

基于 Cauchy-Schwarz 逼近的网络坐标导引*

王 聪, 张凤荔, 杨晓翔, 王瑞锦, 李 敏

(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 成都 611731)

摘 要: 针对拓扑结构突变时网络坐标系统存在的剧烈抖动问题, 定义节点导引步和误差修正步, 通过坐标的延迟发布实现突变抑制。在导引步节点保持坐标广播静默, 并基于 Cauchy-Schwarz 不等式生成迭代序列, 逼近节点坐标的较优初值; 在修正步执行 Vivaldi 算法, 修正自身坐标并广播更新。仿真实验显示, 该方法能在保证定位精度的前提下, 有效抑制拓扑结构突变对网络坐标系统产生的剧烈影响, 显著提升网络坐标系统泛化能力。

关键词: 网络坐标系统; 网络测量; Vivaldi; 收敛性

中图分类号: TP393.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1769-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.043

Cauchy-Schwarz approximating bootstrap algorithm for network coordinate

WANG Cong, ZHANG Feng-li, YANG Xiao-xiang, WANG Rui-jin, LI Min

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

Abstract: For strong oscillation occurs for topology mutation, this paper splited node's life cycle into a bootstrap phase and an error-celebration phase, and mitigated mutation through delaying release node's coordinate. Node kept radio silence in bootstrap phase, and generated an iterative sequence by using Cauchy-Schwarz inequality to approximate its coordinate's optimal value. In error-celebration phase, node executed Vivaldi algorithm to update and broadcasted its coordinate. Experiments and simulations show that this method could mitigate the strong influence caused by topology mutation without losing locating accuracy, and improved the generalization capability of NCS dramatically.

Key words: network coordinate system; Internet measurement; Vivaldi; convergence

在当前 Internet 诸多应用中, 很大一部分都依赖于网络拓扑结构的优化来提升系统性能。网络坐标系统(network coordinate system, NCS)提供了复杂度为 $O(n)$ 的距离预测方法, 已被广泛应用于包括内容分发^[1]、敌手匹配^[2]、云资源调度^[3]乃至社交网嵌入^[4,5]在内的许多领域。

Dadek 等人^[6]在 2004 年提出了分布式网络坐标计算方法 Vivaldi, 利用弹性力学原理构建 NCS, 将节点间的预测距离与测量距离误差模拟为弹簧弹力作用, 将节点受力平衡作为收敛条件实现了节点的空间嵌入。Shavitt 等人^[7]在研究互联网距离空间曲率特征的基础上, 将节点映射到双曲空间之中, 并由此将 Vivaldi 算法扩展为一种基于双曲空间的距离预测机制, 提高了计算精度。王大彬等人^[8]根据 Vivaldi 预测距离范围与预测误差特征关系, 将网络节点划分为多个同心圆环, 使用同圆环内的节点作为基准点来预测特定节点的网络距离。Shi 等人^[9]将 Vivaldi 算法应用于网络初始构建阶段, 对少数种子节点进行 Vivaldi 迭代计算生成坐标后, 以该节点集为地标点, 使用 GNP 算法定位其他节点, 但种子节点坐标的不精确性会在后端成倍放大, 对准确性影响很大。注意到传输时延与地理位置之间的近似线性相关^[10], Wang 等人^[11]将节点嵌入到球面空间中, 利用地标的层次结构实现了街道级的定位精度。然而, NCS 中由于三角违例(triangle inequality violations, TIVs)的存在使得节点难以完美嵌入度量空间^[12], 由此造成的坐标抖

动有可能被网络拓扑突变放大。虽然 TIVs 检测已取得一定成果^[13], 但作为一个 NP-Hard 问题^[14], 仍难以保证算法在多项式时间内检出所有 TIV 信息。由于 TIVs 来自于网络路由的算法缺陷^[15], 无论是降低 RTT 延迟污染^[16,17]还是抑制污染影响力^[18]的研究都无法从根本上解决问题。

针对拓扑突变时大量节点坐标的不精确性造成的剧烈抖动, 本文试图以分段式坐标计算方法削弱不精确节点的传染性。

1 网络坐标导引框架

1.1 NCS 概述

网络坐标系统是基于对少量节点传输时延(round trip time, RTT)的测量, 通过优化特定的目标函数, 将节点映射到特定的度量空间, 从而使得任意节点间距离均可利用节点在空间中的坐标计算。定义节点 i 误差函数 e_i :

$$e_i = \sum_{j \in \text{AnchorSet}(i)} (\text{RTT}_{i,j} - \|i - j\|)^2 \quad (1)$$

从而将网络坐标系统的构建转换为一个最优化问题, 即求解向量 i , 满足 $e_i = \min(e)$ 。 i 可视为节点 i 在度量空间中的坐标, 定义为 $[i_1 \ i_2 \ \cdots \ i_H]$, i_* 为节点坐标在各个维度上的分量, 且 $\forall i, j: i \neq j$ (若等式成立, 则证明 i 与 j 为同一个节点); $\|\cdot\|$ 是空间上定义的作为空间距离度量的范数, 实际应用中通常取 Euclid 范数。为方便表述, 不妨将测量距离 $\text{RTT}_{i,j}$ 记为

收稿日期: 2012-10-21; 修回日期: 2012-11-30 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX03002-002-03)

作者简介: 王聪(1981-), 男, 山东邹平人, 博士研究生, 主要研究方向为网络空间嵌入(wongcong@gmail.com); 张凤荔(1963-), 女, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为信息安全; 杨晓翔(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为网络测量与入侵检测; 王瑞锦(1980-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士研究生, 主要研究方向为无线网位置感知; 李敏(1978-), 女, 四川峨眉人, 博士研究生, 主要研究方向为无线网隐私保护。

$\hat{d}_{i,j}$, 将度量距离 $\|i-j\|$ 记为 $d_{i,j}$ 。

1.2 分布式 NCS 构建

在现实的网络应用中, 固定的地标节点的采集与分发往往是一个较大的问题。尤其在 P2P 网络等分布式环境下, 更加难以在网内找到固定的地标节点。因此, 一种无须地标节点的分布式网络坐标计算方法 Vivaldi 便应运而生, 其主要思想是: 将网络坐标系统视为一个弹簧系统, 节点间的坐标距离与测量距离的误差视为弹簧对节点产生的推拉力。如果一个节点的若干邻居节点的坐标已经确定, 该节点可以利用这些邻居节点的坐标和与邻居节点的测量距离计算出它的受力, 并在受力方向上逐渐移动, 从而不断修正和逼近真实坐标。按照 Vivaldi 算法的通信协议, 节点 j 必须向其邻居节点广播二元组 $\langle j, e_j \rangle$, 即自身的坐标 j 和本地误差 e_j 。当节点 j 的邻居节点 i 接收到二元组信息后, 连同两点间的传输时延 $\hat{d}_{i,j}$ 代入如下算法:

算法 1 Vivaldi 坐标计算方法

```
while get( $\langle j, e_j \rangle, \hat{d}_{i,j}$ )
     $w_{i,j} = \frac{e_i}{e_i + e_j}$ ;
     $e_s = \frac{\text{abs}(\hat{d}_{i,j} - d_{i,j})}{\hat{d}_{i,j}}$ ;
     $e_i = e_s c_e w_{i,j} + e_i (1 - c_e w_{i,j})$ ;
     $i = i + c_e w_{i,j} \frac{\hat{d}_{i,j} - d_{i,j}}{d_{i,j}} (i - j)$ ;
end
```

其中: c_e 是一个较小的常数, 且有 $0 < c_e < 1$ 。由于 Vivaldi 算法不存在地标节点的搜集与计算, 因此在可扩展性和计算开销等方面具备较明显的优势。然而从宏观角度看, 当网络拓扑结构发生突变, 如大量节点突然涌入从而呈现蜂集态 (flash-crowd) 时, 由于大量新加入节点尚未收敛到正确位置即对外广播自身坐标, NCS 会随着新节点的骤然增多产生剧烈扰动; 从微观角度看, 当节点刚加入网络, 或邻居节点集发生重大变化时, 同样需要较长时间收敛到正确位置。因此本文试图建立分段式坐标计算框架, 将节点生命周期分为两个阶段: 节点导引步和误差修正步。节点加入网络时处于导引步, 监听邻居节点的信息。当节点测量的邻居节点数量足够多时, 执行导引算法, 直接生成节点坐标的较优初值; 而节点处于修正步时, 其行为特征与正常的 Vivaldi 节点相同, 随时根据监听的邻居节点信息更新自身坐标。

1.3 坐标导引算法

节点坐标的导引实质是在具备一定网络知识的前提下极小化式(1)的过程。受限于较大的计算量和收敛位置附近的抖动, 传统的梯度下降法在此并不适用。因此本文试图通过构造一个非增的迭代序列实现式(1)的极小化。

首先定义 $N \times H$ 维的坐标矩阵 C , 其第 i 行 $C^{(i)}$ 为节点 i 的坐标 r^i , 即 $C = [\dots r^i \dots]^T$ 。将式(1)展开^[19]:

$$e_i = \sum_{j \in \text{Neighbor}(i)} (\hat{d}_{i,j})^2 - 2\hat{d}_{i,j}d_{i,j} + (d_{i,j})^2 \quad (2)$$

引入一个临时矩阵 Z 和临时函数 e' , 并定义 $N \times N$ 维矩阵 L 与 L^Z :

$$L_{i,j} = \begin{cases} -1 & j \in \text{Neighbor}(i) \\ 0 & j \notin \text{Neighbor}(i) \\ -\sum_{i \neq k} L_{i,k} & i = j \end{cases} \quad (3)$$

$$L_{i,j}^Z = \begin{cases} -\|i-j\| \times \text{inv}(\|Z_i - Z_j\|) & j \in \text{Neighbor}(i) \\ 0 & j \notin \text{Neighbor}(i) \\ -\sum_{i \neq k} L_{i,j}^Z & i = j \end{cases} \quad (4)$$

其中: inv 运算定义为

$$\text{inv}(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} & \alpha \neq 0 \\ 0 & \alpha = 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据 Cauchy-Schwarz 不等式, 必然有^[20]

$$e \leq e' = \sum_{j=1}^N (d_{i,j})^2 + \text{Tr}(C^T LC) - 2\text{Tr}(C^T L^Z Z) \quad (6)$$

当 $LC = L^Z Z$ 时, e' 取极小值。将 Z 视为对坐标矩阵 C 的估计, 可得迭代序列:

$$LC(t+1) = L^{C(t)} C(t) \quad (7)$$

其中: $C(t)$ 是第 t 轮迭代对坐标矩阵 C 的取值。令 $\|\cdot\|$ 运算取集合的势, 则具体到每个坐标维度 $C_i^{(h)}$ 的计算, 有

$$\begin{cases} C_i^{(h)}(t+1) = \frac{\sum_{j \in \text{AnchorSet}(i)} [C_j^{(h)}(t+1) + \delta_{i,j}(C_i^{(h)}(t) - C_j^{(h)}(t))]}{|\text{AnchorSet}(i)|} \\ \delta_{i,j} = \hat{d}_{i,j} \text{inv}(d(C_i^{(h)}(t) - C_j^{(h)}(t))) \end{cases} \quad (8)$$

假定邻居节点数达到 η 时触发节点导引算法, 可得两段式节点坐标计算框架如算法 2 所示。

算法 2 两段式节点坐标计算框架

```
while (|Neighbor(i)| <  $\eta$ )
    collect neighbor node from network;
end
initialize C(t);
do
    calculate C(t+1) by equations(8);
    t++;
until
     $\|C_i(t+1) - C_i(t)\|_2 \leq \varepsilon$ ;
end
i = C_i;
while (true)
    execute Vivaldi algorithm;
end
```

2 实验与分析

为了检验算法的性能, 本文将 Vivaldi 算法作为基准算法, 基于 PlanetLab 时延数据集^[21]作了仿真。该数据集测量了 226 个节点 4 h 内的时延信息。将度量空间定义为二维 Euclid 空间, 使其能够与节点在地理上的经纬度大致重合, 具备明确的物理意义。首先定义相对误差 (relative error, RE) 作为性能评价参数:

$$\text{RE}_{i,j} = \text{abs}\left(\frac{d_{i,j} - \hat{d}_{i,j}}{\hat{d}_{i,j}}\right) \times 100\% \quad (9)$$

2.1 参数选取

首先讨论导引步的收敛阈值 ε 。图 1 是 $|\text{Neighbor}(i)| = 30$ 时迭代次数与迭代差值的关系。从图中可以看出, 当迭代次数增加到 10 次时, 相邻两次迭代的误差就已小于 1 ms, 说明此时目标节点在度量空间内的漂移已极为微弱; 而当迭代次数增加到 15 次以上时, 节点的漂移已可忽略不计。由于导引步的作用在于取较优初值, 综合考虑精度与计算代价, 本文认为取 $\varepsilon = 0.5$ 较为适宜。

