

环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法

曹怀虎 张艳梅 朱建明 郭树行

(中央财经大学信息学院 北京 100081)

摘 要 移动社交网络节点间的组播通信是近年来研究者关注的热点问题之一。由于节点的动态变化及社会性,使得传统组播路由算法不能直接应用于移动社交网络。根据移动社交网络的环境特征,建立了移动社交网络的组播模型;利用环境感知信息,并结合最小生成树、格网组播路由算法,提出了环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法。最后对该算法进行了理论分析及仿真实验测试,结果表明所提出的组播路由算法改善了数据传输的性能,具有较高的扩展性、鲁棒性。

关键词 移动社交网络,组播,P2P,路由算法,环境感知

中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.09.027

Context-aware Mobile P2P Social Network Multicast Routing Algorithm

CAO Huai-hu ZHANG Yan-mei ZHU Jian-ming GUO Shu-hang

(School of Information, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China)

Abstract Mobile social network multicast communication is one of hot issues that researchers focus on in recent years. Due to the dynamic change and social features of nodes, the traditional multicast routing algorithms can not be directly applied to mobile social network. According to the environmental characteristics of the mobile social network, a multicast model of mobile social network was established. Using environmental awareness information, context-aware mobile P2P social network multicast routing algorithm was proposed by combining minimum spanning tree and grid multicast algorithm. The theoretical analysis and simulation tests of the algorithm were conducted, showing that the CMR algorithm improves the performance of data transmission, and has high scalability, robustness.

Keywords Mobile social network, Multicast, P2P, Routing algorithm, Context-aware

1 引言

无线网络传输速度、移动设备性能的提升,使得人们通过移动社交网络共享数据、音频、视频信息成为可能。人们可以在第一时间与自己的好友联机,分享自己的体验(比如:公司会议、体育比赛、音乐会或聚会现场的实时状况)。由于无线网络的带宽有限,如果采用传统单播发送数据的方式,将会耗尽网络的带宽,无法提供保证 QoS 的数据传输服务。移动 P2P 社交网络组播为解决这一问题提供了新的思路,组播(Multicast)是一种面向群组计算的通信传播方式,它使用单一的源地址把数据发给一组主机。其本质是在底层混合通信网络的基础上,通过运行授权的客户端软件,自主形成优化的覆盖组播树(Overlay Multicast Tree)。在一个典型的移动社交网络环境中,组播具有重要意义,一方面,移动社交网络用户常需要组成协同工作组;另一方面,这也是充分利用无线通信的广播特性,以及有效利用有限的无线信道资源的重要手

段。传统依靠 Web 支撑、集中服务的社交网络,很难适应目前动态、异构的分布式移动网络环境,也无法满足点对点共享数据等新的需求^[1]。P2P 结构具有天生的可扩展性和鲁棒性,并且比 C/S 模式经济更容易实现^[2]。不过,由于节点的移动性,拓扑是变化的,会影响到组播系统的性能^[2],这将是具有挑战性且必须解决的问题。

目前,移动设备(智能手机、平板电脑、笔记本、PAD 等)计算、存储能力、带宽、电能都有了很大的提升,同时 GPS、重力感应、加速度感应、六轴向陀螺等传感功能也获得了普及,而且支持越来越多的短距离通信协议,如 WIFI、Wi-Fi Direct、Zigbee、蓝牙等。因此,本文将试图利用移动设备的短距离通信协议,基于社交网络的位置等环境信息,提出一个环境感知的移动 P2P 社交网络协同组播路由算法,该算法综合最小生成树的传播效率和格网的鲁棒性优势,并且利用节点的地理位置、运动轨迹、兴趣等来进一步改进移动社交网络的组播路由性能。

到稿日期:2013-11-18 返修日期:2014-02-17 本文受国家自然科学基金(61272398),教育部科学技术重点项目(109016),北京市自然科学基金(4112053),教育部人文社会科学研究青年基金项目(11YJCZH006)资助。

