

## DTN网络中基于生灭模型的节点运动模式检测

邓广宏<sup>1,2</sup>, 曹万华<sup>1,2</sup>, 张剑<sup>2</sup>, 程雄<sup>2</sup>, 冯力<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 武汉数字工程研究所 系统科研部, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 提出了一种 DTN 网络中基于生灭模型的节点运动模式检测方法(MMD-BDM, mobility model detection method based on birth and death model)。在节点数据传输过程中, 根据数据传输量计算得到各个连通链路采样时刻的信道容量, 在本节点构建以信道容量构成的三维时变连通矩阵, 并在此基础上推导出基于边连通的节点连通性生灭模型, 然后分析节点连通边的生灭特征并以此判断节点的运动模式, 以优化 DTN 网络消息投递过程中的路由转发策略。最后, 将该运动模式检测方法应用在喷射路由(SWR, spray and wait routing)和随机网络编码路由(RNCR, random network coding routing)算法中进行了仿真实验, 实验表明, 该方法能提高 DTN 网络机会路由的投递率和投递延迟等数据投递性能。

**关键词:** 延迟容忍网络; 生灭模型; 节点移动模型; 机会路由

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

## Mobility model detection method based on birth and death model in DTN environment

DENG Guang-hong<sup>1,2</sup>, CAO Wan-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, CHENG Xiong<sup>2</sup>, FENG Li<sup>2</sup>

(1.College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Department of Scientific Research on System, Wuhan Digital Engineering Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A mobility model detection method based on birth and death model (MMD-BDM) in DTN environment was proposed. It first computed the connected channel capacity of sampling times according to the data traffic during the data transfer process, and then constructed the time varying intercommunication metrics at local, which composed of channel capacity between local node and others. Based on these, the connection birth and death mode of nodes based on connected edges was deduced, and then the birth and death features of the connected nodes was analyzed to detect the mobility model, which used to improve the routing strategy during the packages deliver process. Ultimately, the mobility model detection method was put into use in spray and wait routing (SWR) method and random network coding routing (RNCR) method to experiment, the simulation results show that, it can improve the opportunity routing performance of the data deliver rate and transfer latency in DTN environment.

**Key words:** delay tolerant network; birth and death model; mobility model; opportunity routing

### 1 引言

延迟容忍网络<sup>[1,2]</sup>(DTN, delay tolerant networks)是为在间歇连通、动态拓扑的不可靠网络中实现节点间信息传输和交互而提出的一种能适应受限网络

环境的新型网络模型。在一些实际应用场景中, 受节点移动、链路干扰和环境影响等均会导致节点间不可能时刻存在可靠的传输路径, 网络经常处于间歇连通状态, 造成网络拓扑不稳定<sup>[3]</sup>。因此节点必须充分利用与其他节点相遇时的通信机会, 以“存储

收稿日期: 2013-08-31; 修回日期: 2013-10-23

基金项目: 国防预研基金资助项目(4010105010103, 62101050101, 513150802, B0820132036); 船舶基金资助项目(09J3.4.1, 10J3.7.2)

**Foundation Items:** The Defense Pre-Research Projects of China(4010105010103, 62101050101, 513150802, B0820132036); The Shipbuilding Science Foundation(09J3.4.1, 10J3.7.2)

—携带—转发”的方式实现消息的投递<sup>[4]</sup>。如战场网络就是一种典型的 DTN 网络,作战单元移动过程中受地理环境及电磁干扰的影响,各节点间往往都是间歇连通的,网络拓扑也是动态变化的。

DTN 网络复杂的动态性使得为其设计高效的路由协议成为一项复杂而有挑战性的工作。除一些基于洪泛策略的通用路由算法外,在一些特定领域,要想获得更高效的数据投递性能,研究人员大都基于节点移动环境的上下文信息或基于对网络拓扑演化的预测,进而做出消息投递的路由决策<sup>[5~11]</sup>。如研究节点群组移动模式设计群组场景的消息路由策略<sup>[12]</sup>;研究摆渡节点的移动策略以优化节点摆渡路径来提高数据传输效率<sup>[13~15]</sup>;研究节点运动速度、节点密度和传输距离等物理属性分析链路动态模型指导路由设计<sup>[16]</sup>等。

事实上,若可以预测或事先获知动态网络的拓扑演化,则基于节点运动模式预测的机会路由算法性能将得到极大的提高。然而预测网络拓扑演化却很困难,因此,针对各种应用场景,研究人员提出了各种移动模型以预测动态网络的拓扑变化,如空天通信过程中卫星的周期性移动模型<sup>[17]</sup>,群组移动模型<sup>[12]</sup>、社区移动模型<sup>[6]</sup>、车载节点的移动模型<sup>[18]</sup>等。为此也提出了一些移动模型的检测方法以识别这些移动模型。文献[10]利用邻居发现机制获得节点连通信息提出了一种节点移动模型的动态检测方法。周晓波等采用模板匹配的方式实现节点移动模型的提取<sup>[19]</sup>。蔡青松等则通过研究网络拓扑中边的演化过程,分析节点移动过程中边的连通概率,预测网络拓扑演化,指导消息传递<sup>[20]</sup>。

综合分析发现,以上的研究大都是针对特定的应用场景和简单的运动模式而提出,在多种运动模式混杂、节点间歇连通的 DTN 网络环境中,往往不能及时、全面地提取节点的各种运动模式给出有效的路由指导信息。另外,这些方法大都需要获取到全局节点的连通信息,这在网络拓扑频繁变化的 DTN 网络中比较困难并存在较大的

时延,难以提供及时的路由指导。因此,如何在动态变化的多种运动模式混杂的 DTN 网络环境中及时、有效地分析出节点移动模型,优化消息路由转发过程,已成为提升 DTN 网络数据传输效率的一个挑战性课题。

针对战场通信环境下多种运动模式混杂的节点移动通信网络,根据本地节点获取的链路连通状态信息检测本节点及与其相遇节点的移动模型,进而为恶劣通信环境下消息的机会投递提供有价值的路由信息。节点首先根据数据收发状态计算得到连通链路的信道容量,获得各个时刻的节点三维连通矩阵,然后从连通矩阵的时间演化数据中建立节点连通性生灭模型,并根据连通边的生灭特征识别连通节点的移动模型,指导消息的投递转发。

## 2 节点连通矩阵

在动态连通的 DTN 网络中,因为链路的间歇连通性,导致往往只能通过其他节点与本节点的机会接触获得片段性的连通信息,连通信道的信道容量也是不断变化的,因而难以获得全面的网络连通状态。为此,通过在本地节点监测连通链路的数据传输量,在马尔科夫信道模型<sup>[21]</sup>的基础上计算得到连通链路的信道容量,并根据在各个采样时刻本节点与其他节点连通链路的信道容量构建一个加入时间维的三维时变连通矩阵,然后以此作为节点连通性生灭模型分析的数据基础。

### 2.1 有限状态马尔科夫信道(FSMC)模型

有限状态马尔科夫信道模型中<sup>[21,22]</sup>,信噪比的变化范围划分为有限个状态

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}, s_k \in [\Gamma_k, \Gamma_{k+1}), (0 \leq k \leq n)$$

$$-\infty < \Gamma_i < \Gamma_j < \infty, 0 \leq i \leq j \leq n+1$$

$\Gamma_{k+1} - \Gamma_k$  为每个信道状态的信噪比区间,并假设信道为慢衰落,信道状态只在相邻状态间转换,如图 1 所示。信道状态间的转移概率为

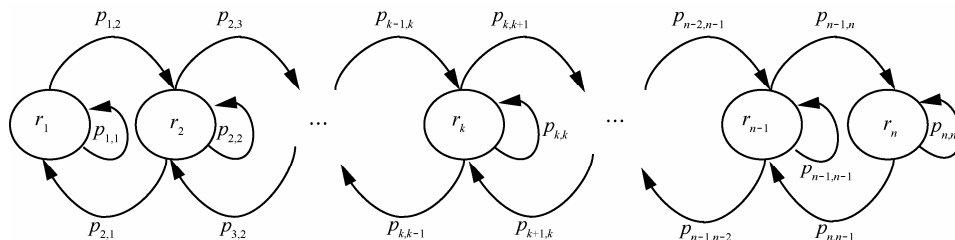


图 1 有限状态马尔科夫信道模型状态转移

$$P_{i,j} = P_r \{S_{t+1} = j | S_t = i, |i-j| \leq 1\} \quad (1)$$

其中,  $S_t = i$  表示在  $t$  时刻信道的状态为  $i$ ,  $P_{i,j}$  表示信道从状态  $i$  变化到状态  $j$  的概率。

在瑞利衰落信道下, 节点  $i$  接收数据的瞬时信噪比(SNR)  $\mathcal{Y}$  的概率密度函数为<sup>[22]</sup>

$$p_i(\mathcal{Y}) = \frac{1}{\bar{\mathcal{Y}}_i} \exp\left(-\frac{\mathcal{Y}}{\bar{\mathcal{Y}}_i}\right) \quad (2)$$

其中,  $\bar{\mathcal{Y}}_i = E(\mathcal{Y}_i)$  是平均信噪比, 信道处于  $s_k$  状态的稳态概率为

$$\eta_k^i = \int_{\Gamma_k}^{\Gamma_{k+1}} p_i(\mathcal{Y}) d\mathcal{Y} \quad (3)$$

设  $\mathbf{P}_\eta^i = (\eta_0^i, \eta_1^i, \dots, \eta_n^i)$  为节点  $i$  的信道状态的稳态概率向量, 节点  $i$  的状态转移概率为<sup>[21]</sup>

$$P_{k,k+1}^i = \frac{N(\Gamma_{k+1})T_c}{\eta_k}, k=0,1,2,\dots,n-1 \quad (4)$$

$$P_{k,k-1}^i = \frac{N(\Gamma_{k-1})T_c}{\eta_k}, k=1,2,\dots,n \quad (5)$$

其中,  $N(\cdot)$  是交叉函数

$$N(\Gamma) = \sqrt{\frac{2\pi\Gamma}{\mathcal{Y}_i}} f_d \exp\left(-\frac{\Gamma}{\mathcal{Y}_i}\right) \quad (6)$$

$f_d$  为多普勒频移, 若发生数据的符号速率恒定, 则  $T_c$  为一恒定值<sup>[22]</sup>。对应的  $P_{k,k}^i$  为

$$P_{k,k}^i = \begin{cases} 1 - P_{k,k-1}^i - P_{k,k+1}^i, & 0 < k < n \\ 1 - P_{0,1}^i, & k = 0 \\ 1 - P_{n,n-1}^i, & k = n \end{cases} \quad (7)$$

得到节点  $i$  的状态转移矩阵为

$$\mathbf{P}_\eta^i = \begin{bmatrix} P_{0,0}^i & P_{0,1}^i & \dots & \dots & \dots & 0 \\ P_{1,0}^i & P_{1,1}^i & P_{1,2}^i & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & P_{n-1,n-2}^i & P_{n-1,n-1}^i & P_{n-1,n}^i \\ 0 & \dots & \dots & \dots & P_{n,n-1}^i & P_{n,n}^i \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 2.2 信道容量计算

假设在节点接收数据时, 其信道状态在一个采样时隙内处于稳态, 则在一个时隙段, 节点  $i$  接收数据量的期望值为

$$\bar{D} = \omega(V \times L^T) P_\eta^{iT} \quad (9)$$

其中,  $\omega$  为发送端发送一个数据帧所用时隙大小,  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  为对应于每个信道状态的数据传

输速率,  $L = (l_1, l_2, \dots, l_n)$  为对应于每个信道速率的分组丢失率,  $V \times L^T = (v_1 \times l_1, v_2 \times l_2, \dots, v_n \times l_n)$ ,  $\mathbf{P}_\eta^{iT}$  是信道稳态概率向量的转置。

假定在时隙  $t$  节点  $i$  接收到的数据量为  $D_t^i$ , 若:  $\alpha \bar{D} < D_t^i < \bar{D}$ , 则说明当前信道状态仍处于某一稳态, 否则进行状态切换。其中,  $0 < \alpha < 1$ , 为误差调整系数。

$\mathbf{S}_e = (s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_n)$  是信道  $e$  的状态向量, 信道处于  $s_k$  的状态元素值为

$$S_j = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ 1, & j = k \end{cases}, 1 \leq j \leq n$$

取状态向量  $\mathbf{S}_e = (s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_n)$  矩阵中第  $k$  列并转置, 记为

$$\mathbf{SP} = [(\mathbf{S}_e P_i) [ * ] [ k ] ]^T \quad (10)$$

计算该列元素的最大值并置为 1, 其他值置为 0, 记为  $\mathbf{SP}'$ , 取信道  $e$  的新状态向量为  $\mathbf{S}'_e = \mathbf{SP}'$ , 根据信道状态向量对应到信道数据速率向量, 可得到当前的信道速率(即信道容量), 计算出链路的信道容量。如算法 1 所示, 算法的计算消耗主要是对向量的循环处理, 其时间复杂度为  $O(n^2)$ , 空间复杂度为  $O(n)$ 。

### 算法 1 信道速率动态获取算法

#### Input

$V$ : 信道  $e$  的数据速率向量

$L$ : 信道  $e$  的数据分组丢失率向量

$|\mathbf{S}_0|$ : 信道  $e$  的初始状态向量

#### Output

$v_i$ : 信道  $e$  的信道速率

#### Steps

1) 统计信道在一个采样时隙收到的数据量  $D$ ;

2) for( $i=1$ ;  $i \leq |\mathbf{S}_0|$ ;  $i++$ )

3) 按式(2)和式(3)计算信道处于  $S_0$  状态的稳态概率向量  $\mathbf{P}_\eta^i$ ;

4) 根据信道的数据速率向量  $V$ , 分组丢失率向量  $L$ , 按式(9)计算信道在一个时隙接收数据的期望值向量  $\bar{D}$ ;

5) if( $\alpha \bar{D} < D_t^i < \bar{D}$ )

6) 对比接收数据期望值向量  $\bar{D}$ , 得到信道的数据速率  $v_i$ 。

7)  $s_t = s_0$ , 返回  $v_i, s_t$ ;

- 8) else
- 9) 根据式(10)获取信道转移概率向量  $SP$ ;
- 10) 计算  $SP$  中元素的最大值, 并把该值置为 1, 其他值置为 0, 得到信道  $e$  新的状态向量  $s_t$ ;
- 11)  $s_0 = s_t$ ;
- 12) end if
- 13) end for

本地节点通过上述方法计算得到与其连通节点间的信道容量  $w_{ij}$  后, 即可得到本节点在某时刻  $t_k$  的瞬态连通矩阵。

$$A_{t_k} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,n-1} & w_{1,n} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,n-1} & w_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ w_{n-1,1} & w_{n-1,2} & \cdots & w_{n-1,n-1} & w_{n-1,n} \\ w_{n,1} & w_{n,2} & \cdots & w_{n,n-1} & w_{n,n} \end{bmatrix}$$

$w_{ij}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  连通过程中的信道容量, 若  $w_{ij} = 0$  则表示此采样时刻两节点间不连通。

在各采样时刻获取节点连通矩阵的快照, 形成一个加入时间维度的三维连通矩阵, 如图 2 所示。通过对此三维时变连通矩阵的时间演化数据分析, 建立节点连通性生灭模型, 进而分析节点运动模式。

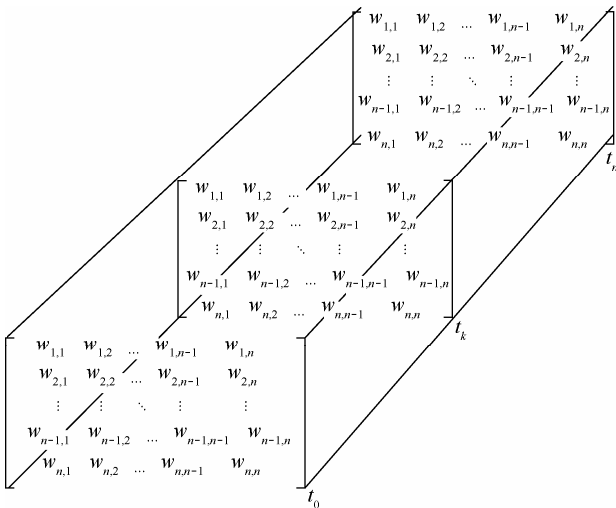


图 2 三维连通矩阵示意

### 3 节点连通性生灭模型和运动模式识别

在间歇连通的 DTN 网络中, 当前提出的大多数路由算法都是基于对节点间相遇概率或网络拓扑演化的预测。在这类算法中, 节点连通的时间演

化规律是一个重要参考信息, 如周期性相遇、群组移动、社区性移动等, 这些连通演化规律在消息的投递转发过程中能有效地指导消息的路由选择, 提升数据传输效率。

本节从节点三维时变连通矩阵的时间演化数据中分析和构建节点连通边的生灭模型, 然后根据节点连通的生灭特征识别连通节点的移动模型, 优化 DTN 网络中消息的路由转发过程。

#### 3.1 节点连通性生灭模型

假定节点  $i$  和  $j$  连通边的信道容量  $w_{ij}$  在持续的时间步内演化,  $w_{ij}$  在演化过程中可能增大(连通性增强)、减小(连通性减弱)、或持续为 0(连接断开)。假设经过足够长的时间步演化后  $w_{ij}$  在  $t_{k+1}$  变为 0, 并在其后的  $t_{k+2}, t_{k+3}, \dots, t_{k+j-1}$  时刻持续为 0, 而后在  $t_{k+j}$  时刻  $w_{ij} > 0$  并增加, 如图 3 所示。

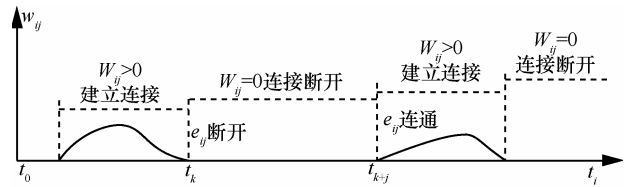


图 3 边连通时间演化

节点间的连通状态随时间演化过程呈连续变化, 下一状态与上一状态有相关性, 因此链路连通状态的变迁具有马尔科夫特性。故而可将边连通性的演化过程视为有 2 个状态(连通或断开)的马尔科夫链, 其状态互通而且不可约, 并有正常返态, 因此存在极限分布, 且极限分布为其稳态分布。链路连通状态演化如图 4 所示。

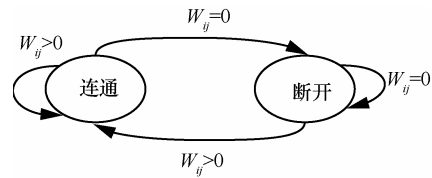


图 4 边连通状态演化

上述假设中, 令  $b(e_{ij})$  表示由  $w_{ij} = 0$  转换为  $w_{ij} > 0$  状态的概率(即边  $e_{ij}$  出生概率),  $d(e_{ij})$  表示由  $w_{ij} > 0$  转换为  $w_{ij} = 0$  状态的概率(即边  $e_{ij}$  死亡概率), 则有

$$b(e_{ij}) = \frac{\sum_{t=t_k, w_{ij}=0 \rightarrow w_{ij}>0} t_k}{\sum t} \quad (11)$$

$$d(e_{ij}) = \frac{\sum_{t=t_k, w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}=0} t_k}{\sum t} \quad (12)$$

其中,  $\sum_{t=t_k, w_{ij}=0 \rightarrow w_{ij}>0} t_k$  表示所有由  $w_{ij}=0$  转换为  $w_{ij}>0$  状态的累计时隙数,  $\sum_{t=t_k, w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}=0} t_k$  表示所有由  $w_{ij}>0$  转换为  $w_{ij}=0$  状态的累计时隙数,  $\sum t$  表示总采样时隙数。为便于计算极限分布概率, 将  $d(e_{ij})$  简化为  $d$ ,  $b(e_{ij})$  简化为  $b$ , 其状态转移矩阵为

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} w_{ij}=0 \rightarrow w_{ij}=0 & w_{ij}=0 \rightarrow w_{ij}>0 \\ w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}=0 & w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}>0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-b & b \\ d & 1-d \end{pmatrix} \quad (13)$$

引入中间矩阵  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{H}$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & -b \\ 1 & d \end{pmatrix}, \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1-b-d \end{pmatrix} \quad (14)$$

则有

$$\mathbf{H}^{-1} = \frac{1}{b+d} \begin{pmatrix} d & b \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{H}^{-1} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}^{(n)} = (\mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{H}^{-1})^{(n)} = \mathbf{H}\mathbf{M}^n\mathbf{H}^{-1} \dots \mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{H}\mathbf{M}^{(n)}\mathbf{H}^{-1}$$

$$\mathbf{P}^{(n)} = \frac{1}{b+d} \begin{pmatrix} d+b(1-b-d)^n & b-b(1-b-d)^n \\ d-d(1-b-d)^n & b+d(1-b-d)^n \end{pmatrix} \quad (16)$$

其中,  $|1-b-d| < 1, 0 < b, d < 1$ , 因此

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{P}^{(n)} = \frac{1}{b+d} \begin{pmatrix} d & b \\ d & b \end{pmatrix} \quad (17)$$

由此可推出从任意初始状态出发, 经过无数次演化后的稳态分布

$$p_d = \frac{d}{b+d}, p_b = \frac{b}{b+d} \quad (18)$$

即从任意状态出发, 经过若干时长的演化过程, 任意边  $e_{ij}$  以概率  $p_b$  连通 ( $w_{ij} > 0$ ), 以概率  $p_d$  断开 ( $w_{ij} = 0$ )。

令  $X$  表示链路连通和断开状态的间隔时间步, 则边  $e_{ij}$  在  $t_{k+1}$  时刻断开并在  $t_{k+j-1}$  连通的概率为

$$\Pr\{X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}} = j\} = (1-p_b)(1-b)^{j-2}b$$

若  $e_{ij}$  在时刻  $t_{k+1}$  断开并在时刻  $t_{k+2}$  连通, 即  $e_{ij}$  在一个时间步后立刻连通, 由于  $e_{ij}$  的状态与其前一时间步的状态具有相关性, 且  $k \rightarrow \infty \Rightarrow k+1 \rightarrow \infty$ , 因此  $e_{ij}$  在时刻  $t_{k+2}$  连通的概率为

$$\Pr\{X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}} = 1\} = p_b \quad (19)$$

由此推出一般形式下任意节点对在  $x$  个时间步内的链路连通间隔的概率密度函数为

$$\Pr\{X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}} = x\} = \begin{cases} p_b, & x=1 \\ (1-p_b)(1-b)^{x-2}b, & x>1 \end{cases} \quad (20)$$

通过上式对任意 2 个节点随时间推移的连通概率变化描述, 计算得到节点相遇的数学期望, 即可得到两节点相遇的平均时间间隔。

$$\begin{aligned} E(X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}}) &= \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i = p_b + \sum_{x=2}^{\infty} (1-p_b)b(1-b)^{x-2}x \\ &= p_b + b \sum_{x=2}^{\infty} \left(\frac{d}{b+d}\right)^{x-1} x \end{aligned} \quad (21)$$

同样, 可获得边  $e_{ij}$  在  $t_{k+1}$  时刻连通并在  $t_{k+j-1}$  断开的概率密度函数和数学期望分别为

$$\Pr\{X_{\text{con\_change}}^{e_{ij}} = x\} = \begin{cases} p_d, & x=1 \\ (1-p_d)(1-d)^{x-2}d, & x>1 \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} E(X_{\text{con\_change}}^{e_{ij}}) &= \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i = p_d + \sum_{x=2}^{\infty} (1-p_d)d(1-d)^{x-2}x \\ &= p_d + d \sum_{x=2}^{\infty} \left(\frac{b}{b+d}\right)^{x-1} x \end{aligned} \quad (23)$$

$e_{ij}$  在  $t_{k+1}$  时刻断开并在  $t_{k+j-1}$  持续断开的概率密度函数和数学期望分别为

$$\Pr\{X_{\text{discon}}^{e_{ij}} = x\} = p_d(1-b)^{x-1}, \quad x \geq 1 \quad (24)$$

$$E(X_{\text{discon}}^{e_{ij}}) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i = \sum_{x=2}^{\infty} p_d(1-b)^{x-1}x \quad (25)$$

$e_{ij}$  在  $t_{k+1}$  时刻连通并在  $t_{k+j-1}$  持续连通的概率密度函数和数学期望分别为

$$\Pr\{X_{\text{con}}^{e_{ij}} = x\} = p_b(1-d)^{x-1}, \quad x \geq 1 \quad (26)$$

$$E(X_{\text{con}}^{e_{ij}}) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i = \sum_{x=2}^{\infty} p_b(1-d)^{x-1}x \quad (27)$$

### 3.2 节点移动模型检测

为降低移动模型检测的复杂性, 分析本地节点

的链路连通矩阵, 暂不考虑全局节点的连通信息, 一方面是因为全局节点的链路连通信息难以全面、及时的获得; 另一方面是若以全局节点的连通数据为计算样本, 增加了计算检测的复杂性, 难以提供及时的路由指导信息。

文献[19]采用节点连通的原始演化数据进行移动模型检测, 但该方法仅能匹配片段性连通数据, 不能长期全面的检测, 同时计算量也更大, 对群组模型、社区模型等运动模式的预测能力有限。因此, 从节点的历史连通数据中提取节点连通的生灭特征, 根据其他节点与本节点连通过程中的生灭特征来进行识别, 检测本节点及连通节点的移动模型。

节点的运动模式中以周期性、群组性和社区性 3 种节点运动信息对消息路由的优化能起到较好的指导作用。

周期性移动模型是指节点间连通或断开存在一种稳定的周期性。若两节点保持在一定误差范围内以一种稳定的时间间隔在连通和断开间不断演化, 则可认为两节点满足一种周期性相遇的移动模式, 相遇周期为节点持续连通和持续断开的数学期望之和。因此, 若本节点与其他节点相遇过程中, 每次生灭过程都满足下列条件, 则可视为节点运动符合周期性移动模型

$$\begin{cases} |(t_{con}^{e_{ij}} - t_{discon}^{e_{ij}}) - E(X_{con\_change}^{e_{ij}})| \leq \delta \\ |(t_{discon}^{e_{ij}} - t_{con}^{e_{ij}}) - E(X_{discon\_change}^{e_{ij}})| \leq \delta \end{cases} \quad (28)$$

其中,  $t_{con}^{e_{ij}}$ ,  $t_{discon}^{e_{ij}}$  分别表示节点  $i$  和  $j$  建立连接的时间和断开连接的时间。上式表示若由连通到断开以及由断开到连通的实际时间与历史统计数据的数学期望在一定误差范围内, 则可判定为周期性运动。

群组模式是指一群节点在较长的时间内处于持续连通的状态, 形成一个具有相似运动特性的节点组。当前的大部分研究中对组的识别大都是基于邻接表, 即依赖于某个时刻节点间的连通状态。这对于间歇性连通的 DTN 网络并不适用, 因为间歇性连接使邻接表变化频繁, 从而使组结构难以探测。

通过分析其他节点与本节点的连通特性, 以及其他节点相对于本节点的连通特性, 可推断节点的群组运动模式。

若本节点与其他节点长期处于持续连通状态 (即持续  $w_{ij} > 0$ ), 则可视为本节点也属于该群组, 这可以通过分析节点连通矩阵进行判定。

本节点外的其他节点是否属于群组运动可以通过分析其他节点相对于本节点的连通规律进行判定。根据节点的连通或断开时刻, 以及持续连通和持续断开的期望值是否相近等进行判定。若其他节点与本节点的连通特性满足以下条件可推断节点为群组运动。

$$\begin{cases} |t_{con}^{e_{ij}} - t_{con}^{e_{ik}}| \leq \delta, |E(X_{con}^{e_{ij}}) - E(X_{con}^{e_{ik}})| \leq \varepsilon \\ |t_{discon}^{e_{ij}} - t_{discon}^{e_{ik}}| \leq \delta, |E(X_{discon}^{e_{ij}}) - E(X_{discon}^{e_{ik}})| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (29)$$

表示若节点  $i$  与  $j$  和  $k$  的连通时间和断开时间基本同步, 并且其持续连通和断开的时间期望在一定误差范围内, 则可认为节点  $j$  和  $k$  属于一个群组。其中,  $t_{con}^{e_{ij}}$  和  $t_{discon}^{e_{ij}}$  为节点  $i$  和  $j$  的连通时间和断开时间,  $t_{con}^{e_{ik}}$  和  $t_{discon}^{e_{ik}}$  为节点  $i$  和  $k$  的连通时间和断开时间。

社区模式是一种扩展的组模式。它用于描述一些节点周期性的在一定时间段聚集成组的一种运动模型, 是一种时段性的群组模式, 是周期性运动和群组运动的融合。如战场侦查时作战单元编队集合行进、进入区域后分组巡逻、完成后集合编队进入下一区域进行周期性分散巡视等。社区模式先要检测出组的形成时刻, 即哪些节点何时聚集成组, 然后利用群组模式进行识别。因此, 社区模式的识别可以采用与群组模式相同的识别方式, 同时再采用周期模式的判定方法, 判断群组聚合的周期性。识别方式如下

$$\begin{cases} |t_{con}^{e_{ij}} - t_{con}^{e_{ik}}| \leq \delta, |t_{discon}^{e_{ij}} - t_{discon}^{e_{ik}}| \leq \delta \\ |(t_{con}^{e_{ij}} - t_{discon}^{e_{ij}}) - E(X_{con\_change}^{e_{ij}} \cap X_{con\_change}^{e_{ik}})| \leq \varepsilon \\ |(t_{discon}^{e_{ij}} - t_{con}^{e_{ij}}) - E(X_{discon\_change}^{e_{ij}} \cap X_{discon\_change}^{e_{ik}})| \leq \varepsilon \\ |(t_{con}^{e_{ik}} - t_{discon}^{e_{ik}}) - E(X_{con\_change}^{e_{ij}} \cap X_{con\_change}^{e_{ik}})| \leq \varepsilon \\ |(t_{discon}^{e_{ik}} - t_{con}^{e_{ik}}) - E(X_{discon\_change}^{e_{ij}} \cap X_{discon\_change}^{e_{ik}})| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (30)$$

其中,  $E(X_{con\_change}^{e_{ij}} \cap X_{con\_change}^{e_{ik}})$  和  $E(X_{discon\_change}^{e_{ij}} \cap X_{discon\_change}^{e_{ik}})$  表示节点  $i$  与  $j$  和  $k$  同时连通和断开时的历史样本的数学期望。上式中首先判断节点  $i, j$  和  $i, k$  的连通和断开时间是否同步, 然后判断其连通和断开的持续时间是否与节点  $i$  同时与  $j, k$  连通和断开的平均持续时间相近, 即节点  $i$  与  $j, k$  的连通规律周期性复现, 满足上述判定即可视为节点运动符合社区模式。

节点移动模型检测算法如算法 2 所示, 算法的处理开销主要集中在对节点连通矩阵的计算, 其时间复杂度为  $O(n^3)$ , 空间复杂度为  $O(n)$ 。

### 算法 2 节点移动模型检测算法

#### Input

$A_i$ : 本地节点  $i$  的三维时变连通矩阵。

$N$ : 与节点  $i$  连通的节点组。

#### Output

$G$ : 与节点  $i$  连通的节点移动模型分组。

#### Steps

- 1) foreach ( $j \in N, w_{ij} > 0$ )
- 2) 计算  $A[i][j][t]$  中各状态的累计时隙数
 
$$\sum_{t=t_k, w_{ij}=0 \rightarrow w_{ij}=0} t_k, \quad \sum_{t=t_k, w_{ij}=0 \rightarrow w_{ij}>0} t_k,$$

$$\sum_{t=t_k, w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}>0} t_k, \quad \sum_{t=t_k, w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}=0} t_k$$
- 3) if ( $\sum_{t=t_k, w_{ij}>0 \rightarrow w_{ij}>0} t_k / \sum t > \eta$ );
- 4) 将节点  $i, j$  存入  $G$  中群组模型类, 并修正  $G$ ;
- 5) else
- 6) 若  $ij$  存在于  $G$  中群组分类, 则删除, 修正  $G$  中分类;
- 7) end if
- 8) 按式 (11) 和式 (12) 计算  $e_{ij}$  的生灭概率  $b(e_{ij}), d(e_{ij})$ ;
- 9) 按式 (21)~式 (27) 计算  $E(X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}}), E(X_{\text{con\_change}}^{e_{ij}}), E(X_{\text{discon}}^{e_{ij}}), E(X_{\text{con}}^{e_{ij}})$ ;
- 10) if ( $t_{\text{con}}^{e_{ij}}, t_{\text{discon}}^{e_{ij}}$  满足式 (28))
- 11) 将节点  $ij$  存入  $G$  中周期性相遇分组, 相遇周期为:  $E(X_{\text{con\_change}}^{e_{ij}}) + E(X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}})$
- 12) end if
- 13) foreach ( $k \in N, k \neq j, w_{ik} > 0$ )
- 14) 计算  $E(X_{\text{con}}^{e_{ik}}), E(X_{\text{discon}}^{e_{ik}}), E(X_{\text{con\_change}}^{e_{ij}} \cap X_{\text{con\_change}}^{e_{ik}}), E(X_{\text{discon\_change}}^{e_{ij}} \cap X_{\text{discon\_change}}^{e_{ik}})$ ;
- 15) if (满足式 (29))
- 16) 将节点  $j, k$  存入  $G$  中群组模型类, 并修正  $G$ ;
- 17) else
- 18) 删除  $G$  群组类中的  $j, k$  节点, 并修正  $G$  中分类;

- 19) end if
- 20) if (满足式 (30))
- 21) 将节点  $j, k$  存入  $G$  中社区模型类, 并修正  $G$ ;
- 22) else
- 23) 删除  $G$  社区类中  $j, k$  节点, 并修正  $G$  中分类;
- 24) end if
- 25) end for
- 26) end for

## 4 应用与仿真

移动模型检测主要为消息路由的投递转发或拥塞控制的丢弃策略提供有价值的决策信息。因此, 将基于生灭模型的移动模型检测方法应用在喷射路由 (SWR, spray and wait routing)<sup>[23]</sup> 和随机网络编码路由 (RNCR, random network coding routing)<sup>[24]</sup> 中优化消息投递过程, 并验证其路由性能。

在喷射路由中, 消息投递分为喷射和等待 2 个阶段, 在喷射阶段消息按一定的配额向周边节点投递, 在传统的喷射算法中往往会出现消息配额消耗在一个扩散能力有限的局部节点群中, 导致消息可达概率降低。因此, 在消息的配额喷射阶段引入移动模型检测, 充分利用有限的消息配额选择向周期运动节点、群组节点、社区性运动节点或随机运动节点进行多样性喷射转发, 提高消息可达概率。

在随机网络编码路由中, 中继节点对所有输入消息在本地节点进行网络编码运算后向所有输出边转发, 在传统的网络编码路由算法中, 消息的编码转发以洪泛的方式向所有输出边投递, 对网络资源消耗较大, 也会造成一些消息的无效传播。因此, 在编码扩散阶段通过移动模型检测选择有较高投递效率和投递成功率的移动节点进行转发, 制定相应的转发规则。

1) 若目标节点在连通矩阵中, 且目标节点属群组模式或社区模式的移动节点, 由于组内节点间连通性较好, 应尽量选择向组内其他节点编码转发; 若目标节点属于周期性节点, 应尽量向其周期途经节点转发, 则投递效率更高。

2) 若目标节点不在连通矩阵中, 则选择向周期运动节点、群组节点、社区性运动节点和随机运动节点等各类节点均匀分配转发数据量, 进行多样性

数据转发,增加目标接触概率,减少网络资源消耗。

结合节点运动模式信息,对消息投递转发规则进行约束和调整,本文设计实现了基于移动模型检测的网络编码路由(RNCR-MMD, random network coding routing based on mobility model detection)和喷射路由(SWR-MMD, spray and wait routing based on mobility model detection),并在仿真环境中与传统的喷射路由(SWR)和网络编码方法(RNCR)进行了对比分析。

#### 4.1 仿真环境

在 DTN 网络仿真软件 ONE1.4.1(the opportunistic network environment simulator)<sup>[25]</sup>中进行了仿真实验。在 ONE 仿真环境中添加了 SWR 喷射路由模块、RNCR 网络编码路由模块,以及 SWR-MMD 喷射路由模块、RNCR-MMD 网络编码路由模块,并对 4 种路由方法的数据投递性能进行了对比分析。

在 ONE 仿真环境中设计了一个在战场环境下的微缩型 DTN 网络场景:在半径为 5 000 m 的地理区域内分布有若干移动节点,并将移动节点分为 4 类:一类模拟卫星节点、摆渡节点等周期性运动节点,这类节点中每个运动符合各自的 MapBasedMovement 移动模型;一类节点模拟编组行进的作战单元,属群组移动模型,每个群组内的节点保持相同的运动模式,设置相同的移动速度和路径;另一类节点模拟进行社区性移动,节点运动过程中遇到其他节点群则交换到其他群组中,保持与群组其他节点相同的运动模式;还有一类节点模拟随机运动,节点运动符合 RandomWaypoint 移动模型。所有节点都具有数据收发能力,都可作为信源、信宿和中继节点。节点连通矩阵的缓存深度为 200 个连通时隙,节点间历史连通记录达到 10 次时节点开始进行运动模式检测。仿真场景中分别选定所有节点数的 10%作为信源和信宿,其余节点为中继节点。采用 RNCR-MMD 方式时部分仿真参数如表 3 所示。

仿真过程中,节点按各自设定的运动模式在区域内移动,信源节点分别采用 4 种不同的路由方式向信宿节点投递数据,信宿统计接收时间和数据接收量,然后根据信源的发送时间和发送数据量计算得到数据投递延迟和投递率。仿真结束时,统计网络中所有节点缓存的数据量,计算数据冗余率。

表 3 部分仿真参数配置

配置项	说明	数值
Scenario nrofHostGroups	场景中节点分组个数	4
Scenario disturbrate	信道干扰率	0.2
Scenario transType	数据传输类型	RNCR-DDM
Group1 bufferSize	组 1 节点缓存大小	50 MB
Group1 speed	组 1 节点移动速度	10.5 m/s, 11.5 m/s
Group1 nrofHosts	组 1 节点数	4
Group1 movementModel	组 1 节点移动模型	MapBasedMovement
Group2 movementModel	组 2 节点移动模型	MapBasedMovement
Group2 bufferSize	组 2 节点缓存大小	30 MB
Group2 speed	组 2 节点移动速度	3.5 m/s, 5.5 m/s
Group3 movementModel	组 3 节点移动模型	MapBasedMovement
Group3 bufferSize	组 3 节点缓存大小	30 MB
Group4 movementModel	组 4 节点移动模型	RandomWaypoint
Group4 bufferSize	组 4 节点缓存大小	30 MB

#### 4.2 结果分析

在 ONE 仿真环境中,对 DTN 网络环境下传统的喷射路由方法、网络编码路由方法,以及加入了移动模型检测的喷射路由和网络编码路由方法进行了仿真实验,对比分析了 4 种方法的数据投递率、投递延迟和数据冗余率。其中数据投递率定义为信宿收到的数据量与信源发出数据量的比值,实验结果取所有信宿节点的数据投递率的均值;数据投递延迟定义为数据分组从信源发出到信宿接收完成所花费的时间,实验结果取信宿节点收到的数据分组的平均投递延迟;数据冗余率为实验结束时网络中所有节点缓存数据量与信源发出数据量的比值。4 种方法的数据投递过程简要描述如下。

**SWR:** 在喷射阶段,源节点按一定配额向与其相遇的节点投递原始数据分组,消息配额用完后不再转发;中继节点收到数据后进入等待阶段,直至遇到信宿节点成功投递。

**SWR-MMD:** 喷射阶段,源节点根据分析获得的相遇节点移动模型按配额分发策略向与其相遇的节点转发;中继节点接收数据后等待直至遇到信宿节点成功投递。

**RNCR:** 源节点以一定的多播率向邻接节点传播数据,中继节点生成随机编码向量对输入数据进行编码计算后传播给周围节点,信宿收到足够的编码数据后进行解码计算得到原始数据。

**RNCR-MMD:** 源节点以一定的多播率向邻接

节点扩散数据, 中继节点进行网络编码扩散时, 根据探测到的节点运动模式信息, 按设计的转发策略进行多样性转发, 信宿收到足够的编码数据后进行解码计算得到原始数据。

为验证移动模型检测在网络规模增大的情况下对路由性能的增益, 对 ONE 仿真环境中 SWR、SWR-MMD、RNCr、RNCr-MMD 4 种方法随网络节点数变化的数据投递率、投递延迟和数据冗余率进行了对比分析, 如图 5~图 7 所示。

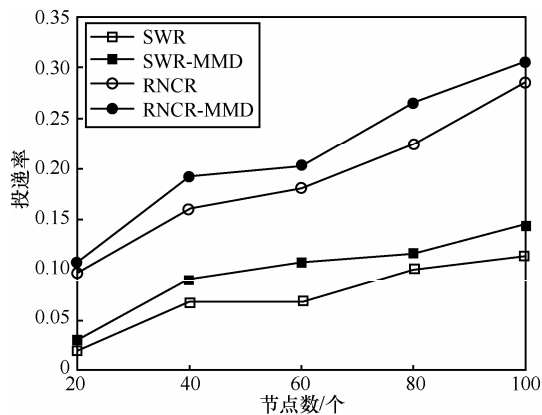


图 5 数据投递率随节点增加的性能比较

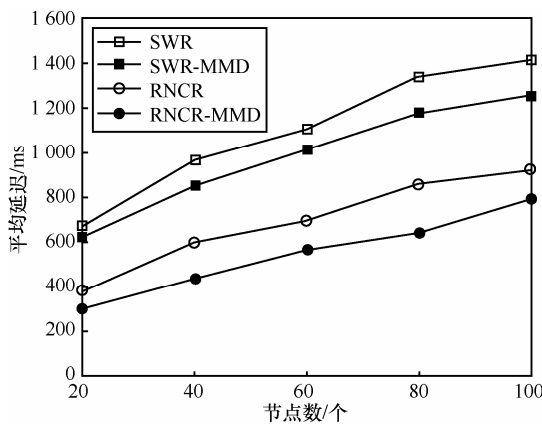


图 6 平均投递延迟随网络规模变化的性能比较

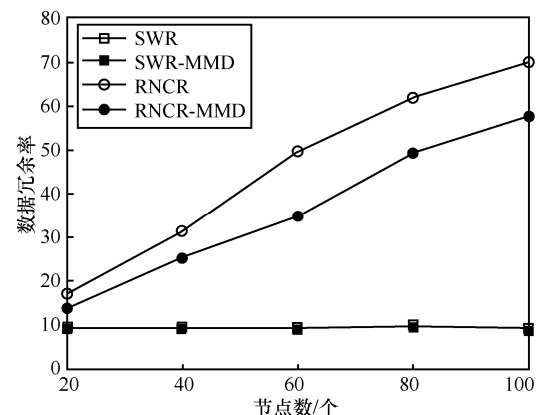


图 7 数据冗余率随节点增加的性能比较

随节点增多, 密度增大, 信源信宿间的数据投递路径增多, 因此数据投递成功率更高, 但数据无效转发次数增多, 数据冗余率增大, 数据投递时延更长, 同时也影响了投递率的提升。SWR 方法中, 节点密度增加会导致消息喷射配额过早用完, 消息扩散能力受限, 因此投递率和投递延迟较其他方法略差, 信息冗余率受投递配额限制不会有明显变化。SWR-MMD 方法中增加了节点运动模式识别, 在消息喷射阶段, 根据相遇节点的移动类型分配消息配额, 增强消息扩散能力, 因此投递率和投递延迟较 SWR 方法略优。RNCr 采用网络编码洪泛传输的策略, 数据分组的编码投递能充分利用网络容量进行多播, 能提高数据传输效率, 但编码包洪泛传播, 转发策略简单, 容易造成消息无效投递过多, 投递率下降等问题。RNCr-MMD 方法在编码包投递转发过程中增加了针对节点移动模型的投递转发策略, 利用节点运动模式信息增强数据分组转发目的性和分组扩散能力, 优化转发策略, 降低了网络信息冗余, 减少数据投递时延, 提高了数据投递率。

为验证在节点移动加剧时, 移动模型检测方法对路由算法的增益, 通过设置 ONE 中仿真节点的速度生成区间, 对比分析了 100 个节点时, 4 种方法随节点移动速度变化的数据投递率、投递延迟和数据冗余率。如图 8~图 10 所示。

随节点移动速度加快, 节点间链路变化更频繁, 节点相遇并转发数据的机会增多, 消息扩散能力更强, 同时节点连通矩阵中有更多的历史连通信息, 节点连通数据样本更全面。在 SWR 和 SWR-MMD 方法中, 节点移动加快会降低节点等待时延, 因此数据投递时延减少, 投递率增加, 但节点移动加快, 节点相遇频率也更快, 使 SWR 中喷射配额很快耗尽, 更容易陷入扩散受限的局部运动节点中, 因此投递时延和投递率性能较 SWR-MMD 要差。SWR-MMD 方法中, 根据节点运动模式的消息分配机制避免了因节点移动加快造成的消息扩散受限的影响, 因此投递率和投递延迟的性能更优。在 RNCr 方法中, 节点移动加剧也使洪泛传播过程中编码分组无序扩散范围加大, 无效投递的编码分组增多, 影响了数据投递性能。RNCr-MMD 方法利用节点的运动模式信息优化转发策略, 能在转发节点的选择上减少数据分组的无效转发, 降低了网络信息冗余, 因此其投递率和投递延迟更优。

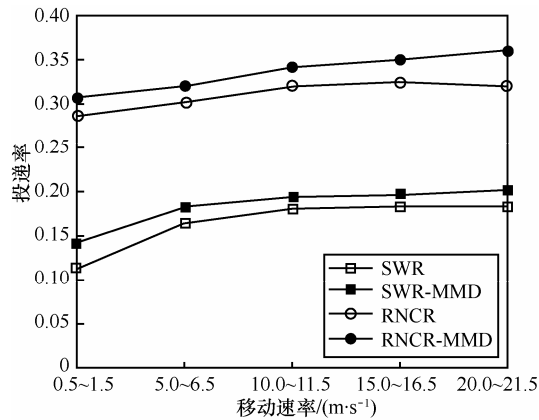


图8 数据投递速率随节点移动速度变化的性能比较

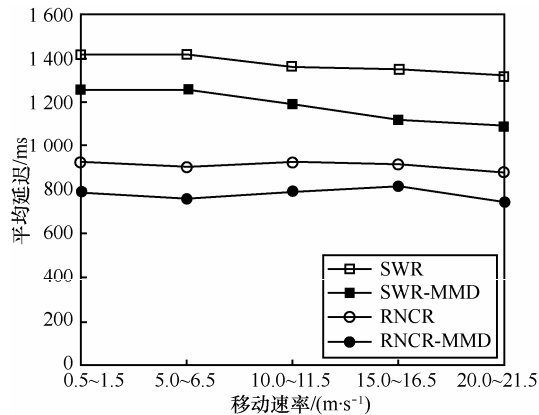


图9 平均投递延迟随节点移动速度变化的性能比较

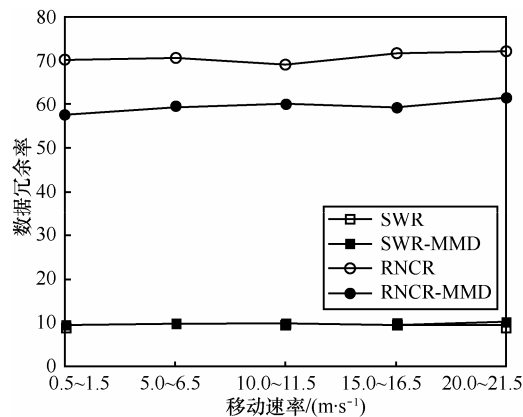


图10 数据冗余率随节点移动速度变化的性能比较

## 5 结束语

节点的运动模式信息在 DTN 网络路由算法的设计和 optimization 中有着重要的作用。针对现有移动模型检测方法对网络连通拓扑信息依赖度较高、对 DTN 网络的适应性不足等问题,提出了基于节点连通性生灭模型的 DTN 网络节点运动模式检测方法。该方法首先在节点数据传输过程中根据数据流量计

算获得链路信道容量,在本地节点构建三维时变连通矩阵,然后在此基础上建立节点连通性生灭模型,再根据连通边生灭特征识别节点运动模式,最后,将该方法应用在 DTN 网络喷射路由和网络编码路由算法中,并在 DTN 网络仿真环境 ONE 中进行了实验,结果表明,该方法能提升路由算法的数据投递性能。

## 参考文献:

- [1] FALL K. A delay tolerant network architecture for challenged internets[A]. Proc of the 2003 Conf on Applications, Technologies, Architectures and Protocols for Computer Communications, ACM[C]. Karlsruhe, 2003.27-34.
- [2] 熊永平, 孙利民, 牛建伟等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1):124-137.
- [3] XIONG Y P, SUN L M, NIU J W, *et al.* Opportunistic networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(1):124-137.
- [4] 樊秀梅, 单志广, 张宝贤等. 容迟网络体系结构及其关键技术研究[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 161-170.
- [5] FAN X M, SHAN Z G, ZHANG B X, *et al.* State-of-the-art of the architecture and techniques for delay-tolerant networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1):161-170.
- [6] 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.
- [7] SU J S, HU Q L, ZHAO B K, *et al.* Routing techniques on delay/disruption tolerant networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(1):119-132.
- [8] JEMIE L, TIMUR F, VANIA C. DTN routing in a mobility pattern space[A]. SIGCOMM'05 Philadelphia[C]. USA, 2005.
- [9] INJONG R, MINSU S, SEONGIK H, *et al.* On the levy-walk nature of human mobility[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 19(3):630-643.
- [10] 郭航, 王兴伟, 黄敏等. 基于半马尔科夫过程的 DTN 节点移动模型[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(7):1273-1276.
- [11] GUO H, WANG X W, HUANG M, *et al.* Mobility model of DTN nodes based on semi-Markov process[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(7):1273-1276.
- [12] HAYOUNG Y, JONGWON K, MAXIMILIAN O, *et al.* Mobility emulator for DTN and MANET applications[A]. WiNTECH'09[C]. Beijing, China, 2009.
- [13] MICHAEL D, TOBIAS P, WOLF B P, *et al.* A new mobility trace for realistic large-scale simulation of bus-based DTNs[A]. CHANTS'10[C]. Chicago, USA, 2010.
- [14] 彭敏. 延迟容忍网络中移动模型和路由技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2010.
- [15] PENG M. Research on Mobility Model and Routing in Delay Tolerant Network[D]. University of Science and Technology of China, 2010.
- [16] 蔡青松, 牛建伟, 刘明珠. 一种评估机会社会网络中节点消息传播能力的方法[J]. 软件学报, 2012, 23(Suppl 1):49-58.
- [17] CAI Q S, NIU J W, LIU M Z. Method for identifying node dissemination capability in opportunistic social networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(Suppl 1): 49-58.
- [18] 吴磊, 王晓敏, 刘明等. 延迟容忍传感器网络中基于群组运动的事

- 件传输[J]. 软件学报, 2012, 23(3):629-647.
- WU L, WANG X M, LIU M, *et al.* Group mobility adaptive event delivery scheme for delay tolerant mobile sensor networks[J]. Journal of Software, 2012, 23(3): 629-647.
- [13] 杨凯, 刘全, 张书奎等. 利用移动内点来修复传感器网络空洞的算法[J]. 通信学报, 2012, 33(9):116-124.
- YANG K, LIU Q, ZHANG S K, *et al.* Hole recovery algorithm based on mobile inner nodes in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(9): 116-124
- [14] 郭剑, 孙力娟, 许文君等. 基于移动 sink 的无线传感器网络数据采集方案[J]. 通信学报, 2012, 33(9):176-184.
- GUO J, SUN L J, XU W J, *et al.* Mobile sink-based data collection scheme for wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(9):176-184.
- [15] 袁远, 彭宇行, 李姗姗等. 高效的移动 sink 路由问题的启发式算法[J]. 通信学报, 2011, 32(10):107-117.
- YUAN Y, PENG Y X, LI S S, *et al.* Efficient heuristic algorithm for the mobile sink routing problem[J]. Journal on Communications, 2011, 32(10):107-117.
- [16] 覃光成, 杨盘隆, 田畅等. 无线自组织网络动态拓扑特性的排队理论建模与分析[J]. 通信学报, 2011, 32(4):9-16.
- QIN G C, YANG P L, TIAN C, *et al.* Characterizing the topology dynamics in mobile ad hoc networks: modeling and analyzing techniques using the queuing theory[J]. Journal on Communications, 2011, 32(4): 9-16.
- [17] 周坡, 曹志刚. 基于马尔可夫过程的卫星移动信道模型及长期预测方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12):2948-2953.
- ZHOU P, CAO Z G. Markov process based satellite mobile channel model and long term prediction method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12):2948-2953.
- [18] 杨卫东, 冯琳琳, 刘伎昭等. 车载自组织网络中网络连通特性研究[J]. 通信学报, 2012, 33(Z1): 48-52.
- YANG W D, FENG L L, LIU J Z, *et al.* Network connectivity characteristics for vehicular ad hoc network[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z1):48-52.
- [19] 周晓波, 张幸, 彭敏等. DTN 中基于泛模板运算的运动模式发现机制[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 472-475.
- ZHOU X B, ZHANG X, PENG M, *et al.* General template-operation based mobility model discovery mechanism in DTN[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(2): 472-475.
- [20] 蔡青松, 牛建伟. 基于边独立演化的机会网络时间演化图模型[J]. 计算机工程. 2011, 37(15):17-22.
- CAI Q S, NIU J W. Time evolving graph model for opportunistic networks based on edge-independent evolution[J]. Computer Engineering, 2011, 37(15):17-22.
- [21] ZHANG Q, KASSAM S A. Finite-state Markov model for rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(11): 1688-1692.
- [22] RAZAVILAR J, LIU K J R, MARCUS S I. Jointly optimized bit-rate/delay control policy for wireless packet networks with fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(3): 484-494.
- [23] BULUT E, WANG Z, SZYMANSKI B K. Cost-effective multiperiod spraying for routing in delay-tolerant networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(5):1530-1543.
- [24] BAO C L, DI N. Random network coding in peer-to-peer networks: from theory to practice[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(3): 513-523.
- [25] ARI K, JÖRG O, TEEMU K. The ONE simulator for DTN protocol evaluation[A]. SIMUTools 2009[C]. Rome, Italy, 2009.

#### 作者简介:



邓广宏 (1981-), 男, 湖北钟祥人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为移动传感器网络、机会网络、网络编码等。



曹万华 (1966-), 男, 江苏金坛人, 哈尔滨工程大学博士生导师, 武汉数字工程研究所副所长、研究员, 主要研究方向为综合电子信息系统、指控系统、通信网络等。



张剑 (1979-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 武汉数字工程研究所高级工程师, 主要研究方向为无线网络、频谱规划等。



程雄 (1980-), 男, 湖北咸宁人, 硕士, 武汉数字工程研究所高级工程师, 主要研究方向为移动传感器网络、信息安全等。



冯力 (1974-), 男, 四川广元人, 博士, 武汉数字工程研究所高级工程师, 主要研究方向为信息安全、无线网络等。