ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.20, No.8, August 2009, pp.2199−2213
doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03639
© 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

应用于移动互联网的Peer-to-Peer关键技术*

李 伟[1,2], 徐正全[3+], 杨 铸[1]

[1](武汉邮电科学研究院 光纤通信与网络国家重点实验室(筹),湖北 武汉 430074)

[2](武汉大学 电子信息学院,湖北 武汉 430072)

[3](武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

Peer-to-Peer Key Technologies in Mobile Internet

LI Wei[1,2], XU Zheng-Quan[3+], YANG Zhu[1]

[1](Optical Communication & Network State Key Laboratory (Preparing), Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China)

[2](School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[3](State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430074, China)

+ Corresponding author: E-mail: xuzq@whu.edu.cn

Li W, Xu ZQ, Yang Z. Peer-to-Peer key technologies in mobile Internet. *Journal of Software*, 2009,20(8): 2199−2213. http://www.jos.org.cn/1000-9825/3639.htm

Abstract: This paper analyzes the previous study of applying P2P technology in mobile Internet. It first introduces the P2P technology and the conception of mobile Internet, and presents the challenges and service pattern of P2P technology in mobile Internet. Second, the architectures of P2P technology in mobile Internet are described in terms of centralized architecture, super node architecture and ad hoc architecture, respectively. Further more, the resource location algorisms and cross-layer optimizations are introduced based on two different terminal access patterns. Detailed analyses of different key technologies are presented and the disadvantages are pointed out. At last, this paper outlines future research directions.

Key words: mobile Internet; peer-to-peer; mobile ad hoc; resource location

摘 要: 对现有的应用于移动互联网的 P2P 技术方面的研究进行了分析.首先介绍了 P2P 技术和移动互联网的概念,并提出将 P2P 技术应用在移动互联网所面临的挑战和应用模式.其次,分别针对集中式架构、超级节点体系架构和 ad hoc 架构对应用于互联网的 P2P 网络体系架构进行了阐述.再其次,针对移动终端的两种接入模式,分别在资源定位算法和跨层优化两个方面进行了介绍.对各关键技术的特点进行了详细的分析,指出其存在的不足.最后,对未来的工作进行了展望.

关键词: 移动互联网;peer-to-peer;mobile ad hoc;资源定位

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303104 (国家重点基础研究发展计划(973))
Received 2008-10-10; Accepted 2009-04-27

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

1 概 述

1.1 P2P技术介绍

P2P 技术起源于互联网,它的核心思想是网络中的节点之间直接进行数据交换,而不依赖于其他节点.P2P 节点之间在应用层建立虚拟连接,从而使整个系统中的所有节点之间互联组成了一个应用层的逻辑上的虚拟网络.这一网络构建于底层物理网络之上,依赖于底层物理网络的支持(比如底层 IP 网络的路由),并且其构建独立于底层物理网络,所以我们把它称作覆盖网(overlay)[1].根据覆盖网的结构,我们可以把 P2P 系统划分为集中式拓扑(centralized topology)、分布式非结构化拓扑(decentralized unstructured topology)和分布式结构化拓扑(decentralized structured topology)[2].

1.2 移动互联网的概念

互联网已成为现代社会最重要的信息基础设施和人们工作、生活的重要组成部分,人们随时随地通过互联网获取信息.移动互联网是互联网与移动通信网的融合,有研究者将其定义为通过无线接入设备(包括手机、PDA 等)访问互联网[3].也有研究者认为,移动互联网是移动终端之间的数据交换.从上述定义我们可以看出,移动互联网的主要载体是移动终端设备.

1.3 P2P技术应用于移动互联网所面临的挑战

与互联网相比,移动互联网具有一些独特的机制和特点,它们将会极大地影响 P2P 技术在移动互联网中的应用,甚至需要针对移动网络对 P2P 系统进行专门的优化和设计.移动互联网的特点主要包括以下几个方面:

- 业务流量.对于移动通信网络而言,无线资源非常宝贵.传统的各种 P2P 应用需要消耗大量的网络资源,如何在 P2P 业务和无线资源消耗之间取得一种新的平衡是需要首先解决的问题.另外,移动互联网中的数据传输采用上、下行非对称的方式,也影响了 P2P 业务的应用.
- 相对恶劣的信道环境.移动通信网络中的无线链路环境相对于宽带接入网络要恶劣得多,经常可能因为无线信号的多径衰落和信道拥塞等问题造成数据传输的不稳定,这在一定程度上影响到 P2P 覆盖网逻辑拓扑的稳定性,并由此会对 P2P 网络中的查询、路由机制等带来一定的影响.
- 有限的处理能力.移动终端设备的 CPU 的处理能力、可用的存储空间、电池使用时间等限制与 PC 相比存在着巨大的差异.移动终端自身的资源限制使得它不可能像互联网中的 P2P 节点那样长时间扮演服务器的角色.另外,在移动网络中,用户还必须同时考虑贡献资源或转发数据过程中所消耗的电池能量.
- 移动性.在移动环境下,节点的频繁移动性对现有的 P2P 业务产生巨大的挑战,会造成一系列的技术问题.尤其对移动 ad hoc 网络,会导致拓扑的频繁变化,甚至导致网络不可用.
- 终端操作系统不统一.目前,移动终端的操作系统很多,主流操作系统包括 Symbian,Linux,Windows Mobile 等.如果要在移动终端上提供 P2P 应用,则必须在不同操作系统上开发多种不同版本的应用程序或者客户端软件.

1.4 P2P技术在移动互联网中的应用模式

基于移动终端提供 P2P 业务可以包括以下两种模式:1) 移动终端可以通过移动网络连接到互联网中的 P2P 系统,为移动用户提供 P2P 业务.在该模式下,需要针对移动终端的特点进行相应的优化,而在网络体系架构、资源定位算法等关键技术方面主要延续互联网中的 P2P 网络拓扑结构和算法.2) 距离较近的移动终端之间也可以组成自组织网络(ad hoc),在自组织网络上实现 P2P 覆盖网(即移动 P2P),进行资源共享.

Ad hoc 网络一直是业界研究的重点,将 P2P 技术应用于 ad hoc 网络之上来提供新的 P2P 应用具有巨大的吸引力.网络路由算法是 ad hoc 网络的主要研究内容,它可以分为主动(proactive)路由算法和被动(reactive)路由算法.P2P 和 ad hoc 有很多相似性,也有很多不同点[4].图 1 描述了 ad hoc 网络和移动 P2P 之间的关系:ad hoc 网络主要解决移动终端之间的互联互通,实现相关的路由协议[5],相当于互联网中的 IP 层;移动 P2P 叠加在 ad hoc

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

网络基础之上,属于应用层.

研究者已经对移动 P2P 关键技术进行了分析和比较.文献[6]通过屏蔽底层网络技术,研究通用的移动 P2P 技术.而我们则认为,移动终端基于移动网络接入互联网 P2P 系统和基于移动 ad hoc 网络的 P2P 系统之间在体系架构、算法等方面存在巨大的差异.因此,本文针对移动终端的两种应用模式分别进行了研究.

本文第 2 节介绍移动 P2P 系统的网络架构,其中包括集中式架构、半分布式架构和面向 ad hoc 网络的全分布式架构.第 3 节、第 4 节分别针对移动终端的两种应用模式进行分析:第 3 节介绍移动 P2P 系统的资源定位算法,第 4 节介绍面向移动互联网的 P2P 跨层优化技术.第 5 节进行总结和回顾,并对未来的研究进行展望.

