

# PQBCF:一种基于中间中心度的机会网络 P2P 查询算法

牛建伟<sup>1</sup>,戴 彬<sup>1</sup>,孙利民<sup>2</sup>,林佳骝<sup>3</sup>,熊永平<sup>4</sup>

(1.北京航空航天大学软件开发环境国家重点实验室,北京 100191;2.中国科学院软件研究所,北京 100190;

3.卡内基梅隆大学计算机学院,宾夕法尼亚州匹兹堡 15213;4.北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室,北京 100876)

**摘 要:** 社会机会网络由人携带的带有短距离通信接口的移动设备利用人的移动形成,其数据采用“存储-携带-转发”的模式进行传输,本文针对这类网络,提出了一种基于中间中心度的 P2P 查询算法(P2P Query based on Betweenness Centrality Forwarding, PQBCF). 节点的中间中心度描述了节点在信息传输转发过程中的参与度和重要度, PQBCF 算法通过选择具有较大中间中心度的节点来实现信息的高效转发. 仿真实验表明,与目前该研究领域的 SF(Spray and Focus)等主流算法相比, PQBCF 算法能够有效提高查询成功率,并降低查询延时.

**关键词:** 机会网络; P2P 查询; 中间中心度; 社会网络; 移动设备

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1815-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.023

## PQBCF: A P2P Query Algorithm Based on Betweenness Centrality Forwarding in Opportunistic Networks

NIU Jian-wei<sup>1</sup>, DAI Bin<sup>1</sup>, SUN Li-min<sup>2</sup>, LIN Jia-liu<sup>3</sup>, XIONG Yong-ping<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Software Development Environment, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA15213, USA;

4. State Key Lab of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** With the proliferation of high-end mobile devices that feature wireless interfaces, many practical applications are enabled in opportunistic networks which comprise mobile devices. Contrary to the traditional networks, opportunistic networks utilize the mobility of nodes to relay messages based on the store-carry-forward paradigm. We propose an efficient P2P query algorithm based on betweenness centrality forwarding (PQBCF) for opportunistic networking, which adopts the metric of betweenness centrality from social network analysis to estimate the active degree of nodes in the networks. PQBCF leverages nodes with greater betweenness centrality as relays to increase query success rate and reduce query latency. Simulation results demonstrate that PQBCF outperforms most state-of-the-art algorithms and achieves approximate efficiency as epidemic with much less resource consumption.

**Key words:** opportunistic networks; P2P query; betweenness centrality; social networks; mobile devices

## 1 引言

机会网络<sup>[1]</sup>是一种延时容忍网络<sup>[2]</sup>,其源节点和目的节点之间可能不存在一条端到端的连通路路径,采用“存储—携带—转发”的消息转发模式,利用节点移动形成的相遇机会来逐跳转发数据,直至消息遇到目的节点.机会网络有许多典型应用场景,如野生动物检测网络<sup>[3]</sup>,自组车载网络<sup>[4]</sup>,移动设备自组织网络<sup>[5]</sup>等.目前机会网络中信息获取的算法大致可以分为主动扩散式算法、优先级广播算法、响应消息返回算法以及查询消

息和源消息扩散相结合的信息获取算法.

Epidemic Routing(ER)<sup>[6]</sup>是典型的消息主动扩散式算法,采用洪泛的形式在整个网络内传播消息,在实际应用中会因资源受限而阻塞. Spray and Wait(SW)<sup>[7]</sup>算法通过限制消息副本数改进了 ER 算法,避免因信道竞争冲突引起的性能下降. Spray and Focus(SF)<sup>[8]</sup>算法利用概率思想改进了 SW 算法,消息不断转发给到目标节点预测概率更高的节点,直到遇到目标节点.另外,文献[9,10]也都提出了类似的主动扩散式路由算法.

Xu 等人在文献[11]中提出了一种消息优先级广播

算法,该算法设定消息的时空优先级,限制了分发过程中消息的扩散范围及其在网络内的生存时间.卢冀<sup>[12]</sup>等人则提出了一种基于机会式网络编码的低时延广播传输算法,提升了消息分发性能.

