文章编号：2095-4980(2014)01-0062-05

基于连接质量和节点相关度的机会网络路由

李永涛[1,2]，竺小松[1]，敦　鹏[1]

(1.电子工程学院，安徽 合肥 230037；2.中国人民解放军 63871 部队，陕西 华阴 714200)

摘　要：提出利用连接质量估计节点间消息成功转发的概率，并证明了节点间相关度越高，消息转发率越高。在此基础上，提出基于连接质量和节点相关度的机会网络路由机制。路由计算节点转发效用值时，综合了连接质量和节点相关度；消息转发时，不断向相对于目的节点转发效用值高的节点转发消息。仿真结果表明，与传统路由相比，在消息送达率相同的前提下，该路由消息延迟更小、消耗的总能量更少。

关键词：机会网络；连接质量；节点相关度；转发效用

中图分类号：TN915.05；TP393　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201401.0062

Opportunistic network routing based on link quality and nodes similarity

LI Yong-tao[1,2]，ZHU Xiao-song[1]，DUN Peng[1]

(1.Electronic Engineering Institute，Hefei Anhui 230037，China；2.The Unit 63871 of PLA，Huayin Shaanxi 714200，China)

Abstract：A new concept called link quality is used to estimate the delivery probability between nodes. It is also proved that the higher the node similarity is, the higher the messages forwarding rate becomes. And then, the opportunistic network routing based on Link Quality and Nodes Similarity(LQ-NS) is proposed, and the message delivery utility is calculated with LQ-NS. The messages are continually forwarded to the nodes with higher utility relative to the destination nodes. Simulation results show that the LQ-NS routing has significantly reduced the message delay and total energy consumption compared to traditional Epidemic and Probabilistic Routing Protocol using History of Encounters and Transitivity(PRoPHET).

Key words：opportunistic network；link quality；nodes similarity；forwarding utility

实际自组织网络应用中，节点移动、节点稀疏、射频关闭或障碍物造成信号衰减等都可能导致网络不能连通。这种网络环境中，传统的 MANET(Mobile Ad Hoc Network)[1-2]通信模式无法有效运行。机会网络是一种不需要源节点和目的节点之间存在完整路径，利用节点移动带来的相遇机会实现网络通信的、时延和分裂可容忍的自组织网络。机会网络采用“存储—携带—转发”的路由思想，更适合实际自组网需求，近年来得到广泛研究。

许多机会网络路由，如 Epidemic[3],PRoPHET[4],CAR[5]，都将节点间的历史相遇次数作为转发节点的选择依据，均假设：一旦两节点相遇，消息就能够被成功传递，即通信成功率是 100%，但在实际网络中难以得到保证。当节点之间有大量消息需要交换，链路带宽不够理想，链路中断频繁，而节点之间相遇持续的时间又较短时，这些消息便无法成功传递。因此，在选择转发节点时，必须考虑节点间连接的持续时间，避免消息发送过程中因连接突然中断导致消息发送失败。研究发现，机会网络中节点的社会性反映了节点在网络中的重要性、传播能力以及节点间的传递性关系[6]。设计机会网络时考虑节点间存在的社会关系，对提高消息转发效率有重要意义。

本文提出基于连接质量和节点相关度的机会网络路由，综合考虑相遇次数和连接时长 2 种历史相遇信息，提出连接质量的概念，连接质量高的节点，在消息转发过程中因连接中断导致的发送失败概率小。同时证明了相关度强的节点间具有更高的消息转发效率，在计算消息转发效用时，将节点质量和节点相关度作为转发效用的评价依据。

1　路由实现

LQ-NS 路由机制根据节点间连接质量和节点相关度估算节点的转发效用值，作为路由决策的主要依据。

收稿日期：2012-10-15；修回日期：2012-11-23

1.1 连接质量

连接次数和连接持续时间与消息转发率密切相关。节点间连接次数越多，消息被转发的概率越高；连接持续时间越长，消息传输的中断概率就越小。因此，单纯考虑连接次数或连接时长都不能完全反映节点间的连接关系[7]。综合考虑连接时间和连接次数 2 种连接属性，本文提出连接质量的概念，用一个窗口期内平均最长连接持续时间占窗口期长度的百分比来衡量节点质量。

每个节点保存节点连接向量(Links Vector，LV)列表，记录最近窗口期 T_{w} 内连接中断次数和最长连接时长。连接向量表示为：

$$\boldsymbol{LV}_{ij}=\{t_{(i,j)\mathrm{start}},t_{(i,j)\mathrm{end}},l\} \tag{1}$$

