

机会网络中自私行为影响的分析与调节

马学彬, 郑田玉, 李明珠

(内蒙古大学计算机系, 内蒙古呼和浩特 010021)

摘 要: 以往针对机会网络中节点自私性影响评估的研究,建立了多种分析模型,然而并未考虑如何应用这些理论模型.本文分别在网络无 TTL 限制和有 TTL 限制两种情况下,利用评估模型对自私节点的影响进行分析,并提出一种基于消息分类的自私模型,评估了自私节点对延迟和消息投递率的影响.分析表明,机会网络受自私节点的影响不仅与自私节点的数目有关,而且与节点的移动速度,消息传输范围有关.因此,可以通过调节这些参数提高网络的性能,减少自私节点的影响.首先,通过理论推导分别得出了 2-hop 路由和传染病路由在延迟保证下的合作节点数目和消息传输范围以及传染病路由在消息投递率保证下消息的 TTL.随后,通过 ONE 仿真平台对自私节点影响的评估,证明自私行为影响下网络性能的理论值与实验值近似,并且证明了通过理论分析获得的参数值也与实验值近似.

关键词: 机会网络; 自私节点; 消息分类; 评估方案; 调节策略

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)04-0837-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.011

Analysis and Regulation of Effects of Selfishness on Opportunistic Network

MA Xue-bin, ZHENG Tian-yu, LI Ming-zhu

(College of Computer Science and Technology, Inner Mongolia University, Huhhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: A variety of analytical models were established for the study of node selfish influence assessment in the opportunistic network in the past. However, how to apply these theoretical models was not considered. In this paper, we analyzed the impact of the evaluation model on the selfish nodes of the networks with or without TTL limitation, and proposed a self-private model based on message classification to evaluate the influence of selfish nodes on delay and message delivery rate. The analysis shows that the opportunistic network is affected not only by the number of selfish nodes, but by the speed of the nodes and the range of message transmission. Therefore, we can improve the performance of the network by adjusting these parameters and reduce the impact on selfish nodes. Firstly, we obtain the message transmission range of the number of cooperative nodes under the delay guarantee of 2-hop routing and epidemic routing and the TTL of the message of the epidemic routing guaranteed by the message delivery rate through the theoretical derivation. Subsequently, we proved that the theoretical value of the network performance under the influence of selfish behavior is similar to the experimental value and the parameter values obtained by theoretical analysis are also similar to the experimental values through the evaluation of the influence of the ONE simulation platform on the selfish nodes.

Key words: opportunistic networks; selfish nodes; message classification; evaluation scheme; regulation strategy

1 引言

机会网络是延迟容忍网络的一种,用于在极端环境下提供通信服务,如灾难场景、野外场景、军事场景.在这些场景下,通信基础设施缺乏,网络中的设备之间缺乏完整的通讯链路,因此,为这类场景服务的机会网络的设计思想与传统网络并不相同.机会网络采用了一种新的消息传输机制——“存储-携带-转

发”^[1],在该机制下,数据包在转发的过程中,会被接收节点存储并携带直到遇到下一个合适节点时进行转发.但是机会网络中节点携带的能量都是有限的^[2],因此,有些节点出于节能方面的考虑,不愿为其他节点携带并转发消息.而且在移动机会网络场景中,节点对的接触时间是有限的,节点在有限的时间如果去接收或转发其他目的节点的消息,会占用转发自己消息的机会,此外携带其他节点的消息还会占

用自身的缓存^[3]. 因此,在机会网络中的节点可能会表现出自私行为.

在以往的节点自私性对机会网络性能影响的理论分析中,大部分工作没有考虑自私节点转发消息的源、目的节点信息对网络性能的影响,因此本文在此基础上对自私节点的影响进行了性能评估并通过调节影响网络性能的参数,进而保证具有自私节点的网路性能.

文献[4]提出了在机会网络中消息延迟在消息的跳数变化下的收敛区域,文献[5]指出过多的跳数不会对延迟的收敛提供帮助,这两种方案都是在满足一定网络性能的条件得出网络参数;文献[6]提出了一个基站通过调节覆盖范围进行节能的方案. 本文在文献[4~6]的基础上求出了性能保证下的合作节点数目、消息的 TTL 以及节点的覆盖范围.

本文提出了机会网络中基于消息分类的自私行为对网络性能影响的评估方案. 在无 TTL 限制下,分析了现有方案的不足,并且提出了基于合作节点数目的分析方法,在理论分析中提出网络性能受到的影响与合作节点数目有关,而与自私节点数目无关. 在有 TTL 限制下得出了在自私节点影响下的延迟和消息投递率的具体表达式. 当网络中存在自私节点时,在保证网络性能的情况下设计了网络相关参数的计算方法.

2 相关工作

在以往的研究中,节点自私行为影响的研究方案主要以理论分析和实验分析这两种方法进行. 因此,在本节主要介绍这两种方法,并进行对比和分析.

2.1 实验分析方案

文献[7]中,作者设计了一个在手机上运行的软件 DMS. 文献[8~10]中设计了对应的场景,从而验证了相应的理论. 在实际部署中,得出的结论具有真实性,缺点是实际部署困难,而且可重复性低. 仿真实验中得出的结论不如实际部署的可信性高,优点是实验环境容易设置、可重复性高、代价低,所以多数自私节点影响的分析都采取仿真实验进行验证.

2.2 理论分析方案

文献[11]中作者使用了马尔科夫过程模型来分析不同类型的自私行为对网络性能的影响. 文献[12]中 Li 和 Pan 提出使用马尔科夫过程模型分析节点自私行为对消息投递延迟和网络开销的影响. 文献[13]中 Liu 采用马尔科夫过程模型分析了在随机路点移动模型下,网络性能受节点自私行为的影响. 文献[14]中 Li 使用了马尔科夫过程模型分析了节点自私行为对机会网络中多播性能的影响. 文献[15]中作者使用了该模型来分析在有能量限制条件下网络的性能是如何受自私

节点的影响. 文献[16]中作者分析了在网络中存在重叠社团情况下网络性能如何受到自私节点的影响. 该模型有算法时间复杂度高、解空间过大的问题,因此该模型的实用性较低. 第二种模型是差分方程模型,文献[17]中作者提出使用差分方程分析 2-hop 路由和传染病路由受节点自私行为的影响. 文献[18]中作者分析在有限跳数下的传染病路由性能受影响情况. 基于差分方程的研究可用性高、算法复杂度低,缺点是普适性较差. 第三种模型是切比雪夫模型,该模型可用于分析异构环境下网络性能受到自私行为影响的情况. 文献[19]中作者使用该模型分析了传染病路由、2-hop 路由和喷洒等待路由受自私行为的影响,文中得出的结论可用性高,但该模型只能分析所有节点都有自私行为下网络性能的影响.

使用马尔科夫过程分析自私节点影响的文献中都将源节点设定为合作节点,自私节点只出现在中间的传输过程中,这种假设并不合理,因为源节点也可自私节点. 另以上文献没有考虑到自私节点对不同消息的处理,真实情况是自私节点对不同的消息采取不同的行为. 从这点可以看出以往的分析模型并不符合真实情况. 因此,本文提出基于消息分类的节点自私行为影响的评估模型,该模型更接近实际情况. 本文着重研究传染病路由和 2-hop 路由,并且使用消息投递延迟和消息投递率作为评价指标.

文献[20]中分析了网络在节点自私行为影响下不同 TTL 的消息投递延迟,没有考虑自私节点对消息的分类处理,未在文中得出消息投递率和消息投递延迟的具体表达式. 文献[21]中,作者对消息进行了分类,并分析了 2-hop 路由下自私节点对消息投递延迟的影响. 然而作者设定所有的节点为自私节点,仅考虑了在无 TTL 限制下网络的消息延迟. 本文考虑了 2-hop 路由和传染病路由,分析了网络中自私节点与非自私节点同时存在的情况,在无 TTL 限制的基础上分析了在 TTL 限制下的消息投递延迟与消息投递率.

在之前的论文中并未介绍如何应用评估方案,限制了这些方案在网络性能提升方面的应用. 在本文中,利用提出的评估方案推导出了性能保证情况下的合作节点数目、消息的 TTL 等参数,为评估方案的应用提供了一个新的思路.

3 系统模型

3.1 网络模型

在本文中,网络结构是由 N 个移动节点组成的,网络中有 M 个自私节点, $M \leq N$. 为了更加突出节点的接触规律对性能的影响,本文提出以下假设:节点之间只要发生接触就转发消息;消息是不可分片的,即消息具

有原子性;节点的缓存空间为无穷大.

3.2 移动模型

本文中使用随机路点移动模型作为移动模型. 在随机路点移动模型中,节点的间隔接触时间服从指数为 λ 的分布,节点的接触过程为泊松过程.

文献[22]提出在随机路点移动模型下,当节点移动的区域为边长为 L 的正方形时,通过下式计算 λ .

$$\lambda \approx \frac{8\omega r v}{\pi L^2} \quad (1)$$

在式(1)中, r 为节点的通信范围, v 是节点的移动速度, ω 是随机路点模型的 RWP 系数, $\omega = 1.3683$.

3.3 流量模型

在网络中,每间隔很短的时间片,随机选择两个不同节点作为源节点和目的节点进行消息的投递. 网络中消息的源节点和目的节点是均匀分布的.

3.4 自私行为模型

以往的自私模型的自私性并没有考虑真实环境中自私节点对不同的消息会进行分类处理. 本文通过消息分类来分析自私节点的自私行为对网络性能的影响.

在具有自私节点的机会网络中,消息的接收过程如下面的伪代码所示.

Receiving Process of Packets

1. **IF** The receiver is selfish
2. **THEN** flag1 : = true
3. **FOR** each packet in the queue of sender
4. **IF** flag1 & The packet's destination
5. node is not the receiver
6. **THEN** The packet is rejected by the receiver
7. **CONTINUE**
8. **END IF**
9. The receiver tackle the packet as the
10. conventional case with the chosen routing module
11. **End FOR**

4 评估方案

在无 TTL 限制下,采用切比雪夫模型分析消息投递延迟. 在有 TTL 限制的情况下,因为差分方程模型考虑了 TTL 内存在消息未投递到目的节点的情况,本文使用差分方程模型 (ODE) 进行分析. 表 1 列出了本文所用的主要的符号.

4.1 消息投递过程与消息分类

在具有 M 个自私节点的网络中,消息从源节点到目的节点的投递过程可以分别记为 Pro_1 、 Pro_2 、 Pro_3 、 Pro_4 ,这四个过程用消息源节点和目的节点的自私性进行区分. 消息投递过程的具体分类和所占比例如表 2 所示.

表 1 符号表示

符号	含义
Pro_i	第 i 个消息传递过程
$property_i$	第 i 个消息传递过程所占比例
N	网络中节点数目
M	网络中自私节点数目
λ	节点对间隔接触时间分布的指数
R	消息传输距离
V	节点移动速度
Delay	消息投递延迟
$Delay_i$	第 i 个投递过程中消息投递延迟
TTL	消息的生存时间
$Delay_{TTL}$	在 TTL 限制下消息投递延迟
$D - p - r_{TTL}$	在 TTL 限制下消息投递率
I_t	t 时刻携带消息的节点的数目
I'_t	t 时刻携带消息的节点数目变化率
P_t	t 时刻消息交付的概率
P'_t	t 时刻消息投递率的变化率
N_{trans}	可用于消息投递的节点数目

表 2 消息所占比例

投递过程	源节点	目的节点	所占比例	合作节点数目
Pro_2	正常	正常	$\frac{(N-M) \cdot (N-M-1)}{N \cdot (N-1)}$	$N-M$
Pro_2	自私	正常	$\frac{M \cdot (N-M)}{N \cdot (N-1)}$	$N-M+1$
Pro_2	正常	自私	$\frac{M \cdot (N-M)}{N \cdot (N-1)}$	$N-M+1$
Pro_4	自私	自私	$\frac{M \cdot (N-M)}{N \cdot (N-1)}$	$N-M+2$

4.2 路由策略

两跳路由是为了解决传染病路由开销大而提出的路由算法,在两跳路由中,消息源节点会向所有相遇的节点转发消息,携带消息的中间节点只会给消息的目的节点转发消息,因此消息最多经过两跳到达目的节点.

4.3 无 TTL 限制下延迟与消息投递率

在存在自私节点的情况下,消息的延迟与合作节点的数目有关. 传染病路由由不限跳数,因此在理论分析中本文也分析了开销受到的影响. 在无 TTL 限制下当移动模型为随机路点移动模型时,消息总能投递到目的节点,所以消息投递率总是 1. 因此在这种条件下,消息投递率不受自私节点的影响.

机会网络中的 TTL 规定了消息在网络中生存的时间,而不是网络中消息被路由器丢弃之前允许通过的最大网段数量.

文献[24,25]提出随机路点移动模型下传染病路由消息的投递延迟,如式(2)所示.

$$E(\text{Delay}) = \frac{\ln(\lambda)}{\lambda \cdot (N-1)} \quad (2)$$

式(2)算法复杂度低,但在网络中节点数目小的情况

况下,该公式不够准确,因此在本文中当节点数目较小时采用文献[25]所提出的如下公式.

$$E(\text{Delay}) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i}}{\lambda \cdot (N-1)} \quad (3)$$

在网络中节点数目较小时,式(3)更加准确并且不会增加太大的计算复杂度.为兼顾算法复杂度与准确性,本文选择40作为一个分界点,当 N 小于或者等于40时选择式(3)用于分析消息投递延迟,当大于40时,选择式(2).

在文献[24]中,同样提出在网络中节点数较大时,两跳路由的消息投递延迟使用式(4)计算.

$$E(\text{Delay}) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\lambda \sqrt{N-1}} \quad (4)$$

同理,在网络中节点数目较小的情况下,该公式不适用.本文采用文献[25]提出的式(5).

$$E(\text{Delay}) = \sum_{k=1}^{N-1} \frac{k^2 (N-1)!}{(N-1)^{k+2} (N-k-1)!} \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

两跳路由也按节点数目选择使用相应的公式,通过计算结果可知,当 N 为40时作为分界点较为合适.

在自私节点的情况下,节点的传递过程可由传递消息的节点完成.所以在传染病路由中,消息投递延迟可由式(6)计算得出.

$$\begin{cases} E(\text{Delay}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{trans}}} \frac{1}{i}}{\lambda \cdot (N_{\text{trans}} - 1)}, & N_{\text{trans}} < 4c \\ E(\text{Delay}) = \frac{\ln(N_{\text{trans}} - 1)}{\lambda \cdot (N_{\text{trans}} - 1)}, & N_{\text{trans}} \geq 4c \end{cases} \quad (6)$$

同样两跳路由的消息投递延迟的计算方法如式(7)所示.

$$\begin{cases} E(\text{Delay}) = \sum_{k=1}^{N_{\text{trans}}-1} \frac{k^2 (N_{\text{trans}} - 1)!}{(N_{\text{trans}} - 1)^{k+2} (N_{\text{trans}} - k - 1)!} \frac{1}{\lambda}, & N_{\text{trans}} < 40 \\ E(\text{Delay}) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\lambda \sqrt{N_{\text{trans}} - 1}}, & N_{\text{trans}} > 40 \end{cases} \quad (7)$$

从式(6)和(7)中可以看出在自私节点影响下的网络性能是由合作节点数目决定的.并且通过式(6)和(7)可以得出有自私节点情况下网络平均消息投递延迟如式(8)所示.

$$E(\text{Delay}) = \sum_{i=1}^4 E(\text{Delay}_i \cdot \text{property}) \quad (8)$$

与以往的文献不同,本文的模型源节点和目的节点以概率为1进行发送和接收.为了方便比较这两种模型中源节点不同发送概率的影响,本文中间转发过程也以一定概率进行.

以传染病路由为例,假设网络中有 N 个节点,这 N 个节点都是正常节点,易证明第一跳的延迟如下.

$$E(\text{Delay}_{1-\text{hop}}) = \frac{1}{(N-1) \cdot \lambda} \quad (9)$$

本文假设整个网络中节点向外转发包的概率为 p (统一自私性),源节点以概率为1向外转发自身的消息.在第一跳以概率为 p_f 转发情况下网络的延迟与第一跳以概率为1转发情况下网络的延迟比,如式(10)所示.

$$\text{Delay_ratio} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i}}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i} - 1 + p_f} \quad (10)$$

从图1看出随着节点自私程度增加两个公式的比值增加、随着节点数目的增加两个公式的值越接近,还看出在网络中节点数目较多、自私程度不高的情况下可以假设源节点和目的节点对于任何消息都以相同的概率进行接收或者转发.但是真实环境中自私程度不同,为了分析自私节点对网络性能的影响,本文采用一种基于消息分类的延迟计算方式,如式(9)所示.

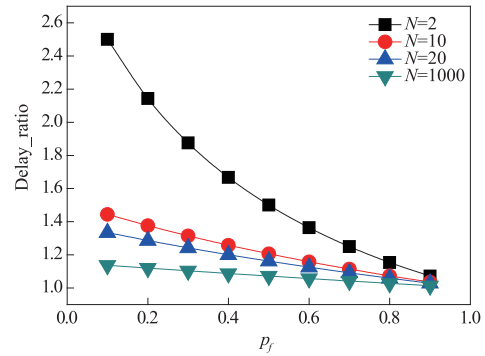


图1 不同公式下延迟比

消息转发过程 在消息源节点与消息目标节点都为正常节点情况下,网络中可参与转发该过程的节点数目为 $N-M$.在消息投递过程1中,传染病路由下消息的开销为 $\frac{N-M}{2}$.网络中可参与转发的节点为 $N-M$,由于在传染病路由下,网络中持有消息的节点会将消息转发给未持有消息的节点,而且由于网络中的节点相遇机会是同构的,因此,消息的目的节点与第2个到第 $N-M$ 个接收到消息的节点是相同的,网络开销记为Overhead.

$$\text{Overhead} = \sum_{i=2}^{N-M-2} i = \frac{N-M}{2} \quad (11)$$

4.4 TTL 限制下的延迟与成功率

在研究 TTL 限制下机会网络性能时,无法应用文献[18]中提出的方法和马尔科夫过程模型,这两

种方案没有考虑消息在有限的 TTL 内可能无法到达目的节点的情况. 本文提出使用 ODE(差分方程)分析 TTL 限制下场景的消息投递延迟和消息投递率. 本文分别对 2-hop 路由和传染病路由这两种情况进行分析.

本文使用文献[17,24]中的差分方程模型得到 I_t 与 P_t 的表达式,用来分析传染病路由和 2-hop 路由在自私节点影响下的消息投递率. 其中与文献[24]最大的不同在于,式(12)、(13)中包含合作节点数目.

4.4.1 2-hop 路由

在两跳路由下获得消息的节点数目和投递可能性的变化率可用下式表示:

$$I_t = (1 - N_{\text{trans}}) \cdot e^{-\lambda t} + (N_{\text{trans}} - 1), t \in [0, +\infty) \quad (12)$$

$$P_t = 1 - e^{N-1-\lambda Nt-(N-1)e^{-\lambda t}}, t \in [0, +\infty) \quad (13)$$

在消息生存时间为 TTL 下,2-hop 路由消息投递率如下:

$$D_{-p-r_{TTL}} = P_{TTL} \quad (14)$$

在消息生存时间为 TTL 下,2-hop 路由平均延迟如下:

$$E(\text{Delay}_{TTL}) = \frac{1}{P_{TTL}} \cdot \int_0^{TTL} t \cdot P'_{TTL} dt \quad (15)$$

4.4.2 传染病路由

在传染病路由下,获得消息节点数目和消息投递可能性 I_t 与 P_t :

$$I_t = (e^{-\lambda \cdot N_{\text{trans}} t} - 1) \cdot (N_{\text{trans}} - 1), t \in [0, +\infty) \quad (16)$$

$$P_t = \frac{(e^{\lambda \cdot N_{\text{trans}} t} - 1)}{(e^{\lambda \cdot N_{\text{trans}} t} + N_{\text{trans}} - 1)}, t \in [0, +\infty) \quad (17)$$

在消息生存时间为 TTL 下,传染病路由消息投递率的表达式如式(14)所示,在消息生存时间为 TTL 下,传染病路由平均延迟如式(18)所示:

$$E(\text{Delay}_{TTL}) = \frac{1}{P_{TTL}} \int_0^{TTL} \frac{\lambda \cdot N_{\text{trans}}^2 \cdot t^2 \cdot e^{\lambda \cdot N_{\text{trans}} t}}{(e^{\lambda \cdot N_{\text{trans}} t} - 1) \cdot (e^{\lambda \cdot N_{\text{trans}} t} + N_{\text{trans}} - 1)} dt \quad (18)$$

4.5 理论分析总结

在无 TTL 限制下,基于文献[24]的模型得出在自私节点影响下消息投递延迟的表达式. 在 TTL 限制下,使用差分方程来分析消息投递延迟和消息投递成功率. 在所有的节点都是自私节点时,网络中的消息被源节点携带,直到投递到目的节点. 因此在极端情况下,当 TTL 不受限制时,消息总会被源节点携带直到投递到目的节点,因此消息投递率为 1.

无 TTL 限制下的消息投递延迟如式(19)所示.

$$E(\text{Delay}) = \frac{\sum_{i=1}^{2-1} \frac{1}{i}}{\lambda \cdot (2-1)} = \frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

在 TTL 限制下,消息投递率如式(20)所示.

$$D_{-p-r_{TTL}} = \frac{(e^{\lambda TTL} - 1)}{(e^{\lambda \cdot N_{\text{trans}} \cdot TTL} + N_{\text{trans}} - 1)} \quad (20)$$

延迟公式(18)过于复杂,难以应用在极端情况下的分析. 文献[17]中提出了在其他节点限制 TTL,消息源节点不限制 TTL 的情况下消息投递延迟的公式,公式的表达式比较简洁,适用于分析,但是这种方法没有考虑到存在自私节点的情况. 在加入自私节点情况下消息投递延迟如式(31)所示.

$$E(\text{Delay}_{TTL}) = \frac{1}{3\lambda} - \frac{TTL}{e^{3 \cdot \lambda TTL} - 1} \quad (21)$$

而在源节点限制 TTL 情况下,由于在源节点携带消息,则

$$E(\text{Delay}_{TTL}) < \frac{1}{3\lambda} - \frac{TTL}{e^{3 \cdot \lambda TTL} - 1} \quad (22)$$

在限制 TTL 下,所有的消息在 TTL 耗尽时,携带节点会将消息丢弃,而在源节点消息不限制 TTL 情况下,源节点会一直携带着消息,直到与目的节点相遇. 所以在源节点消息不限制 TTL 情况下,存在一部分消息的延迟大于 TTL,而在限制 TTL 情况下,所有消息的延迟都小于 TTL,即 $E(\text{Delay}) < TTL$,而在源节点消息不限制 TTL 情况时加入了一些大于限制 TTL 情况平均延迟的消息,那么网络平均延迟一定会上升,即得出式(23).

$$E(\text{Delay}_{TTL}) > \frac{1}{3\lambda} - \frac{TTL}{e^{3 \cdot \lambda TTL} - 1} \quad (23)$$

在下面的实验部分会验证所提理论的准确性与实用性. 本文的理论可以进一步应用,调节方案这一小节中描述了如何应用评估方案进行参数调节.

5 调节策略

要保证网络的性能,关键是保证合作节点的数目和设定 TTL. 当网络中合作节点数目很多时,即使自私节点数目相对较多,网络性能依然很好. 绝大部分文献没有提出如何根据性能计算合作节点的数目、TTL 的大小、节点的覆盖范围即消息的传输距离.

系统要求的是消息的传输延迟和消息投递率在特定范围内即可. 因此,根据性能要求计算合作节点的数目、TTL 的大小这部分工作很重要. 本章推导出的在性能保证下的参数如表 3.

表 3 性能保证下获取的参数

参数	TTL 是否受到限制	保证的性能	路由协议	公式
合作节点数目	无限制	传输延迟	传染病路由	(36)
合作节点数目	无限制	传输延迟	传染病路由	(42)
消息传输距离	无限制	传输延迟	传染病路由	(44)
消息传输距离	无限制	传输延迟	2-hop 路由	(46)
TTL	限制	消息投递率	传染病路由	(48)

5.1 无 TTL 限制下参数获取

在无 TTL 限制下,对于自私节点的处理通常是对其进行激励或者隔离,最终使得网络中自私节点的数目下降,合作节点数目上升.因此在无 TTL 限制下,获取的参数主要为合作节点数目.当自私节点即使在激励方案下表现自私时,合作节点数目无法调节,这时可以通过调节消息传输距离来调节网络性能.

5.1.1 合作节点数目

无 TTL 在节点接触频率不变的情况下,只有合作节点数目影响传输延迟的值.本文获取了传染病路由和 2-hop 路由的合作节点数目.

从传染病公式(6)中可以看出,当网络中合作节点数目很大时,延迟计算公式为

$$E(\text{Delay}) = \frac{\ln(N_{\text{trans}} - 1)}{\lambda \cdot (N_{\text{trans}} - 1)} \quad (24)$$

本文将消息分为了四类,分别求得了每种消息的合作节点数目,因而可以推出每种消息的延迟.在表格 2 中可以看出,网络中四种消息的合作节点数目相差最大为 2.当合作节点数目很大时,四种消息的合作节点数目相差的就相对较小,因此式(24)成立,所以本文可以将消息按其中一种消息的延迟进行计算.

选取 N_{trans} 作为全网中合作节点的数目,则计算传染病路由传输延迟的公式

$$N_{\text{trans}} \approx e^{-\text{LambertW}(-1 - E(\text{Delay}) \cdot \lambda)} \quad (25)$$

$$E(\text{Delay}) \cdot \lambda \approx e^x \cdot x \quad (26)$$

式(25)是 N_{trans} 在实数范围内的解,如上下文所示,网络中合作节点的数目是正整数,因此网络中合作节点的数目的解即为式(25)所示. LambertW 是 $e^x - x$ 的反函数.

2-hop 路由情况与传染病路由类似,传输消息的节点的数目为

$$N_{\text{trans}} \approx \left(\frac{1}{\lambda E(\text{Delay})} \right)^2 \quad (27)$$

5.1.2 消息传输距离

当网络中消息的合作节点数目无法调整时,可以通过调整网络中节点的消息传输距离就可以获得传输延迟保证.

传染病路由下性能保证的消息传输距离为

$$r \approx \frac{\pi L^2}{s\omega v} \cdot \frac{\ln(N_{\text{trans}})}{E(\text{Delay})} \quad (28)$$

2-hop 路由下性能保证的消息传输距离为

$$r \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\pi L^2}{w\omega v} \cdot \frac{1}{E(\text{Delay}) \cdot \sqrt{N_{\text{trans}}}} \quad (29)$$

5.2 TTL 限制下参数获取

在 TTL 限制下传输延迟和消息投递率是两个相关

指标.由于传输延迟公式比较复杂,此处只尝试计算出在传染病路由消息投递率固定前提下 TTL 的值.

式(25)推导出了 TTL 限制下的消息投递率.

当消息投递率一定并且合作节点数目一定时,消息的 TTL 为:

$$\text{TTL} \approx \frac{\ln\left(\frac{1 + (N_{\text{trans}} - 1)p}{1 - p}\right)}{\lambda \cdot N_{\text{trans}}} \quad (30)$$

5.3 实验评估

为了验证上述分析的正确性,本文采用 ONE^[26] 作为仿真工具,并将 ONE 内的传染病路由和本文实现的 2-hop 路由模块进行对比.本节通过对仿真实验获得的值与理论推导的值进行对比验证理论的值的准确性.本文中实验部分分为两部分:第一部分是在无 TTL 限制下验证对于自私节点的传输延迟的影响;第二部分是在有 TTL 限制下验证对于自私节点对网络平均传输延迟、消息成功率的影响.在实验中,每次被选作变化参数的为场景大小、节点移动速度以及消息传输范围,分别记为 space 、 v 、 r ,每次选择其中的一个参数作为变化参数.

5.3.1 无 TTL 限制下自私节点影响分析

(1) 2-hop 路由

为了分析自私节点对网络传输延迟的影响程度,实验部分将有自私节点情况下与无自私节点情况下进行比较.在此处,将有自私节点情况下的网络传输延迟与无自私节点的网络传输延迟的比值作为影响评估的衡量,实验的图中记为 Delay Ratio.无 TTL 限制下实验参数如表 4 所示.

表 4 无 TTL 限制下实验参数

实验参数	数值	实验参数	数值
场景大小(m ²)	1000 * 1000 2000 * 2000	自私节点数目	0, 10, 20, ..., 100
仿真时长	432000s	包产生频率	1/s

图中四条折线对应着两组实验.理论值在图例中以 Theoretical 标记,实验值以 Experimental 标记.为了推理的方便,此处假设网络中合作的节点数目大于 40.因此自私节点影响下网络的延迟与无自私节点场景下的延迟如式(49)所示:

$$\text{Delay Ratio} = \frac{\frac{\ln(N_{\text{trans}})}{N_{\text{trans}}} \cdot \frac{1}{\lambda}}{\frac{\ln(N)}{N} \cdot \frac{1}{\lambda}} = \frac{\ln(N_{\text{trans}})}{\ln(N)} \quad (31)$$

由式(1)、(49)可知,即使速度、场景大小、消息传输距离不同,理论情况下传输延迟受影响的程度也不会发生变化.

从图 2 看出无 TTL 限制下网络的传输延迟比在自私节点数目为 80 时开始剧烈的上升,在网络中均是自私节点的情况下,网络性能受影响的极值不超过 9. 即使网络中均是自私节点,网络也不会出现绝对不连通的情况. 在理论分析中不同速度、不同场景大小、不同消息传输距离下,网络传输延迟受自私节点的影响相同. 仿真实验的时间是受到限制的,所以这样传输延迟不能完全达到收敛. 所以在不同条件下,自

私节点对网络传输延迟影响不同. 由图 2 可知,在自私节点在 80 以下时,理论计算出的传输延迟比与实验得出的相差不超过 10%;在全部为自私节点时,二者相差不超过 6. 在网络中自私节点的数目超过 90 以后,不同条件下才会出现明显差异. 图 2 验证了在无 TTL 限制下推导出的 2-hop 路由在自私节点影响下的延迟即式(7).

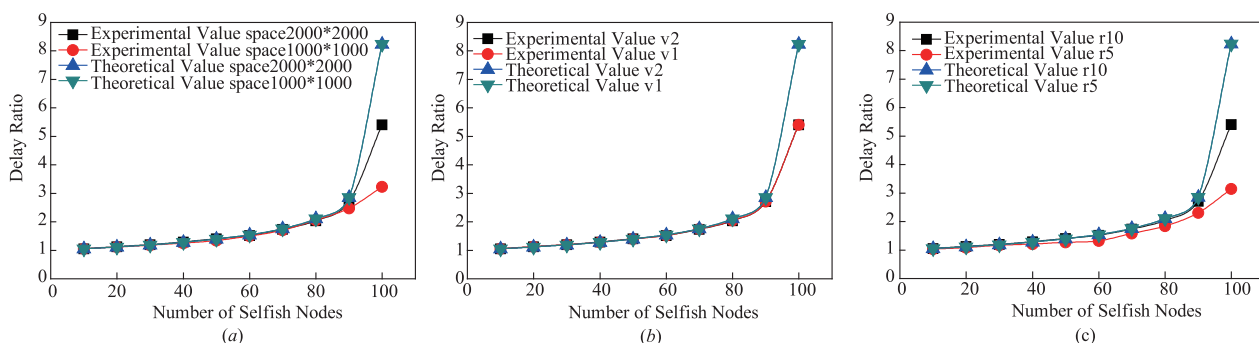


图 2 2-hop路由下不同参数下传输延迟比

(2) 传染病路由

由图 3 可知,无 TTL 限制下网络的传输延迟比在自私节点数目为 80 时开始剧烈的上升. 在网络中均是自私节点的情况下,理论上传输延迟比均不超过 20. 表明即使网络中均是自私节点,网络也绝对不会出现不连通的情况. 在传染病路由下要比 2-hop 路由受自私节点影响严重,因为在传染病路由机制下,网络中的消息会被所有的节点转发,不会受跳数的限制. 这样在网络

中存在自私节点的情况下,网络的自私行为会影响到更多的节点与节点之间相遇的机会,从而更大的影响了消息的传输延迟. 由图 3 可知,自私节点在 80 以下时,理论计算得出的传输延迟比与实验得出的相差不超过 10%;在全部为自私节点时,二者相差不超过 9. 在网络中自私节点的数目超过 90 以后,不同条件下才会出现明显差异. 图 3 验证了在无 TTL 限制下推导出的传染病路由在自私节点影响下的延迟即式(6).

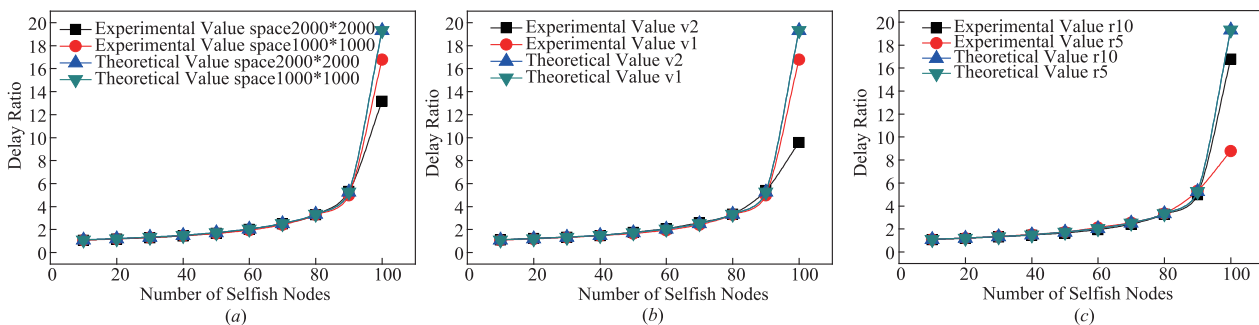


图 3 传染病路由下不同自私节点数目下传输延迟比

5.3.2 TTL 限制下自私节点影响分析

在 TTL 限制下,实验部分按表 6 设置网络参数. 实验部分将在自私节点情况下与无自私节点情况下进行比较. 为了进行比较这两种情况的差异,用传输延迟比作为影响评估的衡量依据(Delay Ratio). 用自私节点情况下的消息投递率与无自私节点的消息投递率的比值作为影响评估的衡量依据,表示为消息投递率比值($\frac{DP_s}{DP}$),其中 DP_s 为自私节点影响消息投递率, DP 为无

自私节点影响下消息投递率. TTL 限制下实验参数如表 5 所示,场景大小如表 3 所示,缓存空间为 ∞ .

表 5 TTL 限制下实验参数

实验参数	数值	实验参数	数值
通信技术	蓝牙	自私节点数目	0,50,80
节点移动速度 (m/s)	1,2	消息生存时间 (min)	30,60,120,180,240,300,360
节点数目	100	消息传输距离 m	10,20

(1) 2-hop 路由

在实验中发现,在 TTL 限制下,网络的传输延迟受自私节点的影响很小,在自私节点影响下,延迟最高上升 0.5 倍,在有些场景下甚至出现传输延迟降低的情况. 理论值与实验值最大相差 0.13 倍,这也验证了模型的准确性. 可以看出传输距离,传输速度、场景大小以及自私节点数目都影响了传输延迟比,这是因为这四个参数都会影响节点之间的接触频率. 图 4 验证了在 TTL 限制下推导出的 2-hop 路由在自私节点影响下的延迟,即式(15).

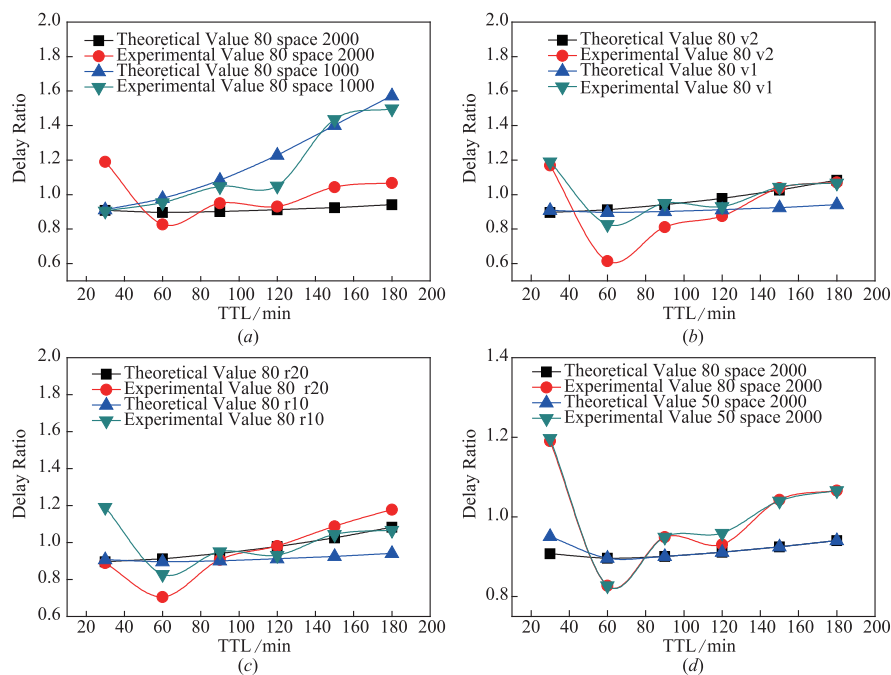


图4 TTL限制下2-hop路由不同参数下传输延迟比

由图 4、5 可知,本文推导出的 TTL 限制下 2-hop 路由受自私节点影响的理论公式适用于 2-hop 路由受自私节点影响的分析.

(2) 传染病路由

由图 6 知在 TTL 限制下,网络的传输延迟受自私节点的影响相对于无 TTL 情况限制下很小. 在 TTL 较小时,理论值与实验值相差较大,随着 TTL 的上升,理论值与实验值变化趋势相同. 虽然理论值与实验值差距较大,但与实验值的变化趋势相同. 随着 TTL 的上升,延迟比逐渐上升. 传输距离、传输速度和场景大小都影响了传输延迟比,这是因为这三个参数都会影响节点之间的接触频率. 在不同参数的设置下,网络的传输延迟比没有超过 4,验证了网络传输延迟对于个人自私行为鲁棒性的体现. 图 5 验证了在 TTL 限制下推导出的传染病路由在自私节点影响下的传输延迟,即式(18).

由图 7 知在 TTL 限制下,TTL 较小时网络的消息投递率受自私节点的影响很大;当 TTL 大于 60 分钟时,

图 5 看出,随着 TTL 的增加,理论值与实验值之间的差距也越小. 除 TTL 较小的情况下,本节的模型计算出的值与实验值很接近,这也验证了模型的准确性. 传输距离、传输速度和场景大小都影响了消息投递率比,这是因为这三个参数都会影响节点之间的接触频率,因而结果不同. 观察到随着 TTL 的增加,在影响趋于稳定的情况下,消息的传输距离越大,移动速度越大,场景越小,自私节点数目越小,消息投递率受影响越小. 图 5 验证了在 TTL 限制下推导出的 2-hop 路由在自私节点影响下的传输投递率即式(14).

随着 TTL 的增加,自私节点对于网络性能的影响逐渐降低,这是因为随着 TTL 的增加,网络中消息可以被合作节点携带更多的时间,因而增加了与目的节点相遇的机会,消息投递率上升,进而消息投递率比值上升. 由图 7(b)、7(c)可知,当网络中节点的移动速度较大、消息传输距离较大时,本文推导出的理论值与实验值相差较大,然而在图中可以看出,当 TTL 大于 60 分钟时,理论值的变化趋势与实验指的变化趋势相同. 由图可知传输距离,传输速度和场景大小都影响了消息投递率比值,这是因为这三个参数都会影响节点之间的接触频率,因而结果不同. 网络场景越小,节点移动速度越大,消息传输范围越大,自私节点数目越小,网络的消息投递率受影响越小. 图 7 验证了在 TTL 限制下推导出的传染病路由在自私节点影响下的消息投递率,即式(20).

由图 6、图 7 可知,本文推导出的 TTL 限制下传染病路由受自私节点影响的理论公式在一些场景中与实验值相差较大,但在一些场景中也十分接近理论值,而且当

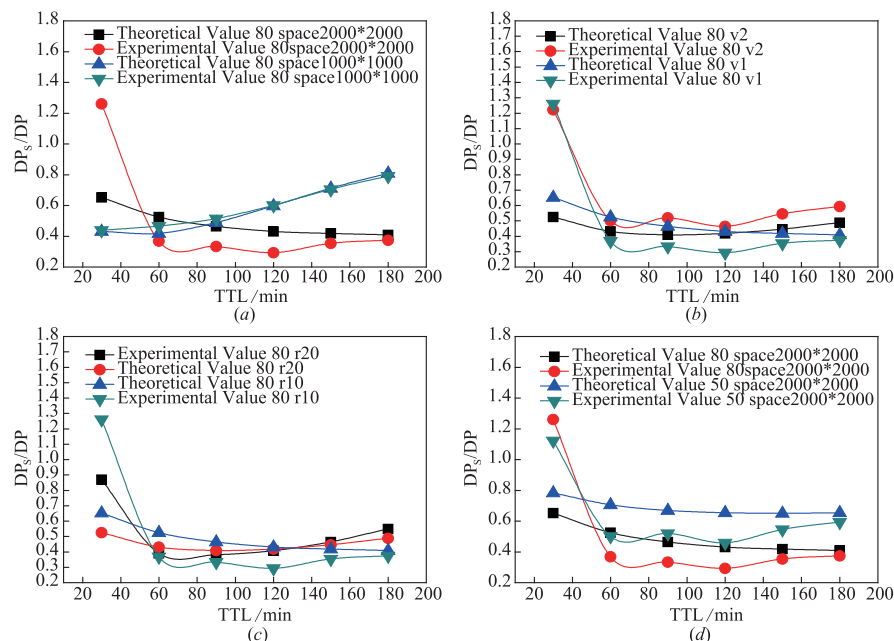


图5 TTL限制下2-hop路由下不同参数下消息投递率比

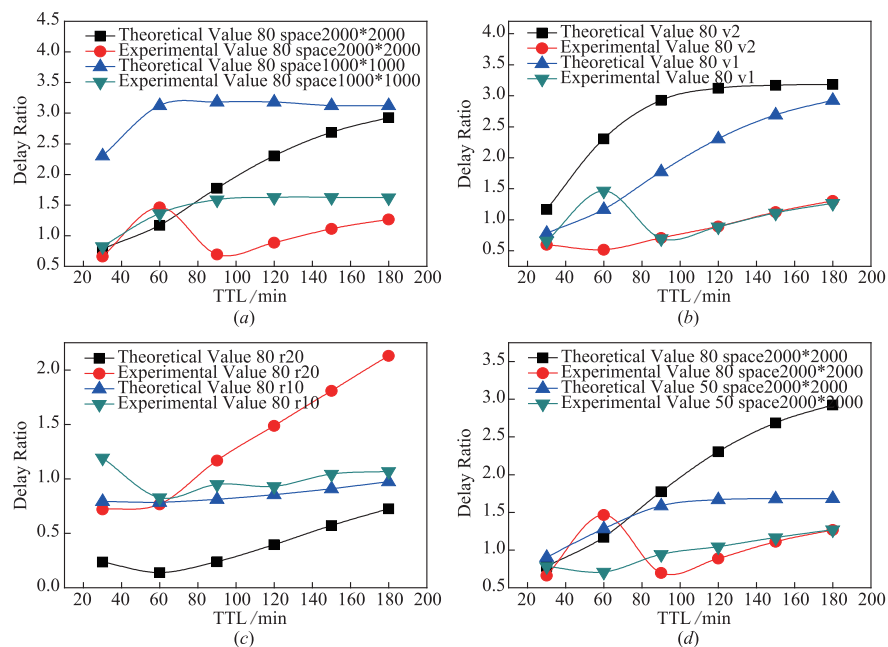


图6 TTL限制下传染病路由下不同参数下传输延迟比

TTL 大于 60min 时,理论值反应出的变化趋势与实验值相同. 因此,本文推导出的传染病路由受自私节点影响的公式可为传染病路由受自私节点影响的分析提供参考.

6 结论

本文提出了在网络中存在自私节点的情况下,自私节点对于不同的消息可能会采取不同的处理. 按源节点和目的节点是否自私将消息为 4 种类型,并依次计算出在无和有 TTL 限制下网络延迟以及消息投递率受自私节

点影响的程度,通过理论推导与实验可以看出,网络延迟受自私节点影响与网络中节点的数目以及 TTL 有关. TTL 限制下且自私节点数目在一定的范围内,网络延迟受自私节点影响不大,说明了机会网络对于网络中的自私行为具有鲁棒性. 随着 TTL 的增加,节点自私行为对于网络性能影响趋于稳定. 在性能影响趋于稳定时,节点移动速度越大、网络场景范围越小、节点的消息传输范围越大时,则自私性行为的影响越小.

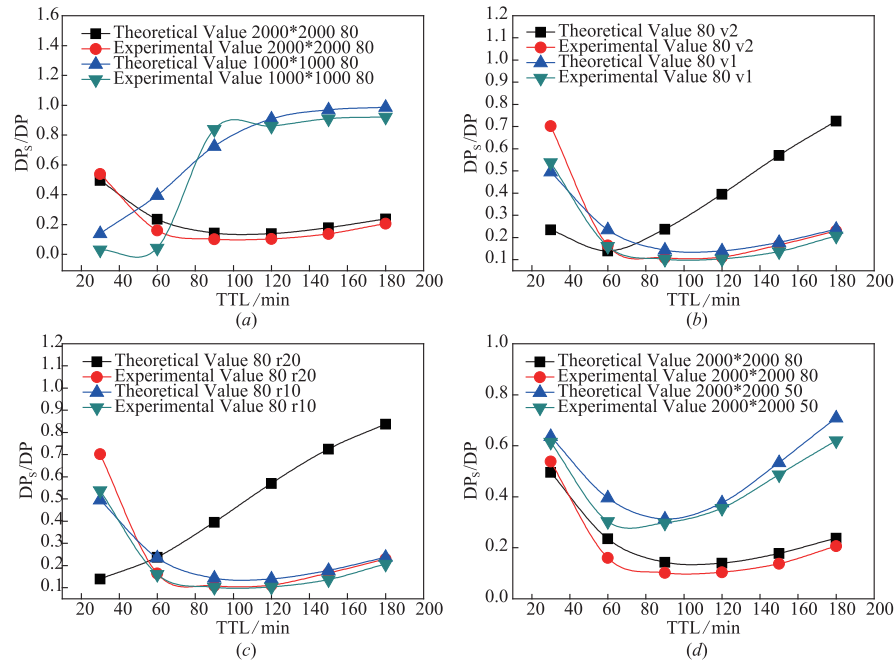


图7 TTL限制下传染病路由下不同参数下消息投递率比

参考文献

- [1] Huang C M, Lan K C, Tsai C Z. A survey of opportunistic networks [A]. International Conference on Advanced Information Networking and Applications [C]. Japan: DBLP, 2008. 1672 – 1677.
- [2] Yoon S K, Haas Z J, Kim J H. Tradeoff between energy consumption and lifetime in delay-tolerant mobile network [A]. Military Communications Conference [C]. Milcom: IEEE Xplore, 2008. 1 – 7.
- [3] Leela-Amornsins L, Esaki H. Heuristic Congestion Control for Message Deletion in Delay Tolerant Network [M]. Springer Berlin Heidelberg: Smart Spaces and Next Generation Wired/Wireless Networking, 2010. 287 – 298.
- [4] Boldrini C, Conti M, Passarella A. The stability region of the delay in Pareto opportunistic networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(1): 180 – 193.
- [5] Boldrini C, Conti M, Passarella A. Less is more: long paths do not help the convergence of social-oblivious forwarding in opportunistic networks [A]. ACM/sigmobile Mobiopp [C]. Zurich: ACM, 2012. 13 – 20.
- [6] Gao C, Zhang W, Tang J, et al. Relax, but do not sleep: A new perspective on green wireless networking [A]. INFOCOM [C]. Toronto: IEEE, 2014. 907 – 915.
- [7] Hameed S, Wolf A, Zhu K, et al. Evaluation of human altruism using a DTN-based mobile social network application [A]. GI-Jahrestagung [C]. Bonn: INFORMATIK, 2012. 81 – 95.
- [8] Chen L J, Chiou C L, Chen Y C. An evaluation of routing reliability in non-collaborative opportunistic networks [A]. International Conference on Advanced Information Networking and Applications [C]. Bradford: IEEE, 2009. 50 – 57.
- [9] Karaliopoulos M, Rohner C. Trace-based performance analysis of opportunistic forwarding under imperfect node cooperation [A]. INFOCOM [C]. IEEE, 2012. 2651 – 2655.
- [10] Sobin C C. Analyzing the impact of selfishness on probabilistic routing algorithms in delay tolerant networks [A]. International Conference on Computing and Network Communications [C]. IEEE, 2015. 186 – 190.
- [11] Li Y, Su G, Wang Z. Evaluating the effects of node cooperation on dtn routing [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2012, 66(1): 62 – 67.
- [12] Li Y, Hui P, Jin D, et al. Evaluating the impact of social selfishness on the epidemic routing in delay tolerant networks [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(11): 1026 – 1028.
- [13] Liu J, Jiang X, Nishiyama H, et al. Performance modeling for relay cooperation in delay tolerant networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2013, 18(2): 186 – 194.
- [14] Li Y, Su G, Wu D O, et al. The impact of node selfishness on multicasting in delay tolerant networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2224 – 2238.
- [15] Li Y, Su L, Jin D, et al. Performance evaluation of multicasting in energy-constrained DTN with selfish nodes [A]. Global Telecommunications Conference [C]. IEEE, 2011. 1 – 5.
- [16] Wu Y, Deng S, Huang H, et al. Performance analysis of

- epidemic routing in delay tolerant networks with overlapping communities and selfish nodes [J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2013, 8 (5): 744 – 753.
- [17] Manam V K C, Mahendran V, Murthy C S R. Performance modeling of DTN routing with heterogeneous and selfish nodes [J]. Wireless Networks, 2014, 20 (1): 25 – 40.
- [18] Wu Y, Deng S, Huang H. On modeling the impact of selfish behaviors on limited epidemic routing in delay tolerant networks [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 71 (4): 2759 – 2782.
- [19] Sermpezis P, Spyropoulos T. Understanding the effects of social selfishness on the performance of heterogeneous opportunistic networks [J]. Computer Communications, 2014, 48: 71 – 83.
- [20] Manam V K C, Mahendran V, Murthy C S R. Performance modeling of DTN routing with heterogeneous and selfish nodes [J]. Wireless Networks, 2014, 20 (1): 25 – 40.
- [21] Wu Y, Huang H, Deng S, et al. Performance of two-hop routing in delay tolerant networks with selfish nodes [A]. Computers & Communication [C]. IEEE Computer Society, 2015. 58 – 63.
- [22] Robin Groenevelt, Philippe Nain, Ger Koole. The message delay in mobile ad hoc networks [J]. Performance Evaluation, 2005, 62 (1): 210 – 228.
- [23] Malekar U B, Hulke S P. Performance Evaluation of Basic Selfish Node Detection Strategy on Delay Tolerant Networking Routing Protocols [M]. Information Systems Design and Intelligent Applications. Springer India, 2016. 357 – 363.
- [24] Zhang X, Neglia G, Kurose J, et al. Performance modeling of epidemic routing [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 51 (10): 827 – 839.
- [25] Sermpezis Pavlos. Delay analysis of epidemic schemes in sparse and dense heterogeneous contact environments [J]. Eurecom, 2012, 3868. 193 – 221.
- [26] Keranen A. Opportunistic network environment simulator [R]. Special Assignment report, Helsinki University of Technology, Department of Communications and Networking, 2008-12-15.

作者简介



马学彬 男, 1981 年生于内蒙古赤峰市, 内蒙古大学副教授, 从事计算机网络技术方面有关研究。

E-mail: csmaxuebin@imu.edu.cn



郑田玉 男, 1993 年 12 月生于内蒙古赤峰市, 内蒙古大学硕士研究生. 研究方向为计算机网络。

李明珠 女, 1992 年 4 月生于黑龙江齐齐哈尔, 内蒙古大学硕士研究生. 研究方向为计算机网络。