

# 一种优化 IPv6 源路由拓扑探测的方法<sup>\*</sup>)

刘振山 王清贤 罗军勇

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

**摘要** IPv6 网络普遍支持源路由的特性及源路由探测具有发现交叉链路的能力,因而成为近年来网络拓扑发现领域研究的焦点。但源路由探测冗余避免和种子节点选取这两个核心问题至今没有得到合理的解决。提出了一种优化 IPv6 源路由拓扑探测的方法,该方法利用分布式拓扑探测方式获取的基本拓扑信息为源路由种子节点的选取和探测冗余避免创造了有利的前提条件,从而显著提高了 IPv6 源路由拓扑探测的执行效率。通过对 CERNET2 网络的实际测试结果体现了该方法在提高覆盖率和探测冗余避免两个主要方面都具有优势。

**关键词** 探测停止集,源路由,探测跳板,种子

## Method for Optimizing Source Routing Topology Probing in IPv6

LIU Zhen-shan WANG Qing-xian LUO Jun-yong

(National Digital Switching System Engineering & Technology R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** Source routing support in IPv6 routers is a mandated feature and allows one to discover cross-links between arbitrary pairs of network nodes. Topology discovery for IPv6 networks with source routing based methodology is being focus in the domain of topology discovery. The selection of seeds and avoiding probing redundancy are still difficult to treat with. This paper presented a methodology for optimizing source routing probing in IPv6. With this methodology, we got the basic topology information of the target IPv6 networks with the distributed probing mode, and the basic topology information is the important precondition for the selection of seeds and avoiding probing redundancy. Then the effectiveness of source routing probing is improved greatly. In the end, our methodology is proved effective in improving coverage and avoiding probing redundancy.

**Keywords** Probing stopping set, Source routing, Probing springboard, Seed

## 1 引言

IPv6 拓扑探测属于 Internet 路由器级拓扑测量的研究范畴。Internet 路由器级拓扑测量经历了从单点测量到多点测量的发展过程。以往的研究按照探测引擎的构成方式可以分为单点探测和分布式探测。起初的单点探测采用 Traceroute 非源路由方式,相关研究主要包括:Pansiot 等人<sup>[1]</sup>、Cheswick 等人<sup>[2,3]</sup>及 Siamwalla 等人<sup>[4]</sup>的研究。Govindan 等人<sup>[5]</sup>研究了在广域网内进行源路由探测的可能性,实验证明 IPv4 网络中支持源路由的设备不足 8%,无法在大规模网络测量中应用,其它的研究也得出了相同的结论<sup>[6,7]</sup>。分布式探测方面,典型的研究为 CAIDA 的 skitter 计划<sup>[8]</sup>。WAND 网络研究小组开发了 Scamper 工具用于 IPv4, IPv6 兼容的分布式拓扑探测。B. Donnet 等人<sup>[9-11]</sup>致力于分布式拓扑探测冗余避免问题的研究,取得了显著进展。

源路由作为 IPv6 协议的基本特征被网络设备普遍支持,这使得源路由机制的拓扑发现方法成为可能。Daniel G. Waddington 等人提出了基于单点源路由探测技术的 Atlas 系统,并利用 Atlas 对 6Bone 进行了拓扑探测<sup>[12]</sup>。种子节点的选取直接决定了拓扑发现的覆盖率,因而成为单点源路由探测首要考虑的问题。Daniel G. Waddington 等人认为应选取

位于目标网络边缘的路由器作为源路由探测的种子节点,他们从 6Bone 注册中心数据库<sup>[13]</sup>中提取了 426 个位于网络边缘的路由器作为种子节点。6Bone 属于 IPv6 研究和运行的试验网络,其规模比较固定,6Bone 注册中心的数据库存储着 6Bone 网络边界的路由器信息。而对于一个国家或地区实际应用的 IPv6 网络,如 CERNET2,其网络规模随着接入需求的增长而不断扩张,并且网络的边界信息一般不对外公开,所以对种子节点的选取不能依赖公共信息。Atlas 系统的初始探测停止集为空,而探测停止集是探测冗余避免的唯一依据,因此在其探测的初始阶段,其探测冗余非常显著,严重制约了执行效能。国内杨柳等人提出了一种冗余最小化的 IPv6 拓扑发现方法<sup>[14]</sup>,该方法只是对 B. Donnet 等人提出的 double-tree 算法<sup>[10]</sup>的一部分稍做改善,而与源路由探测执行效率密切相关的若干问题并未给出优化方案。综上所述可以看出,要从根本上优化源路由探测的效率问题,就必须在源路由探测的初始化阶段为其创造必要的前提条件。

针对源路由探测冗余避免和种子节点的选取这两个核心问题,本文提出一种优化 IPv6 源路由拓扑探测的方法,其主要思想是将分布式与单点源路由探测方式有机地结合起来,将整个拓扑发现过程分为两个阶段。第一阶段,利用分布式拓扑探测方式获取目标网络的基本拓扑信息;第二阶段,从基

<sup>\*</sup>)基金资助:本研究得到国家 863 高技术研究发展计划资助,基金编号:2006AA01Z409。刘振山 博士研究生,主要研究方向为 IPv6 网络拓扑发现与网络特征分析、网络复杂度理论、大规模网络探测的无踪迹性;王清贤 教授,博士生导师,主要研究方向为网络安全、计算复杂性理论;罗军勇 教授,硕士生导师,主要研究方向为网络安全协议分析、分布式计算。

本拓扑信息中为单点源路由探测选出合适的种子节点,同时利用基本拓扑信息来初始化源路由探测冗余避免所依赖的探测停止集。通过对 CERNET2 拓扑发现结果表明,本文提出的方法在提高拓扑发现覆盖率和探测冗余避免两个方面都具有显著优势,可以作为大规模 IPv6 路由器级拓扑发现原型系统的设计依据。

## 2 优化的源路由拓扑探测方法

我们将整个拓扑探测过程分为两个阶段:

第一阶段:采用分布式探测方式获取目标网络的基本拓扑信息。

第二阶段:依据基本拓扑信息,选取源路由探测所需的种子节点;用基本拓扑信息初始化探测停止集,执行源路由拓扑探测。

### 2.1 基本拓扑信息获取

在先前的研究工作中,我们提出了一种新的分布式 IPv6 路由器级拓扑探测系统<sup>[15]</sup>——多隧道接入探测系统(Multi Tunnels Access Probing System, 简记为 MTAPS)。

MTAPS 由探测源(执行探测功能的主机)、探测跳板(公共的 ISATAP 和 6to4 中继路由器)、路径数据库(存储所有已探测路径信息的数据库)三个主要部分组成,如图 1 所示。

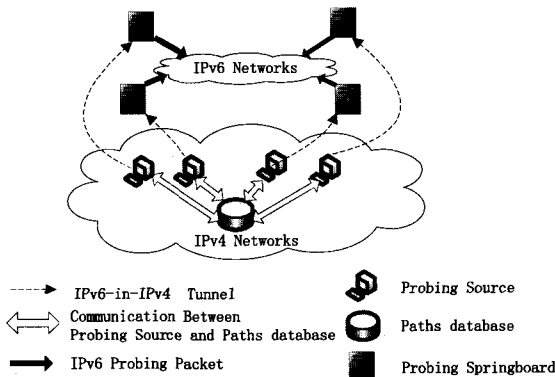


图 1 MTAPS 的组成及原理

MTAPS 将所有的探测源集中部署在一个 IPv4 的 C 类子网中,每一个探测源和一个探测跳板建立固定的 IPv6-in-IPv4 隧道。MTAPS 执行原理描述如下:

(1) 探测源 P 构造出 ICMPv6 请求报文 E, E 被添加一个 IPv4 首部变成 E', 该 IPv4 首部的源地址为 P 的 IPv4 地址,目的地址为探测跳板 V 的 IPv4 地址。

(2) E' 被投递至 V, V 脱掉 E' 的 IPv4 首部,将 E' 还原成 E, 然后根据 E 的目的地址将其投递至探测目标点 T。

(3) T 收到 E 后,产生应答报文 R。R 被投递至 V, R 被 V 添加一个 IPv4 首部变为 R' 该 IPv4 首部的源地址为 V 的 IPv4 地址,目的地址为 P 的 IPv4 地址。

(4) R' 投递至 P, P 脱掉 R' IPv4 首部还原成 R, 至此一次探测报文的往复过程结束。

所有探测源将每次探测获取的路径信息实时存储进路径数据库,并在执行每次路径探测前,通过访问路径数据库来避免探测冗余的产生。MTAPS 的探测方式既达到了分布式拓扑探测效果,又避免了高昂的部署费用和繁琐的通信维护工作,是一种容易推广的分布式拓扑探测系统。通过 MTAPS 可以高效地获得目标网络的基本拓扑信息,为解决单点源路

由探测在初始化阶段要解决的两个核心问题创造了有力的前提条件。

### 2.2 种子节点选取

如图 2 所示,依据 MTAPS 已获取的基本网络拓扑信息,可以得到距离每个探测目标点最近的路由器,将这些路由器节点作为种子节点,既满足了位于目标网络边缘的要求,又保证了每次源路由探测报文的可达性。

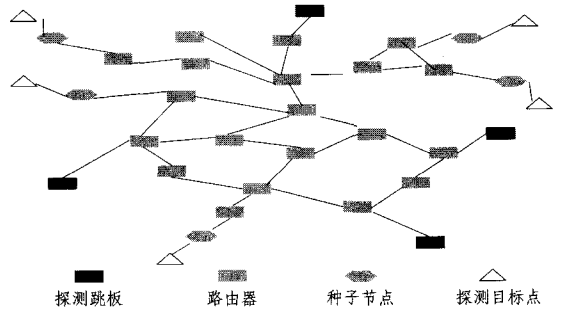


图 2 种子节点的选取

MTAPS 采用非源路由探测方式,因此从探测跳板到探测目标点的这段探测路径上,只有一个方向上的路由器的接口被探测出来,而另一个方向的路由器接口则位于探测盲区。如果把每个探测跳板也作为种子节点,在进行源路由探测的时候,就能够通过反向探测来发现被隐匿的接口。因此种子节点包括两部分:距离每个探测目标点最近的路由器节点和所有的探测跳板。

### 2.3 源路由探测冗余避免的原理

探测停止集存放着已获取的路径信息,在执行路径探测的过程中通过访问探测停止集来决定下面的探测是否继续执行。如图 3 所示,初始的探测停止集  $S = \{(1 \rightarrow 2), (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3), (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow A), (1 \rightarrow 5), (1 \rightarrow 6), (1 \rightarrow 8), (1 \rightarrow 8 \rightarrow 9), (1 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow B), (2 \rightarrow 3), (2 \rightarrow 3 \rightarrow A), (3 \rightarrow A), (8 \rightarrow 9), (8 \rightarrow 9 \rightarrow B), (8 \rightarrow 7), (9 \rightarrow B), (7 \rightarrow 9), (7 \rightarrow 9 \rightarrow B), (6 \rightarrow 7), (6 \rightarrow 7 \rightarrow 9), (6 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow B)\}$ 。当源路由探测引擎 P 准备发现种子节点 A 和 B 的之间可能存在的路径时,通过查询 S 获知路径  $(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow A)$  已经存在,且距离为 3 跳,则 P 设置 TTL 的起始值为 4,从而减少了 3 次探测冗余。当 P 获得 4,5 的应答时,通过查询 S 获知 4,5 为新节点,则实时将相关路径信息存储进 S 中。当 P 探测到 6 时,从 S 中查询到了路径  $(6 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow B)$  的存在,于是结束 A 和 B 的之间的源路由探测,从而又减少了  $6 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 9, 9 \rightarrow B, 3$  次探测冗余。

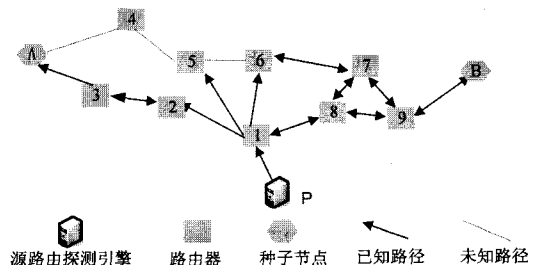


图 3 利用探测停止集来避免探测冗余

从上可以看出,依据探测停止集使得本该执行 10 次的路径探测,减少到了 4 次,说明了探测停止集对探测冗余避免的重要性。

### 2.4 探测停止集初始化

Atlas 系统的初始探测停止集为空,因此在其探测的初始阶段,探测冗余非常显著,严重制约了执行效能。我们利用 MTAPS 获得的基本拓扑信息来初始化探测停止集,从而可以确保源路由探测在初始阶段仍然能够有效避免探测冗余。MTAPS 获得的基本拓扑信息和普通网络拓扑图的差别在于路径的有向性,比如图 3 中的路径 1→A 和 A→1 是不同的,因为可能存在转发路径的非对称性现象。因此要依据基本拓扑信息中的路径方向将每段路径放入探测停止集中,来完成探测停止集的初始化。图 3 中的初始探测停止集 S 只是从极小一部分基本拓扑信息中提取出来的路径信息,就包含了 20 条路径,如果将基本拓扑信息的每一段路径都存放于探测停止集中,则会造成探测停止集的空间过大,从而带来访问效率问题。因此我们通过一种“压缩法”来限制探测停止集空间,我们只将路径距离不小于 2 跳的路径放入探测停止集,按照这种方法,初始探测停止集 S 可以被压缩成  $S' = \{(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3), (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow A), (1 \rightarrow 8 \rightarrow 9), (1 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow B), (2 \rightarrow 3 \rightarrow A), (8 \rightarrow 9 \rightarrow B), (7 \rightarrow 9 \rightarrow B), (6 \rightarrow 7 \rightarrow 9), (6 \rightarrow 7 \rightarrow 9 \rightarrow B)\}$ ,减少了一半以上的空间。

### 3 实验验证

验证网络拓扑发现方法的优劣主要有两种方法:一种是对 NS-2 模拟器的功能进行拓展,使得支持拓扑发现算法,验证拓扑发现算法对 NS-2 模拟器随机产生的网络拓扑结构测试的覆盖率和执行效能<sup>[13]</sup>;另一种方法是通过正在运行的 IPv6 网络的拓扑发现测试来获得验证。考虑到 NS-2 无法模拟路由策略、网络延时、源路由普遍支持率、等直接影响拓扑发现效果的关键因素,因此我们通过对 CERNET2 的测试来初步评估本文提出方法的执行效能。

#### 3.1 实验步骤

我们从 CERNET2 中心的资源网站和国内其它 IPv6 站点下载了 IPv6 Web 站点信息,共获得 287 个 IPv6 Web 站点,经验证其中有 153 个 IPv6 Web 站点可以解析出对应 IPv6 地址,我们从中选出 122 个前 64 位 IPv6 网络前缀不重复的 IPv6 地址作为我们的探测目标点集合。我们在 202.196.63.0 子网内部署了 4 个探测源来完成多点分布式探测的实验工作,4 个探测源分别与 4 个分布在不同位置的探测跳板建立起了 IPv6-in-IPv4 隧道,探测跳板的基本信息如表 1 所示。

表 1 探测跳板的基本信息

| 属性               | IPv4 地址        | IPv6 全球单播前缀          |
|------------------|----------------|----------------------|
| ISATAP Router    | 202.112.26.254 | 2001:da8:8000:3:0/64 |
| ISATAP Router    | 59.66.17.202   | 2001:da8:200:a002/64 |
| ISATAP Router    | 202.202.217.98 | 2001:da8:c800:b/64   |
| 6to4 Rely Router | 192.88.99.1    | 2001:620:0:c000/64   |

我们将单点源路由探测引擎部署在河南 CERNET2 接入中心前缀为 2001:250:480f:6666/64 的纯 IPv6 网络内。

#### 3.2 实验数据

表 2 MTAPS 的执行结果

| 属性                      | 约 51 分钟 |
|-------------------------|---------|
| 每个探测源设置的最大线程数           | 2       |
| 设置的最大超时时间               | 3500ms  |
| 设置对同一个 IPv6 目标地址的最大探测次数 | 4 次     |
| 发现路由器接口数                | 257     |
| 发现链路数                   | 402     |
| 发现存在乒乓路由的路径数            | 6       |
| 探测报文的平均时延               | 570ms   |

我们将 MTAPS 获取的基本路径信息存储成表 3 形式,存储应答路由节点与探测源的路径距离(表 3 中的 Hop\_Distance 项)是为了根据路径距离来确定路径方向,以便下一步对源路由探测停止集的初始化工作。

表 3 MTAPS 获取的基本路径信息的存储形式

| Destination      | Reply_Router_Address | Hop_Distance |
|------------------|----------------------|--------------|
| 2001:250:540a::1 | 2001:da8:1:101::1    | 3            |
| 2001:250:540a::1 | 2001:da8:1:1::2      | 4            |
| 2001:250:540a::1 | 2001:da8:1:3::2      | 5            |
| 2001:250:540a::1 | 2001:da8:1:13::2     | 6            |
| 2001:250:540a::1 | 2001:da8:1:114::2    | 7            |
| 2001:250:540a::1 | 2001:da8:1:114::1    | 8            |

虽然 122 个探测目标点的前 64 位前缀不存在吻合的情况,但我们利用 2.2 节提到的种子节点选取方法只提取出了 107 个种子(103 个路由器节点加上 4 个探测跳板),主要是由于以下三个原因造成的:

- (1)存在不同的探测目标点位于同一个路由器所直连的不同链路内的情况。
- (2)存在到不同的探测目标点的探测路径中止于同一个路由器的情况。
- (3)存在包含乒乓路由的路径。

表 4 源路由探测获得的拓扑信息

|             |              |
|-------------|--------------|
| 探测执行时间      | 约 6 小时 45 分钟 |
| 种子个数        | 107          |
| 初始探测停止集空间   | 4236         |
| 新发现接口数      | 386          |
| 新发现链路数      | 533          |
| 总的路径探测执行次数  | 18191        |
| 完整的路径探测执行次数 | 7607         |

#### 3.3 实验结果分析

我们对 MTAPS 的执行结果进行更深入的分析,发现 4 个探测源共同探测到的路由器接口数为 142,甚至超过了所发现总接口数的一半,这个结果揭示了分布式拓扑探测增加探测源与扩大探测目标点集合这两种方式相比,后者带来的拓扑覆盖率增益更加显著。这一点恰好和 Barford 等人<sup>[16]</sup>所进行的边际效用分析得出的结论是吻合的。通过表 2 和表 4 的数据对比可以看出,源路由探测在 MTAPS 的基础上提高了一倍以上的拓扑覆盖率,而 MTAPS 为源路由探测所提供的初始探测停止集也显著地降低了探测冗余的产生,有 10584 次路径探测由于冗余避免的作用,在执行过程中被终止,即使以探测停止集的最小单位 2 跳来度量每次路径探测的冗余避免量,也至少减少了 21168 次探测冗余。

**结束语** 本文将分布式探测与单点源路由探测结合起来,利用分布式探测获取的基本拓扑信息为源路由探测种子节点的选取和探测冗余避免提供有利的前提条件,优化了源路由探测的执行效率;而源路由探测又在分布式探测的基础上更进一步地提高了拓扑发现的覆盖率。本文给出的实验数据体现了所提出的方法能够同时兼顾拓扑发现覆盖率和探测冗余两个方面,达到了 IPv6 路由器级拓扑探测普适性的要求,可以作为下一步大规模 IPv6 网络拓扑发现原型系统设计的理论依据。同时也应指出,无论是单点源路由还是分布式拓扑探测只能在一定限度内影响拓扑发现覆盖率,而探测目标点集合空间的大小及分布位置对拓扑发现覆盖率有着更重要的影响,因此如何扩大已有的探测目标点空间将是我们的

一步的研究重点。

## 参 考 文 献

- [1] Pansiot J J, Grad D. On Routes and Multicast Trees in the Internet. *ACM SIGCOMM CCR*, 1998, 28(1): 41-50
- [2] Cheswick B, Burch H, Branigan S. Mapping and Visualizing the Internet // *Proc. 2000 USENIX Annual Technical Conf. San Diego, California, June 2000*: 1-12
- [3] Internet Mapping Project. Available at; URL: <http://research.lumeta.com/ches/db/>
- [4] Siamwalla R, Sharma R, Keshav S. Discovering Internet Topology. Technical Report [EB/OL]. CS Dept., Cornell University, July 1998. Available at; URL: <http://www.cs.cornell.edu/skeshav/papers/discovery.pdf>
- [5] Govindan R, Tangmunarunkit H. Heuristics for Internet Map Discovery // *Proc. IEEE INFOCOM 2000. Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000*: 1371-1380
- [6] Chang H, Jamin S, Willinger W. Inferring AS-level Internet Topology From Router-Level Path Traces // *Proc. SPIE ITCOM 2001-Scalability and traffic control in IP networks. Denver, Colorado, Washington: SPIE Press, Aug 2001*: 196-207
- [7] Bejerano Y, Rastogi R. Robust Monitoring of Link Delays and Faults in IP Networks // *Proc. IEEE INFOCOM 2003. San Francisco, California, 30 Mar. -3 Apr. 2003*: 134-144
- [8] Cooperative Association for Internet Data Analysis. <http://www.caida.org/>
- [9] Donnet B, Raouf P, Friedman T, et al. Efficient Algorithms for Large-Scale Topology Discovery // Eager DL, Williamson CL, Borst SC, Lui JCS, eds. *Proc. of the ACM SIGMETRICS 2005. New York: ACM Press, 2005*: 327-338
- [10] Donnet B, Raouf P, Friedman T, et al. Deployment of an Algorithm for Large-Scale Topology Discovery. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, Special Issue on Internet, Special Issue on Internet Sampling, 2006, 24(12): 2210-2220
- [11] Donnet B, Huffaker B, Friedman T, et al. Implementation and Deployment of a Distributed Network Topology Discovery Algorithm. Tech. Rep. arXiv cs.NI/060362, Mar. 2006: 1-12
- [12] Waddington D G, Chang F, Ramesh V, et al. Topology Discovery for Public IPv6 Networks. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 2003, 33(3): 59-68
- [13] 6Bone Registry. <http://www.viagenie.qc.ca/en/ipv6/registry/>
- [14] 杨柳, 李振宇, 张大方, 等. 冗余最小化的 IPv6 拓扑发现方法. *计算机研究与发展*, 2007, 44(6): 939-946
- [15] Liu Zhenshan, Wang Qingxian, Luo Junyong. A new distributed topology discovery technology for IPv6 networks // *Proc. IEEE SoutheastCon, March 2007*: 627-632
- [16] Barford P, Bestavros A, Byers J, et al. On the Marginal Utility of Network Topology Measurement // *Proc. 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement (IMW 2001). San Francisco, California, Nov. 2001*: 5-17
- 
- (上接第 68 页)
- [2] Balakrishnan H, Kaashoek M F, et al. Looking Up Data in P2P Systems. *Comm. ACM*, 2003, 46(2): 43-48
- [3] Stoica I, Morris R, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications // *Proc. 2001 Conf. Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communicating. 2001*: 149-160
- [4] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, Distributed Object Location and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems // *Proc. IFIP/ACM Int'l Conf. Distributed Systems Platforms. 2001*: 329-350
- [5] <http://www.schemaweb.info/schema/SchemaDetails.aspx?id=62>
- [6] Singh M P, Huhn M N, et al. Service-oriented computing: semantic, processes, agents. Ltd, 2005
- [7] Cuenca-Acuna F M, Nguyen T D. Text-based Content Search and Retrieval in ad hoc P2P Communities // *Int. Workshop on Peer-to-Peer Computing. 2002*: 220-234
- [8] Zeinalipour-Yazti D, Kalogeraki V, et al. Exploiting Locality for Scalable Information Retrieval in Peer-to-Peer Systems. *Elsevier Information Systems Journal*, 2004, 30(4): 277-298
- [9] Gupta A, Sahin O, et al. Meghdoot: Content-based Publish/Subscribe over P2P Networks // *Proc. Fifth ACM/IFIP/USENIX Int'l Conf. Middleware. 2004*: 254-273
- [10] Zhuge H, Li X. Peer-to-Peer in Metric Space and Semantic Space. *IEEE Tran. Knowledge and Data engineering*, 2007, 19(6): 759-771
- [11] Yang B, Garcia-Molina H. Efficient Search in Peer-to-Peer Networks // *Proc. 22nd Int'l Conf. Distributed Computing Systems. 2002*: 5-14
- [12] Tang C, Xu Z C, et al. Peer-to-Peer Information Retrieval Using Self-organizing Semantic Overlay networks // *Proc. of the ACM SIGCOMM 2003. 2003*: 175-186
- [13] Kalogeraki V, Gunopulos D, et al. A Local Search Mechanism for Peer to Peer Networks // *Proc. of the 11th Int. Conf. on Information and Knowledge Management. 2002*: 300-307
- [14] <http://www.gnutella.com>
- [15] <http://www.napster.com/>
- [16] <http://www.kazaa.com/>
- [17] <http://www.morpheus.com>
- [18] Lv Q, Cao P. Search and replication in unstructured peer-to-peer networks // *Proceedings of ACM International Conference on Supercomputing. 2002*: 84-95
- [19] Zeinalipour-Yazti D, Kalogeraki V, et al. pFusion: A P2P Architecture for Internet-scale Content-based Search and Retrieval. *IEEE Tran. Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(6): 804-817
- [20] Ratnasamy S, Handley M, et al. A scalable Content-Addressable Network // *ACM SIGCOMM'01. 2001*: 161-172
- [21] Tang C, Xu Z, et al. pSearch: Information Retrieval in Structured Overlays. *Computer Communication Review*, 2003, 33(1): 89-94
- [22] Li M, Lee W C, et al. Semantic Small World: An Overlay Network for Peer-to-Peer Search // *Proc. of the 12th IEEE Int'l Conf. on Network Protocols. 2004*: 228-238
- [23] Watts D J. 小小世界. 中国人民大学出版社, 2006
- [24] Yang B, Garcia-Molina H. Improving search in peer-to peer networks // *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems. 2002*: 5-14
- [25] Li M, Lee W C, et al. Neighborhood signatures for searching P2P networks // *Proceedings of International Database Engineering and Application Symposium. 2003*: 149-158
- [26] Zhuge H, Sun X P, et al. A scalable P2P Platform for the Knowledge Grid. *IEEE Tran. Knowledge and Data Engineering*, 2005, 17(12): 1721-1736
- [27] 刘志忠, 王怀民, 等. 一种双层 P2P 结构的语义服务发现模型. *软件学报*, 2007, 18(8): 1922-1932