接下来讨论导引算法的触发阈值 η 。首先应明确 $\eta \geq H$ 以保证方程组非欠定^[12]。与多数研究相同^[22], 基于相对误差的

90% 分位数 (ninetieth percentile relative error, NPRE) 考察 η 对性能的影响,如表 1 所示。

表 1 触发阈值对精确性的影响

触发阈值	误差均值/%	触发阈值	误差均值/%
2	476.4	10	46.61
3	284.2	15	44.51
5	144.7	20	44.85

从图 1 中可以看出,随着 η 的不断增大,导引算法生成的坐标精度也随之提高。但当 η 增加到 10 以上时,邻居节点的增加对 NPRE 的影响已变得微乎其微。因此, $\eta = 10$ 应是较为合理的取值。

2.2 性能评价

首先从宏观层面考察算法处理网络蜂集的能力。将 226 个节点均分为两组,第一组作为原生节点先行组网,第二组作为蜂集节点插入。同样以 NPRE 为性能评价参数,可得网络生命演进过程如图 2 所示。

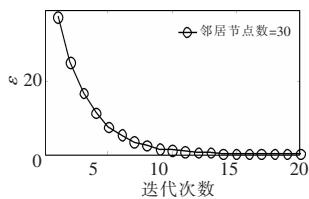


图 1 迭代差值与次数相关性

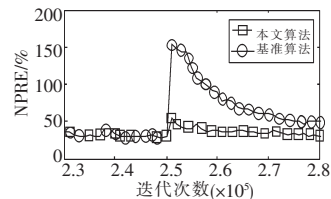


图 2 网络生命演进过程

在第 250 000 步迭代时插入蜂集节点,可以看出 Vivaldi 算法此时产生较大波动,其 NPRE 骤升至 152.7%,反观本文方法,仍能保持 NPRE 维持在 54.94% 的低位。这说明,节点导引算法面对网络结构突变的处理能力远远优于基准算法。

从微观层面,也就是节点个体视角下观察算法的表现,以评价节点对算法的受益。随机抽取节点 α ,测量其从加入到收敛过程中在度量空间内的漂移情况,如图 3 所示。

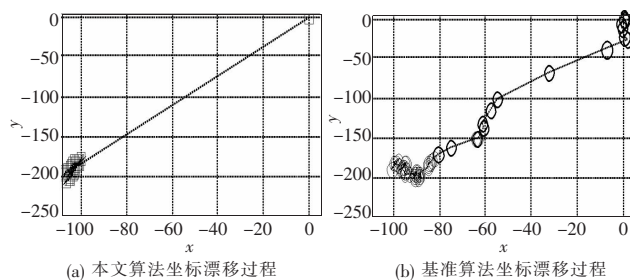


图 3 节点接入网络漂移过程

可以看出,导引算法和基准算法表现出截然不同的动力学特性。如图 3(a) 所示,虽然导引算法测量足够的信息量需要一定的时间,但算法一旦被触发,即可直接将节点移动到正确位置附近;而基准算法随时根据测量的邻居节点时延与坐标等信息逐次更新自身坐标,虽然可以较早校正自身位置,但由于基准算法未能利用历史信息,相比导引算法而言其收敛到正确位置的过程较长。如图 3(b) 所示,节点与正确位置越为接近,收敛速度通常越慢,甚至会在特定时间段内反复出现。考虑到基准算法不精确的坐标广播对邻居节点的影响,相比之下,导引算法无疑同时具有速度与精度上的优势。

