ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.20, No.9, September 2009, pp.2470−2482
doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03559
© by *Institute of Software, the Chinese Academy of Sciences*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

网络距离预测技术*

邢长友+, 陈 鸣

(解放军理工大学 指挥自动化学院,江苏 南京 210007)

Techniques of Network Distance Prediction

XING Chang-You+, CHEN Ming

(Institute of Command Automation, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

+ Corresponding author: E-mail: xcy@plaust.edu.cn

Xing CY, Chen M. Techniques of network distance prediction. *Journal of Software*, 2009,20(9):2470−2482.
http://www.jos.org.cn/1000-9825/3559.htm

Abstract: In this paper, the concept of network distance prediction is firstly presented, and a brief discussion is made on different classification criteria. Then, based on the difference in prediction mechanisms, the existing research on distance prediction is classified into three types: the virtual coordinate based prediction mechanism, the network topology based prediction mechanism and the network proximity estimation mechanism. After a comparison between among the different prediction mechanisms, a comprehensive survey on network distance prediction is made, and the existing prediction mechanisms and their results are analyzed, Furthermore, the shortcomings and problems are outlined. In the end, the future trend of network distance prediction is discussed.

Key words: network measurement; distance prediction; network performance; virtual coordinate; network structure; network proximity estimation

摘 要: 首先概述了网络距离预测的基本概念,从不同角度对网络距离预测技术进行了分类讨论.然后根据预测机理的差异将现有网络距离预测技术划分为基于虚拟坐标的预测技术、基于网络拓扑结构的预测技术以及网络邻近度估计技术.在对典型的预测技术进行分析对比后,详细综述了网络距离预测的研究现状,对现有的各种预测技术以及研究成果进行了分析,指出了需要进一步研究的问题.最后探讨了网络距离预测技术的未来发展方向.

关键词: 网络测量;距离预测;网络性能;虚拟坐标;网络结构;网络邻近度估计
中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

近年来,随着网络技术的发展,新的网络应用不断涌现,其中具有代表性的包括 P2P 文件传输、网格、CDN(内容分发网络)和在线网络游戏等.在这些应用中,由于能够提供相同服务的服务器不止一个,用户在请求某项服务时可以从中选择一个具有更好性能的服务器.因此,快速、准确地获得底层 IP 网络的时延、丢包率和可用带宽等状态信息,就可以采用相应措施提高这些网络应用的性能.例如,在 P2P 应用中,当资源发现机制发现多个对等实体拥有所请求的内容资源时,网络性能信息可以帮助它决定访问哪个对等实体的资源效率最高.同

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.90304016 (国家自然科学基金); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA01Z418 (国家高技术研究发展计划(863))
Received 2007-10-17; Accepted 2008-12-18

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

时,在结构化 P2P 应用如 Chord 中,利用性能信息可以构造更加高效的分布式哈希表结构[1];在数据网格中,当多个站点拥有相同的数据时,性能信息可以帮助其决定从哪个数据站点拷贝和读取数据最优[2];基于 CDN 的流媒体服务,可以根据网络性能状况选择最优服务器为用户提供服务[3];在 Skype 等需要使用中继节点桥接位于 NAT/防火墙后主机的 VoIP 系统中,性能信息能够帮助选择具有最优性能的节点作为桥接节点,从而为用户提供最佳通话质量[4].

正是因为网络性能信息的重要性,许多应用系统在实现中自行设计了测量机制,独立测量所需的网络性能信息.然而,测量需要花费一定的时间,造成系统无法及时响应用户的性能信息查询请求;另一方面,如果大量用户都采用这种方式将会严重侵扰网络.比较好的做法是设计实现一种高效的网络性能测量预测机制,统一获取网络性能信息并发布为公众所用.在各种指标中,RTT(往返时延)是一个重要而又相对容易获取的参数.为此,人们提出了多种网络距离预测技术,基于有限的测量信息预测网络中任意两个节点之间的时延信息,从而降低获取网络距离信息的复杂性,为向因特网中各种应用提供网络距离信息给出了一种解决思路.

本文系统分析了当前网络距离预测中的主要技术,研究了提高网络距离预测精确性的方法,并对今后的研究方向进行了探讨.本文第 1 节介绍网络距离预测的基本概念和分类,概述常用的网络距离预测方法.第 2 节~第 4 节详细讨论几种不同的距离预测技术,分析目前各类网络距离预测技术的研究现状,指出各类研究存在的不足和亟待解决的关键问题.第 5 节对网络距离预测技术进行综合分析,并对未来研究方向进行展望.第 6 节总结全文.

1 网络距离预测基本概念及分类

网络距离预测的主要任务是,根据有限的测量信息对实际网络中任意两个节点间的时延值进行推测,进而向用户提供相关距离信息.近年来,已有多种预测机制被提出,我们首先依据不同准则对这些预测机制进行分类讨论.

1.1 网络距离值预测和网络邻近度估计

根据获取节点间距离方式的不同,网络距离预测可以分为网络距离值预测和网络临近度估计两大类.前者目标是给定网络中任意两个节点,系统均通过预测方式尽可能精确地计算出它们之间的距离值;后者并不预测节点间确切的距离值,而是采用一定的算法,根据用户请求寻找出满足某些条件的一个或者一组近距离邻居节点,进而通过直接测量方式获取到该节点或节点集的距离.两种技术各有优缺点,网络距离值预测技术获取节点间距离比较简单,且测量负载较小,但其预测精度相对较低;而网络临近度估计技术通过一定算法估计出可能的临近节点,最终到目标节点的距离由直接测量获得,因此其精度较高,但测量负载相对较大.

1.2 基于虚拟坐标预测和基于网络拓扑结构预测

基于虚拟坐标的预测技术又被称为网络坐标系统,它采用空间嵌入的方式将因特网距离空间嵌入到一个几何空间中,每个网络节点在该几何空间中分配一个坐标,不同节点间的距离利用其坐标值通过空间距离公式计算得出.基于网络拓扑结构的预测技术则认为网络拓扑对距离预测有重要影响,它首先通过 AS 连接关系或者测量数据构建因特网拓扑地图,然后基于该拓扑地图预测节点间路径,并根据路径预测结果估计其距离.

1.3 基于基准节点预测和基于物理模拟预测

根据距离预测机制采用的坐标优化思想不同,可以将基于虚拟坐标的距离预测技术进一步划分为基于基准节点(landmark-based)和基于物理模拟(simulation-based)两大类.在基于基准节点的距离预测机制中,新节点加入系统后,首先测量到基准节点的距离,然后采用优化算法基于该距离和基准节点坐标获取自身在系统中的坐标;而基于物理模拟的距离预测机制则将网络建模为一种特定的物理系统,网络节点在该物理系统中受到某种力的作用产生运动,最终达到一种平衡状态.此时,节点位置即反映了其在网络中的位置关系.

本文根据距离预测机理以及目标的不同,从以下 3 个方面对网络距离预测技术进行讨论:基于虚拟坐标的网络距离预测技术、基于网络拓扑的距离预测技术以及网络邻近度估计技术.在基于虚拟坐标的网络距离预测

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

技术中,根据坐标优化机制的不同,分别从使用基准节点和使用物理模拟两方面进行了讨论.

2 基于虚拟坐标的距离预测技术

空间嵌入在多个领域都具有广泛的应用,对任意两个测度空间 $M_1(X,\delta)$和 $M_2(Y,\mu)$而言,若存在一个映射 $f:X\to Y$,使得

$$\exists r>0,\forall x,y\in X(\ r\cdot\delta(x,y)\le\mu(f(x),f(y))\le S\cdot r\cdot\delta(x,y)) \tag{1}$$

则称空间 M_1 能够以扭曲度 S 嵌入到空间 M_2 中.其中,S 越接近于 1,则称该嵌入扭曲越小.特别地,若 S=1,那么称该嵌入为等距同构(isometry).

基于虚拟坐标的距离预测技术利用了空间嵌入的基本思想,将网络距离空间映射到一个几何空间中,每个网络节点对应几何空间中一个坐标点,节点间距离可以根据它们的坐标值通过空间距离公式计算得出.

对于一个具有 N 个节点 $H=\{H_1,H_2,H_3,\ldots,H_N\}$的网络,任意节点 H_i 到网络中所有节点的距离组成一个 N 维距离向量$(D_{i1},D_{i2},\ldots,D_{iN})$.因此,所有节点间的距离构成一个 $N\times N$ 的非负距离矩阵 D,其中,D_{ij} 代表节点 H_i 到节点 H_j 的测量距离.基于虚拟坐标的预测技术就是构造一个网络节点到 M 维向量的映射 $f:H\to R^M$,将上述 N 个网络节点 $H=\{H_1,H_2,H_3,\ldots,H_N\}$映射为 M 维几何空间中的 N 个坐标点,同时使得根据坐标值计算得出的距离与实际测量得到的距离误差值最小.这样,网络节点间的距离可以通过坐标空间中节点间距离近似表示.

$$D_{ij}\approx\hat{D}_{ij}=\|f(H_i)-f(H_j)\|,\forall i,j=1,2,\ldots,N \tag{2}$$

例如,在欧氏空间中,我们有距离预测值:

$$\hat{D}_{ij}=\|f(H_i)-f(H_j)\|=\left(\sum_{k=1}^{M}(H_{ik}-H_{jk})^2\right)^{1/2} \tag{3}$$

其中,$\hat{D}_{ij}$ 代表节点 H_i 和 H_j 之间的预测距离,$f(H_i)$为一个 M 维的向量$(H_{i1},H_{i2},\ldots,H_{iM})$,它代表节点 H_i 经过映射后在嵌入空间内的虚拟坐标.

图 1 表示了将某个网络嵌入到一个三维欧氏空间的示意,在由网络距离空间到几何空间的嵌入过程中,我们希望尽可能真实地反映出原始距离信息.然而在因特网中,不同 ISP 之间的多种连接关系以及 Internet 选路策略导致节点间距离违反三角不等式以及对称性约束等,一个好的嵌入空间必须能够处理由这些问题带来的因特网距离复杂性.另一方面,为了方便嵌入后距离的求解,嵌入空间结构也应当尽可能简单.当前,广泛应用的嵌入空间包括欧氏空间以及双曲空间等,它们分别从不同角度描述了因特网距离.

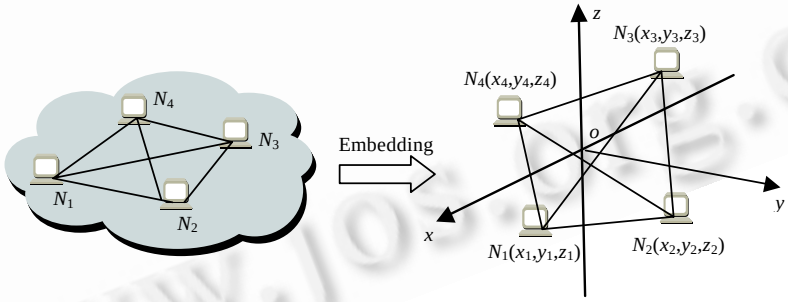


Fig.1 Virtual coordinate based network distance prediction

图 1 基于虚拟坐标的网络距离预测技术

2.1 基于基准节点的虚拟坐标空间嵌入

2.1.1 GNP(global network positioning)

Ng 最先提出了通过虚拟坐标嵌入进行网络距离预测的思想,并实现了一种预测机制 GNP[5].在该机制中,将因特网节点映射为欧氏空间中的坐标点,并按照位置关系为每个节点分配一个坐标值,从而将网络距离问题转换为空间节点之间的距离问题,任意两个节点间距离均可以基于其坐标值通过空间距离公式计算得出.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

根据 GNP 的思想,网络节点包括两类:基准(landmark)节点和普通节点.其中,基准节点是按照一定准则在网络中选出的一些代表性节点,它们互相测量到达对方的距离值,然后根据测量结果,采用最小化实际测量值和按照虚拟坐标计算值之间误差确定各个基准节点的坐标值.网络中普通节点测量自己到基准节点的距离,然后再通过最小化测量距离和计算距离之间的误差来确定自己相对于基准节点的坐标.

尽管这种空间嵌入的思想比较简单,但 GNP 被证明在网络距离预测方面非常有效.然而,GNP 使用固定基准节点集,因此,系统面对节点失效问题非常脆弱.同时,由于每个节点在确定自己坐标时都需要测量到达基准节点距离,在基准节点附近的节点也会遭受较大的测量流量.Ng 随后提出了 NPS(network positioning system)[6]对 GNP 进行改进,在预测过程中引入层次结构,通过逐次迭代的方式实现节点的嵌入.NPS 相对 GNP 而言更加健壮,但其存在误差累积放大效应,初始计算时一旦出现误差,则误差值会随着迭代次数的增加而不断增加.

