

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)

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,BiTorrent,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

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.

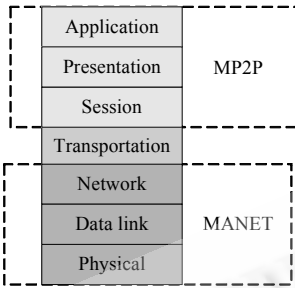


Fig.1 The difference between MANET and MP2P

图 1 MANET 与 MP2P 的区别

所示.

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

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固有的缺点,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.

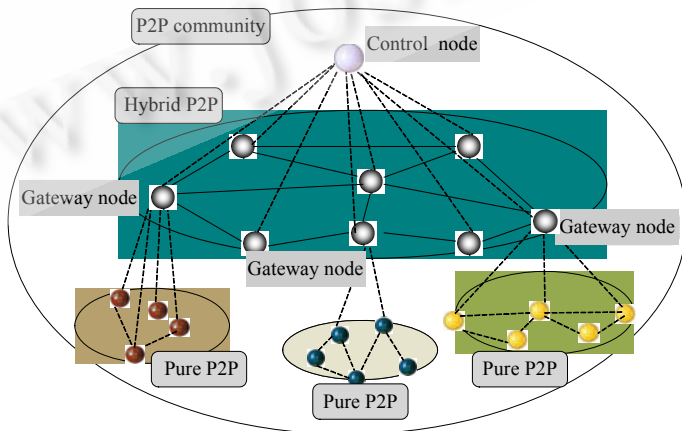


Fig.2 P2P architecture

图 2 P2P 体系结构

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.

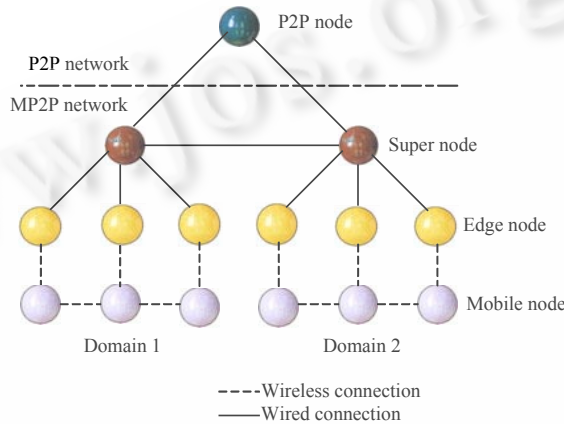


Fig.3 P2P overlay architecture based on super node
图 3 基于超级节点的 P2P 覆盖层体系结构

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

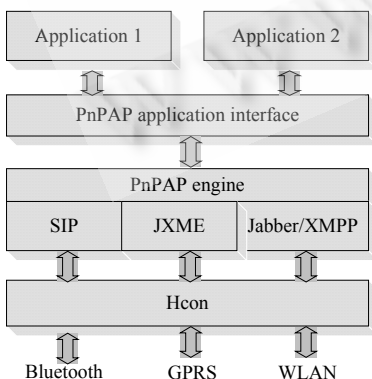


Fig.4 PnPAP architecture
图 4 PnPAP 体系结构

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

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

