软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2013,24(1):139−152 [doi: 10.3724/SP.J.1001.2013.04332]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

移动对等网络覆盖网*

张国印[1], 李 军[1,2]

[1](哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

[2](黑龙江省公安厅 科技信息化处,黑龙江 哈尔滨 150008)

通讯作者: 张国印, E-mail: zhangguoyin@hrbeu.edu.cn, http://www.hrbeu.edu.cn

摘 要: 在移动对等网络的研究工作中,覆盖网络的构造是一个十分关键的核心问题.覆盖网络体系结构决定了移动对等网络的健壮性、安全性和性能.首先提出移动对等覆盖网络的概念,给出了其定义、构建覆盖网的重要意义和覆盖网的分类.然后阐述了 3 类不同的覆盖网,即分布式非结构化网络、分布式结构化网络和半分布式(混合式)网络,其中特别论述了这些覆盖网在移动自组网、车辆自组网以及无线 Mesh 网络等方面的应用,并进行了分析和比较.最后,对整个移动对等覆盖网络研究工作进行了总结,并对下一步研究方向进行了展望.

关键词: 移动对等网络;覆盖网;移动自组网;车辆自组网;无线 Mesh 网络;博弈论;跨层设计

中图法分类号: TP393 **文献标识码**: A

中文引用格式: 张国印,李军.移动对等网络覆盖网.软件学报,2013,24(1):139−152. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4332.htm

英文引用格式: Zhang GY, Li J. Overlays in mobile P2P networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013,24(1):139−152 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4332.htm

Overlays in Mobile P2P Networks

ZHANG Guo-Yin[1], LI Jun[1,2]

[1](College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

[2](Science and Information Technology Division, Provincial Public Security Department, Harbin 150008, China)

Corresponding author: ZHANG Guo-Yin, E-mail: zhangguoyin@hrbeu.edu.cn, http://www.hrbeu.edu.cn

Abstract: The construction of overlays is a crucial problem in the research of mobile peer-to-peer networks. The architecture of overlays determines the robustness, security and performance of MP2P networks. The paper first introduces the concept of mobile P2P overlays, including the definition, significance of the construction of overlays and the classification of them. Next, three kinds of overlays, distributed unstructured, distributed structured and semi distributed (hybrid) network, are described. The application of overlays in MANET, VANET and WMN is especially introduced. Furthermore, the aforementioned overlays are analyzed and compared. Finally, the paper concludes and presents the future research directions.

Key words: mobile peer-to-peer network; overlay; mobile ad hoc network; vehicular ad hoc network; wireless mesh network; game theory; cross-layer design

随着移动对等网络研究的逐步深入,研究领域和应用范围变得越来越广.研究领域已经由基于移动自组网 MANET(mobile ad hoc network)以及蜂窝移动网络等的移动 P2P 网络扩展到基于车辆自组网 VANET(vehicular ad hoc network)、无线 Mesh 网络 WMN(wireless mesh network)等,应用范围由文件共享等传统应用扩大到流媒体、数据分发、网络管理等应用.由于目前还缺乏对移动对等网络统一的定义、公认的抽象模型和通用的检验标准,移动对等网络的研究还处在一个不断探索的阶段.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61073042)

收稿时间: 2011-11-04; 定稿时间: 2012-10-24; jos 在线出版时间: 2012-11-23

CNKI 网络优先出版: 2012-11-23 11:59, http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20121123.1159.001.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

在移动对等网络的诸多问题中,覆盖网的构造是一个关键性问题.覆盖网的结构直接决定了移动 P2P 系统的可扩展性、鲁棒性、安全性和性能.虽然已有一些研究工作明确提出了基于不同物理网络的覆盖网设计,但大多数文献都对此问题重视不够.有很多文献直接提出了移动对等网络的路由协议、资源发现算法、负载均衡算法以及合作缓存算法等,却没有明确地说明所对应的覆盖网构造算法或者仅一笔带过.对于移动 P2P 网络来说,如何构造适合的覆盖网是首要问题,只有解决好这个问题,才能在此基础上进行其他问题的研究.

本文对近年来发表的有关移动对等网络覆盖网文献进行了分析和总结,首先概述移动对等网络覆盖网的概念和分类,然后详细论述了几种不同覆盖网的研究现状,接下来分析、比较了各种不同的覆盖网构造算法,最后对以上论述进行了总结,提出了未来的发展方向.

1 移动对等网络覆盖网的概念和分类

在传统 P2P 网络中,覆盖网一般来说都是构造在应用层上的,可以看作是应用层网络.但对于移动对等网络,有定义称其为叠加在网络层之上的会话层覆盖网络[1].由此可见,移动对等网络覆盖网是可以位于会话层的.近年来,主要针对移动自组网提出的跨层设计方法中有很多将移动 P2P 网络覆盖网直接构造在网络层上.本文根据近期研究成果对于移动对等网络覆盖网给出以下定义:移动对等网络覆盖网是指构造在移动物理网络之上的一个逻辑网络,位于网络层以上(含网络层),通过屏蔽底层网络的设备标识和编址、路由协议、拓扑结构等来构造相对稳定的拓扑结构和提供路由、负载均衡、资源查询等服务.图 1 表明了移动对等覆盖网在 ISO/OSI 网络模型中可能存在的位置.

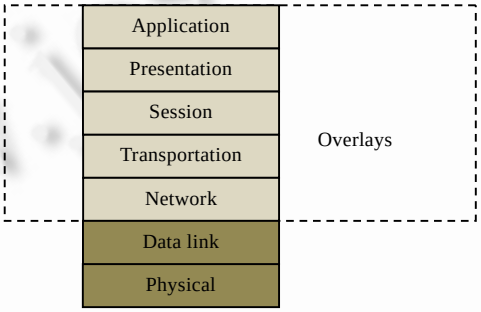

Fig.1 Description of possible location of overlays in ISO/OSI network model

图 1 覆盖网在 ISO/OSI 网络模型中的可能位置示意图

移动对等网络和传统对等网络之间的本质区别在于:一是网络节点的移动性导致物理网络拓扑变化频繁;二是网络节点间链接的速率不稳定性和易失效性;三是网络节点自身的资源和连接能力受限.针对以上几点,构建移动对等网络覆盖网的意义有:

(1) 屏蔽不同的物理设备标识和物理地址、物理网络的拓扑结构和节点的移动性,提供统一的对等节点访问和相对稳定的网络拓扑结构;

(2) 利用对等节点间的合作和协同服务,提供有效的负载均衡,避免某些节点资源消耗过快,延长整个移动对等网络的生命周期;

(3) 提供抗扰动(churn)的路由协议和高效的资源发现算法.

传统 P2P 网络覆盖网按照拓扑结构的不同,可以分为集中式网络、分布式非结构化网络、分布式结构化网络和半分布式(混合式)网络这 4 种.

- 集中式网络通过一个目录服务器来提供资源发现,因此存在着单点故障.早期针对移动对等网络还有一些集中式的网络结构设计,近年来已经基本被摈弃,因此本文对此不进行展开讨论;
- 分布式非结构化网络通过随机图构造,具有较好的容错性和可用性.最典型的非结构化网络是 Gnutella 0.4,但它的后继版本 0.6 改用了半分布式结构.在移动网络环境中构造非结构化覆盖网采取的方法主要

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

有跨层设计、利用节点位置信息以及移动节点间合作资源共享;

- 分布式结构化网络主要利用 DHT(distributed hash table)技术来进行节点和资源的统一组织,因此又被称为 DHT 网络.DHT 网络具有良好的扩展性、健壮性、节点 ID 分布均匀性以及自组织特性.与非结构化网络相比,结构化网络能够提供确切的搜索结果,但对复杂查询缺乏有效的支持.最典型的结构化网络有 Chord[2],CAN[3],Pastry[4],Tapestry[5]等.由于将节点 ID 在整个逻辑空间重新分配,会导致严重的逻辑网络和物理网络失配问题,所以有文献认为移动自组网不适合部署结构化网络[6].但近年来,移动对等网中结构化网络的构造算法并不鲜见,甚至比非结构化算法还要多;
- 半分布式网络通过选择一些高性能节点作为超级节点来存储其他节点的信息,从而结合了集中式和分布式结构的优点,因此又被称为混合式网络.移动网络节点在很多情况下具有较强的异构性,从这点来说比较适合采用半分布式(混合式)网络结构,但超级节点的选择和失效处理等问题还需要很好地加以解决.

2 分布式非结构化覆盖网

面向通用移动网络的分布式非结构化覆盖网络设计主要包括电子科技大学牛新征等人提出的移动节点间协作资源共享模型[7],该模型在 Gnutella 协议的基础上利用排队论和可靠性理论实现相应资源预测算法和请求调度策略.实验结果显示,改进的覆盖网提高了在移动环境下的资源查找命中率;尤其是在节点移动速度较快时,节点间协作更加频繁,因此优势更加明显.

2.1 基于移动自组网(MANET)的覆盖网

基于移动自组网的非结构化覆盖网络构造算法主要有两类:一类是跨层设计,另一类是运用博弈论进行网络构建博弈.下面分别加以论述.

2.1.1 跨层设计

Li 等人在文件共享的背景下讨论了 MANET 中跨层设计的问题[8].通过将网络层的路由协议 AODV 扩展为 EAODV,并将 Gnutella 协议中的泛洪请求替代为一个跨层事件,由覆盖层和网络层共同来完成一个文件搜索操作.

北京航空航天大学的 Shah 和 Qian 提出了一个跨层设计的非结构化覆盖网[9].节点加入时,利用无线网络的广播特性使用扩展环查询 ERS(expanding ring search)算法查找最近邻居端节点,并计算该节点与邻居节点间的最大距离.在节点加入以后,利用 MAC 层多播来定期广播维护(keep-alive)消息.在收到维护信息后,每个节点比较该节点与邻居节点间的距离以及各邻居节点间的最大距离,根据结果删除距离较长的冗余连接,从而保持与物理拓扑的一致性.

Shah 等人在前期研究的基础上提出了一个利用网络层反应式路由协议的覆盖网[10].在该网络中,通过 AODV 网络层路由协议每个节点构建一个链接所有两跳之内邻居节点的最小生成树(MST),所有节点都通过各自的 MST 链接到一个根节点.该覆盖网本质上是一个星形网络,并通过跨层设计来实现被分割 P2P 网络的快速合并.

2.1.2 网络构建博弈

文献[11]基于 Fabrikant 等人的创建网络博弈模型[12]提出了一个在 MANET 下的创建 P2P 网络模型.该模型是一个完全信息非合作博弈模型,通过节点间博弈来决定节点间是否建立连接,从而实现对覆盖网络的拓扑控制.每个节点的代价主要分为两部分:一部分为该节点所有邻居节点的能量之和乘以一个系数;另一部分为该节点到网络中所有节点的距离之和.实验结果表明,该模型创建的 P2P 网络中各节点在多数情况下无法在约束时间内达到纳什均衡,从而导致在即便没有节点退出或者加入的情况下,该覆盖网拓扑也无法保持稳定.此外,正如该文献自身所指出的,由于需要每个节点所有邻居节点的能量信息和该节点到所有其他节点的物理距离,因此每个节点加入或退出都需要重新调整整个网络.对于 MANET 来说,节点的加入和退出非常频繁,因此进一步研究非完全信息合作博弈模型具有更大的实用价值.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Mawji 等人在其尚未公开发表的文献中提出了一个基于非完全信息非合作博弈的构建覆盖网启发式算法[13].每个节点的代价定义为两部分:第 1 部分与文献[11]相同,也为该节点所有邻居节点的能量之和乘以一个系数;第 2 部分则改为该节点与其收发消息最频繁的 D 个节点的距离之和.实验结果表明,该启发式算法比最小代价算法稳定得多,在节点度限制宽松的情况下,其总代价接近最小代价算法.该算法由于不需要网络的全局信息,时间复杂度达到了 $O(N)$,N 为网络节点数,远远好于文献[11]所提模型的指数级复杂度.但该算法假设每个节点都是自私的,没有考虑到各节点合作的可能性,从而限制了算法复杂度的进一步优化.

2.2 基于无线Mesh网络的覆盖网

MW-GRID[14]将无线 Mesh 网络中的节点按照链接情况分为不同的群组,并称之为岛屿.每个岛屿被分配一个虚拟坐标,岛屿内所有的节点共享该坐标.所有岛屿的虚拟坐标被映射到一个二叉树.如果一个节点同属于不同的岛屿,该节点被称为边界节点.图 2 是两个不同的岛屿和边界节点的示意图.从图 2 可以看到,每个岛屿内的节点都是全链接的.每个节点具有两个路由表:自己的路由表和所属岛屿的路由表,路由请求通过岛屿间单播传递和同一岛屿内节点偷听来共同实现.实验结果表明,在用户设备具有普通无线传输范围和步行移动速度的前提下,尽管物理拓扑十分难以预测,但该算法仍然可以产生较稳定的覆盖网.

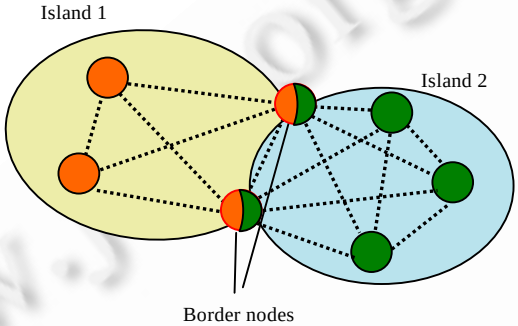

Fig.2 Description of islands and border nodes in MW-GRID[14]

图 2 MW-GRID 中岛屿及边界节点示意图[14]

3 分布式结构化覆盖网

移动 P2P 结构化覆盖网络的研究除了可以利用移动网络的具体特性进行跨层设计之外,现存的传统 P2P 结构化网络提供了大量可以进行改进的原型.此外,通过对网络拓扑结构模型的深入研究可以构建某些网络指标最优的覆盖网络,其优点是特定的网络指标和优化过程可以进行严格的理论证明.

3.1 基于传统P2P网络改进的覆盖网

传统 P2P 网络中实现了很多优秀的结构化覆盖网构建协议和路由算法,因此在移动 P2P 网络领域,绝大多数的分布式结构化覆盖网络都是基于原有的传统 P2P 结构化网络进行改进的.这种方法能够利用原有成熟的算法和理论基础,并有利于与传统 P2P 网络的互通互联.

3.1.1 基于 Chord 改进的覆盖网

Chord 是结构化 P2P 覆盖网中最简单但也是最经典的模型,它通过构建一个带弦的环形网络,将节点和数据映射到该网络中去.Chord 具有良好的路由效率、可扩展性、容错性和负载均衡,因此也成为在移动 P2P 领域被研究最多的结构化覆盖网络协议之一.

Hoang 等人[15]讨论了无线环境的高扰动性对 Chord 的影响,通过修改 Chord 协议,采取了一种原子环维护机制来提高 Chord 对高扰动的抗干扰能力.文献[15]重点分析了节点加入 Chord 环的过程,指出,当一个节点加入时,Chord 并不是马上修正所有相关节点的前驱和后继节点的指针,而是修正部分指针,然后通过周期性的稳定化过程来修正其余的指针.在两个周期之间,部分指针是错误的,从而影响了查询的成功率.因此该文献提出,当一个节点加入网络时,通过锁机制来确保所有指针修正后才可以有新的节点加入.为了避免死锁,设定了锁失效

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

时间,并在锁失效时触发稳定化过程.

文献[16]通过修改 Chord 的 finger 表及 ID 分配策略来提高无线网络中的性能.为了实现覆盖网拓扑与物理网络拓扑的一致性,finger 表增加了节点的前驱节点信息.为实现将相近的 ID 分配给物理上相邻的节点,在新节点加入时,首先获取本地拓扑信息,包括接收到的物理信号强度以及其他成员节点 finger 表中 ID 空间的 Margin 值;然后,选取适合的成员节点发送获取 ID 请求;最后,按照一定的分配算法将 ID 分配给请求节点.

MANETChordGNP[17]将网络层路由协议 AODV[18]与 Chord 结合起来构建一个参考物理位置的覆盖网络.节点的物理位置由 GNP(global network positionning)[19,20]系统来决定.GNP 系统是一个互联网坐标系统,它通过指定一些特定的节点作为路标,并以路标节点为参考坐标将其他节点映射进虚拟坐标空间.每个节点在通过 GNP 系统得到一个坐标以后,MANETChordGNP 提供一个节点 ID 分配算法,根据坐标分配给节点一个临时 ID.当节点的位置发生变化时,该节点要将自己管理的资源转移给后继节点,并通知自己的前驱节点,该节点的 ID 随之重新分配,从而保证覆盖网拓扑与物理网络拓扑的一致性.

Nishihara 等人[21]提出将 Chord 中节点 ID 的计算方法替换掉,按照 4 个步骤来重新分配,从而保证覆盖网中的邻居节点在物理网络中也是邻居.当节点加入网络时,首先从邻居节点收集信息,包括邻居节点的 ID、前驱、后继节点的 ID 等,其中还包括了节点的移动性;其次,根据收集的信息计算出一个候选 ID 集合;然后,在集合中选定一个 ID 作为该节点的 ID,在该步骤中具有高移动性前趋或后继节点的 ID 将被去除;最后,当节点移动后,需要宣布退出覆盖网,然后再重新加入,以便重新分配节点 ID.从上述过程可以看出,该方法仅适用于大多数网络节点移动性较差的情况.

Gouvas 等人在 2010 年提出一个 4 层框架[22],从而在 MANET 网络环境下实现自主服务.这 4 层从上而下依次是 DHT 层、拓扑维护层、路由层和邻居-邻居层.DHT 层主要用来维护一个稳定拓扑结构覆盖网之上的分布式哈希表.从这点来说,任何现有的 DHT 协议都可以被使用.在文献[22]所介绍的实验中,该层选用了 Chord.拓扑维护层用来构建和维护一个虚拟覆盖网拓扑.当覆盖网中的节点相对位置发生变化时,该层负责通知 DHT 层,由 DHT 层来负责进行键-值对的重新分配.路由层即网络层的路由层,负责物理网络节点之间的包传输.邻居-邻居层负责将上层的数据帧从一个邻居传送到另一个邻居.在这个通用的 4 层框架下,文献[22]通过模拟器实现了一个实例,DHT 层采用 Chord,拓扑维护层采用改进的 T-MAN[23]算法,路由层采用改进的 DSR[24]路由协议.该文献的主要作者们在 2011 年又进一步详细阐述了文献[22]中的这一实现实例,并将其正式命名为 Ubi-Chord[25].图 3 展示了 Ubi-Chord 的 4 层结构.

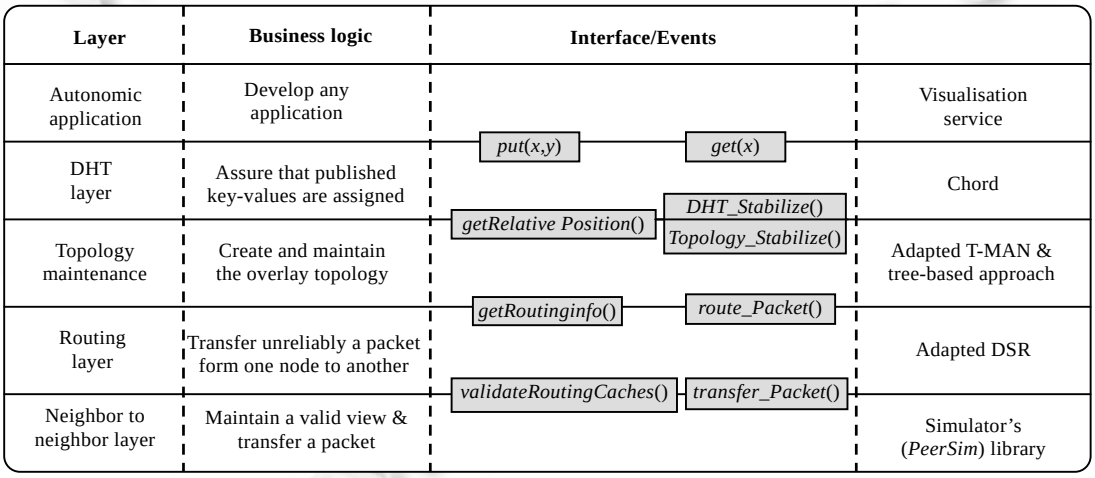

Fig.3 Four-Layered architecture in Ubi-Chord[22]

图 3 Ubi-Chord 的 4 层结构示意图[22]

MChord[26]在 2010 年被提了出来,以提高车辆自组网中 P2P 的性能.为了克服节点的高度移动性和物理拓

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

扑频繁改变所带来的困难,MChord 采取了以下 4 点改进机制:

(1) 进攻性表更新策略:利用一切可能的信息来更新覆盖网路由表;

(2) 覆盖网路由表广播策略:将覆盖网路由表信息广播给邻居节点,而不是像 Chord 那样单播“Ping”信息来探测节点;

(3) 贪婪转发策略:选择覆盖网路由表中最近的节点转发,而不是选择 Chord 的 finger 表中最好的 finger;

(4) 被动式自举策略:一个新节点通过收听到覆盖网路由表广播来了解覆盖网信息,而不是通过钩节点加入覆盖网.

除此之外,MChord 采用了与 MESHCHORD 相类似的跨层设计,所有 MAC 层收到的数据包都被上传到应用层分析以用来更新信息.

MESHCHORD[27]是一个面向无线 Mesh 网络改进的 Chord 版本.其作者提出一个将整个无线 Mesh 网络分为两层的架构:下面一层为无线 Mesh 客户,由它们来提供 P2P 网络需要共享的内容;上面一层为静止的 Mesh 路由器,在这一层上,通过 DHT 来实现网络资源定位.图 4 演示了该两层结构.该文献在上层采用了 Chord 作为 DHT 的实现,并对其进行了两点改进:一是改进了分配 ID 算法,根据节点的地理坐标来判断节点间的距离,从而将相邻的 ID 分配给距离较近的节点;二是进行了 MAC 层跨层设计.因为一个查询请求的目标节点可能在 Chord 环上与源节点的距离很远,在物理网络上的距离却很近,所以每个节点在 MAC 层收到的数据包都要上传至应用层,以确认是否能够快速提供某个查询请求结果.这种方法充分利用了无线 Mesh 网络一跳广播传输的特性,实验结果表明其能够有效提高查询请求的响应时间.

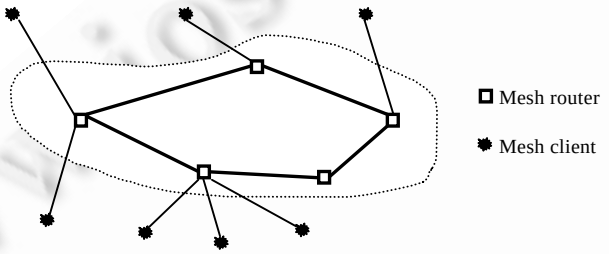

Fig.4 Two-Tier architecture in Meshchord

图 4 Meshchord 的两层结构示意图

3.1.2 基于 CAN 改进的覆盖网

为了在移动对等网络中支持多维度查询,MIME[28]模型提出了一个基于 CAN 改进的分布式结构化覆盖网.该模型将物理节点划分为不同维度的物理地带(physical zone),文献[28]假定节点都在二维空间中运动.通过对物理节点空间和数据空间的不同划分,实现了一个能够与底层物理拓扑一致的覆盖网络拓扑,文献[28]称其为相邻已知覆盖网(proximity-aware overlay).在该覆盖网络的基础上,MIME 实现了一种多维查询算法、一种节点更新算法和一个缓存机制,从而形成了比较完整的移动对等网络系统框架.

3.2 基于跨层设计的覆盖网

ITR(indirect tree-based routing)[29]路由协议通过拓展 MANET 的网络层路由协议 ATR(augmented tree-based routing)[30],使其能够提供全功能的 P2P 服务.对等端的 ID 空间表示为一个 s+1 层的完全二叉树,每个叶子节点分配给一个 s 位的 ID.文献[29]中定义了两个重要的概念:t 层子树与一个叶子节点的 t 层兄弟节点.t 层子树是指共享 s–t 位前缀的叶子节点集合.一个叶子节点的第 t 层兄弟节点则是指与该叶子节点所属的 t 层子树具有同一个父节点的 t 层子树.每个节点的路由表都有 s 节,每一节对应一个兄弟节点.第 t 节路由表存储该节点的 t 层兄弟节点中所有物理距离为 1 跳的邻居节点,从而构造了一个与物理拓扑位置一致的覆盖网.图 5 为 ITR 覆盖网络示意图.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

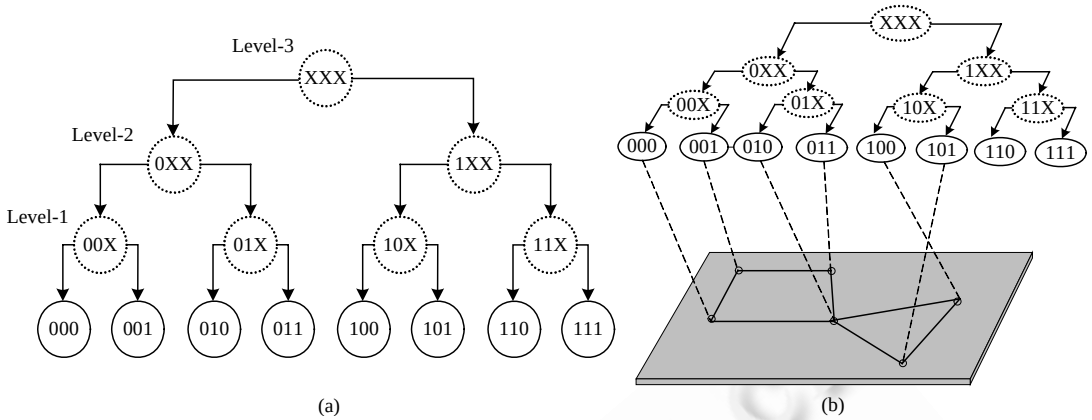

Fig.5 Indirect tree-based routing overlay network

图 5 ITR 覆盖网络示意图

文献[10]的主要作者提出一种新的基于 MANETs 的结构化拓扑构造方法[31],该方法与文献[10]有些类似,也是通过构造每个节点包含最多两跳邻居的最小生成树来去掉节点间的冗余连接,并在节点中指定一个根节点,所有节点都与之相连.与文献[10]不同的是:(1) 该方法利用 MANET 中 OLSR 协议来获得节点间的跳数作为节点间的物理距离,并根据节点间的物理距离来确定覆盖网中的邻居;(2) 该方法是采用结构化方法,将每个资源通过哈希函数分配 m 位 ID,每个节点通过确定 ID 的上限和下限来负责指定 ID 区间资源的一部分.

Cayley-4DHT[32]构建了一个节点度数为常数 4 的结构化覆盖网,并采用跨层设计来提高系统性能.该覆盖网络利用代数群论方法,通过对一个交换群和一个循环群进行半直积运算得到一个新群,并通过设计该群的生成元构造了一个 Cayley 图模型.理论证明,该图为一个连通图且为 4 度正则图.基于该 Cayley 图模型,在无线 Mesh 网络中构建了一个结构化 P2P 覆盖网.在路由算法中,利用无线网络的广播特性将 MAC 层与应用层的信息共同处理,即当一个节点接收到邻居节点 MAC 层的任何广播信息后,立即将其送到应用层,检查该 MAC 层数据包是否含有查询本节点的信息,由此来提高查询效率.由于 Cayley 图具有对称性和点传递性的特点,因此,该覆盖网络路由算法简单,负载较为均衡,容错性较好.

3.3 基于网络拓扑模型的覆盖网

东北大学的 Zhang 等人提出了一个网络拓扑模型[33],该模型可用来对已有的系统进行拓扑优化,也能够产生一些具有特定节点度分布和网络直径的拓扑结构.在某些特定情况下,网络直径可以被该模型优化到最佳值.

针对移动对等网络场景,文献[33]提出以下问题:给定节点数 s 和固定的节点度数 t,构建在这些节点之上的任意图的最小直径 d 是多少?文中给出的答案是

$$d \geqslant \{\log_t[s(t-1)+1]\}-1 \tag{1}$$

从公式(1)可以得出,当节点度数为常数 t 时,网络直径的下限是 $O(\log_t s)$.Kautz 和 deBruijn 图的网络直径达到了该下限,因此文中将其称为 ODN(optimal diameter network).有些图的网络直径是下限的线性函数,例如 CCC 和蝴蝶图,称为 SDN(suboptimal diameter network).有些图的网络直径远远大于该下限,如超立方体,称为 NDN(none-optimal diameter network).文献[33]针对以上 3 种网络进行了建模,并给出了 3 种网络的构建过程和优化方法.通过优化,SDN 可以达到 ODN 的网络直径,从而转变为 ODN.NDN 无法通过优化转变为 ODN,但可以通过设计新的路由表和路由协议来缩小网络直径.文献[33]最后给出了以上优化过程的理论证明.

4 半分布式(混合式)覆盖网

Cheer[34]是一个面向无线自组织网络的基于小世界理论构建的半分布式网络.它将网络中的节点分成若干簇,每个簇都有一个头节点,其他节点称为普通节点.普通节点由头节点管理,定期向头节点发送存活信息和共

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

享资源信息,在查询过程中不能互相通信.头节点不仅负责簇内的节点初始化、维护和查询,而且负责簇间的路由.为了提高网络的健壮性,簇内的节点周期性地轮流作为头节点.同时,Cheer 也提出了一个维护机制来保证头节点失效时网络的正常运行.对于无线网络来说,每个簇中节点太多的话会加重头节点的负担,太少的话又影响查询效率.Cheer 通过理论计算并根据经验值得出,每个簇的节点数目在 32 与 59 之间比较合适.同时,他又提出了一个簇间路由模型,在这个模型中,每个簇作为一个方块在一个平面内顺序排列,所有的簇组成一个规则网络.通过在每个簇上增加一个 n 跳的远程连接,使得远程连接的概率为 1/9,从而构成了一个小世界网络.

唐朝伟等人提出 PLHChord[35]模型,在 Chord 模型基础上进行了改进.该覆盖网络首先在节点 ID 中加入从基站获得的位置特征信息,其次把基站和高性能节点作为系统中的超级节点,从而形成由超级节点构成的内 Chord 环和由普通节点构成的外 Chord 的双环结构.资源查找过程由本节点开始,如果在本节点没有找到,则将请求发送给该节点所属的超级节点;如果还未找到要找的资源,则将请求发送给在此资源键值之前最近的超级节点,该超级节点通过查询本地资源返回查询结果.每次查询成功后,都将更新超级节点中的缓存.通过实验对比,该覆盖网比 Chord 在路由效率上有了很大的提高.图 6 为 PLHChord 模型的结构示意图.

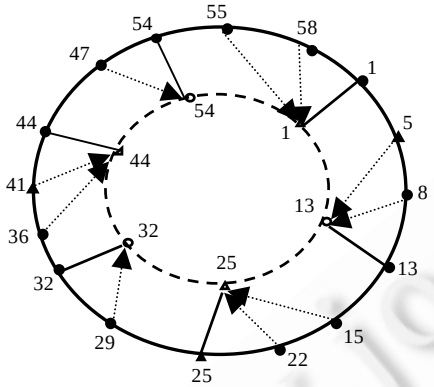

Fig.6 Architecture of PLHChord

图 6 PLHChord 模型的结构

AMPSTP[36]是一个自适应安全拓扑移动对等覆盖网构造协议,它构造了一个双层覆盖网:核心层是一个由锚节点组成的 Plaxton Mesh 结构:第 2 层是叶子层,是由临时锚节点和大量的普通移动节点组成的环.覆盖网中的锚节点是指能够辅助其他节点定位而自身地理位置固定不变的节点,具有较强的计算和存储能力,自身是安全可信的.为了避免一个区域内锚节点失效,按照一定策略从该区域选取一个或多个节点作为临时锚节点.核心层由 Pastry 协议进行组织,并将覆盖网路由表等信息复制到网络层,通过跨层设计来进行路由.文献[36]对该协议进行了详细的理论分析,分别给出了构造安全拓扑算法和维护安全拓扑算法的时间复杂度和空间复杂度,并通过实验给予了验证.

4.1 移动自组网(MANET)上的覆盖网

北京邮电大学的王仕果等人提出一个具有动态拓扑感知特性的无线对等覆盖网[37].该覆盖网以 Chord 为原型,改进了其节点 ID 分配策略,并通过一个中心节点定期地进行节点 ID 和文件索引的更新.

新节点加入覆盖网时申请节点 ID 的过程可分为 3 个阶段:

- 首先,入网节点获取邻居节点的状态信息,除了常规信息之外,还需要两类信息——位置信息和 ID 空间富余度作为下一阶段的两个主要参数;
- 然后确定最佳 ID 分配节点,分为 3 步:第 1 步根据单个参数排除较差节点;第 2 步将入选节点的参数归一化;第 3 步综合各方面参数,确定最佳请求节点;
- 最后,接到请求的邻居节点根据 3 种不同的情况分配 ID.

为了保持与物理拓扑的匹配,每个节点通过 GPS 装置得到自己的位置信息,并向中心节点定期更新其位置信息.中心节点通过收集各节点的位置信息,将节点 ID 分配问题转换成为一个最大旅行商问题,其目标函数为搜索环上所有相邻节点之间的距离之和.为了快速得到计算结果,中心节点采用模拟退火算法进行最优化求解,然后广播更新消息.网内节点根据更新消息进行 ID 交换和文件索引更新,从而实现了物理网络拓扑与覆盖网络拓扑之间的匹配.

4.2 车辆自组网(VANET)上的覆盖网

文献[38]提出了一个 VANET 上的两层交通信息系统架构.该架构底层以 VANET 节点组成,互相通过 IVC

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(intervehicle communication)[39]方式通信.底层节点通过选举一定的超级节点组成上层对等覆盖网,该网络既可以是结构化网络也可以是非结构化网络,文中倾向于非结构化网络,认为其更适合于车辆自组网动态的拓扑结构.上层网络节点通过有基础设施的宽带无线连接进行通信.

文献[38]中所提系统采用了基于 ID 的聚类方法来选取超级节点,因为该方法运算简单而且能够在 VANET 中生成相对较为稳定的簇.一个簇中 ID 最小的节点称为超级节点.由于该方法只能生成单跳节点组成的簇,系统将其与最大最小 d 聚类生成算法[40]相结合,从而生成节点间为多跳的簇.

文献[38]最后对几种不同的覆盖网架构进行了实验对比,这几种架构分别是单层的 VAMET、单层的基于 VANET 的 P2P 覆盖网、有基础设施的 P2P 覆盖网以及前面所述的双层网络架构.实验结果表明,双层网络架构在查询成功率、查询延迟和维护开销等方面要优于其他 3 种架构.同时,文献[38]将 Gnutella 和 Chord 作为非结构化网络和结构化网络的各自代表分别进行了模拟.实验结果表明,对于上层覆盖网来说,非结构化网络 Gnutella 优于结构化网络 Chord.

4.3 无线Mesh网络上的覆盖网

Georoy[41]在 2007 年被提了出来,它采用了混合网络拓扑,分为超级节点和叶子节点两层.超级节点层采用了类似 Viceroy[42]的蝴蝶覆盖网络,但通过基于本地的映射来改善逻辑拓扑和物理拓扑结构的匹配程度,从而使其更加适合于移动环境.在知道每个节点的地理坐标的前提下,文献[41]提出了重新计算节点 ID 的公式:

$$I(x,y)=\begin{cases}\dfrac{x\lambda}{r^2}+\left\lfloor\dfrac{y}{\lambda}\right\rfloor.\dfrac{\lambda}{r}, & \left\lfloor\dfrac{y}{\lambda}\right\rfloor=2k\\ \dfrac{(r-x)\lambda}{r^2}+\left\lfloor\dfrac{y}{\lambda}\right\rfloor.\dfrac{\lambda}{r}, & \left\lfloor\dfrac{y}{\lambda}\right\rfloor=2k+1\end{cases} \tag{2}$$

式(2)中,$I(x,y)$为由地理坐标 x,y 向[0,1]区间映射的函数;r 为所有节点分布正方形区域的边长;λ为任意常数,$0<\lambda<r$;k 为任意整数.

Georoy 没有考虑到节点的数据可以被复制到其他节点的情况.G+[43]将 Georoy 进行了扩展,每个叶子节点由一个责任超级节点和一个宿主超级节点来共同管理.当叶子节点离开网络时,责任超级节点根据数据流行度等指标按一定概率将该节点的资源复制到它所管辖的其他叶子节点中去.这样,如果该叶子节点只是暂时离开,则宿主超级节点的索引不需要作任何更新.如果该叶子节点运动到其他责任超级节点的管辖范围,网络中将存在该叶子节点存储资源的多个副本,从而根据多个副本的网络距离来确定较近的节点.它还通过设置黑名单,并设计了一种惩罚机制来惩罚那些提供不良数据的节点,从而提高节点数据的信任度.

5 移动对等覆盖网络分析与比较

通过以上对 3 种不同移动对等覆盖网的介绍可以看出,随着移动互联网的兴起,针对移动对等覆盖网的研究越来越深入,应用范围越来越广,理论基础越来越扎实.对移动对等覆盖网的研究已经从覆盖网的构建、路由协议、资源发现策略延伸到与物理拓扑的匹配、覆盖网的分割与合并、节点自组织、能量效率等诸多方面.应用范围从 3G 网络、移动自组网(MANET)扩展到车辆自组网(VANET)、无线 Mesh 网络等新兴网络.涉及到移动对等网络覆盖网的理论基础更是从传统的 DHT、随机网、小世界理论发展到博弈论、代数图论、人工智能等诸多领域.

在面向移动自组网络的移动对等网络覆盖网构造算法中,使用跨层方法的占了绝大多数.该方法可以分为两类:一类是覆盖层和网络层跨层通信,简称为网络层跨层;另一类是覆盖层和 MAC 层跨层通信,简称为 MAC 层跨层.网络层跨层方法是利用网络层某种特定的路由协议来共同完成覆盖网络路由工作;MAC 层跨层方法则是将无线广播中收到的所有 MAC 层数据包发送到覆盖层进行分析处理,从而提高查询效率.这两种方法都能够提高查询成功率和效率,从而降低路由开销,减少节点的能量消耗.但跨层方法由于涉及到具体的网络层路由协议和 MAC 层协议,对于此种方法的使用范围必然受到一定的局限,影响了该方法的通用性.

车辆自组网中,移动节点由于节点移动速度较快,物理拓扑变化过于频繁,因此比较适合构建混合式网络.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

无线Mesh网络上的覆盖网也可以利用无线链接情况的不同来构造混合式网络.因此,以上两种移动网络中的移动覆盖网络基本上都采用了混合式网络.混合式网络构造算法的一个重点是超级节点的选择和失效处理.超级节点间的拓扑结构可以按照原型改进方法、网络博弈等方法进行构建.

原型改进方法能够应用于不同的物理网络,利用传统 P2P 覆盖网协议中相对比较成熟的算法来进行路由、资源查询等,通过改进或者增加与其他层协议的通信来提高效率,尤其是对于移动网络和传统 P2P 的互联有着较为明显的优势.针对结构化网络改进的原型最多的就是 Chord,其次是 CAN,Pastry 等.改进的方法主要围绕着节点 ID 的分配和跨层优化两方面进行.节点 ID 的改进方法大概有 3 类:第 1 类是通过引入网络坐标系统进行节点 ID 的重新分配,第 2 类是改变节点 ID 的分配过程,最后一类是改变节点 ID 的生成算法.非结构化网络主要是围绕 Gnutella 进行改进,改进的方法主要是跨层设计.但这种方法必然要遵循已有的框架进行改造,从而限制了算法的改进范围.由于传统 P2P 结构化覆盖网的抗扰动性普遍较差,改进的结构化覆盖网对于如何提高抗扰动性来说仍然面临较大的挑战.

利用博弈论进行覆盖网的构建是一种比较巧妙的方法,并且可以应用于各种不同的移动物理网络.该方法定义了一个博弈,即利用已知的节点如何构建一个达到预定目标的覆盖网络,目标通常设定为所有节点间的距离最短.早期的文献[11]采用了完全信息非合作博弈理论进行构建移动对等覆盖网络,得到的网络拓扑极不稳定.由于对于每个节点来说不可能得到网络的全部信息,文献[13]提出了基于非完全信息非合作博弈的移动对等覆盖网构建方法,通过启发式算法得到相对稳定的覆盖网拓扑.此种方法得到的覆盖网拓扑结构对于预定的目标来说是接近最优的,并且理论基础比较坚实,但产生的覆盖网仍不是很稳定,对于抗扰动性方面还需要进一步地加以研究.

表 1 列举了本文所综述的所有移动对等覆盖网的名字、类型、应用场景、设计原型、模拟平台和对比协议等.

Table 1 Classification and comparison of typical MP2P overlays

表 1 典型移动对等覆盖网分类与对比表

Overlays	Cross-Layer	Prototype	Scenario	Comparison	Simulator	Type
Adapted chord[16]	No	Chord	GEN	Chord	NS2	Structured
MIME[28]	No	CAN	GEN	CAN	Self-Developed	Structured
Cheer[34]	No		GEN	Gnutella		Hybrid
Gnutella_RPA[7]	No	Gnutella	GEN	Gnutella, Chord	NS2	Unstructured
Modified chord[15]	No	Chord	GEN	Chord	OverSim	Structured
PLHChord[35]	No	Chord	GEN	Chord	P2Psim	Hybrid
AMPSTP[36]	Yes	Pastry	GEN	MADPastry	NS2	Hybrid
Adapted chord[21]	Yes	Chord	MANET	Chord	NS2	Structured
MST based[31]	Yes		MANET	Chord	NS2	Structured
MANETChordGNP[17]	Yes	Chord	MANET	Chord	OverSim	Structured
Ubi-Chord[22,25]	Yes	Chord	MANET		PeerSim	Structured
Game-Theoretic[13]	No		MANET		NS2	Unstructured
Adapted Gnutella[8]	Yes	Gnutella	MANET	Gnutella	NS2	Unstructured
ITR[29]	Yes	ATR	MANET	MADPastry	NS2	Structured
A cross-layer protocol[9]	Yes		MANET	ORION	NS2	Unstructured
A cross-layer protocol[10]	Yes		MANET	Gnutella	NS2	Unstructured
Adapted chord[37]	No	Chord	MANET	Chord	NS2	Hybrid
Game-Theoretic[11]	No		MANET		Self-Developed	Unstructured
A two-tier P2P TIS[38]	No		VANET	Gnutella, Chord	QualNet	Hybrid
Mchord[26]	Yes	Chord	VANET	Chord	NS2	Structured
MESHCHORD[27]	Yes	Chord	WMN	Chord	GTNetS	Structured
MW-GRID[14]	No		WMN		Self-Developed	Unstructured
Georoy[41]	No	Viceroy	WMN	Viceroy		Hybrid
G+[43]	No	Georoy	WMN			Hybrid
Cayley-4DHT[32]	Yes		WMN	Chord, MeshChord		Structured

6 总结与展望

本文研究了近年来提出的部分移动对等覆盖网的构建算法,按照不同的分类和应用场景分别进行了论述.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

移动网络与固定网络相比,物理网络链接不稳定,节点资源和能量都相对有限,节点失效更为频繁.尤其是节点的移动性使得物理网络拓扑结构极不稳定,因此给移动对等覆盖网络的构建带来了较大困难.目前,研究者们从不同理论基础和不同应用领域出发,对移动对等网络下的覆盖网络进行了有益的尝试和积极的探索,但从目前这些覆盖网构建算法的时间复杂度和实验的运行结果来看,与实际应用还存在较大的差距.目前,移动对等网络还缺乏像传统对等网络中类似Chord,Gnutella之类的经典协议,但随着研究的不断深入,该领域也一定会有经典的覆盖网构建算法出现,从而推动整个移动对等网络的发展和应用.

