  $m=5$  是较优的取值。

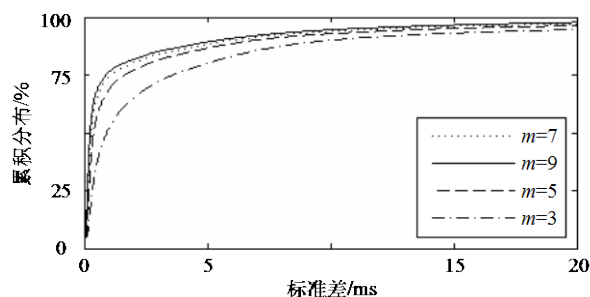
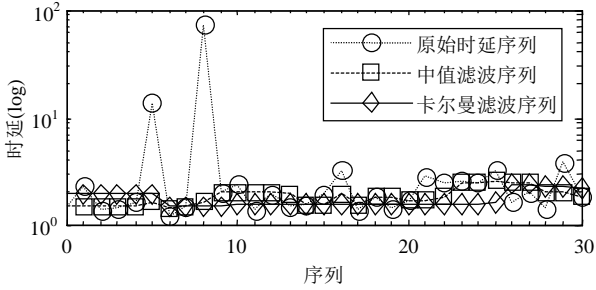


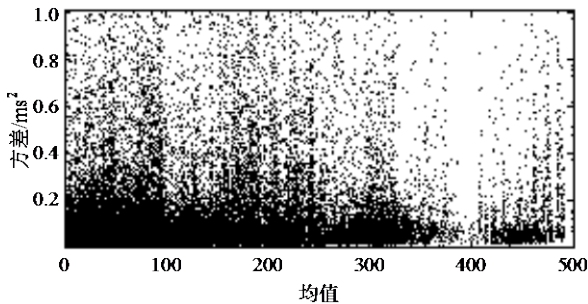
图3 滑动窗口尺寸与均值-方差相关性

时延序列滤波效果对比如图4a所示, 可看出, 原始序列中第5个和第8个时延值出现明显的毛刺, 分别达到了16 ms和73 ms, 而该序列的其他时延值都集中在1~2 ms左右。而在中值滤波序列中, 两个毛刺信号都被消除, 中值序列进一步平滑得到了卡尔曼滤波序列, 证明了本文时延滤波的有效性。原始序列的第21个时延值处出现了一次跳变, 时延序列从1.7 ms跳到2.8 ms, 而卡尔曼滤波器则在第26个时延值处产生响应, 说明本文的拓扑突变感知方法是灵敏有效的。时延序列统计量的全景分布图如图

4b所示。可看出, 经过滤波后的时延序列的抖动振幅与时延均值没有明显的相关性, 即使时延高达400~500 ms, 序列的方差也大部分集中在0.25 ms<sup>2</sup>以下, 意味着不同的时延序列的方差  $R$  可近似地取相同的值, 无疑十分有利于卡尔曼滤波器的设计, 本文令  $R = 0.25$ 。



a. 时延序列滤波效果对比



b. 时延序列统计量的全景分布图

图4 中值-卡尔曼滤波器性能

### 3.2 滤波对矩阵重建性能的影响

动态环境下, 时延矩阵正则化重建的应力系数演进规律如图5所示, 其中正则化参数  $\lambda = 100$ 。便于分析, 本文以正则化重建算法DMF为基准算法, 并引入拥有保持最佳统计特征的  $t$ -Filter<sup>[18]</sup>, 分别与本文提出的重建算法进行比较。 $t$ -Filter通过对时延序列进行  $t$  检验, 剔除序列中的异常时延值, 并以此保证滤波前后序列统计特征的一致性。抽取数据集的序列均值作为静态序列代入DMF算法进行重建, 得到性能评价的基准线。

将未处理的时延序列代入DMF算法时, 由于未处理时延序列中的噪声, 致使应力系数在迭代过程中剧烈抖动, 振幅的顶端接近甚至超过1, 基本丧失了重建时延矩阵的能力。矩阵重建算法在动态环境下相当脆弱, 其根本原因在于, 正则化修正后的系数矩阵仍有可能是弱病态的, 时延序列中的噪声对矩阵重建的影响仍不可忽略。当  $t$ -Filter被引入以后, 应力系数稳定在了0.16左右, 虽然较原始序列有了极大改善, 但考虑到静态环境下的应力系数稳定在0.12左右, 两者仍有显著的差距。相比之下, 本文

算法则可将应力系数稳定在0.13左右, 与理论上的最优性能已较为接近, 相对于  $t$ -Filter滤波器结合DMF的方案有接近20%的改善, 具备明显的性能优势。

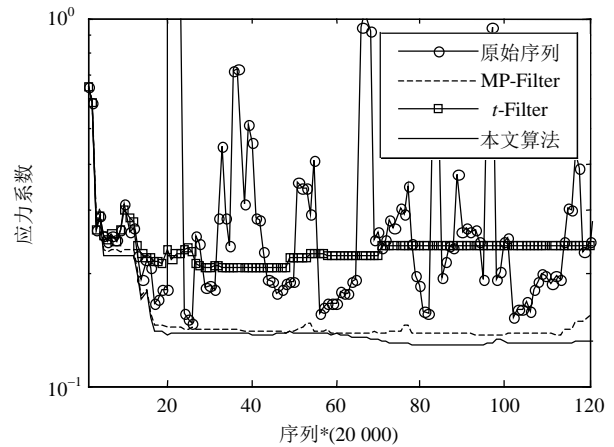


图5 时延矩阵正则化重建的应力系数演进规律

## 4 结论

时延矩阵重建是网络应用性能优化的重要手段。本文深入分析了网络时延噪声的统计学特性, 发现时延序列中存在两种不同特征的噪声信号。在此基础上进一步讨论了网络抖动对时延矩阵重建的重要影响, 并指出了系数矩阵的弱病态性对噪声的放大作用。为提高时延矩阵重建的实用性和鲁棒性, 本文提出了一种时空联合滤波框架, 利用中值滤波器过滤服从二项分布的盐噪声, 并利用卡尔曼滤波器过滤服从高斯分布的白噪声, 使得代入矩阵重建算法光滑的时延序列在保留主要统计学特征的基础上尽可能平滑。并针对真实网络中偶发的拓扑突变现象, 提出了一种基于统计特征的突变感知方法。仿真实验证明, 本文算法可显著提高动态环境下时延矩阵重建的性能。

### 参 考 文 献

- [1] SZYMANIAK M, PRESOTTO D, PIERRE G, et al. Practical large-scale latency estimation[J]. Computer Networks, 2008, 52(7): 1343-1364.
- [2] AGARWAL S, LORCH R. Matchmaking for online games and other latency-sensitive P2P systems[C]//ACM SIGCOMM. Barcelona, Spain: ACM, 2009.
- [3] ARMITAGE G, HEYDE A. REED: Optimizing first person shooter game server discovery using network coordinates[J]. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMCCAP), 2012, 8(2): 1-21.
- [4] AGARWAL S, DUNAGAN J, JAIN N, et al. Volley: Automated data placement for geo-distributed cloud services[C]//7th USENIX Symposium on Networked

- Systems Design & Implementation. San Jose, CA, USA: [s.n.], 2010.
- [5] DING C, CHEN Y, XU T, et al. CloudGPS: a scalable and ISP-friendly server selection scheme in cloud computing environments[C]//Proceedings of the 2012 IEEE 20th International Workshop on Quality of Service. Coimbra, Portugal: IEEE Press, 2012.
- [6] WACEK C, TAN H, BAUER K, et al. An empirical evaluation of relay selection in tor[C]//Proceedings of the Network and Distributed Security Symposium. San Diego, U.S.A: [s.n.], 2013.
- [7] LEE S, ZHANG Z L, SAHU S, et al. On suitability of euclidean embedding for host-based network coordinate systems[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(1): 27-40.
- [8] CANDES E J, PLAN Y. Tight oracle inequalities for low-rank matrix recovery from a minimal number of noisy random measurements[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(4): 2342-2359.
- [9] CANDES E J, RECHT B. Exact matrix completion via convex optimization[J]. Foundations of Computational mathematics, 2009, 9(6): 717-772.
- [10] 王占丰, 陈鸣, 邢长友, 等. 因特网时延空间建模的研究[J]. 通信学报, 2012, 33(7): 164-176.  
WANG Zhan-feng, CHEN Ming, XING Chang-you, et al. Research on the modeling of the Internet delay space[J]. Journal on Communications, 2012, 33(7): 164-176.
- [11] MAO Y, SAUL L K, SMITH J M. Ides: an internet distance estimation service for large networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(12): 2273-2284.
- [12] ZHANG R, TANG C, HU Y C, et al. Impact of the inaccuracy of distance prediction algorithms on internet applications-an analytical and comparative study[C]//Proceedings on 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Barcelona, Spain:IEEE, 2006.
- [13] LIAO Y, GEURTS P, LEDUC G. Network distance prediction based on decentralized matrix factorization[M]. NETWORKING 2010. Berlin: Springer Heidelberg, 2010: 15-26.
- [14] LIAO Y, DU W, GEURTS P, et al. DMFSGD: a decentralized matrix factorization algorithm for network distance prediction[J]. IEEE Transactions on Networking, 2013, 21(5): 1511-1524.
- [15] CHEN Y, WANG SHI C, et al. Phoenix: a weight-based network coordinate system using matrix factorization[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2011, 8(4): 334-347.
- [16] 王聪, 张凤荔, 刘梦娟, 等. IP 网络坐标抖动感知与慢启动抑制[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(6): 921-926.  
WANG Cong, ZHANG Feng-li, LIU Meng-juan, et al. IP-based network coordinate oscillation awareness and slow-start mitigation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 41(6): 921-926.
- [17] LEDLIE J, PIETZUCH P, SELTZER M. Stable and accurate network coordinates[C]//26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Lisboa, Portugal: IEEE, 2006.
- [18] 张敏, 周亮, 黄琼, 等. 随机延迟污染对IP网络坐标系统的影响及其抑制方法研究[J]. 通信学报, 2011, 32(1): 29-35.  
ZHANG Min, ZHOU Liang, HUANG Qiong, et al. Influence of stochastic delay contaminations on IP network coordinate system and contamination mitigation methods[J]. Journal on Communications, 2011, 32(1): 29-35.
- [19] 史加荣, 焦李成, 尚凡华. 不完全非负矩阵分解的加速算法[J]. 电子学报, 2011, 39(2): 291-295.  
SHI Jia-rong, JIAO Li-cheng, SHANG Fan-hua. Accelerated algorithm to incomplete nonnegative matrix factorization[J]. Chinese Journal of Electronics, 2012, 39(2): 291-295.
- [20] 张振跃, 赵科科. 数据缺损矩阵低秩分解的正则化方法[J]. 中国科学, 2013, 43(3): 249: 271.  
ZHANG Zhen-yue, ZHAO Ke-ke. Regularization methods for low-rank factorization of matrices with missing data[J]. SCIENCE CHINA, 2013, 43(3): 249-271.
- [21] WANG Z, CHEN M, XING C, et al. Multi-manifold model of the internet delay space[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(1): 211-218.
- [22] PlanetLab Datase[EB/OL]. [2013-04-20]. <http://www.eecs.harvard.edu/~syrah/nc/sim/pings.4hr.stamp.gz>.

编辑 叶芳