3 结束语

本文提出了一种 IP 网络节点定位的分段式算法以有效应对网络生命周期内拓扑结构的突变。其创新点在于:将节点生

命周期分为节点导引步和误差修正步两个阶段,分别采用不同的算法进行计算:a)在导引步中基于 Cauchy 逼近生成迭代序列并计算坐标的较优初值;b)在修正步中基于 Vivaldi 算法对节点坐标误差实时修正。实验结果表明,本文提出的两段式优化算法能够在加速节点坐标收敛的同时有效抑制网络拓扑结构突变,面对网络蜂集等大规模网络事件表现出了较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] LEDLIE J, GARDNER P, SELTZER M. Network coordinates in the wild[C]//Proc of the 4th USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation. Cambridge:USENIX,2007:299-311.
- [2] AGARWAL S, LORCH R. Matchmaking for online games and other latency-sensitive P2P systems [C]//Proc of ACM SIGCOMM '09 Conference. New York:ACM Press,2009:315-326.
- [3] AGARWAL S, DUNAGAN J, JAIN N, et al. Volley: automated data placement for geo-distributed cloud services [C]//Proc of the 7th USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation. San Jose, CA:USENIX, 2010.
- [4] CHEN Zhuo, CHEN Yang, DING Cong, et al. Pomelo: accurate and decentralized shortest-path distance estimation in social graphs[C]//Proc of ACM SIGCOMM '11 Conference. New York:ACM Press, 2011:406-407.
- [5] KERMARREC A M, LEROY V, TREDAN G. Distributed social graph embedding[C]//Proc of the 20th ACM International Conference on Information and Knowledge Management. New York:ACM Press, 2011:1209-1214.
- [6] DADEK F, COX R, KASSHOEK F, et al. Vivaldi: a decentralized network coordinate system[C]//Proc of ACM SIGCOMM '04 Conference. New York:ACM Press,2004:15-26.
- [7] SHAVITT Y, TANKEL T. Hyperbolic embedding of Internet graph for distance estimation and overlay construction[J]. IEEE/ACM Trans on Networking,2008,16(1):25-36.
- [8] 王大彬,黄琼,阳小龙,等. R-Vivaldi:一种距离范围感知的 IP 网络坐标系统[J]. 通信学报,2012,33(2):87-92.
- [9] SHI Xiao-hui, CHEN Yang, DENG Bei-xing, et al. Network distance prediction based on network coordinate system[C]//Proc of the 5th International Conference on Grid and Cooperative Computing Workshops. Piscataway:IEEE Press,2006:170-175.
- [10] PATRIK M, DAN K, RADIM B, et al. Study and performance of localization methods in IP based networks: Vivaldi algorithm[J]. Journal of Network and Computer Applications,2011,34(1):351-367.
- [11] WANG Y, BURGNER D, FLORES M, et al. Towards street level client independent IP geolocation[C]//Proc of the 8th USENIX Symposium on Networked Systems Design & Implementation, Boston, MA:USENIX,2011:1-14.
- [12] WANG C, ZHANG F, YANG X, et al. A differential dynamic model of distributed network coordinate system[C]//Proc of the 10th International Conference on Communications, Circuits and Systems. Piscataway:IEEE Press,2012.
- [13] 黄琼,刘熙,阳小龙,等. T-Vivaldi:TIV 感知的 IP 网络坐标系统[J]. 电子科技大学学报,2012,41(1):147-151.
- [14] LEE S, ZHANG Z L, SAHU S, et al. On suitability of Euclidean embedding for host-based network coordinate systems[J]. IEEE/ACM Trans on Networking,2010,18(1):27-40.

当 $M=9$ 时,两种方案的性能(平均传输时延和投递率)都优于 $M=4$ 的情况。这是因为区域个数 M 增加,也就是为网络服务的 LMF 个数增加,每个 LMF 服务的普通节点个数减少,其运动路径长度和转发的数据消息的数量也随之减少。分别在 $M=4$ 和 $M=9$ 时,GMF-NRA 在平均传输时延和信息投递率两个方面的性能都明显优于 NRA。

3.3 网络中的数据流量对网络性能的影响

从图 7 和 8 可以看出网络产生的数据流量对网络性能的影响。在网络产生的消息个数不多,即网络的业务负载较低时,两种摆渡路由方案的平均传输时延和信息投递率无明显变化。而当网络产生的消息个数增加到一定值时,即网络的业务负载变重时,两种方案的平均传输时延迅速增加,数据交付率也迅速降低。这是因为当网络业务负载变重时,无论是 LMF 或是 GMF 所需要承担的信息量都增大,在带宽受限的情况下,网络容易发生拥塞,从而导致平均传输时延增加和信息投递率减少。

由于 GMF-NRA 中局部摆渡 LMF 所运行的路径较 NRA 方案更短,因此数据转发较快,不容易产生网络拥塞,同时从仿真图 7 和 8 可以看出,随着网络产生的消息个数的递增,GMF-NRA 在平均传输时延和数据交付率两个方面的性能都明显优于 NRA 方案。

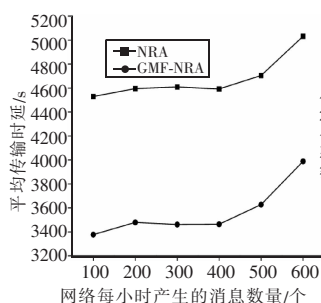


图 7 网络产生的数据流量对平均传输时延的影响

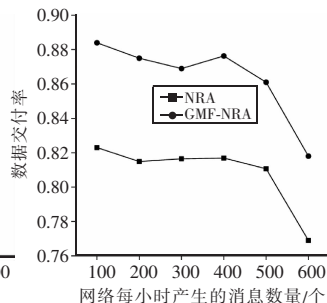


图 8 网络产生的数据流量对数据交付率的影响

4 结束语

针对机会网络中源节点与目的节点间不存在完整路径时的消息转发问题,本文提出了一种新的多摆渡路由技术。在网络分裂的环境中,通过引入了本地消息摆渡和全局消息摆渡来协作完成网络区域间消息的转发,主要目标是为了降低消息传输时延,提高数据交付率,还有使用较少的网络资源(带宽、存储空间等)以及消除通信实体间的在线协作问题。仿真实验

表明,对于长期分裂的形成多个区域的网络,如偏远的乡村通信,这种新的摆渡路由方案在数据传输时延和数据成功交付率等方面优于现有的中继节点算法。在今后的研究中,可以进一步考虑摆渡节点的缓存分配问题,以及不同类型的数据流对网络性能的影响。

参考文献:

- [1] 熊永平,孙利民,牛建伟,等. 机会网络[J]. 软件学报,2009,20(1):124-137.
- [2] PELUSI L, PASSARELLA A, CONTI M. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile Ad hoc networks[J]. *Communications Magazine*, 2006, 44(11):134-141.
- [3] 孙践知,刘乃瑞,张迎新,等. 机会网络典型路由算法性能分析[J]. 计算机工程,2011,37(16):85-89.
- [4] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected Ad hoc networks[D]. [S. l.]: Duke University, 2000.
- [5] LINDGREN A, DORIA A, SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2005, 7(3):19-20.
- [6] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAVENDRA C. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multicopy case[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2008, 16(1):77-90.
- [7] ZHAO Wen-rui, AMMAR M. Message ferrying: proactive routing in highly-partitioned wireless Ad hoc networks[C]//Proc of the 9th IEEE International Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems. 2003:308-314.
- [8] ZHAO Wen-rui, AMMAR M, ZEGURA E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile Ad hoc networks[C]//Proc of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2004:187-198.
- [9] ZHAO Wen-rui, AMMAR M, ZEGURA E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay tolerant network[C]//Proc of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. 2005:1407-1418.
- [10] ZHANG Zhen, FEI Zong-ming. Route design for multiple ferries in delay tolerant networks[C]//Proc of IEEE WCNC. 2007:3460-3465.
- [11] PENG Wei, ZHAO Bao-kang, YU Wang-rong, et al. Ferry route design with delay bounds in delay-tolerant networks[C]//Proc of the 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology. 2010:281-288.
- [12] KERÄNEN A, OTT J, KÄRKÄINEN T. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]//Proc of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. 2009.

(上接第1771页)

- [15] ZHANG B, NG T S, NAND I, et al. Measurement based analysis, modeling, and synthesis of the Internet delay space[C]//Proc of ACM SIGCOMM'06 Conference on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2006:95-98.
- [16] LEDLIE J, PIETZUCH P, SELTZER M. Stable and accurate network coordinates[C]//Proc of the 26th International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway: IEEE Press, 2006: 84-93.
- [17] 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.
- [18] 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.

- [19] HARIRI N, HARIRI B, SHIRMOHAMMADI S. A distributed measurement scheme for Internet latency estimation[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(5):1594-1603.
- [20] BROG I, GROENEN P. Modern multidimensional scaling: theory and applications[M]. New York: Springer-Verlag, 1997:174-188.
- [21] The data set of 4 hours PlanetLab ping trace[EB/OL]. <http://www.eecs.harvard.edu/~syrah/nc/sim/pings.4hr.stamp.gz>.
- [22] WU Shi-ning, CHEN Yang, FU Xiao-ming, et al. NCShield: securing decentralized, matrix factorization-based network coordinate systems[C]//Proc of the 20th International Workshop on Quality of Service. Piscataway: IEEE Press, 2012:1-9.