随着新兴移动网络协议的不断出现和用户需求的多样化,对于移动对等网络覆盖网的需求越来越迫切,要求也越来越高.从实际应用的角度出发,一个好的移动对等网络覆盖网络应该能够自动适应不同的移动网络,具有设计合理的拓扑结构和拓扑控制机制,从而既能保持与物理拓扑的相对一致性,又能具备良好的抗扰动能力和容错能力.从以上的要求可以看出,目前移动对等覆盖网络还有很多方面值得进一步研究和探索.下面列举一些目前需要解决的关键问题和研究方向:

(1) 移动对等覆盖网络和物理网络的失配问题是影响移动对等网络性能的一个关键问题.现有方法主要有两种:一种是采用跨层方法,另一种是利用地理位置或网络坐标.跨层方法无论是将 P2P 协议下压到网络层还是通过层间共享模块或直接通信等方式交互,都会涉及到具体的底层协议,影响此种方法的通用性.利用地理位置需要借助 GPS 等辅助设备,也会受到精度和时延的限制.通过网络坐标来确定节点的物理距离会增加节点的计算开销,从而加大节点的能量消耗.因此,通过理论研究探索覆盖网络与物理网络匹配的新机制、新方法是一个比较现实的研究方向.

(2) 移动 P2P 对等网络虽然有自身的一些特点,但还是属于 P2P 网络的范畴.传统 P2P 覆盖网络构建算法正在不断地发展之中,有些算法是专门针对抗扰动性设计的,而高扰动性正是移动对等网络的主要特点之一.虽然有一些研究工作已将部分传统 P2P 覆盖网协议经过改进移植到移动网络中来,但这些工作主要集中在少数经典协议.时刻保持对新型传统 P2P 覆盖网络的关注,并选择其中适当的算法加以改进,应该也是一个比较适合的研究思路.

(3) 将博弈论引入移动对等覆盖网络研究是一种重要的方法.目前的研究工作还只是集中在节点间非合作博弈方面.由于移动节点间进行合作是完全可行并且需要提倡的,因此进行节点间合作博弈方面的理论研究值得期待.但由于在博弈论中合作博弈方面的研究还属于初期阶段,本身发展得还不够深入和完善,因此给移动对等覆盖网节点间合作博弈理论的研究带来较大的困难.

(4) 半分布式(混合式)网络中有一个很重要的问题就是超级节点的选择问题.可以说,这个问题能否得到较好解决在很大程度上决定了半分布式(混合式)覆盖网络的好坏.文献[44]同时提出了两种选择超级节点的方法:一种是基于贪婪算法的集合覆盖方法,该方法首先找到网络中所有节点中级别最高的节点,将其确立为超级节点,然后使其相邻的节点成为该超级节点的子节点,在去掉所有上述节点的网络节点中重复以上过程,直至没有可候选的网络节点为止;另一种方法称为最大化独立集合(MIS)方法,该方法通过确定一个集合,从而将所有属于这个集合的节点确定为超级节点.第 1 种方法需要服务器来维护超级节点,而第 2 种则不需要.除了选择算法之外,对于超级节点的评级标准、失效恢复机制等方面的研究都具有很重要的意义.

(5) 目前,对于整个 P2P 覆盖网络的评价体系还没有建立起来,对于移动对等覆盖网络的评价更是相对薄弱.由于没有标准的评价指标和评价体系,使得对于不同覆盖网络的比较缺乏一定的说服力.与此同时,针对移动对等网络的模拟器不仅较少,而且都不是十分的完善.从表 1 可以看出,大部分的文献采用了 NS2 模拟器.该平台是一个通用的网络模拟器,需要研究者自己实现相关的协议,缺乏对移动对等网络的专门支持,并不适合对移动对等网络的模拟.之所以有这么多研究者选择了这一平台,可以说是一个无奈的选择.因此,早日建立合适的模拟平台和系统科学的评价体系,对于移动对等覆盖网的研究具有十分重要的意义.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院张国印教授、王向辉老师领导的讨论组的老师和同学们表示感谢.

References:

[1] Ou ZH, Song MN, Zhan XS, Song JD. Key techniques for mobile peer-to-peer networks. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2008,19(2): 404−418 (in Chinese with English abstract). http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/404.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00404]

[2] Stoica I, Morris R, Liben-Nowell D, Karger DR, Kaashoek MF, Dabek F, Balakrishnan H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2003,11(1):17−32. [doi: 10.1109/TNET.2002.808407]

[3] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, Karp R, Shenker S. A scalable content-addressable network. In: Govindan R, ed. Proc. of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM). New York: ACM Press, 2001. 161−172. [doi: 10.1145/383059.383072]

[4] Rowstron 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). Berlin: Springer-Verlag, 2001. 329−350. [doi: 10.1007/3-540-45518-3_18]

[5] Zhao BY, Huang L, Stribling J, Rhea SC, Joseph AD. Tapestry: A resilient global-scale overlay for service deployment. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004,22(1):41−53. [doi: 10.1109/JSAC.2003.818784]

[6] Jörg E, Rüdiger S, Stefan Z, Gerald K. Structured P2P networks in mobile and fixed environments. In: Proc. of the Int'l Working Conf. on Performance Modeling and Evaluation of Heterogeneous Networks. Ilkley, 2004. http://www.comp.brad.ac.uk/het-net/HET-NETs04/CameraPapers/T4.pdf

[7] Niu XZ, Zhou MT, She K. A cooperative sharing scheme for resources in mobile P2P networks. Chinese Journal of Electronics, 2010,38(1):18−24 (in Chinese with English abstract).

[8] Li T, Ji H, Mei J, Li Y, Hu C. Topology mismatch avoidable cross-layer protocol for P2P file discovery in MANETs. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC 2009). Piscataway: IEEE Press, 2009. 2943−2947. [doi: 10.1109/WCNC.2009.4917995]

[9] Shah N, Depei Q. A new cross-layer unstructured P2P file sharing protocol over mobile ad hoc network. In: Proc. of the 2010 Int'l Conf. on Advances in Computer Science and Information Technology. Miyazaki: Springer-Verlag, 2010. 250−263. [doi: 10.1007/978-3-642-13577-4_22]

[10] Shah N, Depei Q, Rui W. An efficient unstructured P2P overlay for file sharing over MANET using underlying reactive routing. KSII Trans. on Internet and Information Systems, 2010,4(5):799−818.

[11] Mawji, A, Hassanein H. P2P overlay topology control in MANETs. In: Proc. of the 2010 IEEE Int'l Symp. on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM). Montreal: IEEE Computer Society, 2010. 1−9. [doi: 10.1109/WOWMOM.2010.5534905]

[12] Fabrikant A, Luthra A, Maneva E, Papadimitriou CH, Shenker S. On a network creation game. In: Proc. of the 22nd Annual Symp. on Principles of Distributed Computing. Boston: ACM Press, 2003. 347−351. [doi: 10.1145/872035.872088]

[13] Afzal M, Hossam H, Xiangyang Z. Peer-to-Peer overlay topology control for mobile ad hoc networks. Pervasive and Mobile Computing, 2011,7(4):467−478. [doi: 10.1016/j.pmcj.2011.04.003]

[14] Gabriele M, Gianluca M, Marco R, Giacomo T. Self-Organizing mobile mesh networks with peer-to-peer routing and information search services. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Advances in Mesh Networks. Venice/Mestre: IEEE Press, 2010. 17−22. [doi: 10.1109/MESH.2010.14]

[15] Giang NH, Hung NC, Khang NV, Thu LTX, Thang NM, Vinh VT. Performance improvement of chord distributed hash table under high churn rate. In: Proc. of the 2009 Int'l Conf. on Advanced Technologies for Communications. Hai Phong: IEEE Press, 2009. 191−196. [doi: 10.1109/ATC.2009.5349535]

[16] Shiguo W, Hong J. Realization of topology awareness in peer-to-peer wireless network. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing: IEEE Press, 2009. 1−4. [doi: 10.1109/WICOM.2009.5301663]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[17] Sonia GF, Habib Y. Locality-Aware chord over mobile ad hoc networks. In: Proc. of the Global Information Infrastructure Symp. (GIIS). Hammemet: IEEE Press, 2009. 1−6. [doi: 10.1109/GIIS.2009.5307057]

[18] Perkin CE, Royer EM. Ad-Hoc on-demand distance vector routing. In: Proc. of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (IEEE WMCSA). New Orleans: IEEE Press, 1999. 90−100. [doi: 10.1109/MCSA.1999.749281]

[19] Ng TSE, Zhang H. Predicting Internet network distance with coordinates-based approaches. In: Proc. of the 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE Press, 2002. 170−179. [doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019258]

[20] Zhang H, Ng TSE. Towards global network positioning. In: Proc. of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement. New York: ACM Press, 2001. 25−29. [doi: 10.1145/505202.505206]

[21] Nishihara Y, Yokota Y, Okubo E. A technique for construction of overlay networks for MANETs with consideration of physical network topologies. In: Proc. of the 2009 1st Int'l Conf. on Advances in P2P Systems. Sliema: IEEE, 2009. 66−71. [doi: 10.1109/AP2PS.2009.19]

[22] Gouvas P, Zafeiropoulos A, Liakopoulos A, Mentzas G, Mitrou N. Integrating overlay protocols for providing autonomic services in mobile ad-hoc networks. IEICE Trans. on Communications, 2010,E93B(8):2022−2034.

[23] Jelasity M, Babaoglu O. T-Man: Gossip-Based overlay topology management. Lecture Notes in Computer Science, 2006,3910: 1−15. [doi: 10.1007/11734697]

[24] Johnson DB, Maltz DA. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: Proc. of the Mobile Computing. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1996. 153−181.

[25] Gouvas P, Bouras T, Zafeiropoulos A, Liakopoulos A. Ubi-Chord: Services provision in dynamic networks based on P2P protocols. In: Proc. of the 18th Int'l Conf. on Telecommunications. Ayia Napa: IEEE Press, 2011. 375−380. [doi: 10.1109/CTS.2011.5898953]

[26] Liu CL, Wang CY, Wei HY. Cross-Layer mobile chord P2P protocol design for VANET. Int'l Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2010,6(3):150−163. [doi: 10.1504/IJAHUC.2010.034968]

[27] Canali C, Renda ME, Santi P, Burresi S. Enabling efficient peer-to-peer resource sharing in wireless mesh networks. IEEE Trans. on Mobile Computing, 2010,9:333−347. [doi: 10.1109/TMC.2009.134]

[28] Shou LD, Zhang XL, Wang P, Chen G, Dong JX. Supporting multi-dimensional queries in mobile P2P network. Information Sciences, 2011,181:2841−2857. [doi: 10.1016/j.ins.2011.02.011]

[29] Marcello C, Luigi P. P2P over MANET: Indirect tree-based routing. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Pervasive Computing and Communications. Galveston: IEEE Press, 2009. 1−5. [doi: 10.1109/PERCOM.2009.4912791]

[30] Caleffi M, Ferraiuolo G, Paura L. Augmented tree-based routing protocol for scalable ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Adhoc and Sensor Systems. Pisa: IEEE Press, 2007. 1−6. [doi: 10.1109/MOBHOC.2007.4428727]

[31] Nadir S, Depei Q. An efficient structured P2P overlay over MANET. In: Proc. of the 9th ACM Int'l Workshop Data Engineering for Wireless and Mobile Access. Indianapolis: ACM Press, 2010. 57−64. [doi: 10.1145/1850822.1850832]

[32] Peng LM, Xiao WJ. A wireless P2P overlay network with constant degree. Journal of Sichuan University (Engeering Science edition), 2011,43(4):124−130 (in Chinese with English abstract).

[33] Zhang Y, Chang G, Jia J. Topology optimization of mobile P2P ad hoc networks. In: Proc. of the 2010 1st Int'l Conf. on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications. Harbin: IEEE Press, 2010. 323−327. [doi: 10.1109/PCSPA.2010.85]

[34] Li X, Ji H. Scalable peer-to-peer resource discovering scheme for wireless self-organized networks. Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2009,16(2):47−52,57. [doi: 10.1016/S1005-8885(08)60200-9]

[35] Tang CW, Chen HD, Shao YQ, Tang H. Physical location based hierarchical chord algorithm in mobile P2P. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2010,38(8):21−24 (in Chinese with English abstract).

[36] Li ZY, Wang RC. Secure topology protocol for mobile peer-to-peer networks. Journal on Communications, 2010,31(10):146−157 (in Chinese with English abstract).

[37] Wang SG, Ji H. Dynamic topology-aware peer-to-peer networks in MANET. Control and Decision, 2010,25(4):619−622 (in Chinese with English abstract).

[38] Tsao SL, Cheng CM. Design and evaluation of a two-tier peer-to-peer traffic information system. IEEE Communications Magazine, 2011,49:165−172. [doi: 10.1109/MCOM.2011.5762814]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[39] Sichitiu MC, Kihl M. Inter-Vehicle communication systems: A survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2008,10(2): 88−105. [doi: 10.1109/COMST.2008.4564481]

[40] Amis AD, Prakash R, Vuong THP, Huynh DT. Max-Min *d*-cluster formation in wireless ad hoc networks. In: Proc. of the 19th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. Tel Aviv: IEEE Press, 2000. 32−41. [doi: 10.1109/INFCOM.2000.832171]

[41] Galluccio L, Morabito G, Palazzo S, Pellegrini M, Renda ME, Santi P. Georoy: A location-aware enhancement to viceroy peer-to-peer algorithm. Computer Networks, 2007,51:1998−2014. [doi: 10.1016/j.comnet.2006.09.017]

[42] Dahlia M, Moni N, David R. Viceroy: A scalable and dynamic emulation of the butterfly. In: Proc. of the 21st Annual Symp. on Principles of Distributed Computing. Monterey, 2002. 183−192. [doi: 10.1145/571825.571857]

[43] Galluccio L, Palazzo S, Rametta C. On the efficiency and trustworthiness of DHT-based P2P search algorithms in mobile wireless networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Ultra Modern Telecommunications Workshops. St. Petersburg, 2009. 1−8. [doi: 10.1109/ICUMT.2009.5345569]

[44] Han JS, Lee KJ, Song JW, Yang SB. Mobile peer-to-peer systems using super peers for mobile environments. In: Proc. of the Int'l Conf. on Information Networking. Busan, 2008. 1−4. [doi: 10.1109/ICOIN.2008.4472831]

附中文参考文献:

[1] 欧中洪,宋美娜,战晓苏,宋俊德.移动对等网络关键技术.软件学报,2008,19(2):404−418. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/404.htm [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.00404]

[7] 牛新征,周明天,余垄.一种应用于移动 P2P 网络的资源协作共享策略.电子学报,2010,38(1):18−24.

[32] 彭利民,肖文俊.一种具有常数度的无线 P2P 覆盖网络.四川大学学报(工程科学版),2011,43(4):124−130.

[35] 唐朝伟,陈宏旦,邵艳清,唐晖.移动 P2P 环境下考虑物理位置的分层 Chord 算法.华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(8): 21−24.

[36] 李致远,王汝传.移动 P2P 网络安全拓扑构造协议.通信学报,2010,31(10):146−157.

[37] 王仕果,纪红.具有动态拓扑感知的无线自组对等网.控制与决策,2010,25(4):619−622.

张国印(1962－),男,山东黄县人,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为网络与信息安全,嵌入式系统.
E-mail: zhangguoyin@hrbeu.edu.cn

李军(1973－),男,博士生,主要研究领域为移动对等网络.
E-mail: Jasonli376@gmail.com

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn