ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.19, No.2, February 2008, pp.404−418
DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.00404
© 2008 by *Journal of Software*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

移动对等网络关键技术*

欧中洪+, 宋美娜, 战晓苏, 宋俊德

(北京邮电大学 电子工程学院,北京 100876)

Key Techniques for Mobile Peer-to-Peer Networks

OU Zhong-Hong+, SONG Mei-Na, ZHAN Xiao-Su, SONG Jun-De

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62282754, Fax: +86-10-62282747, E-mail: zhhouyang@sina.com, http://www.bupt.edu.cn

Ou ZH, Song MN, Zhan XS, Song JD. Key techniques for mobile peer-to-peer networks. *Journal of Software*, 2008,19(2):404−418. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/404.htm

Abstract: The great success of P2P (peer-to-peer) system based on Internet makes researchers focus on the mobile network environment, which is more distributed, with wider participants and more autonomic than the fixed P2P system. The popularity of intelligent terminals and the maturity of mobile application environment bring a bright prospect for mobile P2P networks. But the current research on the mobile P2P network is short of an accurate definition and a great number of questions are still needed to be studied deeply. In this paper, the basic concept of mobile P2P network is introduced firstly, including the definition and characteristics of mobile P2P network, the differences between mobile P2P network and mobile Ad Hoc network and the key techniques of the former. Then a comprehensive survey of the key techniques of mobile P2P networks, such as mobile P2P network architecture, resource discovery strategy, network structure consistency, data dissemination strategy, security and privacy mechanism, is given. The research results of the key techniques are also analyzed in depth, furthermore, the shortcomings and problems are outlined. In the end, the future research and development trend of mobile P2P networks is discussed.

Key words: mobile peer-to-peer network; network architecture; resource discovery; structure consistency; data dissemination; cross-layer optimization

摘 要: P2P 系统在 Internet 上的成功使研究者关注于分布式更强、参与性更广、更具有对等自治特征的移动网络环境.智能终端的普及和移动应用环境的逐渐成熟使得移动对等网络拥有广阔的发展前景.但当前对移动对等网络的研究还缺乏统一而明确的定义,还存在很多未能很好地解决的问题.首先,概述了移动对等网络的基本概念,给出了其定义、特征以及与移动 Ad Hoc 网络的区别,并指出了移动对等网络的相关关键技术;随后,详细综述了移动对等网络体系结构、资源搜索策略、网络结构一致性、数据分发策略、安全与隐私机制等关键技术的研究现状,对各种关键技术的研究成果给出了深入分析,并指出了各自存在的问题和缺陷.最后,讨论了移动对等网络未来的研

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z206 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs of China under Grant No.2006BAH02A03 (国家“十一五”科技支撑计划)

Received 2007-02-10; Accepted 2007-05-10

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

究方向和发展趋势.

关键词: 移动对等网络;网络体系结构;资源搜索;结构一致性;数据分发;跨层优化

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

P2P 作为分布式计算模型,追求的是自治个体之间通过直接交换来共享资源和服务.网络信息的急剧增长,特别是多媒体信息的大量出现,客观上要求信息所有者直接进行高效、自由的信息交换,P2P 模型很好地适应了以上要求,用户数量呈现几何级数增长.2006 年中国 P2P 流媒体研究报告显示,目前国外网络流量的 50%由 P2P 流量占据,并预测在未来几年,P2P 的流量将占到网络流量的 70%以上[1].Napster,Gnutella,Freenet,BitTorrent,SETI@HOME 等基于 Internet 的 P2P 系统显示了 P2P 模型在解决可扩展性、自组织、低成本以及负载均衡等分布式环境下资源共享的共性问题方面具有较大的优势.

移动通信的快速发展使得移动网络带宽逐渐增大、移动终端的处理能力越来越强.GPRS(general packet radio service),UMTS(universal mobile telecommunications system),B3G(beyond 3G)等蜂窝移动网络和 Wi-Fi (wireless fidelity),WiMAX(worldwide interoperability for microwave access),UWB(ultra wideband)等宽带无线接入网络为用户提供了在任何时间、任何地点访问无线网络服务的可能性.移动应用环境的逐渐成熟使研究者关注于分布式更强、参与性更广、更具有对等自治特征的移动对等网络环境.可以预见,Internet 的主流应用将向移动设备扩展,作为目前 Internet 重要应用的 P2P 系统将在移动环境中得到更广泛的应用.

本文第 1 节概述移动对等网络的基本概念,指出移动对等网络的关键技术.第 2 节~第 6 节分别详细综述网络体系结构、资源搜索策略、网络结构一致性、数据分发策略、安全和隐私机制等关键技术的研究现状,并给出相关技术存在的主要问题.第 7 节总结全文,指出移动对等网络未来的发展方向.

1 移动对等网络的基本概念

1.1 移动对等网络的定义及特征

移动对等网络至今尚没有统一而明确的定义.本文给出以下定义:移动对等网络又称移动 P2P 网络(mobile peer-to-peer network,简称 MP2P),为叠加在移动网络环境中网络层之上的会话层覆盖网络,能够利用多种带宽和服务质量的底层接入技术,其主要目的是以直接交换的方式来实现可移动终端设备之间数据资源的共享与服务的协同.

移动对等网络具有以下特征:

(1) 网络拓扑结构不断变化:与传统 P2P 网络拓扑结构相对稳定不同,节点的移动性使移动 P2P 网络拓扑结构不断发生变化,造成覆盖层(overlay)与底层物理网络连接状态不匹配,引起资源发现和数据传输的低效.

(2) 节点自身资源受限:对移动设备的便携要求,使当前移动终端的计算处理能力、存储能力、能量供应等受到限制,这使其在贡献资源的同时必须考虑自身的能耗等因素;同时,服务连接的数量也受到限制,部分节点受所支持协议的限制在无代理服务器的情况下无法直接接入 P2P 网络.

(3) 网络层编址和标识机制不统一:传统 P2P 系统的网络层采用固定不变的唯一 IP(Internet protocol)地址作为节点标识,底层网络的一致使得传统 P2P 网络具有很好的扩展性,而移动网络环境的异构性使得其网络层所采用的编址及通信方式有很大不同,要在其上建立统一面向应用的移动 P2P 网络,就必须屏蔽网络层中不同的网络设备标识的差别[2].

目前,大多数文献[3−6]把在移动 Ad-hoc 网络(mobile ad hoc network,简称 MANET)上进行 P2P 文件共享及数据分发等作为移动 P2P 问题来研究,也有少数文献[7,8]把基于蜂窝移动网和宽带无线接入网的 P2P 网络当作移动 P2P 网络来看待.本文扩展了移动 P2P 网络所涉及的范围,其并不关心上层千差万别的具体应用,主要集中于在会话层提供一种面向应用的覆盖层组网策略,并采取相应措施屏蔽底层网络具体通信方式(红外、蓝牙、蜂窝移动网络、宽带接入网络)对上层应用的影响,同时还涵盖了将移动设备接入到现有基于 Internet 的 P2P 网络

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

所需解决的问题.

1.2 移动P2P网络与移动Ad Hoc网络的关系

移动 P2P 网络侧重于在会话层提供面向应用的覆盖层组网策略,主要关注的是 OSI(open system interconnection)七层参考模型中的会话层、表示层和应用层,而并不关心底层物理网络连接细节;移动 Ad Hoc 网络侧重于在网络层上提供移动设备之间的直接互联、互通,主要关注 OSI 模型的物理层、链路层和网络层.二者处于不同的网络层次,移动 P2P 网络也可把 MANET 作为其网络层的组网方式.二者之间的关系如图 1 所示.

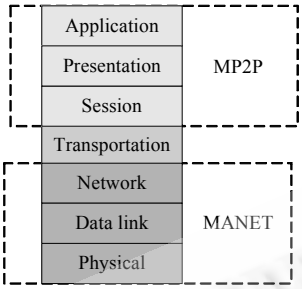

Fig.1 The difference between MANET and MP2P

图 1 MANET 与 MP2P 的区别

文献[9]指出,MANET 与移动 P2P 网络之间的区别如下:

(1) 组网动机.MANET 由终端之间的多跳连接构成,其目的是为了建立网络内部设备之间可互相访问的初始状态连接,属于连接驱动(connection driven)型.移动 P2P 系统通过建立抽象或虚拟的连接来进行网络应用,在很大程度上与网络层相独立.移动 P2P 是一种数据(信息)分发手段,属于应用驱动(application driven)型.

(2) 移动设备的参与程度.MANET 的目标是整个网络节点之间的连通性,即任意两个移动设备之间物理上可达且能有效访问,其涵盖了网络中所有移动设备.移动 P2P 网络侧重于在会话层建立面向特定应用的高效组网策略,移动设备的参与程度取决于应用的流行度,所以,移动 P2P 网络节点的参与范围不及 MANET 广泛.

(3) 任意网络节点之间的连接.MANET 中节点之间的连接多是由中间节点建立的间接连接,而移动 P2P 网络中任意两个节点之间从逻辑上来讲都可以看作是直接的稳定连接.

(4) 广播策略.MANET 执行物理介质上的广播策略,即广播时临近设备均能收到广播设备发出的消息;而移动 P2P 网络的广播则是针对参与节点的多次单播.

1.3 移动P2P网络的关键技术

目前,国内外对移动 P2P 网络的研究主要集中在 MANET 方面,对基于蜂窝移动网络和宽带无线接入网络的移动 P2P 网络研究较少,还存在很多未能很好地解决的问题.

网络体系结构是移动 P2P 网络的基础,不仅需要考虑到异构网络的互通与融合,而且要独立于多样化的具体应用,同时要保证网络的可扩展性.有基础设施的蜂窝移动网络和宽带无线接入网络可利用现有基站或 AP (access point,网络接入点)等网络资源,宜选用集中式控制的网络结构;无基础设施的移动 Ad Hoc 网络所具有的高度分散且自治的特点,使其适合完全分布式的纯 P2P 网络结构;基于 DHT(distributed Hash table)路由策略的结构化 P2P 系统兼顾了搜索效率和负载均衡,网络扩展性能介于上述两种方式之间.因此,如何根据底层网络的不同选择合适的覆盖层拓扑是网络体系结构的主要研究内容.

资源发现策略是网络中的节点用来搜索其他节点所提供资源的方法,是 P2P 应用中所面临的核心问题之一,如何以有效的手段快速响应用户的资源请求关系到整个 P2P 应用的效率和性能.P2P 系统是为共享而产生的系统,移动 P2P 系统的高度动态特征使其需要同样高度动态变化的资源发现策略与之相适应.如何在有限的时间、有限的带宽范围内提供尽可能多的移动 P2P 节点参与资源搜索操作,并返回尽可能多的搜索结果,是资源发现策略的研究内容.

节点的移动性使得移动 P2P 网络的覆盖层拓扑经常发生变化,造成覆盖层与底层物理网络拓扑不一致,引起网络结构一致性问题.网络结构一致性问题会导致网络搜索性能变差,产生移动性扰动(mobility churn),同时引起数据传输的低效.所以,如何提高网络层和覆盖层的结构一致性是移动 P2P 网络亟需解决的关键问题之一.

数据分发是源节点将数据通过某种机制分发到所有请求该数据的节点的过程.在移动网络连接不可靠、带宽有限及终端设备资源受限的情况下,数据分发策略的优劣直接影响到整个 P2P 系统的效率.数据分发一般包

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

括以下 4 个过程:数据处理、路由选择、数据发送和数据接收,每个过程均会对数据分发的效率和可靠性等产生影响.因此,如何结合移动网络环境的自身特点设计高效的数据分发机制,是移动 P2P 网络中数据分发策略的研究内容.

安全和隐私问题是移动 P2P 网络另一个不可忽略的重要问题,主要源于两个方面:移动网络环境的自身特性以及 P2P 网络的固有属性.目前,对移动 P2P 系统安全问题的研究主要集中在信任管理[10]、攻击检测[11]、访问控制[12]、匿名通信[13]、对等信誉[14]这几个方面.在无线资源环境下,连接设备的不确定性以及可信任中央控制节点(certificate authority,简称 CA)的缺乏,使得安全和隐私问题成为移动 P2P 网络亟待解决的关键问题之一.

本文将针对以上移动 P2P 网络的关键技术进行详细综述,并给出相应的发展趋势预测.

2 网络体系结构

移动 P2P 网络体系结构包括两方面的研究内容:覆盖网体系结构和中间件体系结构.覆盖网体系结构主要关注覆盖层的组网方式,主要考虑网络的可扩展性、健壮性等方面,从宏观上描述了网络的组成结构;中间件体系结构主要关注 P2P 协议的实现框架,主要考虑协议轻量化、应用无关和通用性等内容,从微观上描述了节点的组成细节.两者构成了一个相辅相成的有机整体.

2.1 覆盖网体系结构

按照覆盖网结构中有无代理,可把移动 P2P 系统分为基于代理的移动 P2P 系统和无代理的移动 P2P 系统.目前,移动终端资源的限制使得大部分节点在无代理服务器的情况下无法直接连接到网络,大多数移动 P2P 系统均为基于代理的系统[15,16];少数系统采取轻量化策略,允许移动终端在无代理服务器的情况下直接接入到网络,文献[17]即实现了一种无代理的移动 P2P 系统.

按照覆盖网的拓扑结构,当前的移动 P2P 系统主要分为集中式系统[17]、全分布式系统[18]、半分布式系统[19].

在集中式系统方面,日本的 Keio 大学联合多所大学(Tokyo 大学、Kyoto 大学等)和研究机构(NTT DoCoMo, Ericsson,HP 等)成立的 PUCC(P2P Universal Computing Consortium)[17]组织所提出的 P2P 网络平台声称能够在包括 Internet、移动网络、家庭网络等在内的各种网络之间进行无缝通信,其 P2P 网络体系结构可支持纯 P2P 网络和混合式 P2P 网络两种组网方式,如图 2 所示.该混合式 P2P 网络由一个中心控制节点进行集中控制,网络中所有对等节点把其自身和邻居节点的信息汇报给控制节点,因而控制节点能够理解整个网络拓扑结构,并提供路由、安全、拓扑优化等信息.可以看出,这种混合式 P2P 网络采取集中式控制的方式,因而具有集中式网络自有的缺点,包括扩展性不强、控制节点易成为系统瓶颈、存在单点失败等.

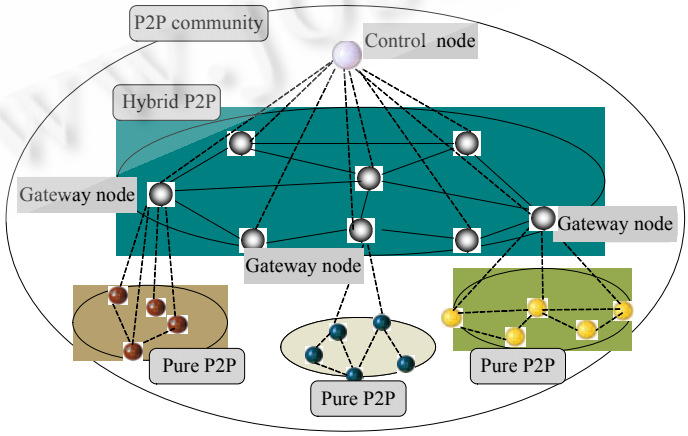

Fig.2 P2P architecture

图 2 P2P 体系结构

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

在全分布式系统方面,德国多特蒙德大学提出了 MANET 环境中基于 P2P 模型的数据共享解决方案 ORION(optimized routing independent overlay network)[18],其目标在于设计一套适合移动 Ad Hoc 环境的高效 P2P 数据搜索和数据传输方法.ORION 采取基于广播的洪泛搜索策略,查询请求被发送到所有邻居节点,每个邻居节点检查是否有搜索命中,并负责选择性地将其他节点的反馈消息向源节点转发或缓存在本地文件路由表中.