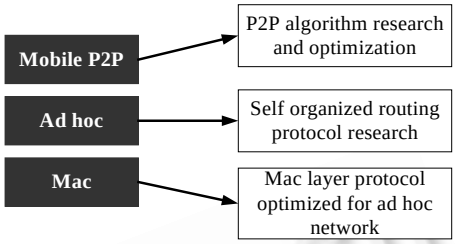


Fig.1 Relationship between mobile P2P and ad hoc

图 1 移动 P2P 与 ad hoc 之间的关系

2 基于移动互联网的P2P网络体系结构

根据 P2P 网络拓扑结构划分,应用于移动互联网的 P2P 网络体系结构可以分为集中式架构、半分布式架构和面向 ad hoc 网络的全分布式架构.

2.1 集中式架构

由 NTT DoCoMo 和爱立信的研究人员共同提出了一个用于移动 P2P 通信的业务平台[7,8].该平台结合了集中式架构和全分布式 P2P 架构,通过网关节点(gateway node)将全分布式 P2P 架构的节点连接到集中式架构中,系统网络拓扑如图 2 所示.由控制节点(control node)和一般节点(peer node)组成的集中式架构位于系统的核心.当移动终端通过 WiFi、蓝牙等连接方式组成 Ad-hoc 网络时,以全分布式 P2P 网络拓扑的形式通过网关节点连接到集中式 P2P 系统中.当移动终端通过 GPRS/HSDPA 等移动网络接入到互联网时,通过移动代理(mobile proxy)连接到集中式 P2P 系统中.

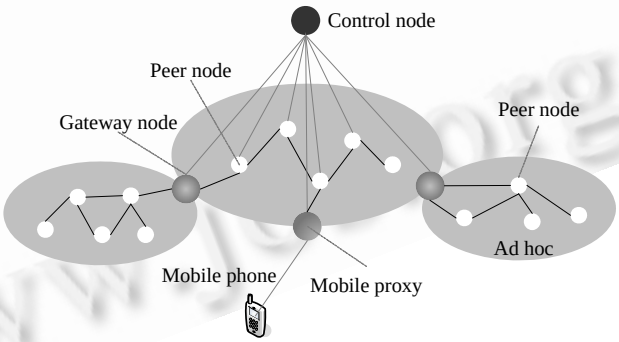


Fig.2 Centralized architecture

图 2 集中式架构

在集中式 P2P 网络中,控制节点(control node)是网络的管理实体,提供名字解析(name resolution)、路由信息(route information)、P2P 节点发现、网络拓扑优化、节点鉴权和组播组的管理等功能.普通节点向控制节点进行注册和登陆,由控制节点维护该节点的在线信息.普通节点通过控制节点提供的路由信息来找到其他节点,以进行数据通信.控制节点解决了网络的安全性问题,并阻止网络被分割.网关节点向全分布式 P2P 节点提供路由信息、节点鉴权和组播组管理等功能.

当移动终端通过移动网络接入到集中式 P2P 网络时,由于处理能力、存储能力、电池等方面的限制,使其无法像普通 PC 那样成为网络中的普通节点.为了适应移动终端的这种特征,系统引入移动代理,由移动代理来

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

代替移动终端实现部分功能.

系统中,移动终端采用层次化协议架构,如图 3 所示.P2P 核心协议是移动终端的必选协议,提供节点命名(node naming)、路由(routing)、基础通信(communication)和多种消息类型.P2P 基础通信协议(P2P basic communication protocol)实现 P2P 节点之间的连接建立,并进行资源交换.P2P 控制消息(P2P control message)实现节点的发现、错误报告和网络拓扑诊断等系统维护和异常诊断的功能.同时,该协议框架还提供了一些可选的功能模块,可以根据终端的能力和业务需求进行裁减和配置.通过中间件 API 接口,开发者可以开发新的 P2P 应用.

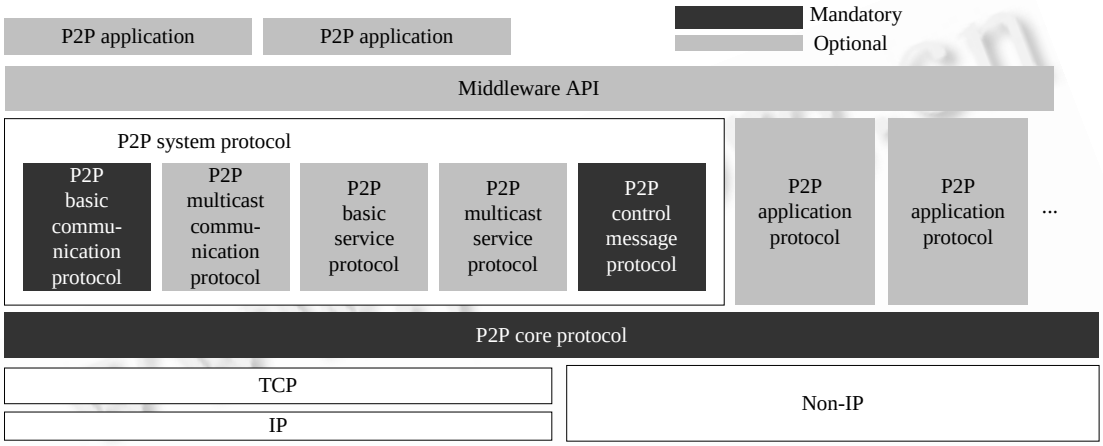


Fig.3 P2P platform software architecture on mobile terminals

图 3 应用于移动终端的 P2P 平台软件架构

上述架构为宽带网络、移动网络、家庭网络、传感器网络等多种异构网络环境提供了统一的业务平台,并提供了安全和网络维护等功能.可以通过控制节点对系统进行配置和管理来满足运营商的需求.同时,该架构也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[6].

2.2 半分布式架构

2.2.1 JXME平台

开源的 JXTA[9]项目由 SUN 公司提出,并在一些学术机构、科研团体和公司的共同参与下不断完善.JXTA 建立在现有的物理网络(IP,WIFI 等)基础上,实现了 P2P 覆盖网中的一些通用操作,为 Peer 节点之间的通信提供标准化的协议框架,使节点能够相互发现,自组织成为群组,实现资源查找和节点之间的相互通信与监测.JXTA 建立在 5 个关键抽象之上:1) 统一的节点标识空间;2) 节点群组;3) 广告;4) 解析器;5) 管道.它们构成了 P2P 业务应用的通用框架,为各种应用的开发提供了基础.JXTA 还具有跨平台的特征.

随着 JXTA 系统的不断完善,在 2.0 版本中,对超级节点(super-peer)的操作进一步优化,如图 4 所示.JXTA 超级节点包括汇集(rendezvous)节点和中继(relay)节点两类.汇集节点缓存连接在该节点上叶子节点所存储的广告索引.JXTA 为超级节点提供非结构化随机漫步(random walk)和结构化松散一致分布式散列表(loosely consistent DHT(distributed hash table))两种拓扑结构.对于抖动幅度较高的 ad hoc 网络,采用随机漫步的方式进行查询,降低了超级节点维护索引信息所产生的额外开销;对于抖动较低的网络,汇集节点之间使用松散一致分布式散列表算法,提高了查询效率.同时,开发人员也可以根据不同的业务需求设计适应的拓扑结构来代替上述两种拓扑结构.中继节点为处于 NAT/防火墙之后的 Peer 节点与其他节点无障碍地进行数据通信提供了手段.

JXTA 协议由核心协议和标准服务协议组成,如图 5 所示.核心协议是 JXTA 协议的最小集,标准服务协议定义了各种 JXTA 应用所需要的功能模块和操作.标准协议并不需要全部实现,可以根据业务需求进行裁减.

为了使 JXTA 能够应用于移动通信网络中,需要采用轻量级的 JXTA 应用于移动终端,基于上述需求,JXME

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

应运而生.JXME 是 JXTA 在 J2ME 上的实现[10].JXME 的基本目的是在提供 J2ME 的小型终端设备和嵌入式消费电子产品上实现 JXTA 的基本功能,为上层的 P2P 应用开发提供底层的平台.通过 JXME,任何 J2ME 的终端设备都能参加 P2P 网络的交互.

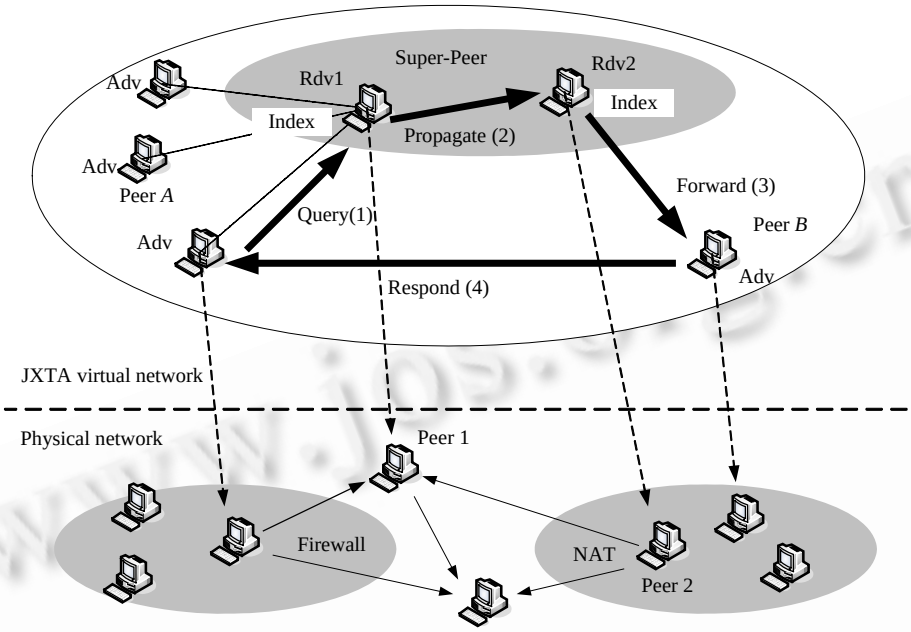


Fig.4 JXTA architecture

图 4 JXTA 体系架构

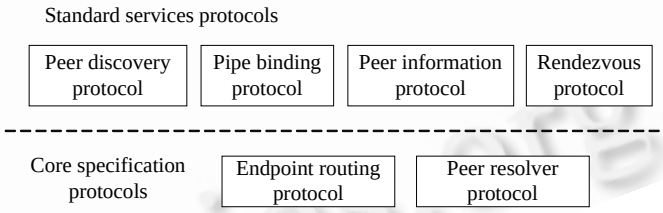


Fig.5 JXTA protocols

图 5 JXTA 协议

与 JXTA 相比,JXME 对中继节点的功能进行了增强,如图 6 所示.JXME 通过中继节点(relay)将移动 peer 节点与 JXTA 网络相连.中继节点实现以下功能:

- 消息过滤.中继节点对不必要的广告进行过滤,以降低对移动网络带宽的消耗.
- 消息路由.中继节点对移动 Peer 节点的消息进行路由.
- 消息压缩.将 JXTA XML 格式的消息转换成二进制发送给移动 Peer,或将移动 Peer 发送的二进制消息转换成 XML 格式发送给其他节点.

如第 1.3 节所述,目前移动终端操作系统版本众多,开发面向移动终端的应用程序面临挑战(需要根据不同的终端操作系统进行开发).JXME 在一定程度上解决了上述问题,任何支持 J2ME 的终端都能支持 JXME.JXME 还充分考虑到移动终端有限的处理能力和网络带宽,对系统进行了优化,改善系统的性能.同时,作为 P2P 应用框架,JXME 降低了系统的开发难度,便于开发新的应用.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

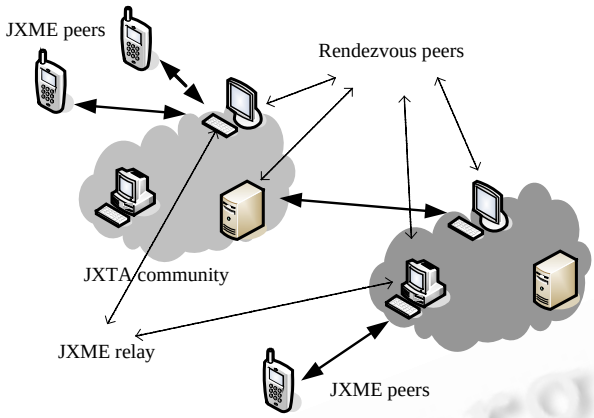


Fig.6 JXME network architecture

图 6 JXME 网络结构

2.2.2 运营商驱动的P2P业务平台

由 NTT 欧洲实验室的 Wolfgang Kellerer 等人提出的面向运营商的基于异构网络的 P2P 平台也是基于超级节点体系架构[11,12],如图 7 所示.该体系架构中,具有较强处理能力的 Super Node 节点组成一个基于分布式散列表(DHT)逻辑拓扑结构,低性能的叶子节点依附于超级节点上,不用处理 DHT 路由信息.

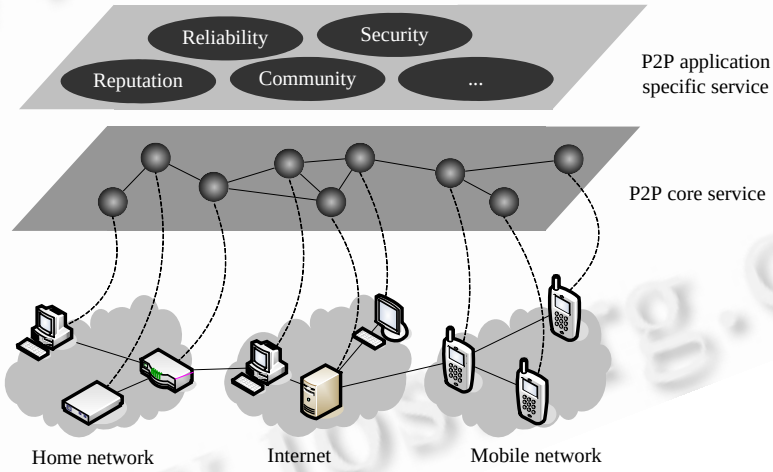


Fig.7 Operator driven P2P platform network architecture

图 7 面向运营商的 P2P 平台网络架构

该 P2P 业务平台被分为两层:P2P 核心服务层(core P2P service)和面向 P2P 应用的特殊服务层(application specific P2P services),如图 8 所示.

P2P 核心服务层提供基础功能,如节点启动引导(bootstrapping)和基于 DHT 协议的资源查找功能.同时,为了满足运营商提供电信级服务的需求,它还为运营商提供网络监控、可靠性管理等功能.P2P 核心层引入了控制管理模块(controllability and manageability),它具有两个基本功能:1) 对网络状况进行监控.通过一些由运营商控制的 Peer 节点或监控服务器来监测网络状况,如网络的流量状况.2) 提供对网络控制的功能.比如,当网络抖动过于剧烈时,向网络中增加一定数量的稳定节点或改变 Peer 节点的备份策略等.动态适配模块(dynamic adaptation)根据底层网络的状况,动态地改变 P2P 协议的参数,甚至是 P2P 算法,以适应网络的变化.比如,在网络抖动很剧烈时,用非结构化网络拓扑来替换 DHT 拓扑可以获得更好的性能.可靠性模块(reliability)为提供电信

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

级高可靠性业务承担重要角色.电信级高可靠性意味着 Peer 节点可以在任何时候获得它所需要的内容,而 P2P 网络在抖动性高的情况下很难满足上述要求,这使得系统需要提供相应的备份机制(用来备份索引信息)来解决上述问题.这些备份机制需要充分考虑节点的在线时间、节点失效的概率等因素.面向 P2P 应用的特殊服务层提供数据管理、信誉度管理、激励机制、数据版权管理等功能,为在该平台上开发新的 P2P 应用提供了相应的开发接口,以便于实现新的 P2P 应用.

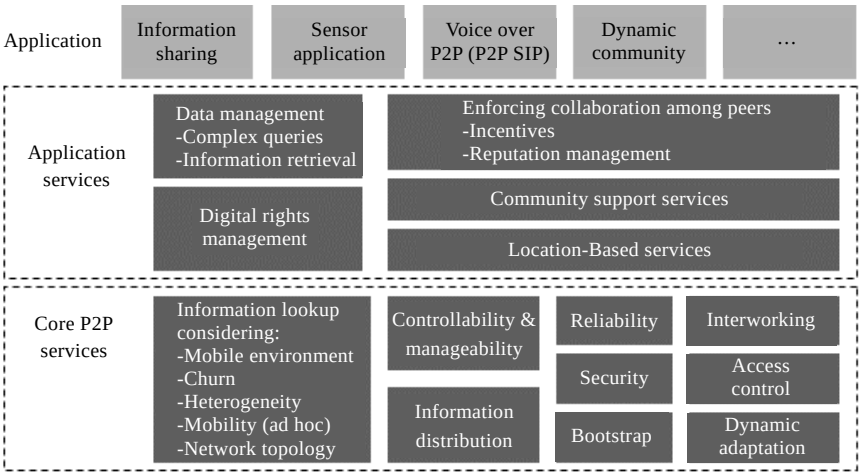


Fig.8 P2P service platform software architecture on mobile terminals

图 8 应用于移动终端的 P2P 业务平台软件架构

该架构最显著的特点是增加了一些新的模块来满足运营商的可控制、可管理和高可靠性方面的要求,并探索将 P2P 技术应用于电信网络.但是,在全分布式的网络环境中提供可控制、可管理等功能面临前所未有的挑战,以往基于 C/S 架构的实现方式与策略无法直接应用到全分布式的 P2P 网络中,比如该架构虽然引入控制管理模块,但是并没有提供对网络状态监控的具体机制和对网络控制的处理方式.因此,相关的实现机制还需要进一步研究与探讨.

2.3 全分布式架构

Proem[13,14]是为了在移动 ad hoc 网络上开发 P2P 应用程序而设计的一个中间件平台,以简化 P2P 应用程序的开发.Proem 平台主要针对在直接相连(face-to-face)的移动终端之间提供协作型应用.Proem 的设计目标包括平台无关性、互通性和便于开发新的应用等.Proem 主要由 3 个部分组成:1) 应用程序运行环境(peerlet engine); 2) 一系列服务;3) 协议.如图 9 所示.在 Proem 中,应用程序称为 peerlets,它们被应用程序运行环境所调用. Peerlet 基于消息驱动模型,移动终端之间的通信基于消息机制.系统提供动态加载模式,peerlet 可以在系统运行时,在应用程序运行环境中被动态地加载或卸载.该特征为系统提供了更多的灵活性.服务(proem service)提供了应用程序所需要的一些公共的功能和为应用程序提供的接口,包括在线管理(presence manager)、用户信息管理(profile manager)、数据管理(data space manager)、群组管理(community manager)、节点数据库(peer database)和事件总线(event bus).协议定义了消息之间的语法,使运行于不同软件、硬件平台上的 Proem 系统之间能够互通.

基于移动 ad hoc 网络开发 P2P 应用面临很多新的挑战,如需要掌握 ad hoc 网络的相关知识、处理不断变化的网络拓扑结构以及资源受限的节点等.Proem 作为移动 P2P 应用软件框架解决了上述问题,对协作、移动性管理、异构网络和快速变换的网络拓扑等进行处理,并为应用程序提供了相关接口,简化了开发过程.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

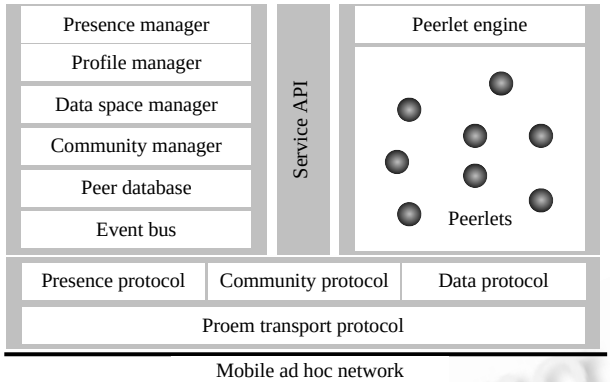


Fig.9 Proem middleware architecture

图 9 Proem 中间件架构

2.4 小 结

集中式架构融合了移动终端通过移动网络(3G/HSPA)接入到 P2P 网络和移动终端之间组成自组织网络两种方式,并且通过网关节点对两种不同种类的网络进行连接.该架构可以应用于多种异构网络环境,但是也存在可扩展性和控制节点单点失效等问题.在半分布式架构中的 JXME 主要针对移动终端通过移动网络接入,组成 P2P 网络,对 ad hoc 网络支持较少.JXME 能够运行于任何支持 J2ME 的移动终端,但是系统的运行效率是其面临的巨大考验.在半分布式架构中,运营商驱动的 P2P 业务平台支持终端节点(包括移动终端、家庭网关、PC 等)基于移动网络、宽带网络等多种接入方式组成的异构网络.同时,在该架构中,终端节点也可以在小范围内组成自组织网络.为满足运营商的需求,该架构中增加了可运营、可管理特征,然而上述特征的具体实现方式仍然需要继续深入地研究.全分布式架构 Proem 面向为移动 ad hoc 网络提供开发协作型 P2P 应用程序软件平台,不支持终端采用移动网络接入系统,限制了 Proem 的应用.

3 基于移动互联网的P2P网络资源发现技术

移动终端可以通过GPRS等移动通信网络接入到移动互联网中,一些系统把通过移动网络接入的移动终端看作是固网系统的延伸,通过增加移动代理,将移动终端接入到现有的 P2P 系统中,实现 P2P 业务.也有研究者研究面向移动 ad hoc 网络的 P2P 应用,提出设计面向异构网络的 P2P 的系统,改变目前网络中的 C/S 模式,提供基于 P2P 架构的业务网络,为移动用户提供服务.

3.1 移动终端通过移动通信网络接入的P2P算法

随着 GPRS 的大规模使用和 3G 技术的兴起,越来越多的移动终端可以通过移动网络来提供数据业务,人们开始探索通过移动网络为移动用户提供P2P业务.一些研究者试图通过对现有的P2P技术进行相应的扩展和优化来适应现有的移动网络和移动终端.相关研究包括以下几个方面:

(1) 集中式架构搜索算法

有研究者提出将 eDonkey 文件共享协议应用于移动网络,实现文件共享或信息共享服务[15],如图 10 所示.移动终端将其共享文件的索引信息发送给索引服务器,由索引服务器对其进行管理和维护.当移动终端希望获取共享文件时,首先向索引服务器发起查询请求,索引服务器搜索其管理的共享文件信息.如果共享文件存在,则将索引信息反馈给发起该请求的移动终端.如果索引信息不存在,则通过爬虫节点(crawling peer)从互联网上进行查询,并将查询结果通过索引服务器发送给发起该请求的移动终端.当共享文件在移动网络中时,查询请求发起的移动终端可以根据获得的索引信息直接向存储该信息的终端获取;当移动共享信息不在移动网络时,发起该请求的移动终端通过 P2P 代理(P2P proxy)与互联网中的 Peer 节点相连,以获取共享文件.系统中点击率较

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

高的热点信息可以存储在缓存节点(cache peer)中,当移动终端获取热点文件时,可以从缓存节点获取,以减少对无线资源的占用.在该架构中,移动终端需要将希望共享的文件索引信息发送给索引服务器,并且与索引服务器之间保持心跳连接,使索引服务器能够随时了解移动终端的在线状态.由于移动终端的资源有限,上述操作将极大地消耗移动终端的网络带宽和电池能量,降低了移动终端的在线时间.

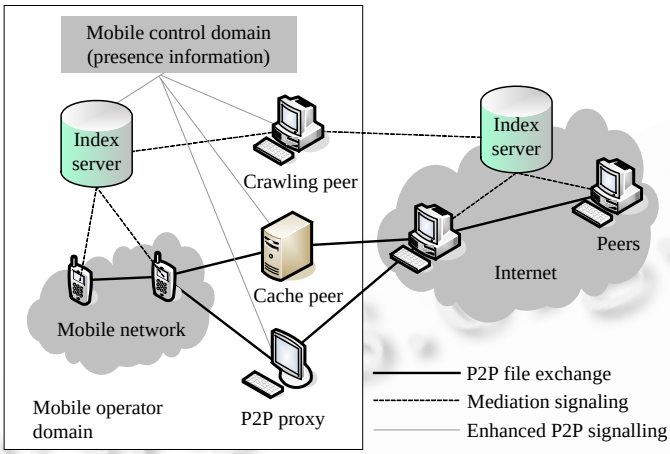


Fig.10 P2P search algorithm based on eDonkey protocol

图 10 基于 eDonkey 协议的 P2P 搜索算法

(2) 基于泛洪的半分布式搜索算法

有研究者提出通过在 Gnutella 文件共享系统中增加移动代理(mobile agent,简称 MA)来支持移动终端的信息共享服务[16].随着对 Gnutella 优化研究的不断深入,Gnutella 协议逐渐演化为半分布式的体系架构,即网络中具有较强处理能力和网络带宽的节点组成超级节点(ultrapeer),普通节点作为叶子节点附着在超级节点周围,超级节点间通过泛洪算法分发查询请求.

移动终端根据其 IP 地址、CPU 处理能力、网络带宽以及用户希望共享的文件等信息生成移动代理(MA),并将其发送到具有执行环境的主机上.在该主机上,移动代理代表移动终端加入到 Gnutella 网络.移动终端和移动代理之间采用类似于 HTTP 的轻量级的通信协议,以降低协议开销.当移动用户发起文件查询时,查询请求被发送到移动代理,移动代理将其转化为 Gnutella 协议,通过 Gnutella 文件共享系统进行查询,如图 11 所示.

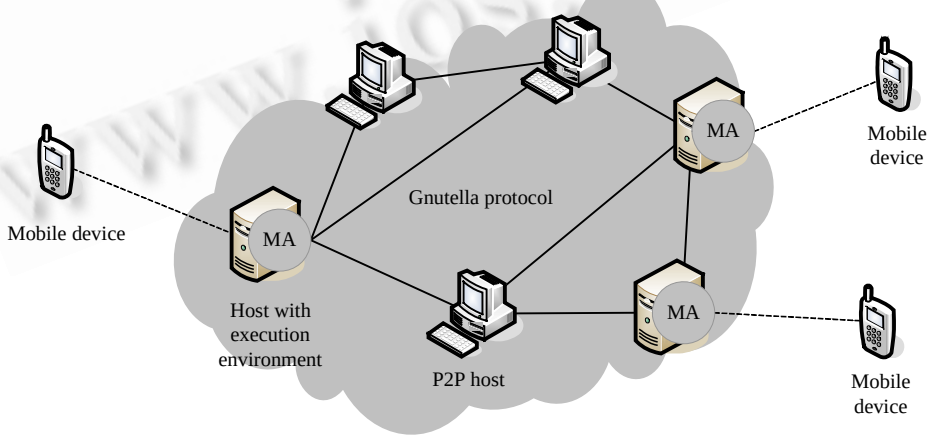


Fig.11 P2P search algorithm based on Gnutella protocol

图 11 基于 Gnutella 协议的 P2P 搜索算法

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

移动代理的引入,使移动终端不必处理网络侧发送来的查询消息,降低了对移动终端处理能力上的消耗.另外,移动代理提供的转发机制能够为处于不同 NAT/防火墙的移动终端之间的数据交换提供保障.

(3) 基于 DHT 的半分布式搜索算法

在传统的 DHT 算法中,所有的节点都被映射到一个 ID 空间中,共同组成分布式散列表.最具代表性的基于 DHT 的 P2P 协议包括 Chord[17],CAN[18],Pastry[19],Tepastry[20].基于 DHT 的算法没有考虑到节点异构性,而且当节点的抖动较剧烈时,对网络拓扑影响较大[21].为了弥补上述不足,有研究者提出基于层次化的分布式散列表结构[11].由处理能力强、网络带宽高、在线时间长的节点组成超级节点,超级节点间基于结构化分布式散列表算法.处理能力较弱的节点,如移动终端,作为叶子节点连接到超级节点,如图 12 所示.由超级节点来维护节点拓扑结构,并处理查询请求,降低了叶子节点的负荷.该架构适用于各种异构网络,包括由移动终端和计算机等组成的 P2P 网络.

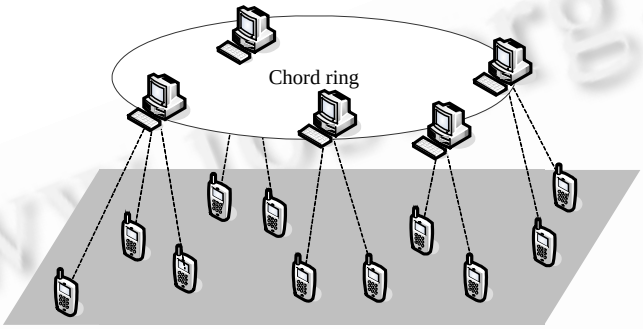


Fig.12 P2P search algorithm based on super node and DHT protocol

图 12 基于超级节点和 DHT 协议的 P2P 搜索算法

3.2 基于移动ad hoc网络的移动P2P算法

传统的 P2P 资源定位算法是为互联网而设计,为了适应移动 ad hoc 网络,需要对 P2P 算法进行改进和优化.相关的研究包括基于泛洪的算法和基于结构化分布式散列表的算法.

(1) 泛洪算法

7DS[22]第一个实现了在 ad hoc 网络上应用 P2P 技术.当移动终端没有连接到互联网时,移动终端通过 WLAN 等方式向 ad hoc 网络中的其他移动终端发送组播查询请求,缓存了相应网页信息的节点向查询节点发送应答信息,使移动终端之间通过文件共享的方式实现对网页的访问.

被动分布式索引(passive distributed indexing)[23−25]通过在每个移动终端中维护索引缓存来避免将查询消息在整个网络中泛洪,索引缓存使节点能够回答一些流行的查询消息,即便是该节点没有存储相关的文件.每个移动终端通过监听广播查询的回复消息来填充索引缓存,采用新索引置换旧索引的方式来限制索引的数目,并且对索引项增加定时器来维护索引的有效性.定时器的时长与网络中节点的抖动幅度相关.当网络中的节点抖动(churn)幅度较大时,需要缩短定时器的时长以及时更新索引项,否则将导致索引失效.较短的定时器时长将导致网络中维护索引信息的负荷增加.目前,采用固定时长的定时器很难适应动态的网络.

RAON[26]参考了 Gia[27]中的大量特征,包括:1) 拓扑适应(topology adaptation),使具有高容量的节点具有高度数;2) 流控制(flow control),通过令牌来限制邻居节点发起的查询请求数目,使本节点不会过载;3) 一跳复制(one-hop replication),使每个节点存储其直接邻居节点的共享文件指针.同时,它还对 Gia 进行了优化,如在有偏随机走(biased random walk)算法中,高度数节点接收查询消息实现查询过程需要消耗较多的电能,因此,根据电池容量和连接稳定性等因素对算法进行了优化.

(2) DHT 算法

在早期的 DHT 算法中,没有考虑节点在网络层的拓扑结构,很多逻辑位置相距较近的节点在物理位置上相距较远,导致产生绕路现象.在 CAN 算法的后续版本中,每个节点通过测量该节点和一系列坐标节点(landmark

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

nodes)之间的延时来推测本节点在互联网中的相对位置,并作为构建 P2P 逻辑拓扑的依据.但是,该方法很难应用在 ad hoc 网络中.在 Pastry 的改进算法中,选择临近的节点作为其在 P2P 逻辑拓扑中的邻居节点,所以 Pastry 算法较多地考虑了网络层拓扑对 P2P 覆盖网的影响,这对 ad hoc 网络极为重要,很多研究试图将 Pastry 应用于 ad hoc 网络中.而一些研究者考察了在 ad hoc 网络上运行 Pastry 的可行性后得出结论,认为 DHT 算法直接应用于移动 ad hoc 网络无法达到理想的性能[28,29].因为建立和维护 P2P 逻辑拓扑结构需要产生大量的开销,加重了 ad hoc 网络的负担,降低了网络的性能,尤其在移动终端的抖动(churn)幅度较高时,将加剧上述问题,导致网络无法工作.另外,两种协议导致的传输延时使 Pastry 经常由于超时而移出实际仍在连接的节点.

为了解决上述问题,一些研究通过增加网络拓扑感知协议来获取底层网络的拓扑信息,并监测网络的状态,以实现 P2P 应用层和物理网络的一致性[30],降低绕路的问题.还有研究者提出跨层(cross-layer)的体系架构[29],将 ad hoc 网络信息提供给 P2P 应用层,以实现 P2P 应用层和物理网络的一致性.

3.3 小 结

移动终端通过移动通信网络接入到 P2P 系统时,由于无线资源的稀缺性,使移动终端之间进行资源共享的成本很高.尤其是当移动终端通过移动网络的上行信道向其他终端提供数据时,由于移动网络的上、下行带宽的非对称性,下行带宽远远高于上行带宽,导致其数据传输效率低,并且该操作将极大地消耗移动终端的电量.同时,移动终端向其他移动终端共享资源产生的网络流量费用也是需要考虑的问题.而互联网中的 P2P 节点相对于移动终端具有更强的存储能力、处理能力和网络带宽,由互联网中 P2P 节点向移动终端共享资源具有高效率、低成本的优势.因此,基于移动终端的特殊性,改变目前移动终端数据共享方式,将移动终端之间数据共享转变为由互联网中的 P2P 节点向移动终端的数据共享模式将更具吸引力.

基于非结构化的移动 P2P 算法能够很好地适应网络的动态性,但是在查询过程中产生大量的查询消息,极大地占用了网络的资源,并降低了网络的可扩展性.基于结构化(DHT)的移动 P2P 算法提高了查询效率,但是在节点不稳定的状况下,散列表的维护占用了大量的资源.因此,将非结构化算法和结构化算法结合起来,在节点稳定的情况下采用 DHT 算法,在节点不稳定的情况下采用非结构化算法,根据网络的状况对算法进行动态调整以提高系统的效率,将是未来的研究方向.

4 基于移动互联网的P2P网络跨层优化技术

P2P 技术独立于底层网络架构,具有独立的路由和资源定位的功能,为 P2P 系统应用于不同物理网络提供了灵活性,同时也带来系统效率问题,即节点的网络拓扑和 P2P 逻辑拓扑不匹配(mismatch)问题.当移动终端通过移动网络接入到 P2P 网络时,上述问题将增加骨干网的压力,提高系统的延时,降低网络的吞吐量.在移动 ad hoc 网络中,通信节点之间的距离为它们之间所经过的中间节点的跳数,网络层和 P2P 应用层不匹配问题将导致额外的路由长度,增加了数据传输的时延.而 ad hoc 网络本身的不稳定性使得上述问题导致网络性能降低,甚至导致网络无法使用.

4.1 基于移动网络接入的节点跨层优化

当移动终端通过移动网络(GPRS/HSPA)连接到 P2P 网络时,系统可以看作时固网的延伸,互联网 P2P 系统中的相关研究将有助于解决上述问题.目前在互联网的 P2P 系统中,跨层优化技术主要包括拓扑感知(topology awareness)和 P4P(proactive provider participation for P2P)等.

(1) 拓扑感知

对于结构化 P2P 算法,节点在 P2P 覆盖网中的一跳对应于网络层中的多跳,这种性能上的损失可以由 stretch 来表示.stretch 的定义为:一次完整的 DHT 搜索所使用的全部物理路径与 DHT 搜索源节点到目的节点之间的最短物理路径之比.一些研究提出了降低 stretch 的方法,这些研究大致可以归为以下 3 类[31]:1) 临近的邻居节点选择(proximity neighbor selection)[30];2) 临近的路由选择(proximity route selection);3) 临近的标识选择(proximity identifier selection)[32].

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(2) P4P

在互联网 P2P 文件共享系统中,P2P 节点在选择其他节点获取数据时,一般不考虑节点之间的距离,节点可能选择任意的能够为其提供数据的 1 个或多个节点来获取数据,其中包括一些网络距离较远的节点,从而导致骨干网流量增加.为解决以上问题,耶鲁大学网络系统实验室的谢海永等人提出了 P4P 体系架构[33,34],通过 iTracker 服务器作为网络层与 P2P 应用层之间的接口,运营商将 IP 网络的拓扑信息和策略信息存储在 iTracker 服务器中,并通过相关的接口发送给 P2P 应用层.P2P 应用程序根据该信息尽量从本地节点获取数据,以减少对骨干网带宽的消耗.Verizon 和 Telefonica 等运营商对 P4P 进行了测试,并取得了良好的测试结果.目前,P4P 的架构还在完善中,一些接口目前还没有进行定义,如 iTracker 和 IP 网络层设备的接口还没有定义,因此没有明确 iTracker 如何获取 IP 网络的拓扑信息以及 iTracker 中的信息如何随着 IP 网络的拓扑变化而自动更新的问题.P4P 需要对已经广泛使用的 P2P 系统进行修改以支持该协议.另外,运营商将其 IP 网络拓扑信息发布给第三方是否会产生安全隐患也需要探讨.

4.2 基于移动ad hoc网络的移动P2P跨层优化技术

目前,基于移动 ad hoc 网络的 P2P 跨层优化算法中主要包括两个思路:1) ad hoc 网络和 P2P 覆盖网共同维护同一个逻辑拓扑,以避免由两个拓扑结构引发的不匹配的问题;2) 在 ad hoc 网络和 P2P 覆盖网之间增加信息共享模块,使 P2P 覆盖网根据 ad hoc 网络层信息调整其拓扑结构,解决拓扑不匹配的问题.

德国的研究者在基于 DSR 路由算法的 ad hoc 网络环境下设计了 MPP 协议框架[35].该框架对网络层的协议进行了扩展,应用层不再维护 P2P 逻辑拓扑信息,而是直接利用网络层的拓扑信息实现资源定位.如图 13 所示,MPP 协议是应用层协议,使节点直接进行数据交换,在 P2P 网络中进行文件传输.EDSR 协议基于 DSR 协议,并对其进行了扩展,为应用层提供接口,使应用层利用网络层的逻辑拓扑信息和路由能力实现资源定位.MPCP (mobile peer control protocol)是 MPP 和 EDSR 之间的通信协议,通过该协议,P2P 应用(MPP)可以注册到 EDSR,并发起查询请求或处理由其他节点发来的查询请求.MPP 通过网络层协议(EDSR)将查询消息向 ad hoc 网络进行广播.收到查询请求的 EDSR 节点将查询请求通过 MPCP 协议发送 P2P 应用层.P2P 应用层查看本地是否有满足查询条件的数据,如果有相关数据,则由 P2P 应用层通过 EDSR 发起一个响应消息.MPP 极大地降低了查询消息所产生的额外负担,提高了查询效率[36].

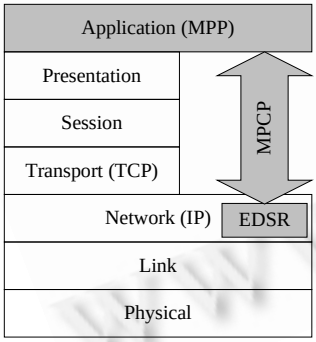


Fig.13 MPP architecture

图 13 MPP 架构

Purdue 大学的研究者认为 ad hoc 网络层协议的路由效率不高,因而提出将结构化的 P2P 路由协议(pastry)进行改进,作为网络层(ad hoc)路由协议 Dynamic P2P Source Routing Protocol(DPSR)[37].P2P 应用层通过 DPSR 协议进行资源定位,而不再单独维护 P2P 应用层逻辑拓扑结构.DPSR 协议在 Pastry 协议中增加 Dynamic Source Routing(DSR)协议的特征.与 Pastry 不同的是,其路由表中的目的地址不是采用 IP 地址,而是使用达到目的节点的路径,这使得路径上的节点不必进行路由寻址,而是根据路径指示的下一跳地址直接进行转发.该架构能够降低路由表的大小,并提高系统的可扩展性.但是,网络拓扑信息和路径信息的维护需要消耗一定的资源,尤其是当网络抖动幅度较高时,维护上述信息需要消耗的资源较大,甚至当网络拓扑结构的变化无法及时地体现到路径信息中时,将导致路径信息失效.

意大利的学者提出了在 ad hoc 网络层和 P2P 应用层之间增加一个数据共享模块来实现网络层和应用层之间的交互[29],如图 14 所示.网络状态模块(NeSt)维护 ad hoc 网络层和 P2P 应用层之间需要共享的信息.P2P 应用层能够通过网络状态模块来获取 ad hoc 网络层信息,并根据该信息对 P2P 逻辑拓扑进行优化.通过网络状态模块支持预定义事件(event),当 ad hoc 网络层拓扑发生改变时,网络状态模块可以通过预定义事件来通知 P2P 应用层,使 P2P 应用层作出相应的改变.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

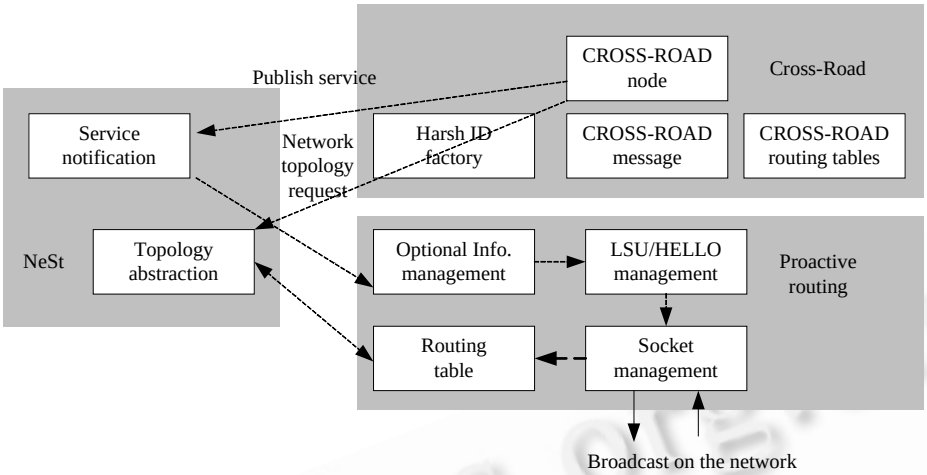


Fig.14 Cross-Road architecture

图 14 Cross-Road 架构

4.3 小 结

在基于移动网络接入的节点跨层优化方面,拓扑感知针对不同的路由算法(结构化、非结构化)进行改进,以提高系统的路由效率,减少查询消息在物理网络中的传输距离,降低查询响应时间,解决控制平面的问题.P4P 主要面向文件共享系统,它通过优先使本地节点之间进行数据交换,尽量减少远距离节点之间的资源共享来降低文件传输的距离,减轻对骨干网带宽的消耗,解决用户平面的问题.

在基于移动 ad hoc 网络的跨层优化技术方面,MPP 架构和 Cross-Road 架构保留了 ad hoc 层路由协议的主要功能并进行了扩展,具有较好的兼容性.在 Cross-Road 架构中,P2P Overlay 层和 ad hoc 层之间的信息共享机制相对于 MPP 架构更为复杂.同时,上述两种架构都是针对某一种 ad hoc 路由协议(DSR),不具有通用性.DPSR 协议采用 Pastry 作为网络 ad hoc 路由协议,与现有的 ad hoc 网络存在兼容性问题.

5 总结与展望

移动通信技术的发展培养了大批的移动用户,随着 3G/HSPA/LTE 等技术的大规模应用,移动数据业务未来将改变目前以语音业务为主的状况,基于移动互联网的各种业务将迅速开展.源于互联网的 P2P 技术,以其分布式、自组织、健壮性、低成本和可扩展性等特点得到广泛的应用.因此,基于移动互联网的 P2P 应用将成为未来 P2P 应用的发展趋势.

移动终端具有处理能力弱、电量有限、网络带宽和稳定性低等特点,将 P2P 技术应用于以移动终端为主的移动互联网中面临更大的挑战.移动终端可以通过移动网络接入 P2P 系统,也可以在 ad hoc 网络的基础上,在小范围内实现 P2P 业务.本文分别根据上述两种模式对基于移动互联网的 P2P 关键技术进行了分析和总结.

尽管面向移动互联网的 P2P 技术的研究得到了学术界的高度重视并取得了大量的研究成果,然而正如本文所阐述的那样,应用于移动互联网的 P2P 技术目前离实际应用还有一定的距离,仍然有很多问题值得继续深入研究,它们包括:1) 能够结合移动终端的两种 P2P 业务模式,同时具有良好的可扩展性的网络拓扑结构;2) 能够适应网络状态、具有根据网络特征进行动态调整的拓扑结构和资源定位算法;3) 能够支持多种 ad hoc 路由协议和 P2P 协议的通用跨层网络架构.上述问题各有侧重,同时也具有联系,需要统筹兼顾,进行综合分析.

References:

[1] Huang Y, Jin BH. A survey of overlay optimization techniques in unstructured P2P Systems. Mini-Micro Systems, 2008,2: 238−244 (in Chinese with English abstract).

[2] Wang CG, Li B. Peer-to-Peer overlay networks: A survey. Technical Report, Department of Computer Science, Hong Kong

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

University of Science and Technology, 2003.

[3] Hoyoung K, Jinwoo K, Yeonsoo L, Minhee C, Youngwan C. An empirical study of the use contexts and usability problems in mobile Internet. In: Proc. of the 35th Annual Hawaii Int'l Conf. on System Sciences (HICSS 2002), Vol.5. Washington: IEEE Computer Society, 2002. 1767−1776.

[4] Ding G, Bhargava B. Peer-to-Peer file-sharing over mobile ad hoc networks. In: Proc. of the 2nd IEEE Annual Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 104−108.

[5] http://baike.baidu.com/view/1453028.htm

[6] Ou ZH, Song MN, Zhan XS, Song JD. Key techniques for mobile peer-to-peer networks: A survey. Journal of Software, 2008, 19(1):126−140 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/126.htm

[7] Kato T, Ishikawa N, Sumino H, Hjelm J, Yu Y, Murakami S. A platform and applications for mobile peer-to-peer communications. 2003. http://www.research.att.com/rjana/Takeshi_Kato.pdf

[8] 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). Washington: IEEE Computer Society, 2006. 157−162.

[9] Traversat B, Arora A, Abdelaziz M, Duigou M, Haywood C, Hugly JC, Pouyoul E, Yeager B. Project JXTA 2.0 super-peer virtual network. 2003. http://research.sun.com/spotlight/misc/jxta.pdf

[10] Yuan M. Mobile P2P messaging, part 2: Develop mobile extensions to generic P2P networks. 2003. http://www.ibm.com/developerworks/java/library/wi-p2pmsg2/

[11] Kellerer W, Kunzmann G, Schollmeier R, Zöls S. Structured peer-to-peer systems for telecommunications and mobile environments. Int'l Journal of Electronics and Communications, 2006,60(1):25−29.

[12] Kellerer W, Despotovic Z, Michel M, Zoels S, Hofstaetter Q. Towards a mobile peer-to-peer service platform. In: Proc. of the 3rd IEEE SPMS Workshop in Conjunction with IEEE SAINT 2007. Washington: IEEE Computer Society, 2007. 15−19.

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

[14] Kortuem G, Schneider J, Preuitt D, Thompson TGC, Fickas S, Segall Z. When peer-to-peer comes face-to-face: Collaborative peer-to-peer computing in mobile ad-hoc networks. In: Graham RL, Shahmehri N, eds. Proc. of the Int'l Conf. on Peer- to-Peer Computing (P2P 2001). Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2001. 75−91.

[15] Andersen F, 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. Bonner Köllen Verlag, 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, Vol.2. Washington: IEEE Computer Society, 2003. 1035−1040.

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

[18] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, Karp R, Shenker S. A scalable content addressable network. In: Proc. of the 2001 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM, 2001. 161−172.

[19] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, distributed 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). Heidelberg, 2001. 329−350.

[20] Zhao BY, Huang L, Stribling J, Rhea SC, Joseph AD, Kubiatowicz JD. Tapestry: A resilient global-scale overlay for service deployment. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004,22(1):41−53.

[21] Rhea S, Geels D, Roscoe T, Kubiatowicz J. Handling churn in a DHT. In: Proc. of the 2004 USENIX Technical Conf. (USENIX). 2004. 127−140.

[22] Papadopouli M, Schulzrinne H. Effects of power conservation, wireless coverage and cooperation on data dissemination among mobile devices. In: Proc. of the ACM Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2001). New York: ACM, 2001. 117−127.

[23] Lindemann C, Waldhorst OP. A distributed search service for peer-to-peer file sharing in mobile applications. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Peer-to-Peer Computing. Washington: IEEE Computer Society, 2002. 73−80.

[24] Lindemann C, Waldhorst O. Consistency mechanisms for a distributed lookup service supporting mobile applications. In: Proc. of

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

the 3rd ACM Int'l Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access (MobiDE 2003). New York: ACM, 2003. 61−68.

[25] Lindemann C, Waldhorst P. Exploiting epidemic data dissemination for consistent lookup operations in mobile applications. Mobile Computing and Communications Review, 2004,8(2):44−56.

[26] Lau G, Jaseemuddin M, Ravindran G. RAON: A P2P network for MANET. In: Proc. of the 2nd IFIP Int'l Conf. on Wireless and Optical Communications Networks. 2005. 316−322.

[27] Chawathe Y, Ratnasamy S, Breslau L, Lanham N, Shenker S. Making Gnutella-like P2P systems scalable. In: Proc. of the 2003 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM, 2003. 407−418.

[28] 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. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 163−173.

[29] 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. Washington: IEEE Computer Society, 2005. 60−64.

[30] Castro M, Drushel P, Hu YC, Rowstron A. Exploiting network proximity in peer-to-peer networks. Technical Report, MSR-TR-2002-82, Microsoft Research, 2002.

[31] Qiu TQ, Chen GH, Ye M, Chan E, Zhao BY. Towards location-aware topology in both unstructured and structured P2P systems. In: Proc. of the 2007 Int'l Conf. on Parallel Processing. Washington: IEEE Computer Society, 2007. 30.

[32] Ratnasamy S, Handley M, Karp R, Shenker S. Topologically-Aware overlay construction and server selection. In: Proc. of the 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol.3. 2002. 1190−1199.

[33] Xie HY, Krishnamurthy A, Silberschatz A, Yang YR. P4P: Explicit communications for cooperative control between P2P and network providers. In: P4PWG Whitepaper. 2007.

[34] Xie HY, Krishnamurthy A, Yang YR, Silberschatz A. P4P: Proactive provider participation for P2P. In: Yale Computer Science YALE/DCS/TR1377. 2007.

[35] 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.

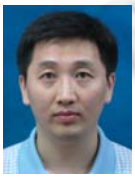
[36] Gruber I, Schollmeier R, Kellerer W. Performance evaluation of the mobile peer-to-peer service. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 363−371.

[37] Hu YC, Saumitra MD, Pucha H. Exploiting the synergy between peer-to-peer and mobile ad hoc networks In: Proc. of the 9th Conf. on Hot Topics in Operating Systems—Volume 9. Berkeley: USENIX Association, 2003. 7.

附中文参考文献:

[1] 黄宇,金蓓弘.非结构化 P2P 系统 Overlay 优化技术综述.小型微型计算机系统,2008,2:238−244.

[6] 欧中洪,宋美娜,战晓苏,宋俊德.移动对等网络关键技术研究综述.软件学报,2008,19(1):126−140. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/126.htm



李伟(1976－),男,吉林伊通人,博士生,主要研究领域为对等计算.

杨铸(1955－),男,教授级高级工程师,主要研究领域为高速光纤通信网络,对等计算.

徐正全(1962－),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为对等计算,多媒体通信.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn