

节点中心度感知的延迟容忍网络路由机制

熊余*, 王金拓, 张洪沛, 张若英

(重庆邮电大学 宽带泛在接入技术研究所, 重庆 400065)

(*通信作者电子邮箱 wangjintuo@aliyun.com)

摘要:为实现在具有社会特征的延迟容忍网络中消息的高效转发,提出了节点中心度感知方法,通过综合分析节点的活跃程度与消息处理能力来量化节点的中心性,进而提出了节点中心度感知的路由机制。与经典的 Epidemic 和同是基于节点中心度的 CC 路由机制的对比结果表明,所提出的路由机制能够较为显著地改善消息的投递率和负载率。

关键词:延迟容忍网络;路由机制;中心度;活跃度;消息处理能力

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Node centralities-aware routing in delay tolerant network

XIONG Yu*, WANG Jintuo, ZHANG Hongpei, ZHANG Ruoying

(Broadband Ubiquitous Network Research Laboratory, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to forward messages more efficiently in the social oriented Delay Tolerant Network (DTN), this paper proposed a way to be aware of nodes' centralities. This paper came up with a routing mechanism for the awareness of nodes' centralities through a comprehensive analysis of the level of activity and the capacity of handling messages which aimed at quantifying the nodes' centralities. The result shows that compared with the traditional Epidemic routing and Contact Counts (CC) routing which principle is still based on nodes' centrality, the routing mechanism this paper discussed can significantly improve the rate of the message delivery and the rate of the overhead.

Key words: Delay Tolerant Network (DTN); routing mechanism; centrality; active level; message handling capacity

0 引言

受节点移动、能量消耗以及传输范围等因素的限制,网络中常无法建立有效的端到端传输路径,致使传统的网络协议无法使用。在这种背景下, Fall 等研究人员于 2002 年首次提出了延迟容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN)^[1-3]的概念。DTN 中节点通过“储存—携带—转发”模式来实现消息的传输,成功克服了网络中不存在完整端到端路径的缺陷。经过对达特茅斯学院(从 2001 年至 2004 年)在校生的日常起居生活以及在迈阿密(2005 年)与巴塞罗那(2006 年)召开的 Infocom 会议等实际测量数据的统计与分析可以得出,DTN 中节点的运动呈现出社会网络学中的大世界、小世界特征。同时,节点的社会等级也有所不同,网络中存在一定数量的活跃节点,即对其他节点来说具有较高社会等级^[4-6]。

可见,对于连接具有间断特性、节点分布较为稀疏的 DTN 来说,路由机制直接决定了网络性能。根据传输过程中消息产生的副本数量,现有路由机制可分为单副本路由和多副本路由。因受 DTN 通信链路间断性连接所限,消息的传输常表现出低投递率与高时延的特点。多副本路由通过增加消息的副本数量来提高投递率并减少传输消息的时延,因此其受到了广泛关注。由 Vahdat 等^[7]提出的传染路由(Epidemic Routing)是其他多副本路由机制的初始版本。其采用洪泛的方式转发消息,此种机制的缺点较为明显,消息传输过程中消

耗的网络资源较多。过多的消息副本致使网络资源不能够合理分配,从而导致其投递率偏低。为了克服传染路由上述的不足之处,研究人员以节点的社会属性为依据,提出了多种限制消息副本数量的方法,如连接累加概率路由(Cumulative Contact Probability, CCP)^[8]、基于节点相似度与中介性(Similar and Betweenness, SimBet)路由^[9]、消息冗余度估计(Message Redundancy estimated Adaptive Cache Management mechanism, MRACM)路由^[10]、基于社会属性的冒泡法(Bubble Rap)路由^[4]、连接次数统计(Contact Counts, CC)路由^[11]以及连接态势感知(Connection Status Aware Message Transmission, CSAMT)路由^[12]等。

CC 路由的基本思想是节点在运行过程中,通过累加与其他节点的连接次数来判定自身中心度。中心度越高的节点在网络中的重要程度越高。当两节点相遇时,消息携带节点将副本转发给中心度较高的节点。文献[11]认为,具有较高活跃度的节点会以更大的概率与其他节点相遇,因此具有较高的中心度。然而,在实际网络中,节点对消息的处理能力有着较大差异,活跃度较高的节点未必对消息有着较高的处理能力,若将消息传输给处理能力较低的节点,则消息将被大量丢弃,从而导致投递率偏低。

针对上述不足之处,本文提出一种节点中心度感知方法,通过综合分析节点的活跃度和消息的处理能力,准确地评估节点在网络中的重要程度,从而合理地选择消息转发过程中的中

收稿日期:2013-08-07;修回日期:2013-10-17。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001105, 60972069)。

作者简介:熊余(1982-),男,四川资中人,副研究员,博士研究生,CCF 会员,主要研究方向:宽带网络可靠性理论及抗毁技术;王金拓(1988-),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,主要研究方向:机会网络;张洪沛(1988-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向:机会网络;张若英(1976-),女,吉林吉林人,副研究员,博士,主要研究方向:网络管理、通信软件。

继节点,达到提高网络资源利用率、改善网络性能的目的。

1 节点中心度感知路由

中心程度较高的节点所携带的消息将在较短时间内蔓延到整个网络之中^[13],因此,节点中心度越高就意味其转发消息所耗费的时间和开销越少;另一方面,节点的资源有限,活跃度较高节点缓存资源消耗速度较快,使其无法对接收到的消息进行缓存并有效处理,从而使大量消息丢弃。因此,在节点中心度估计的过程中,需综合分析节点的活跃度和消息处理能力来估计节点的中心度。

1.1 节点中心度感知

给定节点与网络中其他节点相遇次数可以衡量节点的活跃度(Activity Level),但根据社会网络理论可知,网络中存在一部分节点,它们具有较强的移动能力,但活动意愿却较低。该类节点会在网络中进行爆发式运动,即在短时间内与多个节点产生大量连接,但其长期的低活动意愿对网络通信却没有起到关键作用,因此,单纯地使用连接次数来感知节点中心度并不准确。在给定时间内,若连接次数相同时,连接规律性越强的两节点间具有更紧密的联系。因此,在考虑连接次数的同时,还要对与其他节点相遇的稳定性进行度量。为了能够准确估量节点的活跃度,本文将节点的活跃度公式定义为:

$$AL = T / \sum_{x=0}^M f(x)^2 \quad (1)$$

其中: $f(x) = t_{next} - t_{last}$ 为相遇节点的相遇间隔时间, t_{last} 为节点遇到前一节点的时间, t_{next} 为遇到下一节点的时间,若间隔时间越小, $\sum_{x=0}^M f(x)^2$ 也就越小,从而 AL 值就越大。因此,当节点与其他节点相遇时间间隔越短,且对应的相遇时间间隔方差越小时, $\sum_{x=0}^M f(x)^2$ 的累加速度越缓慢,则该节点在网络中具有较高的活跃度。

另一方面,节点对消息的处理能力(Message Handling Capacity)可由其在单位时间内协助其他节点投递的消息数量来衡量。因此,节点的消息处理能力如式(2)所示:

$$MHC = M_h / h \quad (2)$$

其中: h 是指以小时为单位的当前时间, M_h 为在 h 时间内节点成功转发的消息个数。 MHC 值越大,说明节点协助其他节点转发的信息能力越强,从而使得网络负载越低。

为了使得所提出的节点中心度估计方法能够适应多种网络场景,本文分别为上述两种因素定义了权重因子 α, β ,且二者满足式(3)所示的归一化条件:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (3)$$

因此,节点的中心度程度量化方法如式(4)所示:

$$NC = \alpha AL + \beta MHC \quad (4)$$

1.2 节点中心度感知路由机制

具有更高中心度的节点对保持网络的连通性与消息的传输具有更大的作用。本文提出的节点中心度感知路由机制(Node Centrality, NC-DTN)对消息的传输与否进行了一定条件下的限制,节点只有遇到比自身中心度更高的节点才传输消息;使得节点不仅能够合理地进行消息分配,同时可以减少网络能耗与开销。

设消息 m 的目的节点为 d ,若节点 i 携带着消息 m 与节点 j 相遇。此时,节点 i 判断是否将消息 m 传输给节点 j 的方法如下:1)若节点 j 即为目的节点 d ,节点 i 直接将消息 m 传输给节

点 j ,同时节点 i 删除自身缓存上的消息 m ,以便参与网络其他消息的传输。2)若节点 j 不是目的节点 d ,节点 i 向节点 j 发送询问,以获取 j 的 NC 值,从而比较两节点的 NC 值。若 $NC_i < NC_j$ 时,说明节点 j 比 i 具有更高的中心度,则 i 将消息 m 传输给 j ,即有更高的传输能力将 m 送达到目的节点 d 。3)若 j 不是目的节点 d ,同时 $NC_i > NC_j$ 时,节点 i 不发送消息 m ,因为节点 i 自身将消息传输给目的节点 d 的能力更高。4)当 j 不是目的节点 d ,且 $NC_i = NC_j$ 时,两节点的传输能力相同,为了降低负载率,节点 i 继续携带消息 m 。5)每一次传输消息前,都需询问所遇节点是否曾收到过相同消息,若所遇节点曾接收过相同消息,则无需进行传输,以此来控制消息副本在网络中的数量。

NC-DTN路由机制的伪代码如下所示:

```
Node i encounter Node j;           // 节点 i 与节点 j 相遇
While connection is up           // 建立连接
{
    if (HasDirectMessage = 1)
    {
        SendDirectMessage;       // 传输目的节点为所遇节点的消息
    }
    if (HasMessageToSent() = 1)
    {
        otherNC = Other.NC;
        if (otherNC > NC)        // 与相遇节点比较中心度 NC
        {
            SendMessageToConnection; // 传输消息
        }
        else break;
    }
    UpdateNodeCentrality()       // 更新节点中心度
    {
        Calculate AL;             // 计算活跃度
        Calculate MHC;           // 计算消息处理能力
    }
    NC = alpha * AL + (1 - alpha) * MHC; // 计算节点中心度
    End TransmissionMechanism;
}
```

2 数值结果分析

2.1 仿真设置

本文采用机会网络环境(Opportunistic Network Environment, ONE)^[14]对提出的NC-DTN进行仿真研究,详细参数设置如表1所示,本文选取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

表1 仿真参数设置

参数	数值
仿真时间/s	20000
仿真区域/(m × m)	4500 × 3400
节点运动模型	社区模型
热身时间/s	1000
移动速度/(m · s ⁻¹)	[1, 20]
缓存大小/MB	[20, 200]
消息产生的间隔时间	[25, 35], 服从指数分布
单个消息的大小/kb	[100, 250], 服从指数分布
节点通信方式	Bluetooth
传输范围/m	10
传输速率/(Kb · s ⁻¹)	250

2.2 节点数量对路由机制影响分析

显然网络中节点数量对节点中心度的判断有显著的影响,因此本文将节点数量作为参数,通过节点数量的变化来评估 NC-DTN 的性能。本文分别从投递率、消息平均延迟及负载率三方面进行分析。

在相同参数配置下,本文将 NC-DTN 与经典的 Epidemic 和同是基于节点中心度的 CC 路由机制性能进行比较。图 1 与图 2 分别描述了 NC-DTN、Epidemic 以及 CC 三者的投递率与负载率随着节点个数增加时的性能表现。从图中可以看出随着节点个数的增多,三种路由机制的投递率和负载率都随之增长,NC-DTN 投递率远高于 CC 和 Epidemic,并且具有更显著的上升趋势,在节点数量达到 140 个时,NC-DTN 的投递率比 Epidemic 高出 27%,比 CC 高出 41.9%。在负载率方面 NC-DTN 也明显低于 Epidemic 和 CC。

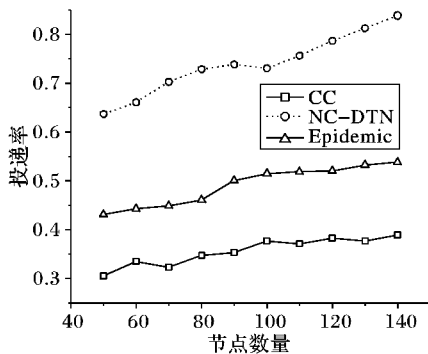


图 1 不同节点个数下消息投递率的比较

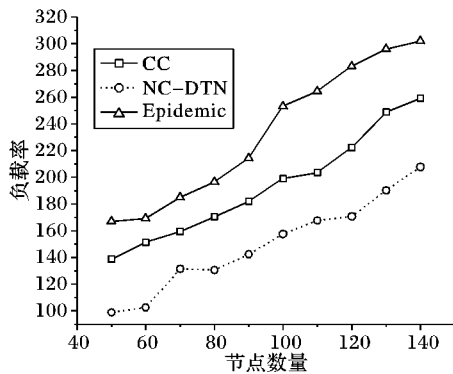


图 2 不同节点数量下负载率的比较

图 3 描述了三种路由机制的消息平均延迟随着节点数量的变化。由图可以看出,NC-DTN 的消息传输时延要低于 CC。其主要原因在于 CC 只是单一地通过对与其他节点连接次数的累加进行中心度的判断,使得部分具有较强移动能力但“懒惰”的节点被辨认为中心度较高的节点,因此对节点中心度估计的误差导致消息不能被及时送达。但 NC-DTN 的消息传输时延要略高于采用洪泛机制的 Epidemic 路由。

2.3 消息生存时间对传输策略影响分析

消息生存时间(Time to Live, TTL)决定了允许节点处理消息的时间长度,DTN 中的消息在节点缓存中停留的时间通常是非常有限的,如何利用有限的消息生存时间更有效地完成对消息的中继转发是 DTN 消息路由机制的研究重点。本部分主要分析消息生存时间的变化对 NC-DTN 路由机制的影响。

图 4 展示了不同路由机制之间投递率随着消息生存时间 TTL 的变化走势差别。由图 4 可以看出,三种路由机制的投

递率都随着 TTL 的增大而升高。这是由于 TTL 值增大,节点保留消息的时间延长,使消息的转发次数增多,从而提高了投递率。而且本文提出的 NC-DTN 的投递率要高于其他路由机制,如前所述,这是由于其他路由在判断节点中心度时只考虑了节点的活跃程度,却忽略了节点消息处理能力对投递率的影响。

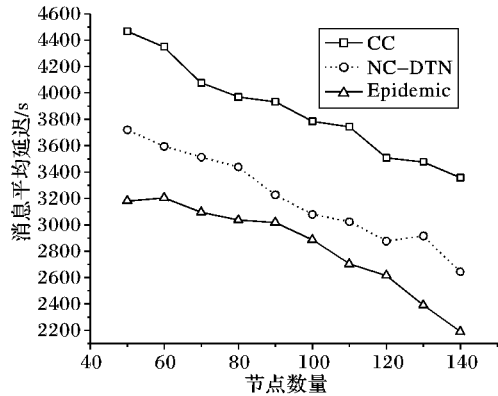


图 3 不同节点个数下消息传输延迟的比较

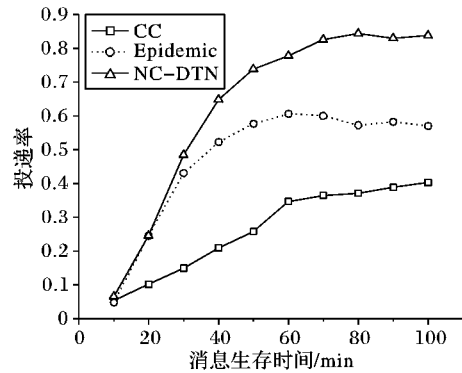


图 4 不同消息生存时间下投递率的比较

图 5 展示了随着 TTL 值的变化,不同路由机制的负载率变化情况。从图 5 中可以看出,随着 TTL 的增加,NC-DTN 及 CC、Epidemic 路由的负载率都有所增加,但 NC-DTN 的负载率要低于其他三者。其主要原因与上面描述的一致,是由于网络中存在着运动能力较强且消息处理能力较弱的节点。CC 与 Epidemic 路由机制中,当遇到上述类型的节点时将传输消息,从而造成资源的浪费;而 NC-DTN 并不将消息传输给上述类型的节点,从而减少了资源的浪费。

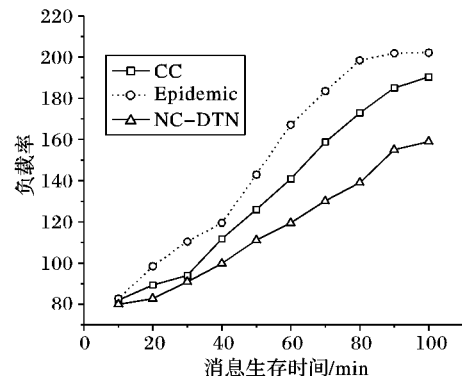


图 5 不同消息生存时间下负载率的比较

图 6 显示了不同路由机制在 TTL 变化的延迟情况。因 NC-DTN 对中心度从两方面分析,导致消息传输给部分具有较强的消息处理能力但活跃度较低的节点,因此消息的延迟

方面比 Epidemic 与 CC 略高。

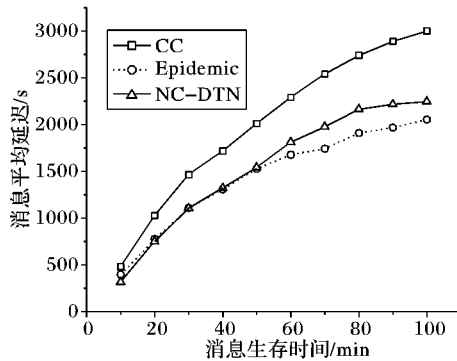


图6 不同消息生存时间下消息传输延迟的比较

3 算法复杂度分析

本文所提出路由机制的时间开销主要为节点对自身中心度感知的时间开销。根据上文所述的节点中心度计算过程,节点需分别计算自身的活跃程度与消息处理能力。对于节点活跃度的更新,需统计从网络初始化到当前时间发送过消息数的总和,时间复杂度为 $O(1)$;同理,在更新节点消息处理能力中,节点需计算前后两节点的相遇时间间隔,时间复杂度为 $O(1)$ 。由于节点并不需了解相关网络环境信息,且节点的中心程度是由节点活跃度与消息处理能力线性相加而得,算法中语句执行次数为常数,因此时间复杂度为 $O(1)$ 。由此看出,本文算法具有较高的执行效率。

4 结语

本文提出了一种节点中心度感知的 DTN 路由机制,结果表明其在消息投递率、网络负载率方面都有较大改善。所提出的机制在副本转发过程中需要充分考虑各个节点的中心程度,然而中心度感知过程将导致消息传输过程的时延增加。同时,由于 DTN 中节点的能量较为有限,NC-DTN 路由算法会使中心度较高的节点能源消耗较快。所以,今后的工作重点将研究减小消息平均延迟的方法以及节点能源消耗与中心度的联系,从而使二者达到均衡。

参考文献:

- [1] XIONG Y, SUN L, NIU J, *et al.* Opportunistic networks[J]. *Journal of Software*, 2009, 20(1): 124 - 137. (熊永平, 孙利民, 牛建伟, 等. 机会网络[J]. *软件学报*, 2009, 20(1): 124 - 137.)
- [2] FALL K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets[C]// *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*. New York: ACM, 2003: 27 - 34.
- [3] FALL K, FARRELL S. DTN: an architectural retrospective[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(5): 828 - 836.
- [4] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. Bubble rap: Social-based forwarding in delay-tolerant networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(11): 1576 - 1589.
- [5] LIN W S, ZHAO H V, LIU K J R. Cooperation stimulation strategies for peer-to-peer wireless live video-sharing social networks[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(7): 1768 - 1784.
- [6] NIU J, ZHOU X, LIU Y, *et al.* A message transmission scheme for community based opportunistic network[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2009, 46(12): 2068 - 2075. (牛建伟, 周兴, 刘燕, 等. 一种基于社区机会网络的消息传输算法[J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(12): 2068 - 2075.)
- [7] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially connected Ad Hoc networks. CS-200006[R]. Durham: Duke University, 2000.
- [8] GAO W, CAO G. User-centric data dissemination in disruption tolerant networks[C]// *INFOCOM 2011*. Piscataway: IEEE, 2011: 3119 - 3127.
- [9] DALY E M, HAAHR M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs[C]// *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM, 2007: 32 - 40.
- [10] WU D, ZHOU J, WANG R, *et al.* Message-redundancy estimating adaptive buffer management mechanism for opportunistic network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 101 - 107. (吴大鹏, 周建二, 王汝言, 等. 机会网络中消息冗余度动态估计的缓存管理策略[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 101 - 107.)
- [11] BURGESS J, GALLAGHER B, JENSEN D, *et al.* MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[C]// *INFOCOM 2006*. Piscataway: IEEE, 2006, 6: 1 - 11.
- [12] WU D, ZHANG P, WANG R. Connection status aware cost efficient message transmission mechanism in opportunistic networks[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(3): 44 - 52. (吴大鹏, 张普宁, 王汝言. 节点连接态势感知的低开销机会网络消息传输策略[J]. *通信学报*, 2013, 34(3): 44 - 52.)
- [13] FREEMAN L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Social Networks*, 1979, 1(3): 215 - 239.
- [14] SOARES V N G J, FARAHMAND F, RODRIGUES J J P C. Impact of vehicle movement models on VDTN routing strategies for rural connectivity[J]. *International Journal of Mobile Network Design and Innovation*, 2009, 3(2): 103 - 111.

(上接第 312 页)

- [7] XIONG Z, HUANG J, LIU W, *et al.* A review of wireless network coding[J]. *Journal of Computer Science*, 2007, 34(3): 6 - 10. (熊志强, 黄佳庆, 刘威, 等. 无线网络编码综述[J]. *计算机科学*, 2007, 34(3): 6 - 10.)
- [8] XIAO X, YANG L, PU B. Multi-node wireless broadcasting retransmission strategy based on network coding[J]. *Journal of Computer Applications*, 2008, 28(4): 849 - 852. (肖潇, 杨路明, 蒲保兴. 基于网络编码的多节点无线广播重传策略研究[J]. *计算机应用*, 2008, 28(4): 849 - 852.)
- [9] AKINO T K, POPOVSKI P, TAROKH V. Optimized constellations for two-way wireless relaying with physical network coding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5): 773 - 787.
- [10] BIANCHI G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(3): 535 - 547.
- [11] LI S R, YEUNG R W, CAI N. Linear network coding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(2): 371 - 381.
- [12] KATTI S, RAHUL H, HU W, *et al.* XORs in the air: practical wireless network coding[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(3): 497 - 510.