文献[19]提出了一个半分布式的基于超级节点的移动 P2P 系统,如图 3 所示.其中,超级节点(super node)负责缓存、内容管理以及与有线 P2P 网络的互通;边沿节点(edge node)负责提供移动节点的镜像、内容虚拟存储和数据的共享;移动节点(mobile node)功能比较单一,主要负责动态数据的管理.整个网络组成以超级节点为中心的域,域内实行集中式控制,域间实现分布式管理;同时,域内移动节点还可以不经过边沿节点,直接以对等方式通信.

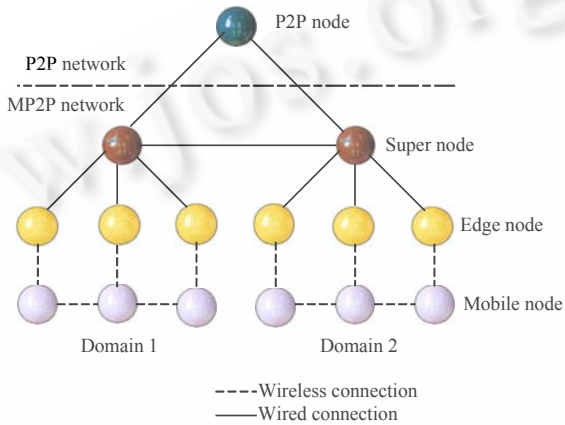

Fig.3 P2P overlay architecture based on super node

图 3 基于超级节点的 P2P 覆盖层体系结构

集中式系统由于存在中央控制节点,使得网络的容错性和扩展性不强,存在单点失败;全分布式系统泛洪式的消息传播方式增加了网络的负载;半分布式系统采用超级节点有效控制了网络中冗余信息的传播,同时具有较好的可扩展性,是集中式系统和全分布式系统性能的折衷,但超级节点的选择和维护更新以及在节点移动条件下网络拓扑结构的维护,仍然是有待解决的开放式问题.

2.2 中间件体系结构

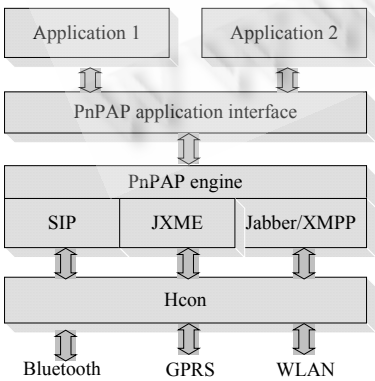

Fig.4 PnPAP architecture

图 4 PnPAP 体系结构

移动节点在资源和性能上的限制,使得移动 P2P 协议的轻量化成为系统设计的首选必要条件.当前,大部分移动 P2P 系统软件体系结构都采用分层模块化和插件技术来设计,即将系统的核心部分及扩展部分分别定义为模块化插件,核心功能部分实现系统最关键的基本操作,而扩展功能部分则被定义为若干相互独立的插件,这些插件可根据系统资源状况随时被加载到系统中发挥作用.

为实现资源的有效共享和网络的互通,移动 P2P 网络不应孤立于其他网络而存在,当前的 P2P 系统大多面向特定应用而设计,使得不同移动 P2P 网络之间的互动和协作无法进行.为实现现有 P2P 协议之间的互通,芬兰的 Oulu 大学提出并实现了一个 PnPAP (plug-and-play application platform)架构平台[20],如图 4 所示.此通用平台可使用户在其框架下自由、动态地采用各种已有的 P2P 协议,并使用 Hcon(holistic connectivity)屏蔽不同的网络接口,使得不同应

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

用可以自如地在覆盖层相互通信.其缺点在于其协议框架在现有 P2P 协议上封装一层,加重了协议的负载,不适合移动环境下协议轻量级的需求.

由 SUN 公司启动、多个开源组织共同参与的 JXTA 项目致力于为所有设备提供分布式的基于 P2P 计算模式的通用平台,JXME(JXTA-J2ME)和 JmobiPeer[21]是两个在移动环境中实现 JXTA 架构的开发项目.JXME 是 SUN 公司发起开发的 JXTA 的 J2ME 版本.JmobiPeer 的目标是开发一套面向 MANET 网络并与 JXTA 协议相兼容的移动 P2P 应用开发平台.它采用模块化系统构建理念,目的在于适应快速发展的移动设备软、硬件升级以及降低软件开发和维护的开销.

美国北卡罗莱纳州大学发起的 7DS(7 degrees of separation)[22]是第一个系统地将 P2P 概念引入到移动计算领域的研究课题,旨在当 MANET 用户访问 Internet 受到限制时,采用自组织及纯 P2P 的方式实现移动用户之间的 Web 文档分发和浏览.美国俄勒冈大学提出的 Proem[23]是面向 MANET 网络的 P2P 共享中间件、应用开发及部署平台的实现.

以上系统的优点在于:JmobiPeer 致力于大范围 MANET 环境中的共享和协同,在缺乏基础设施支持的情况下具有较优的可扩展性;7DS,Proem 仅同物理上的邻居节点建立逻辑连接,这种连接本身就对应了网络层拓扑结构.以上系统的缺点在于:在可扩展性方面,7DS,Proem,JXME 解决的是小范围内的共享场景,参与节点数量较少,不能满足大量用户及大范围应用;而 JXME,JmobiPeer 沿用了 JXTA 的对等组连接策略,没有考虑移动节点的邻接性要求,网络层与覆盖层并不一致.移动场景的多样性,使得很难存在一个普适的移动 P2P 系统.可扩展的、灵活的、轻量化移动 P2P 网络体系结构仍然是今后亟待解决的关键问题.

3 资源搜索策略

资源搜索是节点通过一定方式找到资源在网络中存放位置的方法.现有的对移动 P2P 网络搜索算法的研究主要有两个趋势:一是将现有 Internet 环境中的 P2P 网络搜索算法移植或扩展到移动环境中;二是完全根据移动环境设计全新的移动 P2P 网络搜索算法.

3.1 扩展现有的基于Internet的P2P搜索算法

扩展现有的基于 Internet 的 P2P 搜索算法大体可分为 3 类:基于中央索引节点的搜索算法、基于洪泛式信息广播的搜索算法和基于 DHT 的结构化搜索算法.

3.1.1 基于中央索引节点的集中式搜索算法

集中式 P2P 系统的中央索引节点可承担网络中大部分系统化操作,普通节点不需要有过多的系统开销,从而扩展性最好,Napster 和 eDonkey 是典型的基于中央索引节点的集中式 P2P 系统.

Andersen 等人通过扩展基于 Internet 的 eDonkey 系统搭建了基于 3G(2.5G)网络环境的 Mobile eDonkey 网络,通过给不同等级的用户分配不同权限的 ID 来提供不同级别的服务质量.文献[15]提出了面向移动运营商的 eDonkey 网络解决方案,旨在尽可能利用单个运营商网络中的资源,从而将网络流量控制在本地网络中.它在 eDonkey 原有结构的基础上,针对移动环境的特点增加了爬虫节点(crawler peer)、缓存节点(cache peer)以及代理节点(P2P proxy)3 个组成部分.文献[24,25]分别描述了该结构在 GPRS 网络以及 UMTS 网络中的具体实现,并通过 VPN(virtual private network)的方式解决私有 IP 和防火墙/NAT(network address translation)穿越的问题.通过对移动运营商网络的测试结果显示,以 GPRS 网络为底层承载网的移动 P2P 系统只适合即时通信等数据传输量不大的 P2P 应用,而以 UMTS 网络为承载的移动 P2P 系统具有较高的网络吞吐量和稳定性.

3.1.2 基于洪泛式信息广播的搜索算法

与基于中央索引节点的集中式搜索算法相对应,基于洪泛式信息广播的搜索算法属于完全分散式的搜索策略,参与节点之间没有严格的连接维持要求,节点只记录邻居节点的位置信息,并在有搜索请求到来时将其转发给邻居节点或按搜索请求原路返回结果.Gnutella 和 Freenet 是典型的基于洪泛式信息广播的 P2P 系统.

文献[26]探讨了在移动网络中利用 Gnutella 的可能性,其将无线网络归纳为随机网、半随机网、连通网和星型连通网 4 种类型,并考察了 Gnutella 协议在上述 4 种网络中的性能,同时指出,半随机网和星型连通网比较

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

适合应用 Gnutella 协议.其中,半随机网比较适合由性能类似节点组成的网络,而星型连通网则是由不同性能节点构成网络的最优选择.文献[16]提出了利用移动代理(mobile Agent,简称 MA)支持移动设备访问 Gnutella 的系统结构,如图 5 所示.其中,移动代理代表移动设备以正常主机的身份执行 Gnutella 协议,它与移动设备之间采用轻量级的通信协议(HTTP).

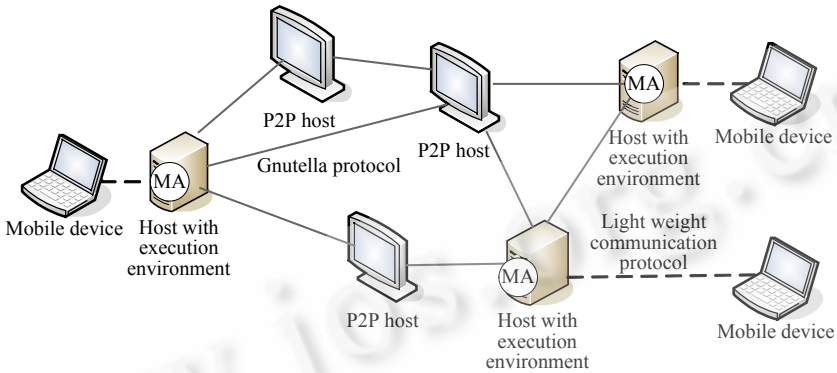

Fig.5 Gnutella system based on mobile Agent

图 5 基于移动代理的 Gnutella 系统

3.1.3 基于DHT的结构化搜索算法

基于 DHT 的搜索策略是另一种分散式资源搜索策略.与洪泛式搜索策略只负责响应与本节点共享资源有关的搜索请求不同,基于 DHT 的搜索策略同时缓存多个其他 overlay 层节点的资源信息,overlay 网络拓扑呈现结构化的特点,因此又称为结构化 P2P 网络,CAN(content-addressable network)[27],Chord[28],Pastry[29]都是典型的结构化 P2P 系统.

文献[30]提出了以超级节点为基础的 CAN 改进搜索算法 M-CAN.它采用注册和分组机制取代 CAN 中的文件传输和缓存以提高资源发现效率,降低了所占用的网络带宽和移动设备计算资源.文献[31]实验了在无线传感器网络中采用类 Chord 环状结构来组织节点并完成节点间路由,每个节点从线性地址空间中获得自身地址,并根据地址大小在邻居节点中选择其后继节点,每个节点同时维持到其前继节点(predecessor)和后继节点(successor)之间的源路由,由此建立整个环型结构.

Pastry 较多地考虑了网络层拓扑结构对 overlay 层的影响,这使得其对移动网络环境的适应性更好,而现有的研究更多地集中于如何在移动网络环境中利用 Pastry 协议.文献[32,33]考察了在 MANET 上运行 Pastry 的可行性,其中,文献[32]网络层采用 DSR(dynamic source routing)算法,而文献[33]则采用 AODV(ad-hoc on-demand distance vector)和 OLSR(optimized link state routing)算法.结果表明,直接在现有路由搜索算法上建立 Pastry 网络并不能达到理想的性能,原因有两个方面:(1) 建立和维护 Pastry 环所需要的操作对于中小型 Ad Hoc 网络是一个极大的负担;(2) 路由协议的传输时延会使 Pastry 环的构造会发生错误.

3.2 提出全新的移动P2P网络搜索算法

资源搜索策略从原理上可分为先应式(proactive)和反应式(reactive)两种[34].先应式资源搜索策略需要在整个网络中事先维护一致的共享文件位置信息或路由信息,如 Napster,CAN,Pastry 等;反应式资源搜索策略并不要求在节点之间交互控制信息,仅当某个节点发起搜索请求以后,文件定位消息才以洪泛的形式向整个网络扩散,如 Gnutella,Freenet 等.

3.2.1 先应式资源搜索策略

在考虑物理网络的邻接性方面,文献[35]提出了基于地理位置的 DHT 路由策略.它利用全球定位系统将移动 P2P 网络划分成相等的空间区域,每一区域负责一系列哈希键值,参与节点使用统一的哈希函数将资源关键字映射到对应区域中,使得关键节点在物理上也均匀分布.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

除了利用 DHT 建立全局索引以外,利用超级节点建立分布式索引中心也取得了很好的进展.文献[36]提出利用 AP 作为资源索引在移动网络环境中进行 P2P 视频流共享的设想.它将视频流划分成基本视频和增强视频两部分,前者由专用视频流服务器提供,而后者则由移动节点利用 P2P 方式直接提供.文献[37]提出利用城市公交车作为移动 P2P 网络的超级节点充当控制节点的功能,由公交车组成移动 P2P 系统的主干网络,但公交车在线路和时间上的限制使其对其他应用的可移植性不强.

现有更多的研究集中在解决移动 P2P 网络的负载均衡问题上.文献[4]提出了基于二分搜索树的搜索算法 Peer-Tree.它根据参与节点 ID(identity)二进制后缀的相似程度把参与节点组织成树状结构,节点接收到消息后选择 ID 后缀更接近目标节点的邻居作为转发节点.文献[38]提出了基于可变索引半径的动态索引策略,每个节点索引其周围一定范围内节点共享的资源信息并响应其他节点的检索请求,根据网络动态性变化,节点可以独立调整自身索引半径以实时反映网络拓扑情况.

3.2.2 反应式资源搜索策略

在反应式资源搜索策略方面,Konark[39]采用推拉模型实现移动 P2P 环境下的服务发现.它不考虑无线环境网络层与有线网络的差异,即假设系统搭建于 TCP(transmission control protocol)/IP 协议栈基础之上,提供服务的节点定期广播自身的服务,收到广播的节点可有选择地缓存广播信息,需要服务的节点会主动向广播地址发出查询请求,要求参与节点返回匹配记录.

文献[40]使用类 Gnutella 的洪泛搜索算法 MPP(mobile peer-to-peer protocol)在移动网络中进行资源查找.MPP 利用 MANET 路由协议完成 overlay 层的大部分功能,并在应用层和 MANET 层之间加入移动节点控制协议(mobile peer control protocol,简称 MPCP)负责协调上层应用与 MANET 层之间的语义交互.

先应式资源搜索策略需要事先建立资源索引,灵活性的限制使其不适合节点频繁移动的移动 P2P 网络环境;反应式资源搜索策略洪泛式的信息传播方式增加了网络的冗余通信量,加重了网络的负载;把先应式和反应式两种资源搜索策略有机结合,通过超级节点和普通节点将基于 DHT 的搜索机制与洪泛机制相结合,使用较少的副本、缓存或控制信息尽量减少洪泛的次数,充分利用两者的优点,是资源搜索策略今后的一个发展方向.