曹怀虎(1977—),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究方向为网络体系结构、移动互联网、网络计算,E-mail: caohu@163.com;张艳梅(1976—),女,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、覆盖网络;朱建明(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为可生存网络、网络信息安全;郭树行(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为信息系统、组合优化。

2 相关工作

目前的组播协议中,针对移动社交网络的还很少,大多是针对特定移动自组网的,主要分为以下两类。

(1) 基于树的组播路由协议

目前基于树的组播路由协议有:利用递增序号的 Ad hoc 组播路由协议 AMRIS(Ad hoc multicast routing protocol utilizing increasing id-numbers)、按需距离适量的 Ad hoc 组播路由协议 MAODV(multicast Ad hoc on-demand vector)、自适应按需驱动组播路由协议 ADMR(Adaptive demand-driven multicast routing protocol)、轻量的自适应组播路由协议 LAM(Lightweight adaptive multicast)等^[8-10]。在基于树的组播路由中,参与组播路由的节点的拓扑结构为树,固定网络中的组播路由协议大都属于这种类型。基于树的组播路由包括如下两种:①独立树的组播路由:指为各个组播发送者分别建立组播路由。使用独立树寻径,相关节点必须为每个组的不同发送者维护一个组播表项,可扩展性不好^[3,4]。②共享树组播路由:指为所有组播组发送节点建立一个共享的路由树。使用共享树寻径,可扩展性好,但分组的传送路径大于发送节点间的最短路径。基于树的组播路由的主要缺点是鲁棒性不好,路由树的任何一段链路有故障或因移动不可用将导致路由树的重构,从而会带来大量的控制开销^[5-7]。

(2) 基于格网的组播路由

基于格网的组播路由协议主要有以下几种:按需组播路由协议 ODMRP(On-demand multicast routing protocol)、核心辅助的格网协议 CAMP(Core assisted mesh protocol)、前向转发组播路由协议 FGMP(Forwarding group multicast protocol)等^[11-13]。基于格网的组播路由协议与组播树协议不同,参与组播的节点的拓扑结构为格网状,数据分组沿着格网进行传输,并以广播的方式在格网中利用广播进行路由发现,用核心或者中心节点发送数据包建立格网。在这类路由中,由于组播发送者与接收者间存在多重路径,可提供路径备份,某一链路的传输失败可能并不会影响当前的组播传送;然而,节点之间也存在冗余路径,因为网状结构中的一些节点是组播组的成员节点,但是还有一些节点本身并不是组播组的成员节点,它们仅对组播数据分组进行转发。基于格网的组播路由协议一般包括两个过程:加入组播格网和维护组播格网。

无论是基于树的,还是格网的路由协议,都不能很好地解决节点自治及动态变化的问题^[14,15]。因此,本文结合移动社交网络的特点,提出基于环境感知的自适应移动组播路由协议。算法考虑利用节点的移动性、社会性来改善移动社交网络的组播性能。首先生成一个组播格网,然后在此基础上生成一个动态自适应的组播树,实现移动 P2P 社交网络组播传输,以提高数据传输的质量及无线网络的利用率。

3 环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法

3.1 移动 P2P 社交网络拓扑模型

移动 P2P 社交网络拓扑模型如图 1 所示,各种移动设备接入的方式不同,如手机用户通过 3G 基站接入 Internet,

Pad、Tablet、笔记本电脑更多的是通过 Wifi 接入 Internet,它们之间形成了一个底层的混合通信网络,同时还应注意到这些移动设备之间还可以通过 Wifi Direct、Zigbee、蓝牙等短距离、低功耗的通信协议传输数据。这些移动设备通过运行授权的客户端软件,在底层混合通信网络的基础上,在应用层映射生成一个虚拟的 P2P 覆盖社交网络(Overlay social networks),在这个基础上,可以进一步实现社交节点之间的数据传输。该覆盖社交网络的生成及维护机制可以参见文献[16],在这里不再赘述。

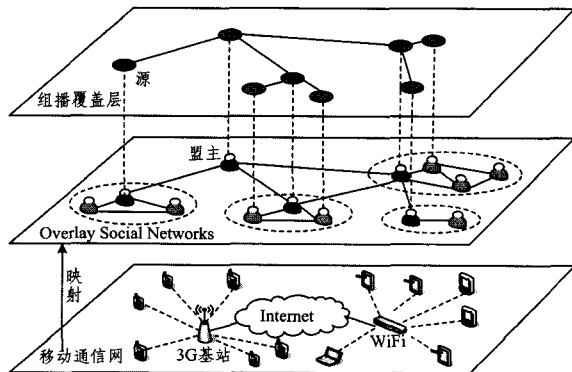


图1 移动 P2P 社交网络组播拓扑模型

3.2 移动社交网络组播路由机制

首先用户运行客户端程序,根据图 1 的架构,建立移动社交网络,由盟主节点负责维护整个移动社交网络。然后根据 GPS 信息可以得到节点的位置,将 GPS 坐标转化为平面坐标 x 和 y ,这样所有节点都映射到这个平面坐标系,按照移动设备最大直接通信距离,将此平面划分为若干区域(如图 2 虚线所示)。从发起点开始,利用广播通信生成组播格网,每个节点的属性信息为 $\langle ID, x, y, Grid, \dots \rangle$,其中 ID 为节点编号, $Grid$ 为格网编号,然后在格网内,结合感知到节点的物理特征和社会特性,运行最小生成树算法生成组播树。

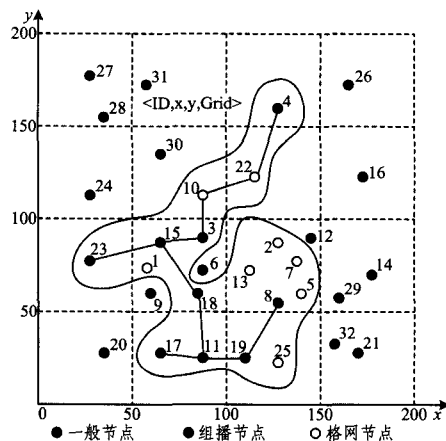


图2 基于地理位置的混合格网路由

最小生成树算法的目的就是在格网内生成一棵树,该树要包括所有组播组成员。算法首先从组播源开始,在其所处区域内,根据 GPS 信息、移动速率、兴趣相似度等,寻找最近的组播组成员加入到组播树中。当本区域内的组播组成员节点全部加入到组播树后,寻找此区域和邻接区域距离最近的组播组成员,如果有,则将其加入到组播树,之后重复前面过

程。如果没有,则寻找此区域和邻接区域距离最近的格网成员,将格网成员加入到组播树,由格网成员完成数据转发。格网成员由于不是组播组成员,因此只转发数据,并不保留副本。如图2所示,曲线圈中的就是一个格网,其中的节点就是格网节点,在这些节点之上运行最小生成树算法,生成组播树。在实际应用中,根据具体的应用场景,可能生成不同的格网和组播树,节点在逻辑上可以属于不同的格网和组播树。当组播树中某个节点失效时,不用重构组播树,只需在本区域内选择一个格网节点代替失效节点即可。如图3所示,当节点15失效时,可以用节点1代替,避免重构组播所带来的高额开销。

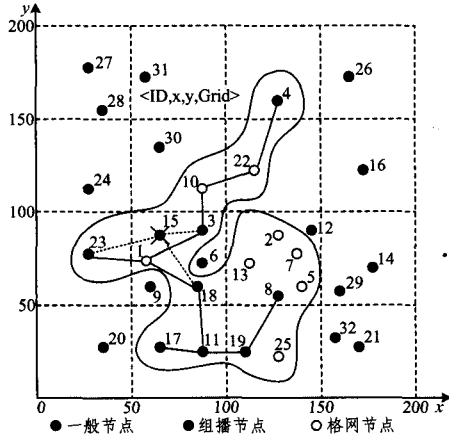


图3 节点失效后组播树恢复

3.3 移动社交网络组播问题优化模型

定义1(组播格网) 对于无向图 $G_M = (V, E, C)$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$ 为一组给定节点,表示移动社交网络 G 中终端节点的集合, V 中的元素可以提供组播服务,则称 G_M 为组播格网。 E 表示由 V 中元素构成的若干边的集合 $\{(v_i, v_j)\}$ 。令 G 的每条边均对应一非负实数 $c(v_i, v_j)$, 称为此边的代价(cost), 而 C 为图 G_M 中边的代价的集合。

定义2(组播树) 无向图 G_M 的一棵组播代价 G 最小的树 T_m , 其中 G 定义如下:

组播树代价 C_T : 设组播树 T 中的链路有 N 条, 则组播树 T 的总费用可表示为:

$$C_T = \sum_{i=1}^M c_i, 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

在此基础上,最小 C_T 即为所求解。式中 c_i 表示图 G_M 中边的代价,对单一约束来说,它可以代表全组播网络中代价、费用、延迟等不同的网络参数,而对多目标约束来说,它又可以表示为一个 QoS 向量,如 $c_i = (c_i^1, c_i^2, \dots, c_i^k)$ ($i = 1, 2, \dots, M$), 或一个 QoS 约束的函数复合。

定义3 移动社交网络组播优化问题:

$$\begin{aligned} \text{Min } C_T &= \text{Min} \sum_{i=1}^M c_i \\ &= \text{Min} \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \alpha \sqrt{(x_i - y_j)^2} + \beta \frac{x_i y_j}{x_i^2 + y_j^2} + \right. \\ &\quad \left. \gamma \frac{H_i^T H_j}{\|H_i\|^2 + \|H_j\|^2 - H_i^T H_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, M 为组播组成员个数, x_i, y_i 为节点 i 的地理坐标, $\sqrt{(x_i - y_j)^2}$ 表示节点 i 和节点 j 的距离,采用欧氏距离表

示, $\frac{x_i y_j}{x_i^2 + y_j^2}$ 表示运动轨迹相似度,采用几何角度相似性函数表

示, $\frac{H_i^T H_j}{\|H_i\|^2 + \|H_j\|^2 - H_i^T H_j}$ 表示用户历史偏好相似度, H 为向量,可以表示多种偏好,采用 Tanimoto 测度表示其特征共性。 α, β, γ 表示权重因子,在实际应用中可以根据实际需要调整其数值。

3.4 环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法实现

环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法 (Context-aware mobile P2P social network multicast routing algorithm, CMR) 由组播源节点发动,其伪代码如下:

算法1 环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法

输入: 移动社交网络节点信息

输出: 移动社交网络组播树

MRMGG(node_information)

```
{
    input node_information;
    Grid_create(); //生成组播格网
    { for i < N;
        { for j < M
            if Xij < D
                then Join j into Gp;
        }
    }

    Multicast_tree(source_node, GPS_regionnode) //在格网内生成组播树
    {
        Input source_node;
        for i < R;
            {for i < S
                {
                    if cij < cik
                        then Join j into the multi-cast_tree;
                }
            }
    }
}
```

3.5 算法复杂性分析

本文所提出的环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法 (CMR) 主要分为两个部分,一个是格网生成算法,另一个是最小生成树算法,这两个算法是独立执行的,我们将分别讨论其复杂性。格网生成算法是基于 P2P 移动社交覆盖网络的,该网络是一个以盟主节点为核心的聚集结构,假设有 N 个聚集,每个聚集有 M 个成员,由于算法是在节点和聚集上分布式实现的,因此该算法的复杂度为 $O(N \times M)$ 。同理,最小生成树算法分为域内搜索和域间搜索两个过程,假设为 R 个域,每个域有 S 个成员,其复杂度为 $O(RS)$,所以总的时间复杂度为 $O(NM) + O(RS)$ 。

4 仿真实验及结果分析

4.1 实验环境设置

基于移动混合通信网络模型,通过 KJAVA 平台和 NS2

网络仿真工具,采用 Java 和 XML 语言实现了移动社交网络仿真实验平台。

本文所提出的环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法(CMR)是一种分布式并行算法,运行在移动设备上,由于移动设备一般能量和运算能力有限,因此该算法的开销、收敛速度和通信量对系统的整体性能至关重要。为此,我们进行了仿真实验来检验其性能。本文的模拟实验主要在网络拓扑生成器 BRITE 的 Java 开源版本以及离散事件驱动模拟程序包 Simjava 的基础上,通过 Java 语言来实现,忽略了实际网络传输过程中的延迟、拥塞、丢包等细节问题。整个模拟实验包括节点物理拓扑生成、聚集算法、离散事件驱动模拟程序、社交信息模拟、消息传递以及发现算法等 6 个主要部分,中间节点的物理拓扑是利用 BRITE(Boston university representative internet topology generator)生成的。为尽量接近现实的移动混合网络拓扑结构,本文模拟实验中的节点物理拓扑图按照 GLP 生成算法在 BRITE 中以路由器级生成,并且随机注入地理位置、运动轨迹兴趣等社交信息。按照文献[5]的聚合算法生成 P2P 移动社交覆盖网(见图 4),然后在这个基础上运行格网生成算法,生成组播格网,进而运行组播树生成算法,生成组播树。

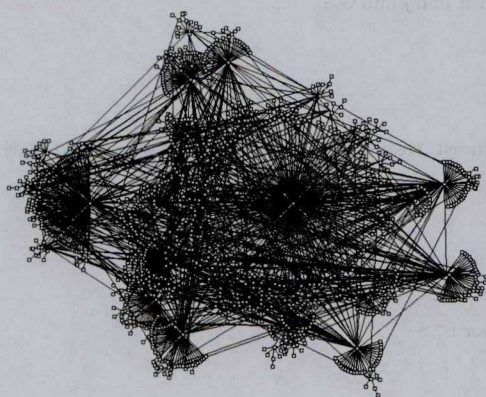


图 4 P2P 移动社交覆盖网

4.2 环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法(CMR)的性能比较

本文主要从算法控制开销、数据传输成功率、对节点移动和实效的适应性等方面与已有的 MAODV、ADMR 算法比较。控制开销如图 5 所示,这里控制开销用控制消息量和请求传输数据量的比值表示。从图 5 可见,CMR 算法的控制开销小于 10%,并且始终低于 MAODV、ADMR 算法,且随着节点数的增加,其控制开销增长比较平缓,说明 CMR 算法具有较好的扩展性。

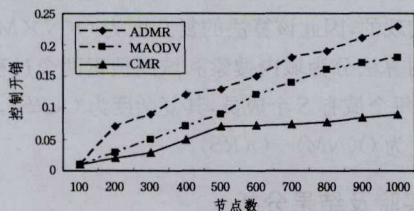


图 5 控制开销比较

节点移动情况下,数据传输率比较如图 6 所示,CMR 算

法的数据传输率始终高于 MAODV 和 ADMR 算法,在节点移动速度小于 4.5m/s 的情况下,CMR 算法的数据传输率始终大于 60%,在节点移动速度小于 3m/s 的情况下,CMR 算法的数据传输率甚至始终大于 85%,可见随着节点移动速度的增加,CMR 算法对于节点的移动性具有较强的适应性,也说明 CMR 算法更适合于节点移动速度较慢的情况,例如室内或城市商业街区等场景。

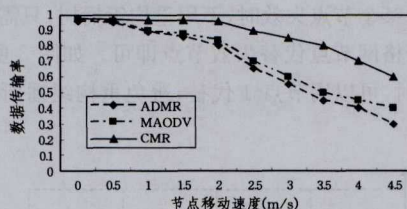


图 6 移动情况下数据传输率比较

算法的时延比较结果如图 7 所示,从图中可以看出,CMR 算法的数据传输时延小于 300ms,并且始终低于 MAODV、ADMR 算法,随着传输数据的增长,时延增长比较平缓,说明 CMR 算法的数据传输质量较高。

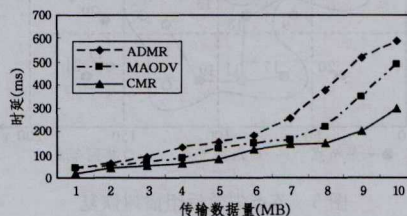


图 7 数据传输时延比较

节点失效的情况下,路由成功率比较如图 8 所示,在 35% 的节点失效的情况下,路由成功率可以保持在 85% 以上;在 12% 的节点失效的情况下,路由成功率达到 89% 以上,并且随着失效节点的增加,CMR 算法的路由成功率始终高于 MAODV 和 ADMR 算法,且下降平缓;而当 20% 的节点失效的情况下,MAODV 和 ADMR 算法的路由成功率急剧下降,说明 CMR 算法具有较强的鲁棒性,能够较好地适应节点经常失效、断连的移动社交网络环境。

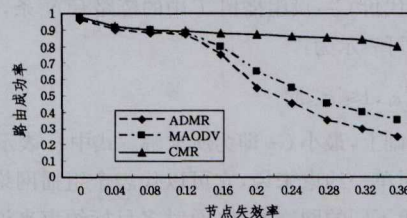


图 8 节点失效情况下路由成功率比较

结束语 如何利用社交网络的特性和直接通信协议,在不依赖移动通信基础设施的前提下,实现节点间的 P2P 组播,从而提高移动社交网络节点间数据传输的质量,是近来研究者关注的热点问题。本文对 P2P 移动社交网络组播问题进行了建模,结合环境感知信息,提出了环境感知的移动 P2P 社交网络组播路由算法(CMR),并充分利用了社交网络的地理位置、兴趣、移动轨迹等信息来改进路由性能,实验证明该算法改善了数据传输的性能,具有较好的扩展性和鲁棒性,能够适应动态变化的移动网络环境。算法的理论分析及实验结

果表明,本文所提方案及算法具有较高的响应速度、准确率。

不过本文的实验系统只是一个原型系统,规模较小,下一步需要进行更大规模的实际应用测试,还要更细致地考虑节点不同的特征,面向不同应用的传输质量要求,进一步优化路由机制。此外,如何激励更多节点加入到组播格网,从而促进节点的协同组播是需要进一步研究的内容。

参 考 文 献

- [1] Chuah M. Social Network Aided Multicast Delivery Scheme for Human Contact-Based Networks[C]// Simplex 2009, Venice, Italy, 2009: 231-237
- [2] 王维,杨明,罗军舟,等. 多射频无线 Mesh 网络组播端到端时延建模与优化[J]. 计算机学报, 2012, 35(7): 1358-1369
- [3] Chiang T-C, Chang Jia-lin, Lin S-W. A Distributed Multicast Protocol with Location-Aware for Mobile Ad-Hoc Networks[C]// Advances in Multimedia, Software Engineering and Computing Vol. 2, Springer, 2012: 691-697
- [4] 夏利,田东渭,刘宗奇. 基于节点相对移动性的自适应按需组播路由协议[J]. 计算机科学, 2012, 39(9): 94-100
- [5] Golle P, Leyton-Brown K, Mironov I, et al. Incentives for Sharing in Peer-to-Peer Networks[C]// Proc. of the ACM Conference on Electronic Commerce (WELCOM), 2001: 210-217
- [6] 李陟,张宏,刘凤玉. 一种基于好友簇的社交网络中的实验容忍路由协议[J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 26-28
- [7] Chen T-W, Tsai J T, Gerla M. QoS Routing Performance in Multihop, Multimedia, Wireless Networks[C]// IEEE International Conference on Universal Personal Communications '97, Part 2, October 1997: 451-557

- [8] Zhang Hai-bo, Shen Hai-ying. A Social Network Based File Sharing System in Mobile Peer-to-Peer Networks[C]// Proceedings of 18th International Conference on Computer Communications and Networks, 2009 (ICCCN 2009). San Francisco, CA, 2009: 1-6
- [9] Kubo H, Shinkuma R, Takahashi T. Social Network Based P2P Multicast Reducing Psychological Forwarding Cost in Mobile Networks[J]. EICE Transactions, 2010, 93(12): 3260-3268
- [10] Eppstein D, Goodrich M T, Löffler M, et al. Category-based routing in social networks: Membership dimension and the small-world phenomenon[C]// Proc. 2011 International Conference on Computational Aspects of Social Networks (CASoN), CASON, Irvine, CA, 2011: 102-107
- [11] Magalhaes J, Holanda M. EIKO: A social mobile network for MANET[C]// Iberian Conference on Information Systems and Technologies, 2011: 1-5
- [12] Bae J H, Lee S H, Kim S W. VegaNet: A peer to peer overlay network for mobile social applications[C]// IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2009: 885-889
- [13] Emre S, Oriana R, Patrick S, et al. Enabling social networking in ad hoc networks of mobile phones[J]. VLDB Endow, 2009, 2(2): 1634-1639
- [14] Cabaniss R, Madria S, Rush G, et al. Dynamic social grouping based routing in a mobile ad-hoc network[C]// International Conference on Mobile Data Management, 2010: 295-296
- [15] 林闯,李寅,万剑雄. 计算机网络服务质量优化方法研究综述[J]. 计算机学报, 2011, 34(1): 1-14
- [16] 曹怀虎,朱建明,潘耘,等. 情景感知的 P2P 移动社交网络构造及发现算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1223-1234

(上接第 140 页)

阅迁移的方法在一定程度上实现了系统负载均衡。

参 考 文 献

- [1] Eugster P T, Felber P A, Guerraoui R, et al. The many faces of publish/subscribe[J]. ACM Computing Surveys, 2003, 35(2): 114-131
- [2] 马建刚,黄涛,汪锦岭,等. 面向大规模分布式计算发布订阅系统核心技术[J]. 软件学报, 2006, 17(1): 134-147
- [3] 嵇伟,金蓓弘,陈海彪,等. 基于发布/订阅中间件的时空事件检测研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(10): 99-103
- [4] 苑洪亮,史殿习,王怀民,等. 内容发布订阅中支持订阅覆盖的路由算法研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(10): 1804-1812
- [5] 薛涛,冯博琴. 内容发布订阅系统路由算法和自配置策略研究[J]. 软件学报, 2005, 16(2): 251-259
- [6] 逯鹏,高庆一,刘旭东,等. 内容发布订阅系统的路由优化和负载均衡技术[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(11): 969-973
- [7] 刘春旭,刘元安,高锦春,等. 大规模 MANET 中基于分层架构的分簇式发布-订阅路由协议[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(2): 451-458
- [8] Rowstron A, Kermarrec A M, Castro M, et al. SCRIBE: The de-

sign of a large-scale event notification infrastructure[C]//Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Networked Group Communication, London: Springer-Verlag, 2001: 30-43

- [9] 汪锦岭,金蓓弘,李京. 结构化 P2P 网络上可靠的基于内容路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(5): 1107-1114
- [10] 尹建伟,施冬材,钱剑锋,等. 结构化 P2P 网络上语义发布/订阅事件路由算法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(9): 161-162
- [11] Zhao Wen, Liu Dian-xing, Liu Xue-yang. Routing Protocol of Semantics-Based Publish/Subscribe Systems over Kademlia Network[C]//In WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, Yunnan, 2009: 189-196
- [12] 钱剑锋,尹建伟,董金祥. 结构化 P2P 网络的语义发布/订阅系统负载均衡算法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(10): 1710-1719
- [13] 汪锦岭,金蓓弘,李京,等. 基于本体的发布/订阅系统的数据模型和匹配算法[J]. 软件学报, 2006, 16(9): 1625-1635
- [14] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup service for internet applications[C]//Proceeding of the ACM SIGCOMM Conference, San Diego, CA, 2001: 149-160
- [15] 施冬材. 基于对等网络的语义发布/订阅系统的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007