式中：$t_{(i,j)\mathrm{end}}-t_{(i,j)\mathrm{start}}=\max\limits_{0<k\leqslant l}\{t^{k}_{(i,j)\mathrm{end}}-t^{k}_{(i,j)\mathrm{start}}\}$；$l$ 为节点 i,j 在 T_{w} 内连接的中断次数；$t^{k}_{(i,j)\mathrm{start}}$，$t^{k}_{(i,j)\mathrm{end}}$ 分别为第 k 次连接的建立时间和中断时间。

由本地连接向量表 $\boldsymbol{LV}$，可计算连接质量矩阵 $\boldsymbol{Q}=\left[q_{ij}\right]_{n\times n}$。假设节点感知连接的能力相同，节点 i 与节点 j 连接时，节点 j 也可感知到与节点 i 的连接，则 $\boldsymbol{Q}$ 为对称矩阵。n 是曾与节点 i 形成连接的节点总数。矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 的元素 q_{ij} 定义为节点 i,j 在 T_{w} 内的连接质量，则有：

$$q_{ij}=\begin{cases}\dfrac{1}{T_{\mathrm{w}}}\left\{\dfrac{1}{l}\max\limits_{0<k\leqslant l}[t^{k}_{(i,j)\mathrm{end}}-t^{k}_{(i,j)\mathrm{start}}]\right\} & l>0\\ 0 & l=0\end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可知，在时间窗口 T_{w} 内节点间连接中断次数越少，连接的维持时间越长，则连接的质量越好，消息在节点间成功传达的可能性越大。反之，节点间消息成功传达的机会越小。

如果节点间长时间没有建立连接，则节点间的连接质量会随时间呈现指数衰减[8]。衰减过程如下：

$$q_{ij}=q_{ij}\gamma^{T_{\mathrm{w}}} \tag{3}$$

式中 γ 为时变衰减因子。

$$\therefore\ q_{ij}=(1-\beta)q_{(ij)_{\mathrm{old}}}\gamma^{T_{\mathrm{w}}}+\beta q_{(ij)_{\mathrm{new}}}\qquad \beta\in(0,1) \tag{4}$$

式中：$q_{(ij)_{\mathrm{old}}}$ 是历史连接质量；$q_{(ij)_{\mathrm{new}}}$ 表示根据当前 T_{w} 内连接情况计算的新的连接质量；时变衰减因子 γ 的取值与当前的通信环境有关；β 反映了历史连接质量对连接质量预测的贡献程度。当连续 n 个 T_{w} 内 q_{ij} 值波动较大时，表明 i,j 连接变化剧烈，则 $q_{(ij)_{\mathrm{old}}}$ 值对 q_{ij} 连接质量的预测参考意义不大，$q_{(ij)_{\mathrm{new}}}$ 应该具有更大价值。总之，连续 n 个 T_{w} 内连接质量值的方差在一定程度上反映了历史连接质量对连接质量计算的参考程度，有：$\beta\propto\dfrac{1}{E[\overline{\boldsymbol{Q}}]}\mathrm{Var}[\overline{\boldsymbol{Q}}]$。其中，$\overline{\boldsymbol{Q}}$ 为连续 n 个 T_{w} 内连接质量值构成的向量，$\overline{\boldsymbol{Q}}=[q^{1}_{ij},q^{2}_{ij},\cdots,q^{n}_{ij}]$，$E[\overline{\boldsymbol{Q}}]=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{k=1}^{n}q^{k}_{ij}$，$\mathrm{Var}[\overline{\boldsymbol{Q}}]=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{k=1}^{n}\left\{q^{k}_{ij}-E[\overline{\boldsymbol{Q}}]\right\}^{2}$。

1.2 节点相关度

节点对之间公有的邻居节点数多少称为节点相关度。节点间相关度越高，说明这 2 个节点之间的相遇机会通过公有邻居节点的传递性越高，即通过节点间间接连接完成消息转发的概率越高。

$$Sim(i,j)=\left|N(i)\cap N(j)\right|=\left|\{i\mid q_{ij}\neq 0,i\in N^{*}\}\cap\{j\mid q_{ij}\neq 0,j\in N^{*}\}\right| \tag{5}$$

式中 $N(i)$ 为节点 i 的邻节点集合。节点 i,j 互为邻节点，$i\in N(j),j\in N(i)$ 时，称节点 i,j 存在直接连接；若 $Sim(i,j)>0$，则称节点 i,j 存在间接连接。此时，即使 i,j 间不直接相遇，仍可能通过公共的中继节点完成转发。

下面证明：相关度越高，节点间的消息转发率越高。

记节点 i,j 间稳定邻节点集合为 S，则 $S=\{k\mid k\in\{N(i)\cap N(j)\}\}$。

若 $sim(i,j)=N$，i,j 间间接通信连接集合表示为：$\{l_n\mid l_n=i\leftrightarrow k_n\leftrightarrow j,n=1,2,\cdots,N\}$；记 i,j 间直接通信连接为 $l_0=i\leftrightarrow j$，则 i,j 间全部通信连接集合为：$\{l_n\mid l_n=i\leftrightarrow k_n\leftrightarrow j,n=0,1,\cdots,N\}$。将消息 m 通过路径 l_n 由节点 i 转发至节点 j(或由节点 j 转发至节点 i)的概率记为 $p^{m}_{ij}(l_n)$，则消息 m 由节点 i 转发至节点 j(或由节点 j 转发至节点 i)的概率 $p^{m}_{ij}=\sum\limits_{n=0}^{N}p^{m}_{ij}(l_n)$。

$\because\ p_{ij}^m(l_n) \geqslant 0, n = 1,2,\cdots,N$ ，$\therefore p_{ij}^m = \sum_{n=0}^{N} p_{ij}^m(l_n) = p_{ij}^m(l_0) + \sum_{n=1}^{N} p_{ij}^m(l_n) \geqslant p_{ij}^m(l_0)$

若 $sim(i,j) > 0$，则有 $\sum_{n=1}^{N} p_{ij}^m(l_n) > 0$，此时有 $p_{ij}^m = p_{ij}^m(l_0) + \sum_{n=1}^{N} p_{ij}^m(l_n) > p_{ij}^m(l_0)$。

因此，相关度可以提高节点的消息转发率，且相关度越高，节点间的消息转发率越高。

1.3 转发效用值

转发效用值是节点间消息转发的可达性的度量，值越大，消息在节点间传输成功的可能性越大。

节点相关度增加的效用值是由节点间公共邻节点形成的间接通信连接带来的。以公共邻节点作为中继节点，节点 i,j 间可形成 $Sim(i,j)$ 条间接通信连接，记 i,j 间以公共邻节点 k 作为中继节点形成的路径效用值为 $s_{ij}(k)$。

如图 1 所示，节点 i,j 间的间接通信连接 l_{ij} 通过节点 k 形成，路径 l_{ij} 的稳定性与节点 i 和 k 间、k 和 j 间链路的稳定度都有关。若其中某一链路断开，则意味着整个路径的失效。因此，间接路径的效用值可根据最弱链路准则[9]得到，即有：

$$s_{ij}(k) = \min\left\{q_{ik}, q_{kj} \mid k \in N(i) \cap N(j)\right\} \tag{6}$$

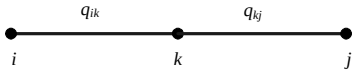


Fig.1 Indirect communication link

图1 间接通信连接

因此，节点 i,j 间间接连接效用值为：

$$d_{ij} = \sum_{k \in N(i) \cap N(j)} s_{ij}(k) \tag{7}$$

显然，除节点间的间接连接外，节点间的直接连接也可提高转发效用，记节点 i,j 直接连接效用值为 $s_{ij}(0)$，则 i,j 间转发效用值矩阵可表示为 $\boldsymbol{U} = \left[u_{ij}\right]_{n \times n}$。

$$u_{ij} = \sum_{k \in N(i) \cap N(j)} s_{ij}(k) + s_{ij}(0) \tag{8}$$

式中 $s_{ij}(0) = \begin{cases} q_{ij} & i \in N(j) \text{ and } j \in N(i) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$。

1.4 路由机制实现

假设节点 i 携带消息，消息目的节点用符号 r 表示。i 与 j 相遇时，i 执行的消息转发流程如下：

Step 1：节点 i 向 j 发送消息目的节点为 j 的消息，记录其 ID 并将消息副本从缓存中删除。

Step 2：与 j 交换连接向量 $\boldsymbol{LV}$，节点 i,j 按更新后的连接关系矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 重新计算转发效用矩阵 $\boldsymbol{U}$，挑选出符合条件 $d_{ir} < d_{jr}$ 的消息，将消息 ID 汇总成向量 $\boldsymbol{SV}_m$，向 j 发送。

Step 3：节点 j 接收到 $\boldsymbol{SV}_m$ 向量后，从 $\boldsymbol{SV}_m$ 中删除其与缓存消息对应的 ID，并发回 i。

Step 4；节点 i 接收到 j 返回的 $\boldsymbol{SV}_m$ 后，将 $\boldsymbol{SV}_m$ 表示的消息按 d_{jr} 从大到小排队，组成消息队列 L_m。

Step 5：若 L_m 为空，则转发结束，等待与新节点相遇，转 Step 1；否则转 Step 6。

Step 6：把消息转发给 j，并将其从队列 L_m 和缓存中删除，转 Step 5。

2 仿真分析

本文使用开源仿真工具 THE ONE[10]对提出的路由算法进行仿真。仿真场景的大小为 4 500 m × 3 400 m。场景内有三类节点 200 个，节点模拟行人、出租车、有轨电车的运动。数据包产生间隔为 35 s~45 s，数据包大小为 300 KB~500 KB。

实验中将 LQ-NS 路由、PRoPHET 路由与 Epidemic 路由从送达消息数目、消息延迟、消息平均路径长度和网络中消息副本数等几方面进行比较。消息平均路径长度是指成功送达一条消息，网络中参与转发消息的节点总数。转发消息需要消耗节点能量，因而该指标一定程定上反映了路由机制的能量消耗状况；消息副本数是指成功送达消息时，在网络中存在的消息副本总数，它反映了路由机制对网络资源的占用程度。

从图 2 和图 3 可以看出，Epidemic 路由无论是送达率或消息延迟都优于其他路由，而 LQ-NS 路由虽在送达率上略逊于 PRoPHET，但其却能以较小的消息延迟将消息送达目的节点。图 4 反映了节点接触次数和消息平均

路径长度的关系，PRoPHET 路由消息路径最长，LQ-NS 次之，而 Epidemic 路径最短，即 LQ-NS 路由节点消耗的总能量要少于 PRoPHET 路由。图 5 反映了网络中消息副本数和节点接触次数的关系，由于 PRoPHET, LQ-NS 都是单副本路由协议，而 Epidemic 是多副本路由协议，因而在网络资源的占用上，PRoPHET,LQ-NS 明显优于 Epidemic 路由。再考虑节点总能量消耗和网络资源的占用情况，则 LQ-NS 路由机制性能更优。

综合图 2~图 5 可见，LQ-NS 路由取得与 PRoPHET 路由相当的送达率时，在消息延迟、能量消耗及网络资源占用等方面的性能优于 PRoPHET 路由机制。

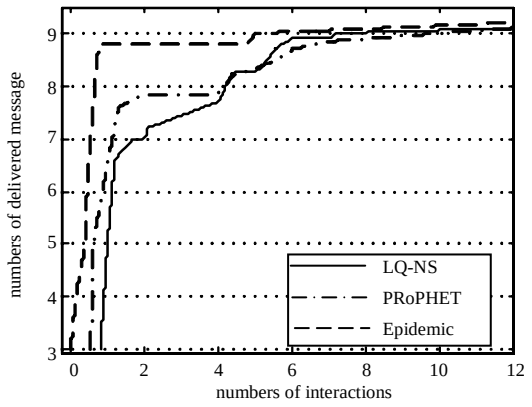


Fig.2 Total number of messages delivered
图 2 送达的消息总数

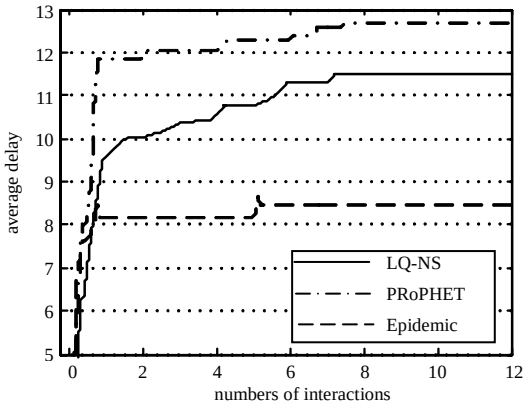


Fig.3 Average message delay
图 3 平均消息延迟

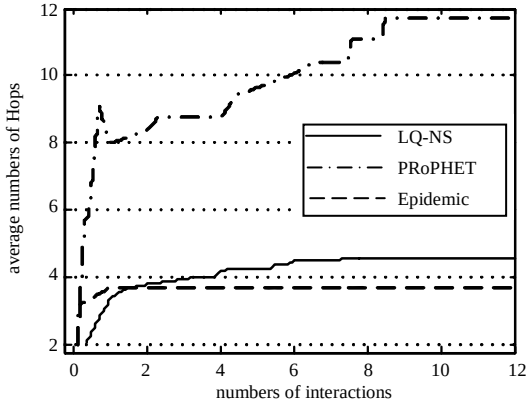


Fig.4 Average length of the forwarding path
图 4 平均转发路径长度

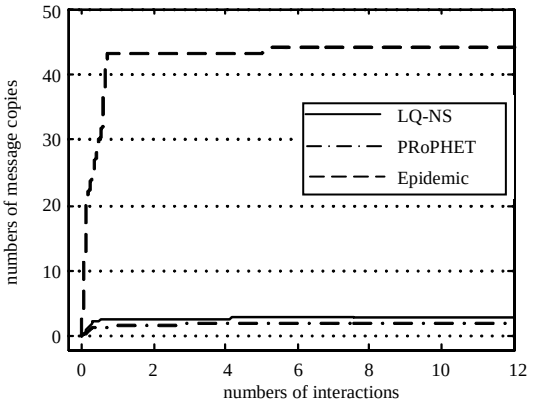


Fig.5 Total number of message copies
图 5 网络中消息副本数

3　结论

本文提出了一种基于连接质量和节点相关度的机会网络路由机制：综合节点间连接时长和连接次数，提出连接质量的概念，使其更客观地反映消息转发成功的概率；借鉴人类社会性引入节点相关度的概念，证明了相关度越高的节点间消息送达率越高。综合连接质量和节点相关度给出了消息转发效用的计算方法，仿真实验证明了该路由机制的有效性和优势。

参考文献：

[1] 周旋,王忠,朱庆. Ad Hoc网络中拓扑结构对路由协议性能的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2007,5(5):377–381. (ZHOU Xuan,WANG Zhong,ZHU Qing. The Impact of Network Topology on the Routing Protocols of Ad Hoc Network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2007,5(5):377–381.)

[2] 孟昊,钟章队,艾渤. Ad Hoc 网络路由协议研究及其性能比较[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009,7(2):151–155. (MENG Hao,ZHONG Zhangdui,AI Bo. Performance Comparison and Evaluation of the Routing Protocols in Ad Hoc Network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009,7(2):151–155.)

[3] Amin Vahdat,David Becker. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks[R]. Technique Report,CS–2000–06, Department of Computer Science,Duke University, 2000.

[4] Anders Lindgren,Avri Doria,Olov Schelen. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. ACM SIGMOBILE Mob. Comput. And Commun. Rev., 2003,7(3):19–20.

[5] Musolesi M,Mascolo C. CAR:Context-Aware Adaptive Routing for Delay-Tolerant Mobile Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009,8(2):246–260.

[6] 刘耀,王建新,黄元南. 延迟容忍网络中基于社会属性的负载感知路由[J]. 系统工程与电子技术, 2012,34(1):185–190. (LIU Yao,WANG Jianxin,HUANG Yuannan. Social-based load aware routing in delay tolerant networks[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012,34(1):185–190.)

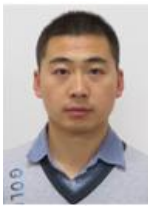
[7] 李陟,查玄阅,刘凤玉,等. 公交时延容忍网络中基于索引的多级分组路由算法[J]. 计算机研究与发展, 2011,48(3):407–414. (LI Zhi,ZHA Xuanyue,LIU Fengyu,et al. Indexing Based Multi-Level Clustering Routing Algorithm in Public Transportation Delay Tolerant Networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011,48(3):407–414.)

[8] 覃少华,黄勇萍,叶佳宁,等. 一种新的效用冗余混合DTN路由算法[J]. 计算机工程, 2011,37(4):90–92. (QIN Shaohua, HUANG Yongping,YE Jianing,et al. Novel Utility and Redundancy Hybrid DTN Routing Algorithm[J]. Computer Engineering, 2011,37(4):90–92.)

[9] Abhyankar S,Agrawal D P. Distributed mobility-aware route selection for wireless ad hoc networks[C]// Proceedings of the 2002 21st IEEE International Conference on Performance,Computing,and Communications. Phoenix,AZ:[s.n.], 2002:241–247.

[10] Ari Keränen,JörgOtt,TeemuKärkkäinen. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. Rome,Italy:[s.n.], 2009:1–10.

作者简介:



李永涛(1988–),男,陕西省咸阳市人,硕士,主要研究领域为无线传感器网络、机会网络等.email:670183218@qq.com.

竺小松(1963–),男,浙江省定海县人,教授,主要研究领域为系统集成与电子设计自动化.

敦 鹏(1988–),男,辽宁省阜新市人,硕士,主要研究领域为数字信号处理.