2.1.2 Virtual landmarks 和 ICS(Internet coordinate system)

虚拟基准节点(virtual landmarks)[7]和 ICS[8]是由不同研究人员同时提出的独立距离预测机制,两者原理基本相同,均使用主成分分析法提取网络的拓扑信息以降低嵌入空间维数,通过矩阵乘法运算获取节点在嵌入空间中的坐标,运算效率远高于 GNP.在这两种预测机制中,同样需要首先部署 N 个基准节点构成基准节点集,基准节点之间互相测量到达彼此的距离并形成一个 $N\times N$ 的距离矩阵 D,然后由某一中心管理节点对 D 进行奇异值分解(singular value decomposition,简称 SVD),$D=U\cdot W\cdot V^T$.那么,距离矩阵 D 中每一个元素可以表示为

$$D_{ij}=\sum_{k-1}^{N}w_kU_{ik}V_{jk},1\le i\le N,1\le j\le N \tag{4}$$

其中,w_i 按降序排列,利用 PCA 分析取其前 m 项($m<N$)对 D_{ij} 进行近似.矩阵 U 的前 m 列组成变换矩阵 U_m,距离矩阵 D 中任意一个距离向量 D_i 通过变换 $D_i'=U_m^T\cdot D_i$ 映射为 m 维向量 D_i',该向量即构成基准节点 L_i 在嵌入空间内的坐标值.普通节点 H_i 加入系统时,首先测量到所有基准节点的距离形成一个距离向量 $V_i=(D_{H_iL_1},\ldots,D_{H_iL_N})$,然后根据变换矩阵 U_m 将该向量映射到 m 维空间中,映射后的向量值即节点 H_i 坐标.图 2 描述了这一机制的基本原理.

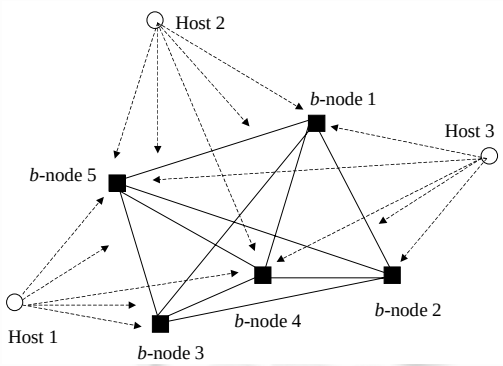


Fig.2 Network distance prediction using principle component analysis

图 2 基于主成分分析的网络距离预测

Virtual Landmarks 和 ICS 在坐标嵌入之前进行了优化,因此能够基于网络特征选择合适的嵌入空间维数,进而提高预测精度.但是,它们都需要通过中心节点完成上述优化过程,使得系统容易出现单点故障问题.同时,采用固定基准节点又会出现因基准节点失效而造成的系统无法正常工作.这些都限制了其在实际大规模网络中的应用.

2.1.3 Lighthouse 与 PIC(practical internet coordinates)

在前述距离预测机制中,新加入系统的节点需要与系统中预先部署的固定基准节点联系.当部分基准节点出现故障时,系统将无法正常工作.Lighthouse[9]与 PIC[10]引入了动态基准节点选择机制避免上述问题.一个新节

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

点加入 Lighthouse 系统时,首先从已经具有位置信息的节点集中随机选择一组节点作为参考节点,将这些参考节点两两之间组成的向量作为局部基(local base)构建一个局部坐标系统,并测量到这些参考节点的距离,然后通过 Gram-Schmidt 变换计算出自己在该局部坐标系统中的位置信息.最后,根据全局变换矩阵(transition matrix)进行坐标空间映射,将局部坐标变换为全局坐标.在 PIC 中,新加入节点从系统现有节点中随机选出一组节点作为基准节点,测量到它们的距离,并根据它们的坐标计算自己的全局坐标.为了防止网络中基准节点发生异常或者有恶意节点冒充基准节点发布虚假坐标信息,PIC 使用基于三角不等式的安全测试对错误坐标进行过滤,在选择基准节点的过程中排除那些严重违反三角不等式约束的节点,有效增强了系统的健壮性.

Lighthouse 与 PIC 避免了 GNP 等机制因固定基准节点失效而导致系统无法正常工作的问题,但是由于使用动态基准节点选择机制,它们的预测精度相对低于 GNP.同时,在构造局部坐标系统的过程中,Lighthouse 利用解线性方程的方式计算节点的 d 维坐标,因此无法过滤测量噪声以及恶意节点.而 PIC 使用了 Downhill Simplex 算法计算节点坐标值,因此存在收敛时间慢、最终解的质量依赖于初始解以及容易陷入局部最优等问题.

2.2 基于模拟的虚拟坐标空间嵌入

2.2.1 BBS(big bang system)

与基于基准节点的预测机制不同,BBS[11]将网络节点建模一组物理粒子集合,每个粒子代表一个网络节点在欧氏空间中的映像,这些粒子在势能作用下根据牛顿力学原理在空间中运动.如公式(5),系统中势能即节点间距离预测误差.公式(6)描述了节点间相互作用力的表达式,其中,$\nabla_{\vec{x}} f(\cdot)$ 代表函数 f 在向量 $\vec{x}$ 下的梯度,$\vec{c}_{H_i}$ 分别代表第 i 个节点在嵌入空间内的当前坐标向量.为了避免出现振荡,BBS 中又引入摩擦力的概念,节点在每次运动中都会有一部分能量因为摩擦力作用而消失,最终达到稳定状态.

$$E_T(H_1,...,H_N)=\sum_{i,j=1|i>j}^{N} Error(D_{H_i,H_j},\hat{D}_{H_i,H_j}) \tag{5}$$

$$\vec{F}_{i0}=-\nabla_{\vec{v}_{i0}} E_T(\vec{c}_{H_1},...,\vec{c}_{H_N}) \tag{6}$$

初始时,所有节点都放置在坐标系统的原点位置,每次迭代,粒子之间根据嵌入误差情况在势能场内相互吸引或者排斥.最终,在总的势能最小(即嵌入误差最小)时算法终止.这种动力学模型能够帮助节点跳出局部最优值,因此,BBS 在预测精度优于包括 GNP 在内的多种距离预测机制.但是,BBS 全部计算需要由一个中心节点负责完成,难以构造分布式实现方式,导致其扩展性相对较差.

2.2.2 Vivaldi

节点坐标嵌入的过程,本质上就是最小化全局误差的过程.Dabek 认为,这一全局最小化过程与物理上通过调整端点位置最小化弹簧弹性势能非常类似.因此,他们将空间嵌入问题模拟为弹簧弹性势能最小化问题,并提出了一种完全分布式的距离预测机制 Vivaldi[12].节点在加入系统时随机测量到系统中一组节点的距离,然后根据测量结果确定自己的初始坐标值.每个节点 H_i 与其邻居节点 H_j 都通过一个虚拟弹簧相连,弹簧的原始长度是 H_i 与 H_j 之间的测量距离 D_{H_i,H_j},而当前长度则是通过节点当前坐标计算出的距离预测值 $\hat{D}_{H_i,H_j}$.根据两者关系,弹簧将相应地伸长或压缩.最终,弹簧在预测值与测量值相等时达到一个平衡状态.此时,系统节点坐标即为最优嵌入坐标.设 $\vec{C}_{H_i}$ 与 $\vec{C}_{H_j}$ 分别代表节点 H_i 与 H_j 的坐标值,则每经过一次迭代,节点坐标更新过程见公式(7).其中,δ代表局部计算步长,$u(\vec{C}_{H_i}-\vec{C}_{H_j})$ 代表弹簧力的作用方向.

$$\vec{C}_{H_i}=\vec{C}_{H_i}+\delta\cdot(D_{H_i,H_j}-\hat{D}_{H_i,H_j})\cdot u(\vec{C}_{H_i}-\vec{C}_{H_j}) \tag{7}$$

为了降低对网络的侵扰,Vivaldi 通过正常网络应用分组捎带方式完成时延测量.与其他距离预测机制相比,Vivaldi 的最大优点是其具有全分布式的结构,能够与 P2P 等应用很好地结合在一起.但是,Vivaldi 本质上仍然是一种基于虚拟坐标的距离预测机制,尽管其引入了具有高度参数的欧氏空间处理边缘网络与核心网络的性能差异问题,网络距离的非对称性以及不满足三角不等式约束等特征仍影响其预测精度.同时,Vivaldi 分布式计算特性也使得算法的收敛时间较长.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

另外,还有许多距离预测机制如 IDES,通过矩阵分解的方式实现网络距离预测[13],避免了坐标嵌入过程中由于网络节点间距离不满足如距离三角不等式、对称性等约束而造成的额外误差;Zhang 等人分析表明,距离预测过程中,短距离和长距离预测精度之间存在相互干扰,并提出了一种分层预测算法,使用多个基准节点集合为每个节点计算多个坐标,在预测过程中根据距离范围差异分别采用不同的坐标计算节点间距离值[14].Shavitt 等人研究了因特网距离空间的曲率特征,提出负曲率测度空间更适合描述因特网距离,并据此构造了一种基于双曲空间的距离预测机制[15].Lee 等人通过矩阵扰动理论分析了使用欧氏空间嵌入进行距离预测过程中的误差问题,指出网络距离违反三角不等式约束是欧氏空间嵌入预测误差的主要原因[16].Chen 等人提出了一种基于网络节点距离相似性聚类的距离预测机制 Internet Iso-bar,其能够通过调整聚类条件在预测精度与系统负载之间做出折衷[17],Ledlie 认为,目前的基于虚拟坐标的距离预测机制都没有考虑实际网络环境中网络距离值大范围的动态变化,因此提出在虚拟坐标系统中增加一组过滤器,防止出现坐标振荡的现象[18].

虚拟坐标的安全性是近年针对虚拟坐标空间嵌入的又一个研究热点.Kaafar 等人的研究表明,当网络中存在恶意节点发布虚假信息时,节点在嵌入空间中的坐标值将会严重偏离真实值[19].鉴于此,他们提出通过卡尔曼滤波器过滤恶意节点行为[20].Saucez 通过为 Vivaldi 这样的分布式距离预测系统中增加信誉体系构建 RVivaldi 预测机制[21].Wang 等人指出,即使在最简单的攻击下,传统基于统计检测的安全机制也可能失效.因此,他们提出了一种基于 Byzantine 错误检测算法和违反三角不等式分析的两阶段网络坐标安全机制[22].然而,关于虚拟坐标安全性问题的研究目前仅仅处于起步阶段,前述机制也只是解决某些特定安全问题,构建一个实用安全的距离预测机制还有许多问题有待进一步研究.

2.3 基于虚拟坐标的距离预测技术性能评价

基于虚拟坐标的距离预测技术优点主要包括:首先,选择一组能够最小化嵌入误差的坐标值后,可以使用简单的距离公式计算出网络中任意两个节点间的距离;其次,存储节点坐标值需要的空间很小.同时,坐标值可以方便地捎带在诸如 P2P 应用等协议报文中.这样,不必专门发送距离查询报文;再次,对于采用分布式结构的预测机制而言,节点所需要的距离值由自己独立计算得出,距离预测完全在本地进行,使得系统的扩展性更好.

尽管基于虚拟坐标的距离预测技术对大多数网络应用都适用,但它还有一些缺陷:

首先,该技术的一些固有特性影响了预测结果的精确性,其主要原因包括:① 从网络距离空间到坐标空间的嵌入引入了一定的误差;② 虚拟坐标本质上是基于网络距离在某一时刻的快照所构建,该信息会随时间变化而过时,进而产生预测误差;其次,网络节点必须加入到系统中并获取坐标值后才能够进行距离预测,限制了距离预测的应用范围;第三,该技术仅限定于网络时延预测,而且无法提供预测值的方差、变化趋势等指标.

Zhang 等人从网络应用的角度对 GNP,IDES 等距离预测算法的精度进行了分析,结果显示,尽管以相对误差作为评价标准来看,大多数预测算法的误差都不大,但是这些误差对网络应用性能的影响仍然非常明显[23].因此,设计新的机制提高距离预测精度仍是需要进一步研究的内容.

3 基于网络结构的距离预测技术

基于虚拟坐标的距离预测技术实际上是将网络视为一个黑盒,它并不关心网络物理拓扑结构以及选路控制等.这种简化使得通过空间嵌入对网络距离进行预测成为可能,但同时也丢弃了大量的可用信息,在一定程度上影响了预测精度.与上述基于虚拟坐标的距离预测技术不同,基于网络结构的距离预测技术充分考虑了网络特征,据此构建有效的预测机制.这一技术经历了两个发展阶段:早期研究如 IDMaps[24]等主要根据因特网选路及地址分配特征估算网络节点间距离值;后期随着因特网拓扑发现技术的发展[25,26],利用网络拓扑结构辅助距离预测成为可能,因此又出现了结构化网络距离预测机制[27]等新方法.