4 网络结构一致性

4.1 网络结构一致性问题的提出

移动 P2P 系统由基于 Internet 的 P2P 系统演化而来,但后者以固定位置连接为基础,在设计时并没有考虑对移动设备的支持.当移动节点的位置频繁变更时,overlay 层就无法保持相对持久的稳定性,产生 overlay 层与底层网络物理连接状态不匹配的情况,称为网络结构一致性问题.

网络结构一致性问题还会产生移动性扰动(mobility churn).多数拓扑感知的移动 P2P 系统采取在 overlay 层“就近连接”的策略,以保持 overlay 层与物理拓扑的一致,考虑到节点之间连接的暂时性,在不同时刻节点将与不同传输范围的节点相交而建立新的物理连接,同时,原有连接可能因为节点距离变远而不可用.当节点 A 的邻居节点 B 因为某种原因不可达时,节点 A 首先进行失败重传,直至确认节点 B 不再可用.此后,节点 A 将调整路由表,把节点 B 移出邻居集合.此时,若节点 B 又在网络的另一个位置出现,即与网络中其他节点建立物理连接,若节点 A 仍然视节点 B 为邻居节点,则所建立起来的 overlay 结构将不能反映物理连接的情况;若节点 A 将节点 B 视为新加入的节点,而据此动态调整维护的路由表,overlay 层就会因为节点无序的移动而变得不稳定,当移动节点频繁加入/退出时,会导致 overlay 层发生振荡,称为移动性扰动.

4.2 网络结构一致性研究现状

目前,对网络结构一致性问题的研究主要有以下两个趋势:一是采用传统优化机制,即遵循 OSI 七层参考模型,单独对 overlay 层或网络层进行优化设计;二是采用跨层优化机制,即打破 OSI 模型的严格分层机制,使相关协议层能够直接交互信息,以提高 overlay 层与网络层的信息传输效率.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

4.2.1 传统优化机制

基于 DHT 的结构化 P2P 网络通过严格的 overlay 层构造规则(环状、N 维空间网格)有效降低了系统维持所需占用的控制带宽,提高了搜索效率.然而,严格的 overlay 层构造规则要求节点的动态性较低,从而节省维护网络逻辑结构的开销,这使得结构化路由算法本身的灵活性不够.

文献[41]通过降低构建 overlay 层的严格程度,使得所加入节点可以选择在物理上更接近自己的节点作为 overlay 层的邻居节点,以降低网络延时.这种方法以足够的系统信息为前提,即节点知道其他所有节点的 overlay 层地址以及与其他节点之间的物理距离,基于这些信息,节点可以在整个 overlay 层地址空间内选择最优的邻居;而在对应的 overlay 层地址空间内找到距离最近的邻居节点有很大难度,特别是在移动 P2P 环境中.

文献[5]提出在 overlay 层采用基于邻接性的策略提高结构一致性,在节点发起或转发搜索请求时,首先考虑周围物理相邻的节点是否有需要的索引信息,即节点在发送搜索请求之前,首先向其传输范围内的节点广播搜索请求.接收到该搜索请求的邻居节点根据自己的路由表,反馈距离目的节点最近的节点地址以及请求节点和该最近节点之间的 overlay 层距离,请求节点把邻居节点的反馈信息与自己的路由表相比较,将搜索请求转发给逻辑上距离目的节点最近的节点.

文献[42]提出了一种 P2P 覆盖网络拓扑相关的通用方法.该方法通过周期性地调整节点标号,既保证了网络结构不变,又逐步降低了网络的平均时延,使得覆盖网络和物理网络逐步匹配;同时,该方法与具体协议无关,可在各种结构化 P2P 系统中使用.实验表明,该方法能够显著降低网络平均时延,并可在其他协议相关方法的基础上进一步提高系统性能.但该方法并没有考虑移动 P2P 网络中节点的移动特性,不能有效地解决移动性扰动等移动 P2P 网络所特有的问题.

4.2.2 跨层优化机制

对于异构的移动网络环境而言,无线信道的时变和节点的移动特性使得链路的断开、路由的改变频繁发生,网络的正常运行需要及时发送网络控制信息,这给目前低带宽的无线链路带来很大开销;严格的分层限制了信息获取的灵活性,高层协议希望直接得到的底层网络信息需要经历几个中间协议层才能获得,信息的更新带有明显的延迟,这使得传统上用于有线网络的严格分层协议栈无法高效运行,而针对某一层次的性能优化也许还会导致全局协议栈性能的降低.针对这些问题,研究人员提出了跨层优化的机制.

文献[43]提出一种基于信令缩减的跨层设计模型 CLASS(cross-layer signaling shortcuts),如图 6 所示.CLASS 的特点如下:(1) 允许非相邻层间的直接信令交互,理论上可在任意两层之间交互信令,实际的层间交互与任务和协议相关,需要选择特定的信令交互通路;(2) 节省了信令的传递时间,假设信令源层用 L_1 表示,目的层用 L_n 表示,则其信令传递所用时间仅为逐层传输时间的 $1/(n-1)$;(3) 在协议栈中引入本地信令机制,并区别对待内部/外部消息.对于内部消息,无须采用开销太大的标准协议.基于 CLASS 的信令交互模式有诸多应用模型,它可以用于解决跨层功率控制、QoS 最优化、移动性管理、跨层媒体接入控制以及跨层路由等问题.

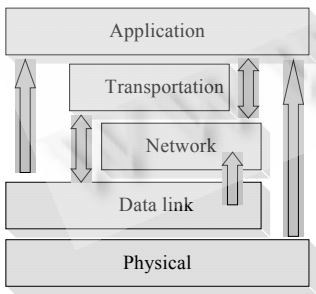

Fig.6 The abstract model of CLASS

图 6 CLASS 的概念模型

文献[33]提出跨层的 Pastry 路由协议 CrossROAD,即通过修改网络层路由协议,将维护 Pastry 网络的信息直接与网络层路由协议合并,在 Pastry 和网络层之间维护一个上、下都能直接访问的记录网络物理拓扑信息的数据结构,这个结构缓存了网络中所有节点的情况以及节点提供的应用,从而使 Pastry 层能够了解整个网络底层的拓扑结构,并针对这些结构进行性能上的优化.

文献[44]利用 CrossROAD[33]跨层优化的思想扩展了文献[45]所提出的 Common API(application programming interface).它通过跨层优化输出网络路由信息和覆盖层乃至应用层的当前信息,把 Common API 扩展到固定和移动的结构化 P2P 系统中;同时,通过利用特殊节点充当路由协议和覆盖层的网关节点,Common API 接口为定义固定和移动网络上 P2P 系统的互通铺平了道路.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

跨层优化的方式有效地降低了构造和管理覆盖层数据结构的负荷,能够更好地支持用户移动性和断续连接.但是,当前对移动 P2P 网络环境中跨层优化机制的研究刚刚起步,以上解决方案并没有从根本上解决覆盖层与网络层结构失配、移动性扰动等问题;同时,当节点移动使网络拓扑发生变化而网络层路由表里的信息未得到及时更新时,对一个已经不存在的路由地址发送路由信息,将会产生“路由黑洞”等问题.这些问题都有待于进一步研究和解决.

5 数据分发策略

5.1 数据分发策略的分类

移动网络环境中节点和网络的自身特性,使得移动 P2P 网络中的数据分发存在诸多限制.针对这些限制,研究人员提出很多改进方案.这些方案从不同的角度描述,有不同的分类方式.

按照数据传输是否同步,可以把数据分发策略分为同步数据分发和异步数据分发两种.同步数据分发需在发送节点与接收节点之间建立有效连接,且在数据传输过程中保持连接一直可用;异步数据分发无须在发送节点与接收节点之间建立直接数据链路,源节点把数据发送给尽可能多的中间节点缓存,目的节点可从中间节点获得其想要的数据,其主要用于源节点与目的节点之间因为距离或时间等原因不能直接建立有效连接的场合.

按照单个节点获取的数据资源是否完整,可以把数据分发策略分为完全(full-packet)数据分发和分段(segmentation)数据分发.在完全数据分发中,接收者从资源提供节点获得的数据必须是完整的,即无论数据资源大小,一旦其从所需节点开始传输,就必须把整个资源传输完毕且不能分段;分段数据分发通过一定的策略把数据资源分段,资源请求节点从不同资源提供节点获取所需资源的不同片断,获取足够的资源片段后即可重构原始数据资源,如 Tornado 编码等.

按照数据分发过程是否与路由策略相关,可以把数据分发策略分为路由驱动(routing-driven)数据分发和路由无关(routing-independent)数据分发.路由驱动数据分发策略通过修改底层网络路由协议来提高数据分发效率,如文献[46–48]中提出的数据分发策略;路由无关数据分发策略不考虑底层路由,通过对资源编码等方式来实现数据分发,如文献[49,50]中提出的数据分发策略.

5.2 主要的数据分发策略

5.2.1 路由驱动数据分发策略

文献[46]所提出的自适应路由技术是一种可感知环境的路由驱动数据分发机制,其优点在于给不同网络区域内自由移动的节点增加了与其他网络区域节点连接的机会.这一机制的前提是节点所有关于位置的信息都是逻辑连接的信息,且连接对时延的容忍足以使信息可以传送到目的节点.文献[46]采用智能化的异步传输机制,使得在部分相连的 MANET 中也能传输数据.它假设移动节点频繁移动于不同网络云(network cloud)之间,且节点移动时可同时携带数据信息,因此不直接相连的两个节点可以通过移动节点实现数据分发.该协议需要底层路由协议的支持,节点需要定期地把底层路由信息发送给其他节点,以保持路由表的更新,提高数据分发的效率.

文献[47]提出了一种高效、节能的数据分发策略.它采用事件调度器动态调度每个事件的时隙(time slot),网络被组织成事件分发树(event dissemination tree),树的根节点称为基站(base station).每个事件都被安排在特殊的时隙中,节点只需在其感兴趣的时隙内进行监听,而在其他时隙则可以关闭连接,因此可以有效减少能量的消耗;同时,由于网络被组织成树状结构,不同节点之间无须建立直接连接即可通过中间节点进行路由.

内容摘要(content summary 或 content synopsis)在减少延迟、均衡负载和减少热点等方面的作用使其受到越来越多的关注.文献[48]提出了一种移动 P2P 网络中自适应的内容驱动路由和数据分发机制.该机制的关键在于,每个节点都为其共享的数据提供一个内容摘要,并将该内容摘要分发给其他节点,因此,节点可根据本地存储的内容摘要来确定所需内容或服务的相应对等节点,有效提高了搜索效率和响应速度.实验表明,这种机制相对于传统的 BFS(breadth-first search)算法具有更好的性能,其困难在于分发数据摘要时,节点必须智能地决定

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

分发节点和分发频度.

5.2.2 路由无关数据分发策略

目前,常用的路由无关数据分发策略主要有 Tornado 编码[49]和传染病信息分发算法[50].

Tornado 编码[49]是一种纠错码.它在现有的通用处理器上能够提供近似最优的编码效率.Tornado 编码在所有节点只接收相同数据的大规模移动网络中具有较好的性能,主要适合两种场景:所有用户请求相同文件;只有 1 个节点发送文件而其他节点只接收文件.该协议首先对数据进行 Turbo 编码,将数据分为多个固定大小的数据段,数据段的总长度比原有文件长度大一个因子,该因子被称为伸展因子(stretch factor).接收方只需接收所有特定的数据段(数据段的大小加起来比原有文件大 5%)即可正确解码数据.通过调整伸展因子,可保证节点接收到足够的数据包来还原文件,同时不会接收到过多的重复数据.

该领域的另一个研究趋势是利用传染病模型[50]来描述数据在 P2P 系统中的传播途径.该模型模仿了传染病爆发时病毒在人群间的传播模式,与受感染的病人将病毒传染给与之接触的人群类似,MANET 中的移动节点能够将数据转发给其信号覆盖范围内的其他节点.在 P2P 模式下,影响传染病数据分发模型的重要参数有:消息向外转发的目标节点数目、一条消息被转发的次数、节点为该算法提供缓存空间大小以及缓存空间的管理策略等.但目前对 P2P 模式下传染病数据分发模型重要参数间的相互影响并没有相关研究和说明,对影响传播效率的关键参数尚需作进一步研究,需要解决成员感知、网络感知、拓扑管理和信息过滤等问题.

6 安全与隐私机制

6.1 安全与隐私问题的提出

与大多数应用系统一样,安全和隐私问题也是移动 P2P 系统不可忽视的重要问题.它不仅需要考虑到 P2P 网络的固有属性,同时也需要考虑移动网络环境所具有的自身特性.目前,对移动 P2P 网络安全问题的研究主要集中在信任管理、攻击检测、访问控制方面;对隐私问题的研究主要集中在匿名通信和对等信誉方面.

在信任管理方面,可信中央控制节点(CA)的缺失使得移动 P2P 系统中节点之间的信任和授权不能采用传统有线网络中基于 CA 授权的安全机制,任何节点都必须采用有效方法来判定可信节点和非可信节点,因此,必须针对移动 P2P 网络完全分散化的特点设计有效的分布式验证协议.

在访问控制方面,移动网络环境中无线信道的不稳定使得进行授权或管理的节点随时都有断网或不可用的可能;另一方面,进行授权和管理的节点难以独立负载整个系统中所有节点的安全需求.因此,分布式授权控制方案成为移动 P2P 网络的首要选择.

在匿名通信方面,现有的 Internet 网络协议不支持隐藏通信端地址的功能.SSL(secure socket layer)等加密机制虽然能够防止他人获得通信内容,但并不能隐藏信息的发送者.在无线通信领域,终端的移动性及连接设备的不确定性使得移动 P2P 网络更需要通过完善的接入控制及授权机制来解决非法用户的侵入,保护无线用户的通信隐私.

移动 P2P 网络在商业环境下能否发挥更大的作用依赖于网络节点之间的信誉问题.集中式的节点信誉管理既复杂又不一定可靠,对等信誉具有灵活性、针对性且不需要复杂集中管理等优点,使其成为未来各种网络加强信誉管理的有效选择.

6.2 安全与隐私问题研究现状

在信任管理方面,英国伦敦大学的 Balfe 等人提出了使用 TCG(Trusted Computing Group)规范的 P2P 网络安全方案[10],主要针对匿名授权机制以及节点之间安全通道的建立,但此研究以 Internet 为基础,没有考虑到无线网络的自有特点;文献[51]指出了 P2P 系统中信任、安全和隐私问题产生的原因,并指出了今后的发展方向以及 P2P 系统的应用前景,但其并没有针对移动环境给出相应的解决方案.所以,结合无线网络环境自身特点的信任管理方案仍是移动 P2P 网络今后的研究方向.

在访问控制方面,奥地利 Vienna 大学 Fenkam 等人为无线移动环境的 P2P 协作开发了访问控制系统[12],作

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

为 MOTION(mobile teamwork infrastructure for organizations networking)工程的一部分.它主要针对无线终端协作中的访问控制问题.系统对参与节点根据能力(L_1 和 L_2)赋予不同的责任.L_1 节点可支持维护正常安全机制所带来的性能开销,并负责对相应资源进行访问控制;L_2 节点主要负责认证其他节点对自身提供的服务所请求的授权证书以及存储部分将来可用的授权证书.

在匿名通信方面,Cornell 大学设计了一个自组织的可扩展 P2P 匿名通信协议 CliqueNet.它采用分治的思想对 DC-Net 协议进行了改进,目的是解决 DC-Net 协议效率低和可扩展性差的弱点.P5 采用分级广播的思想来建立匿名通信网络,并考虑了用户的匿名性和通信效率之间的平衡,其缺点是当用户数很大时协议效率很低.Onion Routing,Tarzan,MorphMix 都是基于 Chaum 提出的 MIX 方法的 P2P 匿名通信协议.它们的匿名性较好,但在大规模情况下,可扩展性和效率不高,且没有考虑移动环境的独有特性.文献[13]提出了基于秘密共享的双向匿名机制(secret-sharing-based mutual anonymous,简称 SMA),实现了移动 P2P 环境中的双向匿名解决方案.

在对等信誉方面,文献[15]提出了一种面向非结构化 P2P 网络的分级信誉管理系统 hiREP.它把节点分为普通节点、信誉代理和可信代理 3 种类型.带宽大于 64KB 的任何节点均可行使信誉代理的功能,但只有授权节点才能被其他节点选为可信代理.所有可信代理构成一个信誉社区,节点只需向其可信代理汇报交易结果并从其可信代理处检查其他节点的信誉值,从而把通信流量限制在 $O(N)$内,其中,N 为可信代理拥有的节点数.在分布式环境中,对等信誉机制的挑战是如何在无中央管理的情况下对局部信誉度进行聚合:如果对等节点的信誉度聚合仅限于某个局部范围,就不能得到节点的全面信誉度值;如果在全局范围内聚合,那么查询每个对等点的局部信誉度会导致网络拥塞.

7 总结及展望

目前,对移动 P2P 网络的研究总体上还处于起步阶段,现有的研究大多集中于无基础设施的 MANET 环境.但有基础设施的移动蜂窝网络和宽带无线网络也存在越来越大的 P2P 应用需求,具有异构融合特征的移动 P2P 网络更是存在大量的开放性问题有待进一步研究和探索.从推动移动 P2P 网络的应用和发展来看,我们认为以下几个方面会成为未来的发展方向:

(1) 在移动对等网络体系结构方面.移动场景的多样性使得满足各种需求的普适应用系统很难存在.在异构融合环境下如何有效利用现有网络基础设施,寻求一种可运营、可管理,能够使移动运营商、内容提供商与终端用户三方共赢[52]的移动 P2P 网络体系结构,是一个值得深入研究的问题.IMS(IP multimedia subsystem)[53]是 3GPP(third generation partnership project)提出的支持 IP 多媒体业务的子系统,其通信与接入方式无关,多媒体业务控制功能与承载能力分离、呼叫与会话分离、应用与服务分离、业务与网络分离,并能有效实现移动网与因特网业务融合.IMS 在本质上的分布特征为解决移动对等网络体系结构提供了一个很好的思路.

(2) 在资源发现策略方面.先应式资源发现策略要求节点周期性地更新网络拓扑结构和索引信息,从而增加网络通信量;反应式资源发现策略通过发现过程中得到的反相路由向源节点反馈发现结果.如果发现路由的中间节点在结果反馈之前消失,资源发现结果也会随之丢失,这种情况在移动环境中将相当频繁.因此,如何把先应式策略和反应式策略两种机制有机结合,充分利用两者优势互补,是今后移动 P2P 网络资源发现的一个重要研究方向.

(3) 在覆盖层和网络层结构一致性方面.目前已有的方法大多没有考虑覆盖层与实际物理连接的匹配状况,从而造成覆盖层和网络层的一致性失配.跨层优化机制能够直接在相关协议层交互信息,有效提高了覆盖层和网络层的结构一致性,减少了信息交互的冗余,成为移动 P2P 网络今后一个重要的发展方向.

(4) 在数据分发方面.传染病模型因其具有高可靠性和健壮性等优点引起研究人员越来越多的关注,但数据分发模型重要参数之间的相互影响并没有相关研究和说明.利用传染病模型来描述数据在移动 P2P 环境中的传播途径,并以此指导 P2P 系统设计,还需要进一步的研究和探索.

(5) 在安全和隐私方面.P2P 系统为了追求最大的用户参与度,很少干预用户的行为.从本质上来讲,P2P 网络是天生的不可信网络,这使其对用户的恶意行为表现较为脆弱.对基于 Internet 的 P2P 系统的安全和隐私问题

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的研究还刚刚起步,如何结合异构融合环境的自身特性研究移动 P2P 系统的安全和隐私问题,成为当前和今后移动 P2P 网络的重要研究方向.

移动 P2P 网络是一种新型的资源共享和数据分发的手段与技术,移动应用环境的逐渐成熟,使其拥有越来越广阔的应用前景.本文首先介绍了移动对等网络的基本概念,包括移动对等网络的基本特征以及与 MANET 的区别,并指出了相应的关键技术;随后,详细综述了网络体系结构、资源搜索策略、网络结构一致性、数据分发、安全和隐私等关键技术,深入分析了其发展现状和目前所存在的问题;最后,从推动移动 P2P 网络应用和发展的角度展望未来的研究方向.希望本文能对相关学者的研究起到推动和促进作用,我们也正在作相关的研究.

References:

[1] The Washington times online. 2004. http://www.washingtontimes.com/technology/20040303-094741-3574r.htm

[2] Krco S, Cleary D, Parker D. P2P mobile sensor networks. In: Proc. of the 38th Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences. 2005. 1–9.

[3] Sözer H, Tekkalmaz M, Körpeoğlu İ. A peer-to-peer file sharing system for wireless ad-hoc networks. In: Proc. of the 3rd Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net 2004). 2004. 1–9.

[4] Liu J. Peer-Tree: A peer-to-peer message forwarding structure for relaying messages in mobile applications. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Hot Topics in Peer-to-Peer Systems. 2005. 87–94.

[5] Meier R, Cahill V, Nedos A, Clarke S. Proximity-Based service discovery in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 5th IFIP WG 6.1 Int'l Conf. on Distributed Applications and Interoperable System. 2005. 1–15.

[6] Zahn T, Winter R, Schiller J. Simple, efficient peer-to-peer overlay clustering in mobile, ad hoc networks. In: Proc. of the 12th IEEE Int'l Conf. on Networks, Vol.2. 2004. 520–524.

[7] Cheng JJ, Li YH, Cheng SD, Ma J. The architecture on the mobile P2P system and the study for the key technology. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006,29(4):86–89 (in Chinese with English abstract).

[8] Sato K, Katsumoto M, Miki T. P2MVOD: Peer-to-Peer mobile video on-demand. In: Proc. of the 8th Int'l Conf. on Advanced Communication Technology (ICACT 2006). 2006. 1866–1870.

[9] Schollmeier R, Gruber I, Finkenzeller M. Routing in mobile ad hoc and peer-to-peer networks. A Comparison. In: Proc. of the NETWORKING 2002 Workshops on Web Engineering and Peer-to-Peer Computing. London: Springer-Verlag, 2002. 172–186.

[10] Balfe S, Lakhani AD, Paterson KG. Trusted computing: Providing security for peer-to-peer networks. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Conf. on Peer-to-Peer Computing (P2P 2005). 2005. 117–124.

[11] Sit E, Morris R. Security considerations for peer-to-peer distributed hash tables. In: Proc. of the 1st Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems. 2002. 261–269. http://www.cs.rice.edu/Conferences/IPTPS02/173.pdf

[12] Fenkam P, Dustdar S, Kirda E, Reif G, Gall H. Towards an access control system for mobile peer-to-peer collaborative environments. In: Proc. of the 11th IEEE Int'l Workshops on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. 2002. 95–100.

[13] Han JS, Zhu YM, Liu YH, Cai JF, Hu L. Provide privacy for mobile P2P systems. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems Workshops. 2005. 829–834.

[14] Liu XM, Xiao L. hiREP: Hierarchical reputation management for peer-to-peer systems. In: Proc. of the 2006 Int'l Conf. on Parallel Processing (ICPP 2006). 2006. 289–296.

[15] Andersen FU, de Meer H, Dedinski I. An architecture concept for mobile p2p file sharing services. In: Proc. of the Workshop at Informatik 2004—Algorithms and Protocols for Efficient Peer-to-Peer Applications. 2004. 229–233.

[16] Hu THT, Thai B, Seneviratne A. Supporting mobile devices in Gnutella file sharing network with mobile agents. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Symp. on Computers and Communication (ISCC 2003). 2003. 1035–1040.

[17] Sumino H, Ishikawa N, Kato T. Design and implementation of P2P protocol for mobile phones. In: Proc. of the 4th Annual IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2006). 2006. 1–6.

[18] Klemm A, Lindemann C, Waldhorst OP. A special-purpose peer-to-peer file sharing system for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE 58th Vehicular Technology Conf., Vol.4. 2003. 2758–2763.

[19] Raivio Y. A peer-to-peer overlay architecture for mobile networks. In: HUT T-110.7190 Research Seminar on Data

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Communications Software. 2005. 1−10. http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/T-110.7190/2005/papers/Raivio.pdf

[20] Harjula E, Ylianttila M, Ala-Kurikka J, Riekki J, Sauvola J. Plug-and-Play application platform: Towards mobile peer-to-peer. In: Proc. of the ACM 3rd Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Multimedia. 2004. 63−69.

[21] Bisignano M, Di Modica G, Tomarchio O. JMobiPeer: A middleware for mobile peer-to-peer computing in MANETs. In: Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW 2005). 2005. 785−791.

[22] Papadopouli M, Schulzrinne H. Seven degrees of separation in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM 2000), Vol.3. IEEE Computer Society, 2000. 1707−1711.

[23] Kortuem G. Proem: A middleware platform for mobile peer-to-peer computing. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002,6(4):62−64.

[24] Hoßfeld T, Tutschku K, Andersen FU. Mapping of file-sharing onto mobile environments: Feasibility and performance of eDonkey with GPRS. In: Proc. of the IEEE Conf. Wireless Communications and Networking, Vol.4. 2005. 2453−2458.

[25] Hofeld T, Tutschku K, Andersen FU. Mapping of file-sharing onto mobile environments: Enhancement by UMTS. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. 2005. 43−49.

[26] Bakos B, Csúcs G, Farkas L, Nurminen JK. Peer-to-Peer protocol evaluation in topologies resembling wireless networks. An experiment with Gnutella query engine. In: Proc. of the 11th IEEE Int'l Conf. on Networks. 2003. 673−680.

[27] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, Karp R, Shenker S. A scalable ContentAddressable network. In: Proc. of ACM SIGCOMM 2001. 2001. 161−172.

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

[29] Rowstron1 A, Druschel P. Pastry: Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In: Proc. of the 18th IFIP/ACM Int'l Conf. on Distributed Systems Platforms (Middleware 2001). 2001. 329−350

[30] Peng G, Li SP, Jin HR, Ma TC. M-CAN: A lookup protocol for mobile peer-to-peer environment. In: Proc. of the 7th Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms and Networks. 2004. 544−549.

[31] Cramer C, Fuhrmann T. ISPRP: A message-efficient protocol for initializing structured P2P networks. In: Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Performance, Computing, and Communications. 2005. 365−370.

[32] Pucha H, Das SM, Hu YC. Ekta: An efficient DHT substrate for distributed applications in mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. 2004. 163−173.

[33] Delmastro F. From pastry to CrossROAD: CROSS-Layer ring overlay for ad hoc networks. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. 2005. 60−64.

[34] Gmber I, Schollmeier R, Kellerer W. Performance evaluation of the mobile peer-to-peer service. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid. 2004. 363−371.

[35] Joseph MS, Kumar M, Shen HB, Das S. Energy efficient data retrieval and caching in mobile peer-to-peer networks. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. 2005. 50−54.

[36] He YF, Lee I, Gu XJ, Guan L. Centralized Peer-to-Peer Video Streaming Over Hybrid Wireless Network. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Multimedia and Expo 2005 (ICME 2005). 2005. 550−553.

[37] Seet BC, Lau CT, Hsu WJ, Lee BS. A mobile system of super-peers using city buses. In: Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom 2005 Workshops). 2005. 80−85.

[38] Peng G, Li SP, Jin HR, Ma TC. Dynamic indices for mobile peer-to-peer networks. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Computer and Information Technology (CIT 2004). 2004. 410−415.

[39] Lee C, Helal A, Desai N, Verma V, Arslan B. Konark: A system and protocols for device independent, peer-to-peer discovery and delivery of mobile services. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 2003,33(6):682−696.

[40] Schollmeier R, Gruber I, Niethammer F. Protocol for peer-to-peer networking in mobile environments. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks. 2003. 121−127.

[41] Dabek F, Li J, Sit E, Robertson J, Kaashoek MF, Morris R. Designing a DHT for low latency and high throughput. In: Proc. of the 1st USENIX Symp. on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 2004). 2004. 134−147.

[42] Liu Q, Xu P, Yang HT, Peng Y. Research on measurement of peer-to-peer file sharing system. Journal of Software, 2006,17(10):

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2131−2140 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2131.htm

[43] Wang Q, Abu-Rgheff MA. Cross-Layer signaling for next-generation wireless systems. In: Proc. of the IEEE WCNC 2003 of Wireless Communications and Networking, Vol.2. 2003. 1084−1089.

[44] Delmastro F, Conti M, Gregori E. P2P common API for structured overlay networks: A cross-layer extension. In: Proc. of the 2006 Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2006). 2006. 1−5.

[45] Dabek F, Zhao B, Drusche P, Kubiatowicz J, Stoica I. Towards a common API for structured peer-to-peer overlays. In: Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS 2003). 2003. 1−6.

[46] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005). 2005. 183−189.

[47] Cetintemel U, Flinders A, Sun Y. Power efficient data dissemination in wireless sensor networks. In: Proc. of the 3rd ACM Int'l Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access. 2003. 1−8.

[48] Repantis T, Kalogeraki V. Data dissemination in mobile peer-to-peer networks. In: Proc. of the 6th Int'l Conf. on Mobile Data Management Table of Contents. 2005. 211−219.

[49] Goel SK, Singh M, Xu DY. Efficient peer-to-peer data dissemination in mobile ad-hoc networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Parallel Processing Workshops (ICPPW 2002). 2002. 152−158.

[50] Eugster PT, Guerraoui R, Kermarrec AM, Massoulié L. Epidemic information dissemination in distributed systems. IEEE Computer, 2004,37(5):60−67.

[51] Mondal A, Kitsuregawa M. Privacy, security and trust in P2P environments: A perspective. In: Proc. of the 17th Int'l Conf. on Database and Expert Systems Applications (DEXA 2006). 2006. 682−686.

[52] Qiu TQ, Chen GH. A generic approach to making P2P overlay network topology-aware. Journal of Software, 2007,18(2):381−390 (in Chinese with English abstract) http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/381.htm

[53] Koukal M, Bestak R. Architecture of IP multimedia subsystem. In: Proc. of the 48th Int'l Symp. ELMAR-2006 on Multimedia Signal Processing and Communications. 2006. 323−326.

附中文参考文献:

[7] 程久军,李玉宏,程时端,马建.移动 P2P 系统体系结构与关键技术的研究.北京邮电大学学报,2006,29(4):86−89.

[42] 刘琼,徐鹏,杨海涛,彭芸.Peer-to-Peer 文件共享系统的测量研究.软件学报,2006,17(10):2131−2140. http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2131.htm

[52] 邱彤庆,陈贵海.一种令 P2P 覆盖网络拓扑相关的通用方法.软件学报,2007,18(2):381−390. http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/381.htm

欧中洪(1982－),男,湖南娄底人,博士生,主要研究领域为移动对等网络.

战晓苏(1964－),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为对等计算,下一代网络.

宋美娜(1974－),女,博士,副教授,主要研究领域为分布式计算,移动对等网络.

宋俊德(1938－),男,博士,教授,博士生导师, CCF 高级会员,主要研究领域为并行计算,异构融合网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn