

基于 MANET 的 P2P 网络跨层方法综述

曲大鹏^{1,2} 王兴伟¹ 黄 敏¹

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)¹ (辽宁大学信息学院 沈阳 110036)²

摘 要 MANET 和 P2P 网络都具有自组织的特性。然而,它们一直被分开独立研究。近年来,随着 P2P 系统在 Internet 上的成功和无线技术的快速发展,P2P 开始扩展到 MANET 网络上。但由于 MANET 网络受限的资源和多变的拓扑结构,直接将 P2P 系统部署在 MANET 网络上得到的性能较差。最近,提出一些跨层方法来提高性能。首先分析了 P2P 和 MANET 之间的相似性和不同点,然后比较了一些跨层提高性能的方法。最后,总结了好的方法应具有的特点以及未来的研究策略与发展趋势。

关键词 P2P, 移动自组网, 路由, 跨层

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Survey of the Cross-layer Approaches of P2P over MANET

QU Da-peng^{1,2} WANG Xing-wei¹ HUANG Min¹

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)¹

(School of Information, Liaoning University, Shenyang 110036, China)²

Abstract Mobile Ad-hoc networks (MANET) and peer-to-peer (P2P) systems share a common underlying paradigm: self-organization. However, the two fields were researched independently all the time. In recent years, with the success of P2P over Internet and rapid development of wireless technology, P2P systems began to be applied to MANET. Because of the limited resource and dynamic topology structure, the performance of applying P2P directly over MANET is poor. A lot of cross-layer approaches were proposed to improve the performance. In this paper, after analyzing the similarity and difference between P2P and MANET, some existing cross-layer approaches were compared in their characteristics and classifications. Finally, the important features that good approaches possess and the future research strategies and trends were summarized.

Keywords P2P, Mobile ad hoc network, Routing, Cross-layer

P2P 系统是指参与系统的所有节点都处于对等的地位,通过直接交换来共享资源和服务。MANET 是指由一组具有无线收发装置的移动节点组成的一个多跳的临时性的自治系统。P2P 和 MANET 的基础都是 P2P 模型。在此模型中,每个节点都具有相似的功能,彼此都能够发送和响应请求,它们由于都能同时担任服务器(server)和客户机(client),因此被称为“servent”。

近年来,随着 P2P 系统在 Internet 上取得的巨大成功和移动通信的快速发展,P2P 系统逐渐扩展到移动网络环境,特别是移动 Ad hoc 网络。基于自组织的共性使得两者天然地适合在一起运行,P2P MANET 已经成为一个研究热点^[1]。但移动 Ad hoc 网络中节点的移动性、资源受限和拓扑的动态多变,无法提供有线网络的支持,而且 P2P 网络没有考虑底层物理网络的情况,加之路由和维护的开销过大,使得 P2P 系统直接运行在 MANET 上性能显著下降,因此需要研究出

有效的方法以提高性能^[2]。

本文第 1 节简略分析了 MANET 和 P2P,指出它们之间的相同点和不同点以及使用跨层方法能提高 P2P-MANET 性能的原因;第 2 节具体陈述了各种跨层方法;第 3 节比较了这些跨层方法;最后总结全文,指出未来的发展方向。

1 P2P VS. MANET

1.1 MANET

MANET 网络中的每个节点综合了传统主机和路由器的功能,既能发现和维护到其它节点的路由,又能自由运动并构成任意的网络拓扑,它可以在没有或不便利用现有的网络基础设施的情况下提供一种通信支持环境,从而拓宽了移动通信网络的应用^[3]。MANET 突出了无中心、多跳、自组织、分布式思想。

图 1 所示是一个简单的移动自组织网络,黑色箭头表示

到稿日期:2009-03-31 返修日期:2009-06-21 本文受国家自然科学基金资助项目(60673159,70671020,60802023),国家高技术研究发展计划重点项目(2007AA041201),教育部科学技术研究重点项目(108040),高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20060145012,20070145017,20070145096),长江学者和创新团队发展计划资助。

曲大鹏(1981-),男,博士生,讲师,主要研究方向为移动对等网络,E-mail:dapengqu@gmail.com;王兴伟(1968-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为下一代网络、自组织网络等;黄敏(1968-),女,教授,博士生导师。

每个节点具有的不同方向和速度,虚线箭头表示每个节点的传输范围,灰色箭头表示节点之间的 Ad hoc 连接。

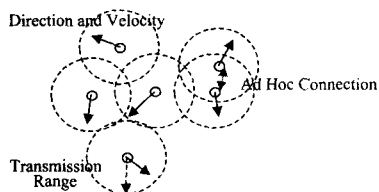


图1 移动自组织网络

路由协议是影响 MANET 性能的关键问题之一^[4]。目前为止,针对 MANET 已经开发了多种基于不同策略的路由协议,主要可以分为两类:主动型/路由表驱动(proactive/table driven)和被动型/按需(reactive/on demand)。主动型路由协议中的每个节点无论当前是否需要通信,都建立和维护若干个路由表,表中包含了该节点到网络中所有其它节点一致的、最新的路由信息。一方面要定期向网络广播拓扑信息,以维护一致的网络视图;另一方面当检测到网络拓扑结构或链路质量发生变化时,要发送更新消息,及时更新路由表,以维护及时、准确的路由信息。这样,当某节点需要发送数据分组时,可以立即获得到达目的节点的路由。各种主动型路由协议之间的区别主要在于拓扑更新消息在网络中的传播方式和存储的表的类型。

DSDV(Destination Sequenced Distance Vector)^[5]维护多个路由表,以提供到网络中每个可能目的节点的信息。表中包含到某个特定目的节点的最小跳数和下一跳信息。路由更新可分为两类:完整信息和增量信息。收到路由更新信息的节点据此更新自己的路由表,必要的话,广播自己的路由表。每个节点由于都维持关于整个网络的所有必需的信息,因此能快速建立起路由。

OLSR(Optimized Link State Routing)^[6]的关键在 MPR (MultiPoint Relay)节点。MPR 节点周期性地向网络广播控制信息,内含选举自己为 MPR 节点的节点信息,使得其它节点能与这些节点直接连接。只有 MPR 节点被用作路由节点,非 MPR 节点才不参与路由计算,也不转发控制信息。

反应型路由协议中的每个节点仅在需要时才创建到其它节点的路由,向整个网络广播路由请求,目的节点或知道到该目的节点路由的中间节点会响应应答,从而源节点拥有到该目的节点的路由。

DSR(Dynamic Source Routing)^[7]基于源路由的思想,包括两部分:路由发现和路由维护。当某移动节点想向某目的节点发送数据包时,它首先检查自己的路由缓存。如果缓存中有到目的节点的有效路由,则直接使用该路由。否则,向邻居节点广播路由请求(RREQ)。收到请求的节点先检查自己的路由缓存,如果没有所需的路由,则将自己的地址加入到 RREQ 中,然后转发。如果某节点从不同的中间节点收到多份相同的 RREQ,则只转发第一个,丢弃后面的。如果某节点有到目的节点的路由或者该节点即为目的节点,则发送路由响应(RREP)。RREP 中包含从源节点到目的节点的整个路由,并严格沿着该路由由反向传输。每个从源节点发往目的节点的数据包都包含所有中间节点的地址。传输过程中,当某节点不可达后,路由上的前一个节点发送路由错误包给源端,上游的每个节点都转发该路由错误包,删除该跳和所有依靠

该跳的路由。源节点也删除该跳,重新开始一次 RREQ。

AODV(Ad hoc On demand Distance Vector)^[8]与 DSR 的源路由不同,它的路由中的每一跳都自己维护下一跳信息。AODV 也使用 RREQ 和 RREP。当源节点需要向目的节点发送信息而它的路由缓存中又没有到该目的节点的路由时,源节点向邻居节点广播 RREQ。每个节点第一次收到该 RREQ 时,都先保存节点地址,再转发。如果收到多份,则丢弃后面的 RREQ。RREQ 在网络中传播,直至到达知道到目的节点路由的某个中间节点或目的节点。它们生成 RREP, RREP 沿着 RREQ 传来的方向反向传输回去。每个节点都在转发 RREP 前保存节点地址,在源节点收到 RREP 后,整个路由建立。源节点向目的节点发送数据包,而无须知道整个路由的情况。每个中间节点维护到下一跳的连接信息。与 DSR 相比,AODV 减少了数据包开销,但增加了每个节点的存储空间。

1.2 P2P

P2P 网络又叫对等网络,网络中的所有参与者以一种对称、双向的方式彼此交互^[9],如图 2 所示。P2P 网络结构可分为 3 类:集中式、分布式非结构化和分布式结构化。P2P 突出了自组织、分布式、可扩展性的思想。

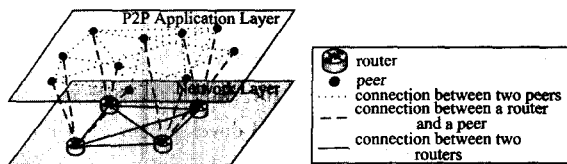


图2 P2P 网络

1.2.1 集中式系统

集中式系统使用目录服务器存储系统中所有文件的索引。用户加入系统时,该系统向目录服务器注册可供其它用户下载的文件的索引,用户检索时,向服务器提交查询,获得存储所需文件的主机的地址,然后用户连接到对应主机并下载。当用户退出系统时,共享的文件索引从服务器中删除。集中式系统以集中式的方式定位文件,以点到点的方式传输文件。优点是支持多样化的查询、响应迅速,缺点是存在单点故障问题,而且背离了 P2P 系统的本质。Napster^[10]是典型的集中式系统。

1.2.2 分布式非结构化系统

分布式非结构化系统既没有集中的目录服务器,对网络拓扑和文件位置也没有精确的控制。每个节点只维护自己存储的文件及其索引,采用的是完全分布式策略,可以将其看成是一组对等节点之间的自组织网络。Gnutella^[11]和 Freenet^[12]是典型的分布式非结构化系统。

Gnutella 查询文件时按照洪泛法扩散进行,接收到查询消息的节点,将其与自身存储的文件比较。如果符合,反向沿着查询来时的路径回应;否则,将查询消息向邻居节点扩散。为了控制搜索半径,每条消息都设置了生存周期。

FastTrack^[13]是部分分布式非结构化系统。它根据网络带宽等属性将节点分为两类:超级节点和普通节点。超级节点是系统中部分普通节点的目录服务器,维护这些普通节点上资源对象的元数据。FastTrack 系统形成一种层次式结构,第一层是超级节点组成的一个分布式非结构化网络,第二层是普通节点。FastTrack 的资源搜索是通过超级节点间的广

播来实现的。这种部分分布式非结构化拓扑是集中式拓扑和全分布式系统之间的折衷,可扩展性和性能较好,但对超级节点的依赖过大,容易失效。

分布式非结构化系统的优点是容错性好,适合动态系统;缺点是查询文件时网络的负载较大,速度较慢。

1.2.3 分布式结构化系统

分布式结构化系统对 P2P 网络拓扑和文件位置可以精确地加以控制。每个节点存储了特定的信息或对应的索引。当用户需要信息时,通过查询某些节点即可获得结果,避免了分布式非结构化系统的盲目查找,提高了搜索效率。DHT (Distributed Hash Table, 分布式哈希表) 将存储对象的关键字经过哈希运算,得到键值,对象按键值进行分布式存储。在 DHT 被提出后,分布式结构化系统才得到了飞速的发展。

Chord^[14]使用相容哈希^[15]为每个节点和数据对象分配 m 位的标识符。节点的标识符通过哈希 IP 地址、端口号、随机数等得到,数据对象的标识符可通过哈希数据对象的名称、内容等得到。每个数据对象 k 都保存在标识符大于等于 k 的第一个节点。每个节点除了其后继节点外,还维护一个 m 项的路由表,其中第 i 项指向到自己的距离至少为 2^{i-1} 的第一个节点。查找数据对象 k 时,节点将寻找在 k 之前且离 k 最近的节点 j 。如此递归下去,直到找到数据对象或遍历整个网络。当有节点加入系统时,首先初始化该节点的指针表,然后更新其它现有节点的指针表,最后从新节点的后继节点中把所有现在后继节点是新节点的数据对象传递到新节点。同样,当有节点退出系统时,则将后继节点是退出节点的数据对象加入到退出节点的后继节点中。

CAN(Content Addressable Network)^[16]基于虚拟的 d 维笛卡尔坐标空间实现其数据组织和查找功能。整个坐标空间动态地分配给系统中的所有节点,每个节点都拥有独立、互不相交的一块区域。CAN 中每个节点都有一个包括其邻接点的 IP 地址和虚拟坐标区域的路由表。每条查询消息都包括目的坐标。路由时节点将其消息转发给最接近目的节点的邻居节点。

Chord 和 CAN 的一个共同的缺陷,就是在构造覆盖网络时没有考虑与底层物理网络的匹配。逻辑路由间一次相邻转发就可能引起物理网络之间多次、大范围的路由。

Tapestry^[17]基于 Plaxton 技术^[18],但每个节点只需维护系统的部分视图。每个节点都维护一个多层的路由表,层数等于节点标识符的长度,第 i 层节点标识的后 $i-1$ 位与本节点标识的后 $i-1$ 位相同。如果系统中有多个节点标识满足路由表中某一项的条件,则选择延迟最小的节点。Tapestry 使用了冗余邻居和复制等技术来提高对节点动态性和容错性的支持。

Pastry^[19]也基于 Plaxton 技术,网络中的每个节点都有一个唯一的节点号 (nodeId),用于在节点空间中标识位置。节点号在节点加入系统时随机分配。每个 Pastry 节点都维护一个路由表、一个邻居节点集合和一个叶子节点集合。其中邻居节点集合存放在离当前节点最近的节点,用于维护路由的位置属性,叶子节点集合存放与当前节点的节点号数值上最接近的节点。当收到消息时,节点首先判断消息的关键字是否在叶子节点集合中。如果是,直接转发,否则将消息转发给节点号和关键字直接的共同前缀至少比当前节点长 1 位

的节点。如果对应表项为空,则转发给共同前缀一样长但数值上更接近的节点。整个路由过程逐步向目的节点前进。

1.3 P2P VS. MANET

P2P 和 MANET 具有许多相似之处:(1)都基于自组织。两种网络(除了违背 P2P 本意的集中式系统)都没有中央管理节点,只是依靠节点间的自发行为组建起网络。(2)两个网络的拓扑都是动态变化的,尽管原因不同。MANET 的拓扑变化是因为节点自身的移动性或者节点有限的能量被耗尽,而 P2P 的动态性是因为网络节点登录、登出状态的不确定,某种程度上,这比无线节点的移动性更难控制。(3)P2P 和 MANET 都基于自组织,所以都在某种程度上使用了广播技术,以便周期性地探测动态网络的情况。(4)除了物理直接相连或彼此在传播范围内的节点,两种网络中大部分节点之间的通信都是逐跳的间接通信。

尽管有这么多相同点,P2P 和 MANET 还是有许多不同点:(1)最显著的不同点是两者关注的层次不同:P2P 着重在应用层上建立和维护覆盖网络连接,而 MANET 更关注在网络层为无线节点之间提供一个逐跳的连接。(2)最本质的不同是两者的组网动机不同:P2P 是为网络用户之间直接共享文件而发明的,直接部署在 Internet 现有的基础设施上,通过建立连接以进行网络应用,属于应用驱动(application driven)型。而 MANET 最早是为军事发明的,在无法或没有网络基础设施的地方建立临时的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。(3)节点之间的连接。虽然大部分节点都是间接通信,但 MANET 的中间节点随时可能因为移动或资源耗尽而失去作用,需要重现选路,而 P2P 的中间节点,特别是属于网络基础设施的中间节点,如路由器等,从逻辑上来讲可看作是稳定连接。(4)广播策略。虽然都使用广播,但 MANET 的广播是物理广播,位于一个节点传播范围的其它节点都能收到消息,而 P2P 的广播是虚拟广播,由多次单播组成。

显然,将 P2P 与 MANET 结合最简单的方法是将 P2P 应用直接放置在 MANET 上。这虽然与 ISO/OSI 层次模型紧密一致,但由于运行在一起的两个系统之间缺少通信和合作,会导致性能较差。因为 P2P 只是从逻辑的角度设计覆盖网络拓扑,并未考虑底层的物理拓扑,覆盖网拓扑上的一跳可能对应物理拓扑的多跳,在有线网络这可能只造成延迟增加,性能下降而已,但在无线网络,随着延迟的增加,通信双方可能发生移动而失去连接,如图 3 所示。文献[20]在理论上比较了 P2P 系统在 MANET 上的 5 种放置方式(broadcast over broadcast, broadcast, DHT over broadcast, DHT over DHT, DHT)。分析显示,跨层方法能提供更好的性能。L. B. Oliveira等在文献[21]中考察了 Gnutella 分别运行在 3 种 MANET 路由协议(DSDV, DSR 和 AODV)上时的性能,结果发现 3 种路由协议相比,各有千秋,没有一种路由协议能在所有环境下都表现良好。他们还在文献[22]中模拟评价了非结构化协议(Gnutella)和结构化协议(Chord)运行在 MANET 上的性能。结果表明,非结构化协议具有更强的适应性,但耗费了更多的能量和带宽。结构化协议在网络尽量保持静态的环境下才能耗费较少的资源。这都说明我们应仔细考虑两种系统各自的特点,使用跨层方法,将两者结合起来,以取得最佳的整合效果。

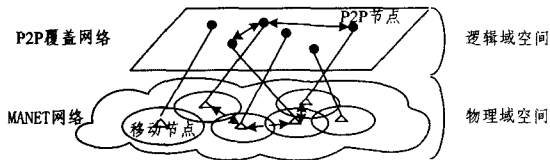


图3 MANET上的P2P覆盖图

2 跨层方法分析

最近,研究者们提出了多种跨层方法以提高P2P系统在MANET上的性能。下面对其核心机制和优缺点等进行分析。

ORION^[23]协议:ORION(Optimized Routing Independent Overlay Networks)试图建立一个按需的基于内容的覆盖网络,与底层网络拓扑相匹配。它分为查找和传输两个阶段。在查找阶段,ORION使用基于广播的洪泛搜索,查找请求被发送到所有的邻居节点。每个邻居节点检查自己的本地知识库是否命中。如果命中,则响应此搜索,否则转发给自己的邻居节点,并且有选择地将其它节点的反馈信息转发给源节点或缓存在本地文件路由表中。每个节点只维护两个路由表:响应路由表和文件路由表,且都在查找时使用LRU机制更新,以降低网络流量。在传输阶段,接收方即发起查找的节点对传输过程完全控制,文件被分成相同大小的若干块。一旦路由失效,中间节点使用备选路径恢复本地路由。同时,使用数据包排序机制,保证收到全部的数据包。ORION采用的某些数据结构和机制,AODV和DSR也有提供,所以应提高两者之间的协同。此外,还应引入拥塞控制机制,以保证公平性。

XL-Gnutella^[24]协议:Gnutella节点能通过跨层接口在网络层的路由agent上实现节点发现和链路选择,从而以较低的代价构造一个拓扑感知的overlay网络。路由agent将收到的来自其它节点的请求上报给Gnutella节点,或者将Gnutella节点的请求发布出去。每个节点的缓存也改为advertisement table,如图4所示。节点发布的advertisement内含路由控制包,所以节点可以对自己到发布advertisement的节点的物理距离有精确的计算(以跳为单位),从而建立起一个更接近于物理拓扑的overlay网络。

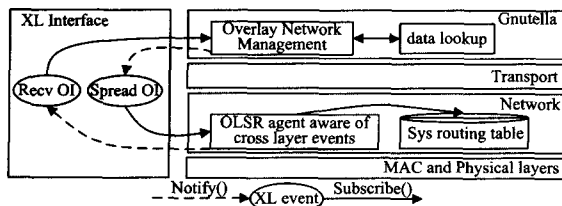


图4 XL-Gnutella的跨层结构

Gnutella/DSRV^[25,26]:基于路由和P2P度量来选择合适的节点建立连接。它引入层次结构,将节点分为超节点和叶节点两类。其中,每个超节点与若干个叶节点连接,同时连接几个其它的超节点。超节点能起类似代理的作用,只有在知道其连接的叶节点能回答时,才转发查询。每个leaf节点可同时与几个超节点连接,但从不过转发查询。节点在启动时,可选择自身类型,服务器只存储超节点的信息,也只发布超节点的信息。为了减少传输的信息量,周期性地在超节点之间发布UADV(Ultrapeer ADvertisement)信息来代替传统Gnu-

tella中的请求和响应信息。在建立P2P连接时,使用网络层的路由表,先选择物理距离小的超节点。如果路由度量相等,则基于节点的搭便车行为、连接度和剩余能量等方面进行综合考虑。

MPP^[27,28]协议:MPP(Mobile Peer-to-Peer)协议组共分为3个部分:应用层的MPP、层间通信协议MPCP(Mobile Peer Control Protocol)和网络层的EDSR(Enhanced DSR)。层次结构如图5所示。其中,网络层只负责路由,应用层只负责数据交换,数据和路由的分离可尽量重用已存在的协议(如TCP和HTTP)。应用层的MPP使用MPCP在EDSR注册以初始化查询请求和处理来自其它节点的查询请求。EDSR中加入了新的查询和响应类型,使得节点可通过包括IP地址在内的许多标准去寻找其它节点。MPP由于提供了基于内容的路由和基于位置的服务,因此能支持许多新服务。

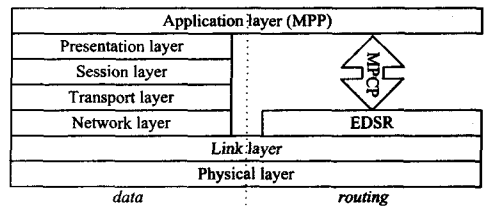


图5 MPP的层次结构

FastTrack/AODV^[29]:FastTrack/AODV认为通过通信信道将不同的两层连接在一起不是完全整合,因此提出一种真正完全整合的方法:在寻找带有所需数据的节点的同时即建立路由。与传统的先定位带有所需数据的节点,然后寻路的方法相比,该方法可以进一步降低开销。除了常用的路由表,每个节点还维护一个通过检测本地流量来更新的缓存路由表,以更好地掌握MANET中信息的存放情况。

Ekta^[30]协议:Ekta是第一个提出将DHT与Ad Hoc路由协议整合的方法。Ekta通过将移动节点的IP地址和节点ID一对一映射起来,从而将结构化的DHT协议和MANET的网络层路由协议整合在一起。P2P层使用Pastry,Pastry采用启发式算法,将消息尽力路由到更接近目标节点的中间节点(节点号和消息关键字的共同前缀长度比当前节点号的长1个数位或共同前缀长度相等但节点号数值更接近的节点)。同时,在每个节点的缓存中维持一系列源路由路径,以减少路由发现造成的开销。一旦收到数据包,不论是发给自己的还是偷听到的,都及时更新路由。但由于覆盖网络与网络层的拓扑结构不是完全对应的,Pastry考虑的覆盖网络不等于底层的物理拓扑。每个节点使用Ekta路由的过程与图6相似,只是AODV换成了DSR。

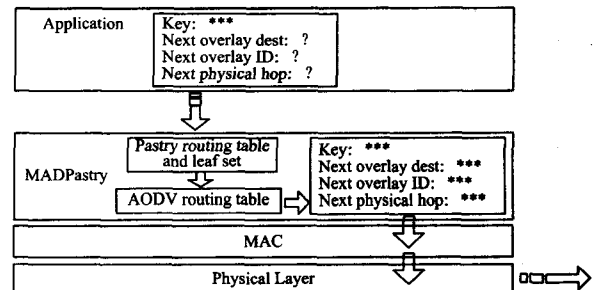


图6 MADPastry节点的路由过程

DPSR^[31]协议:DPSR(Dynamic P2P Source Routing)在

Ekta 的基础上加入路由重用,使用局部通信将来自多个彼此邻近的源节点的数据包发送给一个邻近的簇首节点,簇首节点再将它们转发给共同的远方目的节点,从而降低开销。

MADPastry^[32] 协议: MADPastry (Mobile AD hoc Pastry) 考虑了物理局部性,将 Pastry 的 DHT 功能与 AODV 路由协议整合,提供了有效的间接路由。它采用了 Random Landmarking (RLM)^[33] 的思想,创建物理簇,簇内的节点共享相同的 overlay ID 前缀。这样,物理上邻近的节点逻辑上也是邻近的。RLM 中临时的 landmark node 相当于传统的簇首节点,它是 ID 与 landmark key 最接近的节点。所以,确定的是 landmark key,而非临时的 landmark node。一旦节点失效, ID 次近的节点自动顶上,使其更适合动态网络。临时的 landmark node 周期性地在其簇内广播,以保证内部其它节点及时更新自己的 overlay ID。同时,为了降低开销, MADPastry 减小了其维护的 Pastry 路由表,不再指向每个节点,只保证指向每个聚簇,对于叶子节点集合也只维护其直接左、右 overlay 邻居。虽然降低了精度,但其开销低和考虑节点位置的特性使得 MADPastry 能很好地适应高度查找。MADPastry 路由时,首先查看 Pastry 的路由表和叶子节点集,找到下一逻辑跳节点,然后查看 AODV 路由表,找到到下一逻辑跳节点的多跳物理路径。到达下一 overlay 跳节点,再重复此过程,直至到达最终目的节点。

CrossROAD^[34]: CrossROAD (Cross-layer Ring Overlay for AD hoc networks) 使用跨层结构来减少 Pastry 在 MANET 上的通信开销,在应用层和网络层之间维护一个外部的数据共享模块 NeSt。NeSt 存储了网络中所有物理节点的拓扑情况和节点提供的服务,使得 Pastry 能够了解整个网络底层的拓扑结构,并据此进行性能优化。位于网络层的路由协议 OLSR 周期性地将服务信息作为路由包的可选域发往整个网络。CrossROAD 的体系结构和跨层交互如图 7 所示。文献^[35]在 MobileMAN 工程中验证了 CrossROAD 的性能。

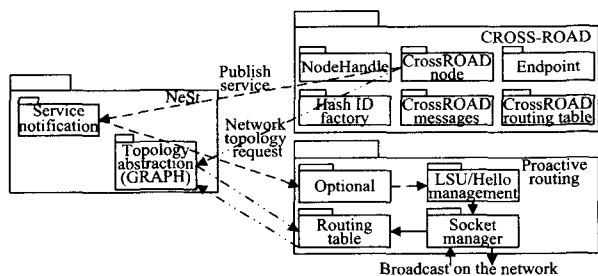


图 7 CrossROAD 软件结构和跨层交互

MA-Chord^[36]: MA-Chord 将 AODV 和 Chord 在网络层结合起来,方法和结构与 MADPastry 类似。MA-Chord 也使用 RLM 将网络节点组织成聚簇,它维护的 3 个路由表分别为用于物理路由的 AODV 路由表、用于间接路由的 Chord 路由表和用于维护左右叶子节点的 MA-Chord 路由表。路由时,节点首先查找 Chord 路由表,寻找下一逻辑跳节点。然后不断查找 AODV 路由表,寻找到 overlay 节点的物理路径上的下一跳节点。要了解其它节点的 ID,可以通过哈希该节点的地址或者向该节点的地址服务器发送请求。

VRR^[37]: 与其它跨层方法尽力消除移动网络的逻辑 overlay 和物理拓扑之间的差别不同, VRR (Virtual Ring Routing) 对 MANET 中的每个节点随机分配一个 ID,按照 ID 顺

序将所有节点在逻辑上组织成一个虚拟环。每个节点在虚拟环上维护 $r/2$ 个顺时针邻居和 $r/2$ 个逆时针邻居(虚拟邻居集 vset),此外还维护其物理邻居集 pset。Virtual Ring 上的逻辑连接通过类似距离向量的方法来维护。每个节点保存到其 vset 中每个邻居的下一跳节点,具体路由时沿着这些下一跳节点逐跳路由到虚拟邻居。为保证路由,每个节点的路由表中还保存其它节点经过它的路由路径。VRR 的特点在于它是一个网络层路由协议,自己建立和维护路由路径。因为它的建立和维护不需要泛洪广播,也不需要额外的机制来提供节点 ID 和其地址间的转换,其性能甚至优于传统的 Ad hoc 路由。

3 性能评价

下面以列表的形式对上述 11 种跨层方法进行比较。表 1 从采用的 P2P 协议、MANET 路由协议和物理邻近性等进行分类比较,表 2 从主要设计目标、采用的跨层方法和实现工具进行了比较。

表 1 跨层方法的分类比较

	P2P 覆盖网协议	P2P 协议类型	路由协议	路由协议类型	物理邻近	性能比较
ORION	Gnutella	unstructured	AODV	reactive	×	Layered Gnutella/DSR
XL-Gnutella	Gnutella	unstructured	OLSR	proactive	✓	Layered Gnutella/OLSR
Gnutella/DSDV	Gnutella-like	unstructured	DSDV	proactive	✓	Gnutella
MPP	Gnutella-like	unstructured	EDSR	reactive	×	ORION
FastTrack/AODV	FastTrack	unstructured	AODV	reactive	✓	Layered FastTrack/AODV (with/Without supernode)
Ekta	Pastry	DHT-based	DSR	reactive	×	Layered Pastry/DSR
DPSR	Pastry	DHT-based	DSR	reactive	✓	DSR
MADPastry	Pastry	DHT-based	AODV	reactive	✓	Pastry/AODV (without RLM)
CrossROAD	Pastry	DHT-based	OLSR	proactive	✓	-
MA-Chord	Chord	DHT-based	AODV	reactive	✓	AODV
VRR	Virtual Ring	DHT-based	-	proactive	×	AODV/DSR/DSDV

表 2 跨层方法的特点比较

	主要设计目标	跨层方法	实现
ORION	To construct and maintain an application-layer overlay network that enables routing of all types of messages required to operate a P2P file sharing system	Combine Gnutella with AODV	NS2
XL-Gnutella	To decrease the network traffic and improve the quality of the resulting overlay and features like self-organization	a vertical stack	NS2
Gnutella/DSDV	to improve P2P performance using cross-layer design and the goodness of a node as a peer	Integrate Gnutella with DSDV at the network layer	NS2
MPP	To decrease the signaling overhead as far as possible and to match the virtual P2P topology on the physical topology of the MANET	a communication channel; MPCP	NS2

FastTrack/ AODV	To develop a common query and response framework on which both ad hoc network routing and P2P file sharing can be built	Integrate FastTrack and AODV in the most complete way	NS2
Ekta	To efficiently implement DHTs in MANETs	Integrate Pastry with DSR at the network layer	NS2
DPSR	To reduce the routing overhead	Integrate Pastry with DSR at the network layer	NS2
MADPastry	To provide an efficient indirect routing primitive in MANETs	Integrate Pastry with AODV at the network layer	NS2
CrossROAD	To reduce the communication overhead introduced by Pastry and maintain all the basic principles of structured overlay networks	External data sharing module; NeSt (Network Status)	Mobile-MAN
MA-Chord	To provide an efficient primitive for key-based routing in MANETs	Combine AODV and Chord at the network layer	OPNET
VRR	To provide both traditional point-to-point network routing and DHT routing to the node responsible for a hash table key	Push DHT down directly on an underlying network	NS2 & testbed

从上面 11 种跨层方法中可以看出,对于 P2P 协议,有 5 种方法使用了非结构化协议,有 6 种方法使用了结构化协议;对于 MANET 路由协议,有 4 种方法使用了主动型路由协议,有 7 种方法使用了反应型路由协议。

(1) 从 MANET 路由协议的角度看,只有 4 种方法使用了主动型路由协议,其中 2 种使用 OLSR,1 种用 DSDV,VRR 使用一种新型的主动路由协议。在移动的网络环境下,由于需要定期维护网络拓扑结构,主动型路由协议比反应型路由协议产生更多的带宽和计算开销,性能较差^[38]。但这里 CrossROAD 共享的 NeSt 中存储了物理节点的拓扑情况。XL-Gnutella 中每个节点都要根据收到的其它节点发布的 Advertisement 精确计算自己到发布节点的物理距离,Gnutella/DSDV 在超节点之间发布 UADV 信息,VRR 维持虚拟邻居以保证路由,四者都是为了能够保证周期性地及时更新信息,才使用主动型路由协议。

(2) 从 P2P 的协议角度看,使用结构化和非结构化的方法各占一半。两者各有优势,非结构化协议容错好,但查找速度慢。结构化协议采用的 DHT 可以向上层隐藏底层网络的某些问题,简化应用层的设计,但会带来维护开销的问题。因此,应更多地从 MANET 的环境和所提供的应用来看,在低移动性下,维护 DHT 的开销有限,而且能带来显著的性能提高,值得维护 DHT。而在高移动性或节点数目过少的情况下,维护 DHT 可能得不偿失,非结构化协议性能更好。

(3) 这些跨层方法大致可以分为两类:一类是将 P2P 协议下压到网络层,一类是通过层间共享模块或直接通信等方法交互。其中 MADPastry,DPSR 等属于前者,而 CrossROAD,XL-Gnutella 等属于后者。前者将基于内容的索引和路由整合在一起,主要关注如何克服覆盖网络和物理拓扑之间的差别,而后者通过直接通信来保证上层对底层物理拓扑的掌握。上述方法都证明跨层方法既能提高性能,又能降低开销。进而引入一个新问题:如何使用跨层方法?是将不同

层直接整合在一起,还是维护层次结构基本不变,而创建新接口可使层间直接通信或共享数据库。实际上,分层体系结构早已受到质疑,相关的研究也有很多,但仍有一些基本问题(如各种跨层方法如何共存等)尚未解决。MANET 研究团体既承认使用跨层设计所带来的好处,也承认严格层次结构的简便^[39]。

(4) 前面讨论过物理邻近性对 P2P-MANET 系统的重要性。从上面的分析可看出,这一点已经受到了广泛重视,大多数方法在设计时都考虑了物理邻近性。具体实现途径可分成两种:XL-Gnutella,Gnutella/DSDV 和 CrossROAD 是通过共享数据库或主动发布节点信息来使得每个节点都能掌握物理网络的整体拓扑情况;MADPastry,MA-Chord 和 FastTrack/AODV 是使用 Random Landmark 机制,使得物理邻近的节点逻辑上也邻近。

(5) 系统实现。除了 CrossROAD 和使用 OPNET 的 MA-Chord,其它 9 种方法都使用 NS2^[40] 模拟实现。模拟实验的参数设置一般都遵循文献^[41] 的设定。但 NS2 毕竟只是模拟实现,还应在具体环境中实现。这一点也得到了研究者的重视。CrossROAD 和 VRR 都已先后在具体工程中实现。

结束语 由于 P2P MANET 资源受限且与应用相关,好的跨层方法应该具有以下特点:在构建覆盖网拓扑的时候,考虑底层物理节点的邻近性,尽量选择物理邻近节点而非较远节点;尽量利用 P2P 和 MANET 各自已有的研究成果,如 MANET 中的路由协议和 P2P 中的资源发现方法;考虑 P2P 和 MANET 之间的协同性,如位于应用层的 P2P 资源发现和位于网络层的 Ad hoc 路由发现,两者有很大的重复性,可通过跨层的方法将两者结合起来。

本文综述和分析的跨层方法各有特点,但都存在考虑不够全面的问题。通过对当前的各种跨层方法进行分析与总结,我们认为在今后的研究中有如下几个方面值得关注。

虽然较之 Internet,P2P 应用在 MANET 上会造成性能的下降,但由于 MANET 自身的移动性和节点受限等特点,也使得 P2P 应用在某种程度上更适合运行在 MANET 上。相对静态网络,分布式的 P2P 更适合动态网络。当节点移动时,尽管会失去一些固有的连接,但同时也建立了一些新的连接。随着移动性增强,节点能与更多的邻居节点通信,显然更适合数据分发的应用。P2P 在 Internet 上出现的与用户行为相关的某些问题,如搭便车行为,在 MANET 上很容易解决。

尽量降低开销以节约能量和保持通信量负载均衡。数据通信是开销的主要因素。节点要减少数据发送量,需要清楚掌握底层物理拓扑情况。可以充分利用收到的信息,无论该信息是发给自己的还是偷听到的。例如,为避免路由发现时的广播,可尽量找缓存中有到其有效路由的节点作为下一跳节点。而且应尽量让各个节点分担数据传输,平衡节点之间的负载,而非依赖单独某些节点,延长整个网络的生存时间。例如 Gia^[42] 中通过探求节点的相异性,将更多的责任分配给能力强的节点,在 MANET 环境下会造成这些节点过早失效。

跨层方法能够有效利用 P2P 和 MANET 之间的协同性,提高覆盖网和底层物理拓扑之间的一致性,减少信息冗余,是提高 P2P over MANET 的重要方法。但针对前面讨论的两

种跨层方法,即直接整合不同层和保持层结构不变、层间直接通信或共享数据库,两者各有其优劣性,目前还没有一个统一的论断,所以在可预见的一段时间内,两种跨层方法还将共存。

加入 QoS(Quality of Service)机制和考虑安全、隐私等问题。MANET 的应用环境要求 QoS 机制的保障,而且研究表明跨层机制能提供更好的保障^[43]。除了文件共享,对等网络还可应用在协同工作和分布计算等其它方面,而这些应用都需要 QoS 机制的支持^[44]。QoS 机制也有助于解决对等网络中的搭便车等问题。另外,P2P 网络本质上是不可信网络,因此对用户的恶意行为表现得较为脆弱,安全与隐私问题不容忽视。解决时不仅要考虑 P2P 网络的固有属性,还要考虑 MANET 网络的自身特性。目前,研究主要集中在信任管理、攻击检测、访问控制和匿名通信等方面^[45]。

最后,本文分析的跨层方法绝大多数使用 NS2 做模拟实验。事实上,NS2 过于关注底层而忽略上层,不适合模拟 P2P 网络。目前有多种用于 P2P 研究的模拟器,但它们都存在一定缺陷,没有一款模拟工具能被研究人员广泛接受^[46],而 NS2 已有自己的固定用户群,特别是其很适合模拟 MANET 网络^[47],这使得 NS2 成为目前研究 P2P MANET 的主要工具。

参考文献

- [1] Gerla M. From battlefields to urban grids: new research challenges in ad hoc wireless networks[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2005; 77-93
- [2] Gerla M, Lindemann C, Rowstron A. P2P MANETs-new research issues [C]//*Perspectives Workshop: Peer-to-Peer Mobile Ad Hoc Networks - New Research Issues*. 2005
- [3] IETF. Mobile ad hoc networks charter[EB/OL]. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [4] Royer E M, Toh C K. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 17(8): 46-55
- [5] Perkins C E, Bhagwat P. Highly dynamic destination sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers[J]. *ACM Computer Communication Review*, 1994, 24(4): 234-244
- [6] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR)[EB/OL]. IETF RFC 3626. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt> 2003, 10
- [7] Johnson D, Maltz D, Hu Y C. The dynamic source routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4 [EB/OL]. IETF RFC 4728. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>. 2007, 2
- [8] Perkins C, Royer E B, Das S. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing [EB/OL]. IETF RFC 3561. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>. 2003
- [9] 陈贵海,李振华. 对等网络:结构、应用与设计[M]. 北京:清华大学出版社,2007
- [10] The Napster Protocol [EB/OL]. <http://opennap.sourceforge.net/napster.txt>
- [11] Ripeanu M. Peer-to-Peer architecture case study: gnutella network [C]//*Proc. of the 1st Int'l Conf. on P2P Computing*. 2001; 90-100
- [12] Clarke I, Sandberg O, Wiley B, et al. Freenet: a distributed anonymous information storage and retrieval system [C]//*Proc. of Int'l Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability*. LNCS 2009. Springer, 2000; 46-66
- [13] KaZaA [EB/OL]. <http://www.kazaa.com>
- [14] Stoica I, Morris R, Nowell D L, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for Internet applications [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(1): 17-32
- [15] Karger D, Lehman E, Leighton F, et al. Consistent hashing and random tree: distributed caching protocols for relieving hot spots on the world wide web [C]//*Proc. of the 29th Annual ACM Symp. on Theory of Computing*. 1997; 654-663
- [16] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A scalable content-addressable network [C]//*Proc. of the 2001 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (ACM SIGCOMM 2001)*. 2001; 161-172
- [17] Zhao B, Kubiatowicz J, Joseph A. Tapestry: an infrastructure for fault-tolerant wide-area location and routing [R]. CSD-01-1141. Berkeley, USA: University of California, 2001; 106-115
- [18] Plaxton C G, Rajaraman R, Richa A W. Accessing nearby copies of replicated objects in a distributed environment [C]//*Proc. of the 9th Annual ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures*. 1997; 311-320
- [19] Powstron A, Druschel P. Pastry: scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems [C]//*Proc. of the IFIP/ACM Int'l Conf. on Distributed Systems Platforms (Middleware)*. 2001; 329-350
- [20] Gang D, Bharqava B. Peer-to-peer file sharing over mobile ad hoc networks [C]//*Proc. of the 2nd IEEE Annual Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW 2004)*. 2004; 104-108
- [21] Oliveira L B, Siqueira I G, Loureiro A A F. On the performance of ad hoc routing protocols under a peer-to-peer application [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2005, 65 (11): 1337-1347
- [22] Oliveira L B, Siqueira I G, Macedo D F, et al. Evaluation of peer-to-peer network content discovery techniques over mobile ad hoc networks [C]//*Proc. of 6th IEEE Int'l Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. 2005; 51-56
- [23] Klemm A, Lindemann C, Waldhorst O P. A special-purpose peer-to-peer file sharing system for mobile ad hoc networks [C]//*Proc. of the IEEE Conf. on 58th Vehicular Technology (VTC 2003)*. 2003; 2758-2763
- [24] Conti M, Gregori E, Turi G. A cross-layer optimization of gnutella for mobile ad hoc networks [C]//*Proc. of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobilHoc 2005)*. 2005; 343-354
- [25] Choi H, Woo M. A power-aware peer-to-peer system for ad-hoc networks [C]//*Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*. LNCS 4325. Springer, 2006; 861-872
- [26] Park H, Kim W, Woo M. A gnutella-based P2P system using cross-layer design for MANET [J]. *International Journal of Electronics, Circuits and Systems*, 2007, 1(3): 139-144
- [27] Schollmeier R, Gruber I, Niethammer F. Protocol for peer-to-peer networking in mobile environments [C]//*Proc. of the 12th Int'l Conf. on Computer Communications and Networks (ICCCN 2003)*. 2003; 121-127

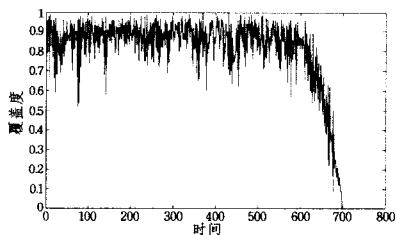


图7 非分簇算法(S2B03 规则)系统覆盖度

结束语 通过建立无线传感器网络的元胞自动机模型,对拓扑控制过程的本质特征进行了刻画。研究证明,与非分簇的拓扑控制方式相比,以 LEACH 及其改进协议的传统拓扑控制方法的主要优势在于放宽对拓扑连通性和覆盖程度的限制,从而在原理上可能获得更高的节能增益。通过具体的机制设计,实现了这种非分簇拓扑控制方法,进而证明了该设想的可行性。在具体应用中,本方法作为对现有分簇方法的补充,更适合在对覆盖性能要求不高,而对生存时间或布置成本要求较高的场合,对大规模的生态环境监测系统、森林防火、城市信息采集相关的无线传感器网络建设有重要意义。

参考文献

[1] Schurgers C, Tsiatsis V, Ganeriwal S, et al. Topology management for sensor networks; Exploiting latency and density[C]//

Proc 3rd ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking & Computing, Lausanne, Switzerland. June 2002; 135-145

[2] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670

[3] Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing[C]// Proc 7th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCOM). Rome, Italy, July 2001; 70-84

[4] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management[R]. DCS-TR-441. Rutgers University, May 2001

[5] 张文铸, 袁坚, 俞哲, 等. 基于元胞自动机的无线传感网络整体行为研究[J]. 物理学报, 2008(11)

[6] Wolfram S. Statistical-mechanics of cellular automata[J]. Reviews of modern physics, 1983, 55(3): 601-644

[7] Packard, et al. Two-dimensional cellular automata[J]. Journal of statistical physics, 1985, 38(5/6): 901-946

[8] Kubisch M, et al. Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks[C]// IEEE WCNC 2003. New Orleans, Louisiana, March 2003

[9] <http://cesl.ee.tsinghua.edu.cn/flows/home.html>

(上接第 37 页)

[28] Gruber I, Schollmeier R, Kellerer W. Performance evaluation of the mobile peer-to-peer service[C]// Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid (CCGRID 2004). 2004; 363-371

[29] Tang B, Zhou Z H, Kashyap A, et al. An integrated approach for P2P file sharing on multi-hop wireless networks[C]// Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WIMOB 2005). 2005; 3: 268-274

[30] Pucha H, Das S M, Hu Y C. Ekta: an efficient DHT substrate for distributed applications in mobile ad hoc networks[C]// Proc. of the 6th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Application (WMCSA 2004). 2004; 163-173

[31] Pucha H, Das S M, Hu Y C. Imposed route reuse in ad hoc network routing protocols using structured peer-to-peer overlay routing[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2006, 17(12): 1452-1467

[32] Zahn T, Schiller J H. Designing structured peer-to-peer overlays as a platform for distributed network applications in mobile ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(3): 643-654

[33] Winter R, Zahn T, Schiller J. Random landmarking in mobile, topology-aware peer-to-peer networks[C]// Proc. of the 10th International Workshop on Future Trends in Distributed Computing Systems (FTDCS 2004). 2004; 319-324

[34] Delmastro F. From pastry to CrossROAD: CROSS-layer ring overlay for ad hoc networks[C]// Proc. of the 3rd IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications Workshop (PerCom 2005). 2005; 60-64

[35] Borgia E, Conti M, Delmastro F. MobileMAN: Design, Integration, and Experimentation of cross-layer mobile multihop ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(7): 2-7

[36] Meng Q, Ji H. MA-Chord: A new approach for mobile ad hoc network with DHT based unicast scheme[C]// Proc. of the

Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (Wicom 2007). 2007; 1533-1536

[37] Caesar M, Castro M, Nightingale E B, et al. Virtual ring routing: network routing inspired by DHTs[C]// Proc. of the 2006 Conf. on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2006). 2006; 351-362

[38] Lee S J, Gerla M, Toh C K. A simulation study of table-driven and on-demand routing protocols for mobile ad hoc networks[J]. IEEE Network, 1999, 13(4): 48-54

[39] Conti M, Maselli G, Turi G, et al. Cross layering in mobile ad hoc network design[J]. IEEE Computer, 2004, 37(2): 48-51

[40] The VINT Project. The VINT Network Simulator version 2 [EB/OL]. <http://mash.cs.berkeley.edu/ns>

[41] Broch J, Maltz D A, Johnson D B, et al. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols[C]// Proc. of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom'98). 1998; 85-97

[42] Yatin C, Sylvia R, Lee B, et al. Making gnutella-like p2p systems scalable[C]// Proc. of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM 2003). 2003; 407-418

[43] Mohapatra P, Li J, Gui C. QoS in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Wireless Communications Magazine, 2003; 1-16

[44] 黄宇, 金蓓弘, 万淑超. P2P 系统服务质量研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(5): 45-48

[45] 欧中洪, 宋美娜, 战晓苏, 等. 移动对等网络关键技术[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 404-418

[46] Naicken S, Livingston B, Basu A, et al. The state of peer-to-peer simulators and simulations[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2007, 37(2): 95-98

[47] Kurkowski S, Camp T, Colagrosso M. Manet simulation studies: the incredibles[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2005, 9(4): 50-61