3.1 IDMaps

IDMaps 是最早提出的一种大规模网络距离预测机制,通过集中式服务为网络节点提供距离预测服务.该机制中包括两个核心内容:地址前缀块(address prefix,简称 AP)以及 Tracer 节点.每个 AP 代表一个具有相同 IP 地

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

址前缀的节点集合,Tracer 节点则是在网络中部署的测量节点,并保证每个地址块至少有一个 Tracer 与其接近.不同 Tracer 节点周期性地互相测量相互之间距离,同时,每个 Tracer 节点周期性地测量到与其临近 AP 的距离.所有这些测量信息都被收集到某个集中式服务器中,这样,任意两台主机间的距离就等于两台主机所在 AP 到达各自 Tracer 节点间距离与两个相关 Tracer 节点间距离之和.

在实际应用中,IDMaps 还存在如下一些问题:首先,IDMaps 中基于 IP 地址前缀进行 AP 划分,认为具有相同地址前缀的主机在物理上也比较接近,但因特网并非按照这一准则进行地址划分;其次,在没有完整网络拓扑的情况下,如何合理地划分 IP 地址到不同的簇并不是一件简单的事情;最后,使用固定 Tracer 节点对系统的健壮性和扩展性有负面影响.鉴于此,人们又设计了 King[28]等多种改进的距离预测机制,分别从 AP 划分以及 Tracer 节点选择等方面对其进行了改进.

3.2 结构化网络距离预测

当前,因特网选路技术本质上是由目的地址驱动,因此,来自于相近源地址、到达同一个目的地址的分组会很快汇聚到同一条路径上.如果给定足够多且地理上分散的观测点集合 V,则网络中从任意一个节点 S 到节点 D 的路由将会与某个观测点 V_i 到达 D 的路由出现路径段重合.利用这一特性,可以实现对节点间距离的预测.

基于因特网选路拓扑测量的结构化距离预测机制就是上述思想的一种具体实现,该机制包括路径预测以及距离估计两个过程.路径预测过程如图 3 所示,在网络中分布广泛的监测点测量到 BGP 选路表中的每个地址前缀的路径,并基于测量信息构建因特网地图.普通节点 S 在加入系统时,会随机选择一些 BGP 前缀并测量到它们的路径信息.当节点 S 希望预测到节点 D 的路径时,S 搜索自己在加入系统时发出的测量路径,直到找出一个与某一监测点到 D 路径的相交节点 I.这样,从 S 到 D 的路径被预测为 S 到 I 和 I 到 D 两段路径的组合.如果找不到这样的相交点,那么使用从监测点到 S 的路径加上监测点到 D 的路径作为 S 到 D 的近似路径.为了处理因特网中广泛存在的路径非对称性问题,算法分别对 S 到 D 的路径和 D 到 S 的路径进行独立预测.得到预测路径后,利用不同路径段上的时延迭加值即可对节点间的距离进行估计.

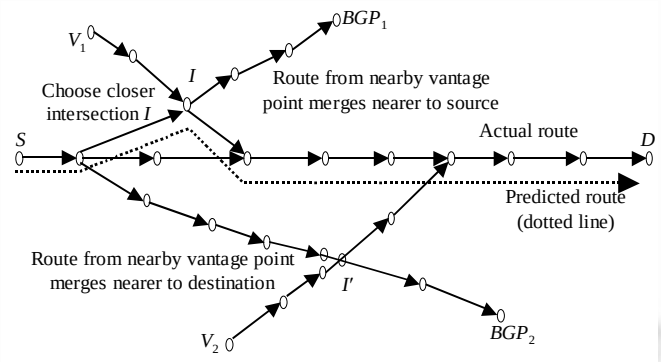


Fig.3 Network topology based distance prediction

图 3 基于网络拓扑的距离预测

与基于虚拟坐标的距离预测机制仅仅能够预测节点间距离不同,该机制可以通过改进将距离预测扩展到诸如可用带宽、丢包率等其他网络性能参数.但是,这一机制最大的问题就是其预测精度取决于对因特网拓扑结构探测的准确度,需要在网络中部署足够多的监测点,并通过大量测量构造出精确的因特网地图.而且随着因特网选路结构的变化,所构造地图也必须进行相应的变化,导致算法具有较大的负载.

网络距离特征与网络结构有着密切联系,当前,因特网的层次化结构导致网络性能的不均匀性,进而影响其时延分布模式.而基于网络结构的距离预测技术在距离预测过程中充分考虑到了网络结构的影响,因此能够提供更为精确、合理的预测结果.随着网络拓扑发现等技术的发展,结构化预测技术将会得到人们越来越多的关注.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4 网络邻近度估计技术

基于虚拟坐标的距离预测方式采用空间嵌入机制会导致额外的误差;而基于网络结构的距离预测机制又根据 IP 地址块或网络结构将节点聚类,只能提供粗粒度的距离估计结果,预测精度也难以保证.网络邻近度估计技术则从另一角度实现了节点间距离的预测,其基本思想是,首先通过一定的算法寻找到目标节点可能的最近节点或节点集,降低备选空间的大小,因此可以通过直接测量的方式获取到最近节点的距离.

4.1 Netvigator

在早期估计节点临近度的机制中,首先,每个节点测量到网络中基准节点的 RTT 值,然后根据测量结果按照顺序对基准节点进行排列,形成一个基准节点序列,具有相似节点序列的节点就被认为是距离较近节点[29].但仅凭两个节点到一组固定基准节点的距离相类似判定两个节点相邻近,会造成很大程度的误判.图 4 中的节点 A,B 到两个基准节点的距离很相近,但它们在网络中并不相邻.如果在判别过程中引入到基准节点路径中经历的中间节点信息,如图 4 中的中间节点 s 和 t,则可以避免这一误判.由此,Sharma 提出了一种网络邻近度估计技术 Netvigator[30],其中利用了两类基准节点:固定基准节点(landmarks)以及临时基准节点(milestones).前者是一些在网络中固定部署的基准节点,后者由普通节点在探测固定基准节点的过程中动态发现(traceroute 探测到的中间路由器).通过同时记录到临时基准节点的距离,增加节点邻近度估计的准确度.

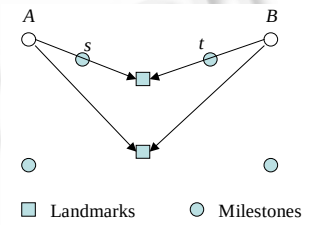


Fig.4 Network proximity estimation
图 4 网络邻近度估计

Netvigator 包括两个基本工作过程:基准节点向量构建以及最近节点查询.在前一过程中,每个普通节点向固定基准节点发送探测报文,并记录下到固定基准节点以及临时基准节点的距离值.在收到所有的应答后,普通节点构造一个基准节点向量,其中包括到所有固定和临时基准节点的距离,并将该基准节点向量提交给系统中预定义的全局服务器.在最近节点查询过程中,查询节点向全局服务器发送查询请求,由服务器运行聚类算法选出 k 个备选的临近节点返回给查询节点.随后,查询节点向备选节点发起主动测量获取到其距离.Netvigator 通过全局服务器向普通节点提供网络相邻信息,因此,其部署代价和系统扩展性比较难以保证,需要设计合适的结构保证系统的稳定性和高效性.

4.2 Meridian

Wong 提出了一种使用覆盖网络进行基于网络距离信息的节点选择机制 Meridian[31],该机制结合了查询选路和主动测量技术.每一个 Meridian 节点通过覆盖网络记录 M 个对等节点,并根据与这 M 个对等节点间的距离关系将它们组织在一个半径指数增长的同心圆环结构中,如图 5 所示.对于第 i 个圆环而言,内圆半径 $r_i=as^{i-1}$,外圆半径 $R_i=as^i$.其中,a 为一个预先确定的常数,s 是一个指数增长因子,且 $r_0=0$,$R_0=a$.所有位于此圆环内的对等节点到 A 的距离 d 满足 $r_i\le d\le R_i$.为了限制圆环数目,当 i 达到某个阈值 i^*后,定义 $r_i= as^{i^*-1}$,$R_i=\infty$.同时,不同 Meridian 节点之间通过 Gossip 协议相互交换信息,以保证不同节点形成的覆盖网络之间不会相互隔绝.

Meridian 的典型应用包括最近节点选择、选择到达一组节点距离最小的节点、计算满足某个时延上限约束的节点集合等.以查询到某一节点 T 的最近节点为例,普通节点向某个 Meridian 节点 A 发起查询请求,节点 A 首先判断自己到 T 的距离 d,然后探测其覆盖网络中位于半径为$(1-\beta)d$~$(1+\beta)d$ 圆环中的邻居节点到 T 的距离,并将该查询转发至这些邻居节点中到 T 最近的节点 B,进而由 B 重复这一查询过程,直至转发到某个节点后无法再找到更近节点进行转发.此时,该节点即为查找得到的最优节点.其中,β是一个位于 0 和 1 之间的预设参数.由于 Meridian 覆盖网络圆环半径指数增长,因此,这种迭代查询能够以指数速度接近目标节点.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

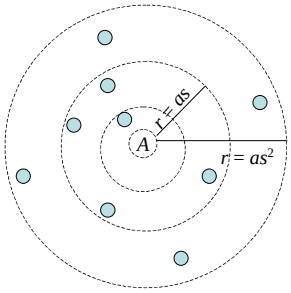


Fig.5 Meridian overlay network

图 5 Meridian 覆盖网络

相对于 Netvigator 的中心服务器结构,Meridian 松散覆盖网络结构模式使其能够很好地应对网络节点失效问题.同时,Meridian 采用直接测量的方式查找最近节点,因此能够迅速反映出网络性能动态变化情况,有效避免了空间嵌入带来的误差.但是在 Meridian 中,由于每次查询都需要进行一部分主动测量,导致了额外的网络侵扰和查询时延.同时,系统负载也取决于查询量,当查询量很大时会造成对网络侵扰过大.

5 网络距离预测技术综合分析及未来研究方向

从总体上说,我们可以从以下几个方面对距离预测机制的性能进行评价:

测量及部署代价.任何一种距离预测机制都是在部分测量信息的基础上实现的.由于测量对网络造成额外的侵扰,因此,一个好的预测机制应当使用尽可能少的测量.对任何一种网络应用而言,部署代价将直接影响其能否在因特网中应用.借鉴 P2P 等应用在网络中取得的巨大成功,分布式无中心结构的距离预测机制能够实现增量部署,具有较好的扩展性,因此明显优于依赖集中式服务实现的距离预测机制;

获取距离信息的复杂性.在诸如 GNP 等预测机制中,节点必须加入系统并被分配一个虚拟坐标值后才能够预测到其他节点的距离;而类似 Meridian 等机制中,通过向覆盖网络中节点查询,只要目标节点能够响应测量报文,就可以获得到其最近距离的节点.因此相对而言,这类机制更加具有一般性;

安全性及健壮性.距离预测机制必须能够处理大规模网络环境下的多种异常,尤其是在网络中存在恶意节点或者攻击的情况下,系统要保证仍能够正常工作,不能出现单点失效的问题.同时,距离预测机制还必须能够适应网络状态的动态变化;

预测性能参数.大多数基于空间嵌入的距离预测机制仅仅能够实现节点间距离值的预测,但其他诸如可用带宽以及丢包率等性能参数对分布式应用性能同样具有重要影响.结构化距离预测技术结合因特网拓扑测量技术能够实现多参数预测,因此其性能要相对优于其他机制;

网络结构和时变的影响.网络状况随时间在不断的变化.许多距离预测机制严格来说都是基于网络静态特性的估计距离的一种近似.这种近似假设在网络核心部分一般能够成立,但是用于边缘网络则显得不够合理.因特网持续的变化要求系统必须周期性地进行更新,一个好的距离预测机制应当关注于网络距离的变化趋势而非简单地估计静态距离值.

表 1 分别通过几个基本指标对前面提到的典型距离预测技术进行了比较.其中,Vivaldi 由于测量通过捎带方式完成,其测量负载可以忽略.从表 1 可以看出,同一类型的预测机制性能指标具有很强的相似性,而且没有哪一种距离预测机制能够在预测性能方面占有绝对优势.

在进一步研究中,网络距离技术还需要解决下列问题:

(1) 网络距离特征及其对嵌入空间选择的影响

严格来说,由于违反对称性以及三角不等式约束,因特网距离空间不满足测度空间的定义.因此,任何一种基于虚拟坐标的距离预测机制都是对网络距离的一种近似,选择合适的嵌入空间对预测精度有重要影响.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Abrahao 等人的研究表明,与传统 PCA 分析结论不同,网络距离空间具有非常低的维度[32].也有研究指出,Internet 选路空间具有指数扩张速度,因此,多项式扩张速度的欧氏空间难以对其进行精确描述等.如何利用这些特性选择更好的嵌入空间实现距离预测仍需要进一步探讨.

