

## 基于节点行为分析的自私性延迟容忍网络消息转发机制

胡 敏, 罗 兰, 寇 兰, 黄宏程

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘 要:** 延迟容忍网络中的转发机制因节点自私性行为会造成中继节点拒绝转发, 并导致消息投递率降低、传输时延增长等性能下降问题。为此, 基于节点行为分析, 提出一种自私性延迟容忍网络消息转发机制。该机制以多副本传输为基础, 通过研究节点行为中的合作特性和非合作特性建立节点状态概率转移模型, 进而预测节点间消息的递交过程。利用消息副本转发条件对邻居节点进行选择喷射递交。若副本未到达目的节点, 则进行基于目的节点相遇概率的递交方式。仿真结果表明, 相比具有激励机制的传染路由、具有激励机制的喷射等待路由以及社会路由机制, 该机制在消息投递率、传输时延、网络开销方面均具有较好的性能。

**关键词:** 延迟容忍网络; 消息转发机制; 自私性; 节点行为; 概率转移模型

**中文引用格式:** 胡 敏, 罗 兰, 寇 兰, 等. 基于节点行为分析的自私性延迟容忍网络消息转发机制[J]. 计算机工程, 2016, 42(11): 131-138.

**英文引用格式:** Hu Min, Luo Lan, Kou Lan, et al. Message Forwarding Mechanism Based on Node Behavior Analysis in Selfishness Delay Tolerant Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(11): 131-138.

### Message Forwarding Mechanism Based on Node Behavior Analysis in Selfishness Delay Tolerant Network

HU Min, LUO Lan, KOU Lan, HUANG Hongcheng

(School of Communication and Information Engineering,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**[Abstract]** In Delay Tolerant Network (DTN), the forwarding mechanism can cause the relay node to refuse forwarding messages because of the selfish behavior of the node, which results in a decline in network performance such as lower message delivery ratio and longer transmission latency. Focusing on this problem, this paper puts forward a selfish DTN message forwarding mechanism Based on Node Behavior Analysis (BNBA). On the basis of multi-copy transmission and through researching the characteristics of cooperation and noncooperation behaviors between encountered nodes, the node state probability transfer model is established and the process of message delivery between nodes is predicted. According to message copy forwarding conditions, neighbor nodes are selected to forward message with injection. If the message copy doesn't reach its destination, the submission method based on encountering probability of the destination is enabled. Simulation results show that, compared with Epidemic + TFT, Spay and Wait + TFT and Bubble Rap, the proposed mechanism has higher performance in message delivery ratio, transmission delay and network overhead.

**[Key words]** Delay Tolerant Network (DTN); message forwarding mechanism; selfishness; node behavior; probability transfer model

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.11.022

#### 0 概述

延迟容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN)<sup>[1]</sup>

是一种缺乏端到端完整路径、传输时延较大的无线自组织网络。与传统的多跳无线网络相比, DTN采用基于“存储-携带-转发”的机会路由方式, 依靠

**基金项目:** 国家自然科学基金(61401051); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2014jcyjA40039); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400402)。

**作者简介:** 胡 敏(1971—), 女, 副教授, 主研方向为无线自组织网络、容迟网络; 罗 兰, 硕士研究生; 寇 兰, 副教授; 黄宏程, 副教授、博士研究生。

**收稿日期:** 2015-11-09    **修回日期:** 2015-12-16    **E-mail:** huanghc@cqupt.edu.cn

中继节点的移动实现网络中的消息传递。为了保证消息能够有效地到达目的节点,需要在传输过程中设计出一个合理的转发机制。在现有的延迟容忍转发机制中,根据消息的副本数量存在2种转发方式:1)基于单副本的消息转发过程;2)基于多副本的消息转发过程。其中,由于单副本方式很难保证消息能够快速达到目的节点<sup>[2]</sup>,因此目前的消息转发机制更多采用带有副本控制的多副本转发方式,以提高网络中的成功投递率,降低网络时延。

本文提出一种基于节点行为分析的自私 DTN 消息转发机制(Message Forwarding Mechanism Based on Node Behavior Analysis in selfishness DTN, BNBA),利用多副本传输方式,综合考虑节点缓存中接收分组和丢弃分组2种情况对传输机制的影响,以一对相遇节点为对象研究节点间的行为特性,并由此建立相关的节点状态概率转移模型,结合消息副本转发条件,对具有合作行为的邻居节点进行选择喷射递交,以避免自私节点引起的拒绝转发问题。

## 1 相关工作

在基于多副本的 DTN 转发机制中,由于资源受限、无转发意愿等问题,中继节点只处理与自身相关的数据分组,对于其他节点待转发的分组都会选择拒绝<sup>[3]</sup>,从而造成消息传输延迟或无法到达目的节点,这种节点自私行为极大地影响网络中的投递率、时延及开销。为了验证中继节点对网络性能的影响,文献[4]提出了利用马尔可夫特性建立相应的内容分发预测模型,得出自私节点下的消息投递时延大于合作节点的消息投递时延;并且文献[5]利用随机着色过程模拟 DTN 传染路由,得出自私节点下的消息投递率低于合作节点的消息投递率;同时,文献[6]通过实验仿真证明,具有自私性的中继节点在转发过程中存在较高的丢包率。因此,为了保证数据的高效传输,如何避免中继节点的自私行为,是基于多副本 DTN 转发机制中需要解决的关键问题。

现有文献采用激励机制方式促进节点间的协作能力,主要分为3类:基于声誉评估的激励机制<sup>[7]</sup>,基于虚拟货币的激励机制<sup>[8]</sup>,基于博弈论的激励机制<sup>[9]</sup>。其中,文献[10]提出了一种以用户为中心的 DTN 声誉评估方案,其方法是在传统声誉评估的基础上增加声誉证明和自我检查方案,提高了方案的安全性和有效性。文献[11]提出了基于虚拟货币的互惠激励机制,该机制规定无线节点需要向其他节

点支付电子币,才可以获取自身所感兴趣的内容。而为了获得更多的收益,节点需要从 Internet 下载大量它并不感兴趣的内容,从而满足其他节点需求。文献[12]针对 DTN 存在的节点自私性问题,提出了一种基于买卖模型的节点激励策略,采用货币支付模式,综合考虑节点自身资源、拥有的虚拟货币以及消息属性对消息进行定价,从而激励自私节点合作。文献[13]提出了基于演化博弈的网络合作机制,在传统囚徒博弈的基础上,将模型扩展为演化博弈模型,并设计相关转发博弈的支付矩阵,根据不同节点采用多种转发策略,实现消息的转发。

激励机制的提出虽然解决了因中继节点不转发导致的投递率下降问题,但是由于延迟容忍网络中的拓扑结构存在剧烈的动态变化,激励方法无法直接部署于网络,需要依靠第三方系统控制。为了对第三方进行有效的机制部署,基于激励的传输方式需要更多占用节点的能量、缓存空间等有限资源,因此,本文提出一种基于节点行为分析的转发机制,该转发机制按照节点行为特性以确定待转发的副本数量,不需要依赖第三方进行管理。

## 2 自私性 DTN 中的节点行为分析

### 2.1 节点行为分析方法

在延迟容忍网络中,当中继节点进行数据分组的递交过程时,会表现出一定的行为特征。根据博弈论中节点行为<sup>[14]</sup>的定义,若中继节点完成了数据分组的接收,则该节点的行为特征表现为合作性;若中继节点拒绝接收数据分组,则该节点的行为特征表现为自私性。因此,为了保证分析方法的准确性,本文对不同的节点类型进行了如下定义。

**定义 1** 在延迟容忍网络中,若中继节点会无条件帮助其他节点转发消息,则称该类节点为合作节点,节点类型用{+}表示。

**定义 2** 在延迟容忍网络中,若中继节点在帮助其他节点转发消息时存在条件限制,则称该类节点为自私节点,节点类型用{o}表示。

**定义 3** 若携带数据分组的节点  $i$  运动到下一跳中继节点  $j$  的通信范围时,则称节点  $i$  与节点  $j$  为节点对  $\Phi_x = (i, j)$ ,且节点对集合用  $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$  表示。

根据节点类型的不同,网络中有4种状态节点对分别为: $\Phi \in \{(i_+, j_+), (i_+, j_o), (i_o, j_+), (i_o, j_o)\}$ 。如上所述,在节点行为分析方法中存在2个重要因素:节点行为和节点类型,且不同状态的节点对会因节点行为的不同而产生接收分组和丢包2种

情况。因此,在分析过程中,需综合考虑节点的接收概率和丢包概率来评估节点行为。

当 DTN 中的节点处于通信范围内,成功接收消息的概率主要与数据分组的大小、分组个数及下一跳节点的缓存能力有关。设  $t$  为当前时刻,  $\Delta t$  为节点  $i$  与节点  $j$  在下次接触前的时间间隔,则一对节点中消息成功接收的概率密度为:

$$f(t, t + \Delta t) = \lambda_{i,j} \cdot e^{-\lambda_{i,j} \Delta t \sum_{k=1}^n X_k(t)} \quad (1)$$

其中,  $\lambda_{i,j}$  表示携带消息的节点  $i$  与下一跳中继节点  $j$  之间的接触概率;  $X_k$  表示在  $\Delta t$  时间段内,节点对处于连接状态时,下一跳节点允许通过的消息分组的次数,如式(2)所示。

$$X_k = \begin{cases} 1, L_k \leq L_o(j) + \sum_{\{m | Pr_m < Pr_k\}} L_m(j) \\ 0, L_k > L_o(j) + \sum_{\{m | Pr_m < Pr_k\}} L_m(j) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $L_k$  代表存储  $k$  个数据分组时需要的缓存大小;  $L_o(j)$  代表节点  $j$  中闲置剩余的缓存大小;  $L_m(j)$  代表在节点  $j$  中已被占用的、存储  $m$  个数据分组时所需要的缓存大小,节点  $j$  中  $m$  个分组的优先级小于  $k$  个分组的优先级,即表示为  $\{m | Pr_m < Pr_k\}$ 。由此,根据上述节点允许接收消息的概率密度,可计算出在消息分组的生存时间  $TTL$  之内,节点对中组成节点  $j$  消息成功接收的概率,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} p_{\text{receive}}(j) &= F(t, t + \Delta t) \\ &= \int_t^{t+\Delta t} f(t + \Delta t) d(\Delta t) \\ &= \int_t^{TTL} \lambda_{i,j} \cdot e^{-\lambda_{i,j} \Delta t \sum_{k=1}^n X_k(t)} d(\Delta t) \end{aligned} \quad (3)$$

但当中继节点成功接收数据分组后,若中继节点因资源受限等因素表现出无转发意愿时,节点会拒绝帮助非目的节点的分组进行中继转发,而选择丢弃数据分组,则计算网络中节点丢包率的估计值为:

$$\begin{aligned} p_{\text{drop}} &= \frac{\sum_{\{k | p_k < p_d\}} |S_k(j)|}{\sum |S_n(j)|} \\ &= \frac{\sum_{\{k | p_k < p_d\}} k}{\sum n} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $S_k(j)$  代表节点  $j$  缓存中第  $k$  个消息分组集合,且第  $k$  个分组的优先级小于以  $j$  为目的节点的消息分组  $d$  的优先级,即表示为  $\{k | Pr_k < Pr_d\}$ ,  $\sum S_n(j)$  表示为节点  $j$  中所有的分组集合。

综上所述,节点对中不同节点行为的评估方法为以下 3 种事件的发生概率。

**事件 1** 若节点对中下一跳中继节点( $j$ )为合作节点,则事件 1 发生的概率为:

$$P_1 = P_{(i_+, j_+)} = P_{(i_o, j_+)} = R_c \cdot \lambda_{i,j} \cdot p_{\text{receive}}(j) \quad (5)$$

**事件 2** 若节点对中下一跳中继节点( $j$ )为自私节点的合作行为,则事件 2 发生的概率为:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{(i_+, j_o)} = P_{(i_o, j_o)} \\ &= R_s \cdot \lambda_{i,j} \cdot p_{\text{receive}}(j) [1 - p_{\text{drop}}(j)] \end{aligned} \quad (6)$$

**事件 3** 若节点对中下一跳中继节点( $j$ )为自私节点的非合作行为,则事件 3 发生的概率为:

$$\begin{aligned} P_3 &= P'_{(i_+, j_o)} = P'_{(i_o, j_o)} \\ &= R_s \cdot \lambda_{i,j} \cdot p_{\text{receive}}(j) p_{\text{drop}}(j) \end{aligned} \quad (7)$$

在式(5)~式(7)中,  $R_c, R_s$  分别表示网络中当前时刻未接收到数据分组的合作节点比例和自私节点比例。

## 2.2 节点状态概率转移模型

设延迟容忍网络中存在  $N$  个无线移动节点,包括  $K$  个自私节点和  $N - K$  个合作节点,节点集合表示为  $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 。当  $t = 0$  时,源节点产生数据分组进行消息投递,若携带消息副本的节点与合作中继节点相遇,则完成递交过程,此时,副本所经历的跳数会增加 1 跳;若与具有自私特征的节点相遇,则存在 2 种情况:1) 具有转发副本意愿的自私节点,则副本所经历的跳数会增加 1 跳;2) 无转发副本意愿的自私节点,则副本所经历的跳数会增加 0 跳。

因此,基于上述分析方法,按照消息的投递过程,建立节点相遇概率转移模型。在该模型中,状态量记为  $\{n, k, T_{\max}\}$ 。其中,  $n$  表示自私场景下参与路由的节点个数;  $k$  表示中继节点中自私节点的个数;  $T_{\max}$  表示数据分组在投递过程中的最大跳数。当携带数据分组的节点运动到中继节点通信范围时,模型的状态量发生改变,更新规则如表 1 所示。

表 1 模型状态量更新规则

节点类型和节点行为	$n$	$k$	$T_{\max}$
$(i_+, j_+), (i_o, j_+)$ 中合作行为	+1	0	+1
$(i_+, j_o), (i_o, j_o)$ 中合作行为	+1	+1	+1
$(i_+, j_o), (i_o, j_o)$ 中不合作行为	+1	+1	0

通过更新规则获得状态概率转移条件,如式(8)所示。

$$\begin{aligned} (X | n, k, T_{\max}) \in \{ &(n + 1, k, T_{\max} + 1 | n, k, T_{\max}), \\ &(n + 1, k + 1, T_{\max} + 1 | n, k, T_{\max}), \\ &(n + 1, k + 1, T_{\max} | n, k, T_{\max}) \} \end{aligned} \quad (8)$$

根据节点行为分析方法和状态概率转移条件,建立自私性 DTN 下节点状态概率转移模型,如图 1 所示。

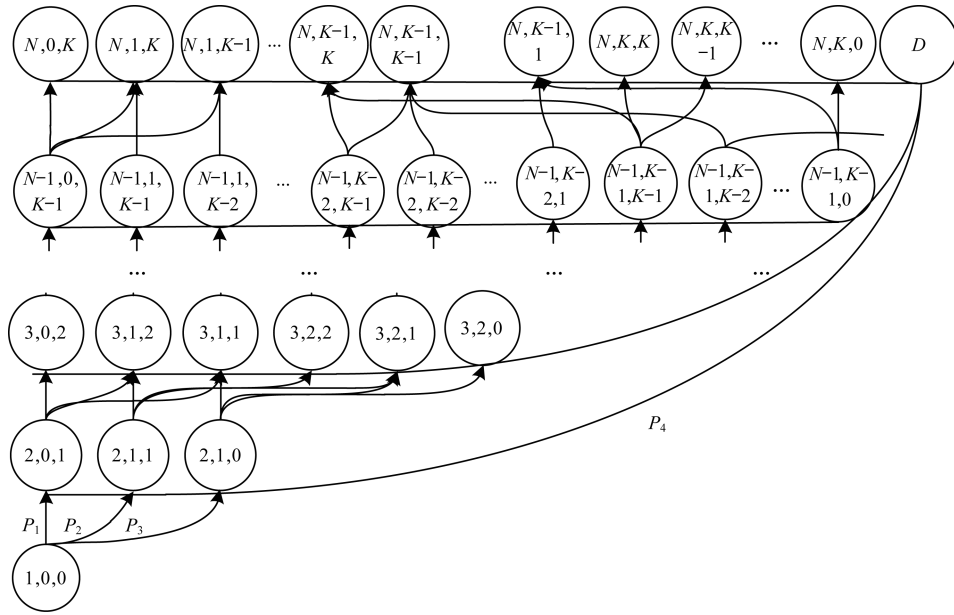


图1 自私性 DTN 下的节点状态概率转移模型

具体转移过程如下：

1) 当  $t$  为零时刻时, 源节点产生数据分组, 当前的状态量记为  $(1, 0, 0)$ 。

2) 数据分组到达中继节点后, 源节点依据中继节点的节点类型及状态更新规则确定相应的状态转移, 其相关的转移概率计算如式(9)所示。

$$P(X|n, k, T_{\max}) = \begin{cases} [(N-K) - (n-k)] \times \lambda p_{\text{receive}}, & X = (n+1, k, T_{\max} + 1) \\ (K-k) \times \lambda p_{\text{receive}} (1 - p_{\text{drop}}), & X = (n+1, k+1, T_{\max} + 1) \\ (K-k) \times \lambda p_{\text{receive}} p_{\text{drop}}, & X = (n+1, k+1, T_{\max}) \\ \lambda p_{\text{receive}}, & X = D \end{cases} \quad (9)$$

3) 重复上述步骤, 直至数据分组到达目的节点  $D$ 。

### 3 基于节点行为分析的消息转发机制

按照上述所提的节点状态概率转移模型和行为分析方法可评估出各中继节点的转发能力。本文通过节点状态转移概率模型中的跳数变化来检测中继节点类型是否为自私节点; 利用节点行为分析方法对网络中的节点是否有意愿传递消息进行评估, 进而完成与目的节点的递交。同时, 为了控制网络中的副本数量和保障消息传输的可靠性, 需要设计一个合理、有效的消息传输机制。因此, 本文提出了基于节点行为分析的消息转发机制, 其主要的转发过程包括 2 个阶段, 选择喷射递交策略和目的概率递交策略。

### 3.1 选择喷射递交策略

在初始状态下, 源节点生成  $L$  个消息副本转发给未接收副本的邻居节点, 同时在转发过程中, 副本的递交存在约束条件: 通过比较状态转移概率的大小来确定副本的递交, 因此需要对节点中的状态转移概率值进行更新。本文利用贝叶斯定理建立更新公式, 如式(10)所示。

$$P_{\text{new}} = P(X) = \sum P(X|n, k, T_{\max}) \cdot P_i(n, k, T_{\max}) \quad (10)$$

其中,  $P_{\text{new}}$  表示为更新后的节点转移概率;  $\sum P(X|n, k, T_{\max})$  表示为似然函数;  $P_i(n, k, T_{\max})$  表示为更新前的节点先验转移概率。因此, 在节点的属性单元中需要加入该节点与下一跳节点的转移概率属性, 如表 2 所示。

表 2 节点相关属性结构单元

属性名称	数据格式	含义
Node ID	Int	节点 ID
$n$	Int	参与路由的节点个数
$T_{\max}$	Int	节点的最大跳数
$P_i$	Double	更新前的节点转移概率
$P_{\text{new}}$	Double	更新后的节点转移概率
$L_0$	Double	节点剩余缓存大小
$Pr$	Int	当前消息的优先级
Update time	Long	节点转移概率的更新时间

消息副本的转发条件与自私性 DTN 下的合作阈值有关: 若节点间的转移概率大于合作阈值, 即  $P_{\text{new}} > p_{\text{th}}$ , 则表示邻居节点为正常节点或具有合作性的自私节点, 节点间进行消息副本传输, 其传输的副

本数为  $L/2$ ; 若节点间的转移概率小于合作阈值, 即  $P_{\text{new}} < p_{\text{th}}$ , 则表示邻居节点为自私行为下非合作节点, 节点间不进行副本传递。

### 3.2 目的概率递交策略

由于消息副本在网络中不断转发, 节点中副本拷贝数也不断减小。当节点的副本拷贝数为 1 且副本并未到达目的节点时, 节点只能通过机会移动的方式等待目的节点, 导致此阶段存在较大时延。因此, 在 BNBA 中通过计算节点对消息接收的意愿情况, 并且结合与目的节点的相遇概率来解决等待时延较长的问题。

在网络中定义节点接收消息意愿值, 如式 (11) 所示。

$$w_{i,j} = \sum_{r=t-T_{\text{window}}}^t L_{i,j}^r / T_{\text{window}} \quad (11)$$

其中,  $L_{i,j}^r$  表示在第  $r$  时刻时, 节点  $i$  与节点  $j$  之间是否存在消息转发关系, 若  $L_{i,j}^r = 1$ , 则表示节点  $i$  与节点  $j$  在  $r$  时刻时存在消息副本的转发; 若  $L_{i,j}^r = 0$ , 则表示节点  $i$  与节点  $j$  在  $r$  时刻时不存在消息副本的转发;  $T_{\text{window}}$  表示消息副本的排队时间窗口。

当消息副本完成选择递交过程后, 进入目的概率递交阶段, 即通过选择与目的节点相遇概率较大的中继节点进行递交, 则中继节点的更新规则表示为:

1) 当中继节点与目的节点在一个时间单元  $t$  内相遇时:

$$p_{i,d}^t = p_{i,d}^{t-1} + (1 - p_{i,d}^{t-1}) \cdot w_{i,d} \quad (12)$$

2) 当中继节点与目的节点在一个时间单元  $t$  内没有相遇时:

$$p_{i,d}^t = p_{i,d}^{t-1} \cdot w_{i,d} \quad (13)$$

### 3.3 BNBA 算法设计

基于节点行为分析的自私性 DTN 消息转发机制 (BNBA) 的具体步骤如下:

**步骤 1** 节点  $i$  与节点  $j$  进入通信范围后进行信息交互, 并判断节点  $j$  是否为消息的目的节点, 若是则完成消息的递交过程; 否则进入步骤 2。

**步骤 2** 此阶段进行节点行为分析过程, 通过统计网络的历史状态信息获知状态概率转移模型中各节点属性的跳数信息、参与节点个数等参数信息, 并由式 (9) 获知状态转移概率, 建立节点状态概率转移模型; 同时当前节点与邻居节点进行信息交互后, 由式 (10) 更新当前的节点状态转移概率, 并进入步骤 3。

**步骤 3** 此阶段进行 BNBA 中的选择喷射递交策略, 根据状态转移概率和合作阈值对转发的副本数量进行分类, 若大于合作阈值, 则对邻居节点传输的副本数量为  $L/2$ ; 若小于合作阈值, 则对邻居节点

传输的副本数量为 0, 若在此阶段数据分组到达目的节点, 则消息递交过程结束; 若待副本还未到达目的节点时, 则进入步骤 4。

**步骤 4** 此阶段进行 BNBA 中的目的概率递交策略, 由式 (11) ~ 式 (13) 更新中继节点与目的节点的相遇概率, 直至数据分组到达目的节点。

### 3.4 BNBA 算法分析

#### 3.4.1 控制开销

利用控制开销评价算法效率, 即控制开销越小, 算法的有效性越高。设  $C_{\text{TFT}}, C_{\text{BNBA}}$  分别为激励机制中的 TFT 策略算法<sup>[15]</sup> 和 BNBA 算法的控制开销。在相同条件下, 激励机制 TFT 策略需要与 Epidemic<sup>[16]</sup>, Spay and Wait<sup>[17]</sup> 多副本路由机制结合。而 BNBA 算法通过引入节点状态概率转移模型来评估中继节点的转发能力, 并由此对中继节点进行选择递交, 从而控制由副本带来的大量开销, 因此有  $C_{\text{BNBA}} < C_{\text{TFT}}$ 。同时, 在源节点向中继节点递交过程中, 节点状态概率的计算只与邻居节点的个数有关, 无需对全局消息进行统计, 而对状态概率的更新过程也不需要额外维持 BNBA 中节点的属性单元信息, 则 BNBA 具有较高的效率。

#### 3.4.2 分组平均传输时延

假设在自私性 DTN 中存在的节点数目为  $N$ , 节点之间的接触间隔符合参数为  $\lambda$  的指数分布, 利用数学期望可计算出带有 TFT 策略算法和 BNBA 算法的分组平均传输时延, 分别为:

$$E_{\text{TFT}}[t] = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{N-i} = \frac{1}{\lambda} (\gamma + \ln(N-1) + o(\frac{1}{N-1})) \quad (14)$$

$$E_{\text{BNBA}}[t] = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{1}{i(N-i)} = \frac{2}{\lambda N} (\gamma + \ln(N-1) + o(\frac{1}{N-1})) \quad (15)$$

其中,  $\gamma$  为欧拉常数; 由式 (14)、式 (15) 可知:  $E_{\text{BNBA}}[t] < E_{\text{TFT}}[t]$ 。

#### 3.4.3 复杂度

根据上述算法步骤可计算出 BNBA 的时间复杂度为  $T(n) = O(N)$ , 且空间复杂度为  $O(1)$ , 同时在极端情况下需要经过  $N-1$  次转发, 则此时的通信复杂度为  $O(N-1)$ , 可见 BNBA 算法并没有增加过多复杂度。

## 4 仿真结果与分析

本文采用机会网络环境 (Opportunistic Network Environment, ONE)<sup>[18]</sup> 所提出的转发机制进行仿真验证, 并与带有激励策略的 Epidemic + TFT 算法、

Spay and Wait + TFT 算法、Bubble Rap 算法<sup>[19]</sup>进行了性能比较。为了更好地模拟真实场景中的网络情况,采用真实数据集 Dataset roma/taxi<sup>[20]</sup>作为相关参数,配置文件的仿真参数设置如表3所示。

表3 仿真参数设置

参数	参数设置
仿真时间/s	43 200
仿真区域范围/m	4 500 × 3 400
预热时间/s	4 000
节点数	120
传输速率/(Kb · s <sup>-1</sup> )	250
最大传输范围/m	10
传输方式	Bluetooth
节点缓存/MB	[5, 50]
消息大小	[500 KB, 1 MB]
消息生存时间/s	600
消息间隔时间/s	[25, 35]

在仿真过程中,本文参照文献[21]设置自私环境,将120个节点共定义为2类,分别为合作节点、自私节点,其中,合作节点的缓存设置为[45 MB, 50 MB]区间均匀分布,且能量大小没有限制,自私节点的缓存设置为[5 MB, 10 MB]区间均匀分布,且能量大小存在限制;同时当与合作节点相互接触时,节点之间无需进行请求交互,当接触自私节点时,节点之间存在请求交互。仿真过程中设置了7种自私场景,按照不同的自私节点比例划分,分别为[20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%],相应的测评指标定义如下。

**定义4(消息成功投递率)** 在一定时间内由源节点生成并成功到达目的节点的消息数量与源节点生成的所有消息总数之比。

**定义5(消息传输时延)** 消息分组从源节点到目的节点所需的时间,包括消息分组在缓存中的等待时间。

**定义6(网络开销)** 在一定时间内源节点产生的消息分组总数与网络中所有节点转发消息分组总数之比。

#### 4.1 不同合作阈值对BNBA网络性能的影响

由3.1节可知,消息副本的传输与合作阈值有关。若合作阈值 $p_{th}$ 较小,则会导致允许接收非合作节点消息分组;若合作阈值 $p_{th}$ 过大,则会导致拒绝接收合作节点消息分组,以上2种情况均会降低转发机制的准确性。本节研究不同合作阈值对BNBA网络性能的影响。图2、图3分别描述了不同的合作阈值在不同自私场景下的投递率情况和消息传输时延情况。数值结果表明,不同大小的合作阈值会影

响BNBA中的消息投递概率和消息传输时延。当 $p_{th}$ 设置为0.6时,网络中消息的平均投递概率最大,且消息的平均传输时延最小。

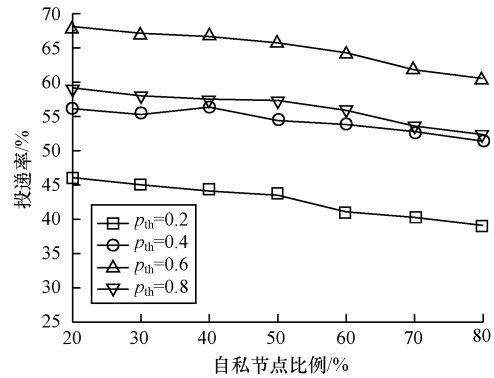


图2 不同合作阈值在不同自私场景下的投递率比较

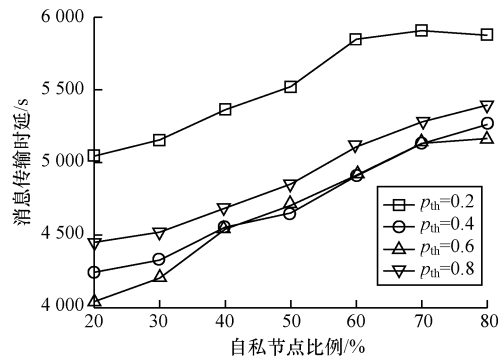


图3 不同合作阈值在不同自私场景下的消息传输时延比较

同时,图4、图5也分别描述了自私节点比例为50%的网络场景中,不同大小的合作阈值与消息的投递率、传输时延之间的关系。数值结果表明,随着节点数目的增加,投递概率及传输时延也随之上升,且提高速率逐渐减小。当合作阈值 $p_{th}$ 为0.2时,网络中消息的投递率较低,且消息的传输时延较高,其主要原因为对合作行为较低的邻居节点进行消息副本传输,会导致网络中存在大量丢包。综合比较网络中的投递率及传输时延,本文选取大小为0.6的合作阈值 $p_{th}$ 运用于BNBA中较为合理。

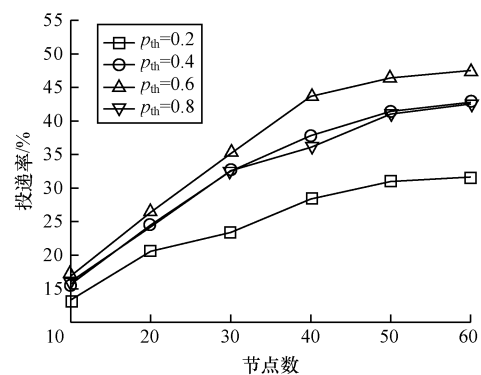


图4 不同合作阈值在不同节点数目下的消息投递率比较

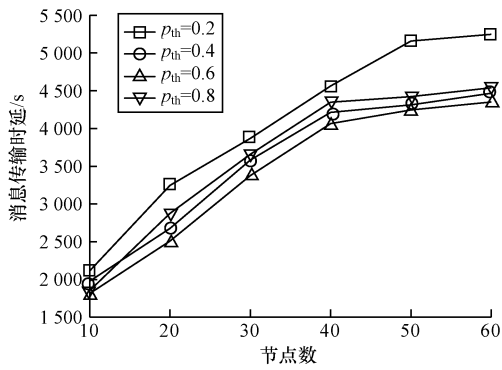


图 5 不同合作阈值在不同节点数目下的消息传输时延比较

#### 4.2 不同自私节点比例下算法的比较

在网络中,不同的自私节点比例会影响网络的性能大小。图 6、图 7 描述以 4 种转发机制为背景,通过调节不同的自私节点比例来评估相关的网络性能指标。图 6 结果显示,随着自私节点比例的增加,网络中消息的投递概率整体呈现为降低趋势。当自私节点比例增加为 50%,BNBA, Epidemic + TFT, Spay and Wait + TFT, Bubble Rap 算法 4 种转发机制的投递概率分别降低了 3.5%, 28.6%, 32.4%, 35.9%;当自私节点比例增加为 80%,4 种机制的投递概率分别降低了 11.1%, 52.2%, 38.9%, 41.5%。

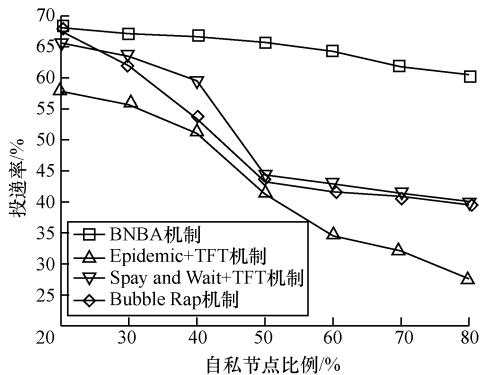


图 6 不同自私节点比例与消息投递率的关系

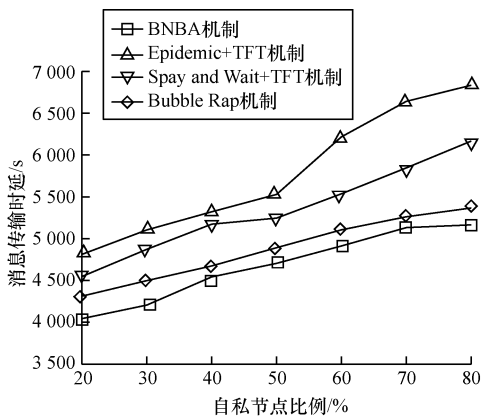


图 7 不同自私节点比例与消息传输时延的关系

数值显示,BNBA 转发机制较其他三者递减幅值相对较小,转发效果相对稳定。同时,BNBA 在消息的投递概率大小方面比 Epidemic + TFT 平均提升了 22.02%,比 Spay and Wait + TFT 平均提升了 13.84%,比 Bubble Rap 平均提升 15.15%,在相同条件下的消息传输时延如图 7 所示。BNBA 比 Epidemic + TFT 平均降低了 22.56%,比 Spay and Wait + TFT 平均降低了 14.34%,比 Bubble Rap 平均降低了 4.4%,其主要原因为 BNBA 通过评估节点间的行为大小,对下一跳中继节点进行选择性的消息副本传输,在减小副本传输盲目性的同时,提高在自私场景下的消息投递概率,降低了消息传输时延。

#### 4.3 不同节点缓存下算法的比较

不同大小的节点缓存会影响网络中路由的性能。图 8 描述了在自私节点比例为 50% 的场景中,随着节点缓存的不断增大,BNBA, Epidemic + TFT, Spay and Wait + TFT, Bubble Rap 这 4 种转发机制的消息投递概率呈现增大趋势。数值显示可知,在节点缓存有限的情况下,BNBA 的消息投递概率明显优于 Epidemic + TFT 和 Spay and Wait + TFT, Bubble Rap,其主要原因是当节点缓存受限时,Epidemic + TFT, Spay and Wait + TFT 和 Bubble Rap 会因为缓存不足产生大量丢包,导致网络中的投递率较低;而在 BNBA 转发机制中通过对中继节点缓存大小的评估,并以此进行消息转发,因此 BNBA 存在较高的投递率。图 9 描述的是随着网络中节点缓存不断增大,4 种机制的平均网络开销不断减小的趋势。数值显示可知,BNBA 在网络开销方面比 Epidemic + TFT 最高降低了 15.59%,比 Spay and Wait + TFT 最高降低了 11.12%,比 Bubble Rap 最高降低了 8.18%。因此,在节点资源受限的条件下,BNBA 较 Epidemic + TFT, Spay and Wait + TFT 和 Bubble Rap 这 3 种机制相比性能更优。

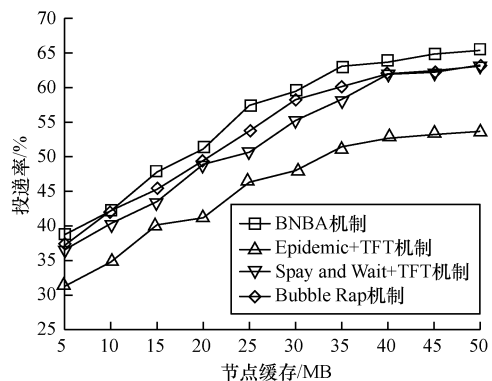


图 8 不同缓存大小与消息投递率的关系

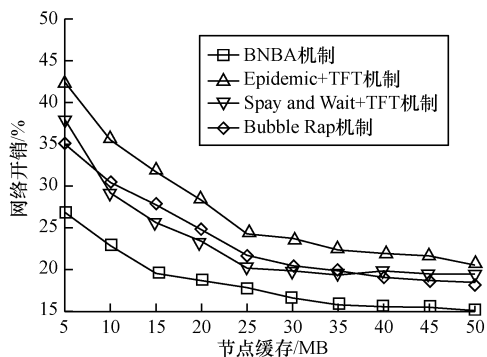


图9 不同缓存大小与网络开销的关系

## 5 结束语

在延迟容忍网络中,节点的自私性会影响 DTN 的网络性能。激励方案虽促进了节点合作机会,但同时要占用自身有限资源管理第三方,加重了网络负载。为此,本文采用节点行为分析方法对网络中的节点是否有意愿传递消息进行了评估,通过建立节点状态转移概率模型来检测该节点类型是否为自私节点,进而提出一种基于节点行为分析的自私性 DTN 消息转发机制(BNBA)。实验结果表明, BNBA 机制在不同自私节点比例的场景下,与其他 3 种算法相比,均具有较高的投递率、较低的消息传输时延及网络开销。在今后的工作中将考虑更多的节点特征,如节点社会属性对自私性 DTN 消息传输的影响,进一步完善机制。

### 参考文献

[1] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, et al. Delay-tolerant Networking: An Approach to Interplanetary Internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128-136.

[2] 苏金树, 胡乔林, 赵宝康, 等. 容延容断网络路由技术[J]. 软件学报, 2010, 21(1): 119-132.

[3] 马华东, 袁培燕, 赵东. 移动机会网络路由问题研究进展[J]. 软件学报, 2015, 26(3): 600-616.

[4] Helgason O R, Legendre F, Lenders V, et al. Performance of Opportunistic Content Distribution Under Different Levels of Cooperation [C]//Proceedings of European Wireless Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 903-910.

[5] Resta G, Santi P. A Framework for Routing Performance Analysis in Delay Tolerant Networks with Application to Noncooperative Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(1): 2-10.

[6] Miao J, Hasan O, Mokhtar S B, et al. An Investigation on the Unwillingness of Nodes to Participate in Mobile Delay Tolerant Network Routing [J]. International Journal of Information Management, 2013, 33(2): 252-262.

[7] Dini G, Duca A L. A Reputation-based Approach to Tolerate Misbehaving Carriers in Delay Tolerant

Networks [C]//Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 772-777.

[8] Chen Binbin, Chan Munchoon. Mobicent: A Credit-based Incentive System for Disruption Tolerant Network [C]//Proceedings of the 29th Conference on Information. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 1-9.

[9] Shevade U, Song H H, Qiu V L, et al. Incentive-aware Routing in DTNs [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 238-247.

[10] Wei Lifei, Zhu Haojin, Cao Zhenfu, et al. MobiID: A User-centric and Social Aware Reputation Based Incentive Scheme for Delay/Disruption Tolerant Networks [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks. New York, USA: ACM Press, 2011: 177-190.

[11] 赵广松, 陈鸣. 自私性机会网络中激励感知的内容分发的研究[J]. 通信学报, 2013, 34(2): 73-84.

[12] 李云, 于季弘, 尤肖虎. 资源受限的机会网络节点激励策略研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(5): 947-956.

[13] Baig O, Al-Harhi Y S, Al-Tubaishi E. Game-theoretic Algorithm Stimulating Cooperation in Multihop Wireless Networks [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Institute of Electrical and Electronics Engineers. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1-5.

[14] 许力, 陈志德, 黄川. 博弈理论在无线网络中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[15] Boyer S, Robert J M, Rousseau C, et al. A Novel Reputation-based Tit-for-Tat Strategy for IEEE 802.11 CSMA/CA Protocol [C]//Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference. New York, USA: ACM Press, 2012: 143-148.

[16] Jindal A, Psounis K. Performance Analysis of Epidemic Routing Under Contention [C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing. New York, USA: ACM Press, 2006: 539-544.

[17] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks [C]//Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay-tolerant Networking. New York, USA: ACM Press, 2005: 252-259.

[18] Keranen A, Ott J, Karkkainen T. The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. New York, USA: ACM Press, 2009: 55.

[19] Pan Hui, Crowcroft J, Yoneki E. BUBBLE Rap: Social-based Forwarding in Delay-tolerant Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 10(11): 1576-1589.

[20] Lorenzo B, Marco B, Pierpaolo L, et al. CRAWDAD Dataset Roma/Taxi [DB/OL]. (2014-07-17). <http://cr-awdad.org/roma/taxi/20140717>.

[21] Anderson R, Edjair M. Implementation of Selfish Behavior in Opportunistic Network Using the ONE, RT-GRCM-2014/1 [R]. Federal University of Amazonas, 2014.