Baldoni 等人在文献[13]中提出了一种基于内容和概率结合的响应消息返回算法,响应消息返回时,综合考虑与查询节点之间的距离和节点之间的预测相遇概率,选取消息最合适的下一跳节点.彭喜元等人在文献[14]中提出了一种多时间尺度链路估计的转发算法,进一步降低了信息延时、网络负载和带宽耗费.

Pan 等人在文献[15]中提出了查询消息和源消息扩散相结合的信息获取算法.该算法将整个查询过程比作物理学中的溶质反渗透过程,将带有 TTL(Time To Live)的查询消息进行周期性地广播扩散,形成以查询节点为中心的查询消息浓度差,响应消息则如溶剂分子一样向查询消息浓度更高的地方传播.文献[16]则提出了一种基于种子喷雾的自适应路由转发算法.

但是,以上算法较少应用于由人携带移动设备、利用人的移动形成的机会网络(以下称“社会机会网络”)中.在社会机会网络中,每个节点因社会角色不同,活跃程度不同,在移动规律上具有独特的社会属性.本文针对社会机会网络中的 P2P 信息查询服务场景,提出了一种基于节点中间中心度的消息查询算法 PQBCF(P2P Query based on Betweenness Centrality Forwarding).

## 2 基于中间中心度的 P2P 消息查询

### 2.1 节点中间中心度定义

社会网络<sup>[17,18]</sup>的中间中心度理论,通过计算一个节点落在其它任意两节点最短路径上的程度,准确刻画该节点在信息查询过程中的重要程度,描述其在整个网络数据传输中起到多大的转发作用.

将这一概念引入社会机会网络,节点  $P_i$  的中间中心度  $C_B(P_i)$  定义为:经由节点  $P_i$  转发而成功完成数据传输的次数与网络中所有成功完成数据传输的次数的比值.

### 2.2 节点中间中心度计算

节点中间中心度  $C_B(P_i)$  的具体计算过程如下: $b_{sd}(P_i)$  表示经由  $P_i$  转发的  $P_s$  和  $P_d$  之间成功完成数据传输的次数,占有所有  $P_s$  和  $P_d$  之间成功完成数据传输的次数的比值:

$$b_{sd}(P_i) = \frac{g_{sd}(P_i)}{g_{sd}} \quad (1)$$

其中,  $g_{sd}$  表示源节点  $P_s$  与目的节点  $P_d$  成功完成数据传输的总次数,  $g_{sd}(P_i)$  表示其中经由节点  $P_i$  转发完成的次数.假定网络节点总数为  $n$ ,对  $P_i$  到任意其它两节点的  $b_{sd}(P_i)$  进行求和,可计算出节点  $P_i$  的中间中

心度  $C_B(P_i)$ :

$$C_B(P_i) = \sum_{s=1, s \neq i}^n \sum_{d=1, d \neq i, d \neq s}^n b_{sd}(P_i) \quad (2)$$

对于特定节点  $P_d$ ,可计算出节点  $P_i$  对节点  $P_d$  的中间中心度  $C_{Bd}(P_i)$ :

$$C_{Bd}(P_i) = \sum_{s=1, s \neq i}^n b_{sd}(P_i) \quad (3)$$

$C_B(P_i)$ 、 $C_{Bd}(P_i)$ ,都是与网络规模有关的自然数.机会网络中,由于节点的频繁移动,节点总数并不是一个固定的值,因此需要把  $C_B(P_i)$ 、 $C_{Bd}(P_i)$  转换成与网络规模无关的比例数.本文采用社会网络中化归的方法对  $C_B(P_i)$ 、 $C_{Bd}(P_i)$  进行归一化处理:

$$C'_B(P_i) = \frac{C_B(P_i)}{\max C_B(P_i)} = \frac{C_B(P_i)}{\frac{1}{2}(n-1)(n-2)} = \frac{2C_B(P_i)}{n^2 - 3n + 2}$$

$$C'_{Bd}(P_i) = \frac{C_{Bd}(P_i)}{\max C_{Bd}(P_i)} = \frac{C_{Bd}(P_i)}{\frac{1}{2}(n-1)(n-2)} = \frac{2C_{Bd}(P_i)}{n^2 - 3n + 2} \quad (4)$$

网络中每个节点  $P_d$  都维持一张中间中心度表  $T(P_d)$ ,记录以自我节点为目的节点的所有成功查询消息的转发路径.随着节点移动和相遇,节点间不断交换和更新中间中心度表中的数据,形成数据库并计算  $C'_B(P_i)$ 、 $C'_{Bd}(P_i)$  值.

### 2.3 查询消息副本数计算

查询消息副本数  $L$  的计算基于期望查询延时和网络中节点的总数.网络内节点的总数可以通过节点  $i$  在区域内与任意其它节点相遇延时  $T_1$ ,以及与其它两个不同节点相遇延时  $T_2$  估算出.公式如下:

$$\begin{cases} T_1 = E_{Ddt}/(n-1) \\ T_2 = E_{Ddt}(\frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2}) \end{cases} \Rightarrow n = \frac{2T_2 - 3T_1}{T_2 - 2T_1} \quad (5)$$

其中,  $E_{Ddt}$  为平均传输延时期望. Spyropoulos 等人<sup>[7]</sup>研究证明,数据传输延时期望  $E_D$ 、副本数  $L$  和网络内节点总数  $n$  的关系表现为:

$$(H_n^3 - 1.2)L^3 + (H_n^2 - \frac{\pi^2}{6})L^2 + (a + \frac{2n-1}{n(n-1)})L = \frac{n}{n-1} \quad (6)$$

其中,  $H_n$  是  $n$  的谐波级数,可通过算法传输延时期望的下界  $E_{Dopt}$  计算获得.因此,可以通过实验测出  $T_1$ 、 $T_2$ ,根据式(5)计算出网络中的节点总数  $n$ ,进而根据式(6)确定消息分发副本数  $L$ .

### 2.4 消息分发与回传算法

查询消息产生后,本文基于改进二叉树的 Spread 算法分发查询消息,算法选择具有较大中间中心度的节点作为转发节点,具体步骤如图 1.

其中,  $\text{Token}(P_i)$  代表节点  $P_i$  携带的查询消息副本

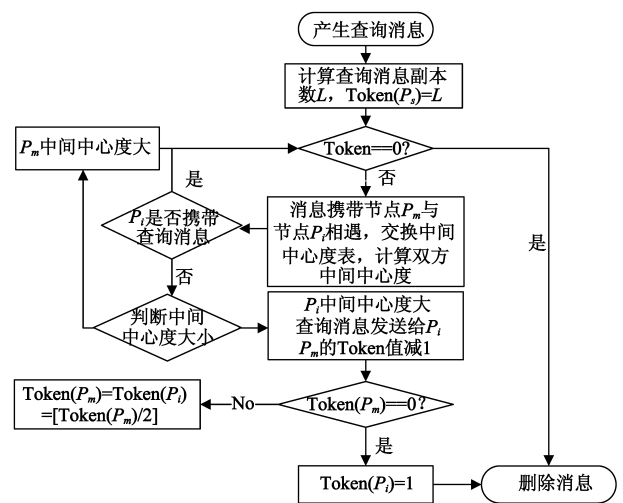


图1 查询消息Spread分发算法

数量。

响应消息回传算法同样根据与目标节点相遇概率的大小,选择转发节点,其基本框架与分发算法相同。与分发算法不同的是,响应消息有明确的唯一目的节点,因此携带响应消息的节点  $P_r$  在遇到中间节点  $P_i$  时,判断  $C_{\text{Bd}}(P_r) < C_{\text{Bd}}(P_i)$  是否成立,若成立则分发,否则不分发。

3 仿真实验

3.1 仿真环境

本文使用 Opportunistic Network Environment(ONE)<sup>[19]</sup>网络仿真系统验证分析 PQBCF 算法的性能。在仿真过程中,节点采用 Random-Walk 移动模型,每隔 15 min 计算一次  $T_1$ 、 $T_2$  值,根据式(5)计算出网络当前节点总数  $n$ ,代入式(6)确定消息分发副本数  $L$ 。ONE 仿真的其它具体参数设置如表 1 所示。

表 1 ONE 仿真系统主要参数

仿真参数	数值	仿真参数	数值
仿真时间(h)	12(ONE 内部定时)	节点最小速度(m/s)	0.5
PQBCF 学习时间(h)	3	节点最大速度(m/s)	3
移动节点数目	300,500,1000	传输距离(m)	10,30,50,75,100
节点缓存(MB)	5	传输速率(kB/s)	250
消息大小(B)	512	缓存队列模型	FIFO

3.2 实验结果

本文主要从查询成功率和查询延时两方面考察 PQBCF 算法的性能。查询成功率是指在仿真结束时,所有获得正确响应的查询消息数与所有查询消息总数之比。实验结果中的查询延时是指所有查询消息的查询

延时的平均值,对于失败的查询,其查询延时设为仿真时间的 1.5 倍,即 18h。

3.2.1 期望延时和生存期对算法性能的影响

节点在产生查询信息时,根据实时性要求,确定本次查询的期望延时  $E_D$ ,  $E_D$  设为理论最优延时  $E_{\text{Dopt}}$  的  $a$  倍,  $a$  称作期望延时系数。本组实验中,  $a$  在区间  $[1:10]$  取值。查询消息的生存期 TTL 值在区间  $[1:10]$  取值,单位为跳数。当查询消息经过 10 次转发仍未遇到能够响应的节点,最后一跳的节点就将此消息删除,以控制整个网络的负载。

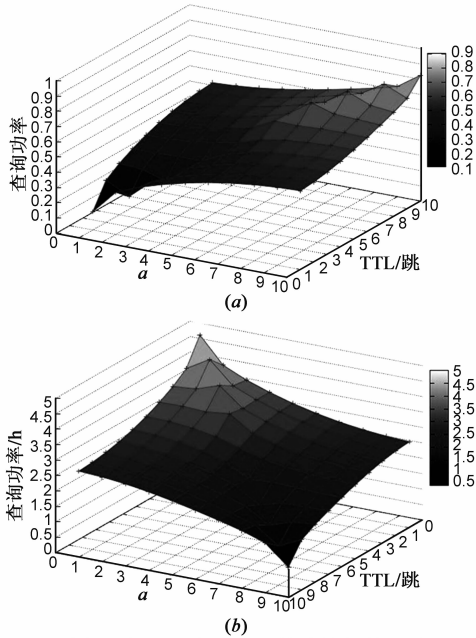


图2 和TTL对PQBCF算法性能的影响

图 2 表示节点无线信号传输半径分别为 100m 时,期望延时系数和生存期对查询性能的影响。从图 2(a) 可以看出,查询消息 TTL 值不变时,随着  $a$  值的增大,查询成功率随之提高。在  $a$  一定时,TTL 设得越大,查询成功率就越高。图 2(b) 表示 TTL 一定时,随着  $a$  的增大,算法的查询延时降低。当  $a$  一定时,TTL 值越大,查询延时越低。

在图 2 中,  $a$  值越大,意味着节点的期望查询延时越大,表明该节点对此次查询请求的内容急迫程度越低,有更多的时间来等待合适的响应消息的到来,算法的查询性能越好。同时,TTL 值如果设得过小,消息副本可能因 TTL 很快减小到 0 而被中间节点删除,导致算法的查询性能降低。

3.2.2 节点数量和节点移动速度对算法的影响

图 3 给出了网络的节点总数  $n$  和节点移动速度  $v$  对 PQBCF 算法性能的影响。实验中  $a = 6$ 。

从图 3(a) 可以看出,随着节点总数的增加,PQBCF 算法的查询成功率相应地提高。图 3(b) 表明,查询延时

随着节点总数增多而显著降低.这是因为,随着节点总数增多,按照本实验中响应消息产生的模型,能够对查询消息做出响应的节点也有所增加,提高了查询成功率,降低了传输延时.

从图 3(c)可以看出,随着节点移动速度的增加, PQBCF 算法的查询成功率也有较明显地提高.图 3(d)表明,查询延迟随着节点移动速度的提高而显著降低.这是因为随着节点移动速度的提高,节点之间的相遇频率就会提高,根据 PQBCF 的信息转发策略,查询消息

就会以更高的效率在网络中传播,使得查询成功率提高,传输延时降低.与增加节点数量的效果相比,提高节点移动速度对于 PQBCF 性能的提高更为明显.这是因为 PQBCF 算法的核心策略是基于消息转发效用,而非冗余数量,所以提高节点移动速度,进而提高消息转发效率,对于 PQBCF 算法性能的提高更加有效.图 3 同时表明,与增加 TTL 比,增加节点总数或节点移动速度带来的性能改善均不十分明显.

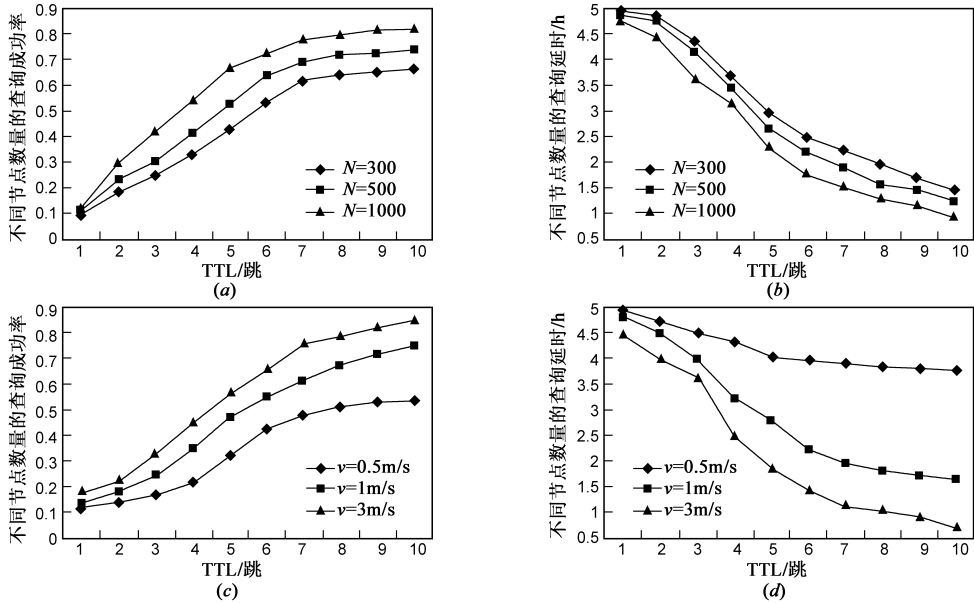


图3 节点数量和移动速度对PQBCF算法效果影响

3.2.3 算法性能对比实验

为实验 PQBCF 算法性能,本文选取 Epidemic 和 SF 算法进行对比实验. Epidemic 算法的泛洪策略在网络资源不受限时可以标示该类算法的极限效果. SF 算法则使用与 PQBCF 算法相同的消息副本数  $L$ ,并将  $L$  份消息转发给那些与目标节点相遇概率较大的节点. PQBCF 算法与 SF 算法主要不同之处是利用节点的中间中心度作为转发决策的依据.

图 4(a)表示随着 TTL 增大,各算法的查询成功率都有不同程度的提高.在假定网络资源不受限制条件

下, Epidemic 算法查询成功率最高,但 PQBCF 算法与其差距并不是很明显.而对比 SF 算法,在 TTL 大于 6 以后, PQBCF 算法的查询成功率明显高于 SF 算法.这是因为, SF 算法的转发策略只能粗粒度地预计提高信息到达概率的路径,而不能准确预测信息成功到达的最优路径.因此,当信息生存时间变大时, SF 算法中的信息副本虽然能够不断地被转发给与目标节点相遇概率更大的节点.但是,与 PQBCF 算法不同,无法找到全局最优的转发节点.

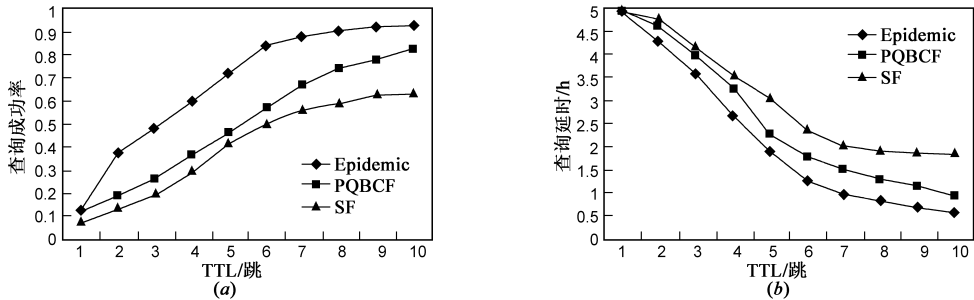


图4 不同TTL情况下PQBCF算法与Epidemic算法、SF算法的性能比较

图 4(b)表示,随着 TTL 值增大,各个算法的平均查询延时都有不同程度的降低.因为如果 TTL 较小,则查询消息或者是过早的被中间节点丢弃或者是被某些节点长时间携带而没有被转发导致查询失败.失败的查询消息以 18h 计入到平均查询延时中,使得平均查询延迟增大.随着期望延时的增加,查询成功率增加,新增的成功查询会使查询延时由 18h 缩短为实际查询时间(不超过 12h),平均查询延时也会随之减小.PQBCF 算法的查询延时介于 SW 算法和 Epidemic 算法的查询延迟之间.

## 4 结论

本文针对社会机会网络,提出了一种基于节点中间中心度的信息查询算法 PQBCF.算法引入了社会网络中的中间中心度,准确描述了各节点在数据传输中所起到的转发作用,并通过选择那些对传输数据起关键作用、具有较大中间中心度值的节点,来实现查询消息和响应消息的高效转发.仿真实验表明,与目前该领域主流算法相比,PQBCF 算法能够有效提高查询成功率,并降低查询延时.

## 参考文献

- [1] 熊永平,孙利民,牛建伟,等.机会网络[J].软件学报,2009,20(1):124-137.  
Xiong Yong-ping, Sun Li-min, Niu Jian-wei, et al. Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1): 124-137. (in Chinese)
- [2] K Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[A]. Proceedings of 2003 Conference on Application, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications[C]. New York: ACM, 2003. 27-34.
- [3] P Juang, H Oki, Y Wang, et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: Design tradeoffs and early experiences with ZebraNet[A]. Proceedings of the 10th ASPLOS[C]. New York: ACM, 2002. 96-107.
- [4] B Hull, V Bychkovsky, Y Zhang, et al. CarTel: A distributed mobile sensor computing system[A]. Proceedings of the 4th Int'l Conf on Embedded Networked Sensor Systems[C]. New York: ACM, 2006. 125-138.
- [5] H Pan, A Chaintreau, J Scott, et al. Pocket switched networks and human mobility in conference environments[A]. Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking[C]. New York: ACM, 2005. 244-251.
- [6] A Vahdat, D Becker. Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks, CS-2000-06[R]. Durham: Department of Computer Science, Duke University, 2000.
- [7] T Spyropoulos, K Psounis, C S Raghavendra. Spray and wait;

- An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks[A]. Proceedings of ACM SIGCOMM workshop on Delay Tolerant Networking(WDTN)[C]. New York: ACM, 2005. 252-259.
- [8] T Spyropoulos, K Psounis, C S Raghavendra. Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility[A]. Proceedings of the IEEE PerCom Workshop on Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks[C]. New Jersey: IEEE, 2007. 79-85.
  - [9] 霍广城,王晓东.移动传感网中一种基于 RSSI 的机会主义路由设计[J].电子学报,2009,37(3):608-613.  
Huo Guang-cheng, Wang Xiao-dong. An opportunistic routing for mobile wireless sensor networks based on RSSI[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 608-613. (in Chinese)
  - [10] A Lindgren, A Doria, O Schelén. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2003, 7(3): 19-20.
  - [11] B Xu, A Ouksel, O Wolfson. Opportunistic resource exchange in inter-vehicle ad-hoc networks[A]. Proceedings of Mobile Data Management IEEE International Conference[C]. New Jersey: IEEE, 2004. 4-12.
  - [12] 卢翼,肖嵩,吴成柯.基于机会式网络编码的低时延广播传输算法[J].电子学报,2011,39(5):1214-1219.  
Lu Yi, Xiao Song, Wu Cheng-ke. Opportunistic network coding based delay sensitive broadcast transmission algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1214-1219. (in Chinese)
  - [13] R Baldoni, R Beraldi, M Migliavacca, et al. Content-based routing in highly dynamic mobile ad hoc networks[J]. International Journal of Pervasive Computing and Communications, 2005, 1(4): 277-288.
  - [14] 彭喜元,潘大为,彭宇.无线传感器网络多时间尺度链路估计算法研究[J].电子学报,2011,39(3A):80-85.  
Peng Xi-yuan, Pan Da-wei, Peng Yu. On multiple time scales link estimation in wireless sensor network[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3A): 80-85. (in Chinese)
  - [15] H Pan, J Leguay, J Crowcroft, et al. Osmosis in pocket switched networks[A]. Proceedings of the First International Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM 2006)[C]. New Jersey: IEEE, 2006. 1-6.
  - [16] 徐佳,孙力娟,王汝传,等.机会网络中基于种子喷雾的自适应路由协议[J].电子学报,2010,38(10):2315-2321.  
Xu Jia, Sun Li-juan, Wang Ru-chuan, et al. Adaptive seed spray routing for opportunistic networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2315-2321. (in Chinese)
  - [17] L C Freeman. Centrality in social networks; Conceptual clarification[J]. Social Networks, 1978, 1(3): 215-239.

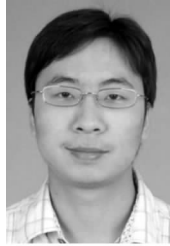
- [18] L A Adamic, A Eytan. Friends and neighbors on the web[J]. Social Networks, 2003, 25(3): 211 – 230.
- [19] A Keränen. Opportunistic Network Environment Simulator [R]. Helsinki: Department of Communications and Networking, Helsinki University of Technology, May 2008.

#### 作者简介



**牛建伟** 男, 1969 年 7 月出生于河南. 博士, 现为北京航空航天大学计算机学院教授, CCF 高级会员, 主要研究方向为嵌入式与移动计算.

E-mail: niujianwei@buaa.edu.cn



**戴 彬** 男, 1987 年 3 月出生于天津. 2013 年毕业于北京航空航天大学计算机学院. 现为北京航空航天大学教师, 主要研究方向为机会网络和社会网络计算.

E-mail: daibin\_buaa@hotmail.com

**孙利民** 男, 1966 年出生于河南, 博士, 中国科学院软件所研究员, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究领域为无线传感器网络, 无线接入网和多媒体技术.

**林佳骝** 女, 1985 年出生于江苏, 美国卡内基梅隆大学计算机学院博士研究生, 主要研究领域为移动和普适计算.

**熊永平** 男, 1982 年出生于江西, 博士, CCF 会员, 主要研究领域为移动感知网络, 机会组网和无线传感网.