Table 1 Comparison of researches on network distance prediction

表 1 不同距离预测机制研究对比

Scheme	Measurements overhead	Prerequisites	Embedded security	Fixed landmark	Churn recovery	Infrastructure dependability	Dynamic
GNP	$O(L^2+L\cdot H)$	A set of landmarks	No	Yes	No	No	No
ICS	$O(L^2+L\cdot H)$	A set of landmarks	No	Yes	No	No	No
Lighthouse	$O(L^2+L\cdot H)$	Frame of reference	No	No	No	No	No
PIC	$O(L^2+L\cdot H)$	P2P substrate	Yes	No	No	No	No
BBS	$O(L^2+L\cdot H)$	A perspective of network	No	No	No	No	No
Vivaldi	--	Inter-nodes traffic	No	No	Yes	No	No
IDES	$O(L^2+L\cdot H)$	A set of landmarks	No	Yes	No	No	No
Internet Iso-bar	$O(C^2+H)$	A set of landmarks	No	No	Yes	No	Yes
IDMaps	$O(T^2+AP)$	A set of tracers	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Structural prediction	$O(V\cdot N_p+L\cdot H)$	A set of vantage points	No	Yes	No	No	No
Netvigator	$O(L\cdot H+R\cdot H)$	Traceroute supported routers	No	Yes	No	Yes	No
Meridian	$O(N\cdot m^2)(GI)+O(\log^2 N)(RI)$	--	No	No	Yes	No	Yes

L: number of landmarks; H: total hosts; N: number of Meridian nodes; m: number of rings per node; R: number of milestones; V: number of vantage points; N_p: number of BGP prefixes. T: number of tracers; AP: number of clustered address prefixes; GI: overhead per gossip interval; RI: overhead per ring management interval[36]; C: number of clusters.

(2) 距离预测新机制的研究

现有的各种距离预测机制的内在缺陷限制了预测精度的提高和在因特网中的大规模应用,因此需要探讨新的距离预测机制和解决方案.例如:考虑到因特网层次化结构对网络性能的重要影响,一个可行的研究方向就是在预测过程中充分利用因特网边缘-核心-边缘的网络结构信息将网络划分为多个预测域,通过分域的方式独立为每个预测域构造距离预测模型,避免多个域间时延分布的相互干扰;其次,因特网节点间距离呈现典型的分簇特性,同时,簇内节点间的距离违反三角不等式约束情况更加严重[33].因此,可以考虑如何利用这种特性构建新的距离预测机制,提高预测精度;再次,因特网选路对节点间距离有重要影响,可以考虑利用选路信息提高预测的精度.另外,网络层析成像(network tomography)[34,35]能够通过端到端测量推断链路级的时延、丢包率等性能参数,它广泛应用于网络故障诊断、拓扑发现等研究中,如何将这一技术与距离预测结合也值得进一步探索.

(3) 多种网络性能参数的测量预测

当前,大多数距离预测机制仅仅能够针对网络往返时延进行预测.然而,往返时延只是影响网络应用性能诸多因素中的一个,广义的网络距离应当包括诸如可用带宽、丢包率、时延抖动等多种性能参数.与往返时延是一种加性参数不同,可用带宽为凹性参数,丢包率为乘性参数,简单利用空间嵌入技术将这些参数映射到诸如欧氏空间这样的几何空间中会导致较大的预测误差.因此,如何基于不同性能测度的特性设计合适的模型实现相应性能参数的预测仍需要进一步研究.

(4) 距离预测系统的安全性

目前,大多数的预测机制都假设参与节点是可以信任的,如果网络中出现恶意节点提供虚假的距离信息,将严重降低距离预测精度甚至导致整个预测系统的失效.在基于固定基准节点以及集中式结构提供距离预测服务的系统中,相应基准节点或中心服务器又会面临各种攻击的威胁.能否有效防范这些问题,直接影响距离预测服务在网络中的部署.目前,有关这方面的研究刚刚起步,在进一步的研究中可以借鉴分布式系统设计中的概念,构建实用的安全性距离预测系统.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(5) 构建完善的因特网性能服务体系结构

随着网络技术的发展,越来越多的网络应用需要依赖因特网性能信息提高自身性能.设计一种标准化的性能服务模型,以通用的方式向因特网端用户和各种网络应用提供性能服务变得日益重要.网络距离预测为实现这样一种服务提供了部分解决方案,从本质上讲,距离预测的最终目标是协助优化分布式应用的性能.目前,围绕如何优化 P2P 等应用的性能出现了一些探讨,其中典型机制包括 P4P[37]、基于指导的 ISP-P2P 协作机制[38]等,进一步的研究应当结合网络架构和应用结构两方面综合考虑.设计一个精确、可靠的因特网性能服务体系结构是下一步的重要研究方向,也是网络距离预测研究的根本目的所在.

6 结束语

良好的网络距离预测机制能够为飞速发展的网络应用提供所需要的网络状态信息,帮助优化网络应用性能.从目前的研究现状看,根据预测机理的不同,网络距离预测技术形成了基于虚拟坐标的预测技术、基于网络结构的预测技术以及网络邻近度估计技术 3 个主要的研究方向,每个方向都提出了一些典型的预测机制.但是,目前的研究还普遍存在难以适应网络动态变化以及无法对网络性能参数进行综合预测等问题,没有哪一种现有的预测机制能够成为因特网中的公认标准.另一方面,为了适应在复杂因特网环境中部署,距离预测技术的安全性成为目前一个新的研究热点.总之,尽管目前有关网络距离预测的研究已经取得了长足的进步,但这一领域仍有许多问题需要进一步研究,尤其是分布式、易于部署、容错性及安全性好的综合距离预测技术将是未来研究的重点.在新型网络应用需求的推动下,网络距离预测最终将可能发展成为一种新型通用的网络服务.

References:

[1] Stoica I, Morris R, Liben-Nowell D, Karger D, Kaashoek M, Dabek F, Balakrishnan H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):17−32.

[2] Gossa J, Pierson J. End-to-End distance computation in grid environment by NDS, the network distance service. In: Proc. of the ECUMN 2007. Washington: IEEE Computer Society, 2007. 210−222.

[3] Xu D, Kulkarni S, Rosenberg C, Chai H. Analysis of a CDN-P2P hybrid architecture for cost-effective streaming media distribution. Multimedia Systems, 2006,11(4):383−399.

[4] Ren S, Guo L, Zhang X. ASAP: An AS-aware peer-relay protocol for high quality VoIP. In: Proc. of the IEEE ICDCS 2006. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 70−79.

[5] Ng T, Zhang H. Predicting Internet network distance with coordinates-based approaches. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2002. Washington: IEEE Computer Society, 2002. 170−179.

[6] Ng T, Zhang H. A network positioning system for the Internet. In: Proc. of the USENIX Annual Technical Conf. 2004. 2004. http://www.cs.rice.edu/~eugeneng/papers/USENIX04.pdf

[7] Tang L, Crovella M. Virtual landmarks for the Internet. In: Proc. of the ACM IMC 2003. New York: ACM Press, 2003. 143−152.

[8] Lim H, Hou J, Choi C. Constructing an Internet coordinate system based on delay measurement. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2005,13(3):513−525.

[9] Pias M, Crowcroft J, Wilbur S, Harris T, Bhatti S. Lighthouse for scalable distributed location. In: Proc. of the IPTPS 2003. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 278−291.

[10] Costa M, Castro M, Rowstron A, Key P. PIC: Practical Internet coordinates for distance estimation. In: Proc. of the IEEE ICDCS 2004. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 178−187.

[11] Shavitt Y, Tankel T. Big-Bang simulation for embedding network distances in Euclidean space. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004,12(6):993−1006.

[12] Dabek F, Cox R, Kaashoek F, Morris R. Vivaldi: A decentralized network coordinate system. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2004. New York: ACM Press, 2004. 15−26.

[13] Mao Y, Saul L, Smith J. IDES: An Internet distance estimation service for large networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Special Issue on Sampling the Internet, Techniques and Applications, 2006,24(12):2273−2284.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[14] Zhang R, Hu Y, Lin X, Fahmy S. A hierarchical approach to internet distance prediction. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems 2006. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 73−80.

[15] Shavitt Y, Tankel T. Hyperbolic embedding of Internet graph for distance estimation and overlay construction. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2008,16(1):25−36.

[16] Lee S, Zhang Z, Sahu S, Saha D. On suitability of Euclidean embedding of internet hosts. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2006,34(1):157−168.

[17] Chen Y, Lim K, Katz R, Overton C. On the stability of network distance estimation. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2002,30(2):21−30.

[18] Ledlie J, Pietzuch P, Seltzer M. Stable and accurate network coordinates. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems 2006. Washington: IEEE Computer Society, 2006. 84−93.

[19] Kaafar M, Mathy L, Turletti T, Dabbous W. Virtual networks under attack: disrupting internet coordinate systems. In: Proc. of the CoNext 2006. 2006. http://www.run.montefiore.ulg.ac.be/~kaafar/KaafarCoNext06.pdf

[20] Kaafar M, Mathy L, Barakat C, Salamatian K, Turletti T, Dabbous W. Securing Internet coordinate embedding systems. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2007. New York: ACM Press, 2007. 61−72.

[21] Saucez D, Donnet B, Bonaventure O. A reputation-based approach for securing vivaldi embedding system. In: Proc. of the IFIP TC6.6 Workshop on Dependable and Adaptable Networks and Service. LNCS 4606, Berlin: Springer-Verlag, 2007. 78−85.

[22] Wang G, Ng T. Distributed algorithms for stable and secure network coordinates. In: Proc. of the ACM SIGCOMM IMC 2008. New York: ACM Press, 2008. 131−144.

[23] Zhang R, Tang C, Hu Y, Fahmy S, Lin X. Impact of the inaccuracy of distance prediction algorithms on Internet applications—An analytical and comparative study. In: Proc. of the IEEE INFOCOM 2006. 2006. http://cobweb.ecn.purdue.edu/~rongmei/publications/infocom06.pdf

[24] Francis P, Jamin S, Jin C, Jin Y, Raz D, Shavitt Y, Zhang L. IDMaps: A global internet host distance estimation service. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2001,9(5):525−540.

[25] Breitbart Y, Garofalakis M, Jai B, Martin C, Rastogi R, Silberschatz A. Topology discovery in heterogeneous IP networks: The NetInventory system. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2004,12(3):401−414.

[26] Donnet B, Raoult P, Friedman T, Crovella M. Deployment of an algorithm for large-scale topology discovery. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Sampling the Internet: Techniques and Applications, 2006,24(12):2210−2220.

[27] Madhyastha H, Anderson T, Krishnamurthy A, Spring N, Venkataramani A. A structural approach to latency prediction. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conf. 2006. New York: ACM Press, 2006. 99−104.

[28] Gummadi K, Saroiu S, Gribble S. King: Estimating latency between arbitrary internet end hosts. In: Proc. of the ACM IMW 2002. 2002. http://www.mpi-sws.org/~gummadi/king/king.pdf

[29] Ratnasamy S, Handley M, Karp R, Shenker S. Topologically-Aware overlay construction and server selection. In: Proc. of the IEEE INFOCOMM 2002. New York: IEEE Press, 2002. 1190−1199.

[30] Sharma P, Xu Z, Banerjee S. Estimating network proximity and latency. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006,36(3):39−50.

[31] Wong B, Slivkins A, Sirer E. Meridian: A lightweight network location service without virtual coordinates. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2005. New York: ACM Press, 2005. 85−96.

[32] Abrahao B, Kleinberg R. On the Internet delay space dimensionality. In: Proc. of the ACM SIGCOMM Internet Measurement Conf. 2008. New York: ACM Press, 2008. 278−287.

[33] Lee S, Zhang Z, Sahu S, Saha D, Srinivasan M. Fundamental effects of clustering on the euclidean embedding of Internet hosts. In: Proc. of the IFIP Networking 2007. Berlin: Springer-Verlag, 2007. 890−901.

[34] Chen Y, Bindel D, Song H, Katz R. An algebraic approach to practical and scalable overlay network monitoring. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2004. New York: ACM Press, 2004. 55−66.

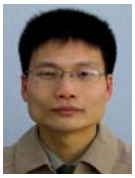
[35] Zhao Y, Chen Y, Bindel D. Towards unbiased end-to-end network diagnosis. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2006. New York: ACM Press, 2006. 219−230.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[36] Elmokashfi A, Kleis M, Popescu A. NetForecast: A delay prediction scheme for provider controlled networks. In: Proc. of the IEEE GLOBECOM 2007. New York: IEEE Press, 2007. 502−507.

[37] Xie H, Yang Y, Krishnamurthy A, Liu Y, Silberschatz A. P4P: Provider portal for applications. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2008. New York: ACM Press, 2008. 351−362.

[38] Aggarwal V, Feldmann A, Scheideler C. Can ISPs and P2P systems cooperate for improved performance? ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2007,37(3):29−40.



邢长友(1982－),男,河南杞县人,博士,讲师,主要研究领域为计算机网络,网络测量,分布式系统.

陈鸣(1956－)男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络体系结构,网络管理,网络测量,分布式系统.

¤¤¤