

文章编号:1007-5321(2018)01-0059-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-148

表征机会传感网络连通性的方法

舒 坚¹, 蒋善东¹, 孙利民²

(1. 南昌航空大学 软件学院, 南昌 330063; 2. 中国科学院 信息工程研究所, 北京 100093)

摘要: 机会传感网络的连通性具有时间演化性, 很难用传统的图模型直接建模. 为此, 采用时间图对机会传感网络的连通性进行建模, 通过时间路径、时间距离和连通效率计算得到整网连通度, 提出采用整网连通度表征机会传感网络的连通性能. 仿真实验结果表明, 整网连通度能够较准确地反映不同实验场景下的网络连通性.

关 键 词: 机会传感网络; 连通性; 整网连通度; 时间图

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

A Novel Method for Depicting Connectivity in Opportunistic Sensor Networks

SHU Jian¹, JIANG Shan-dong¹, SUN Li-min²

(1. School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Institute of Information Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Connectivity is an important metric to reflect the performance of network. Connectivity of opportunistic sensor networks (OSN) is of temporal evolution, which is hard to be modeled with traditional graph model. Connectivity of OSN is modeled with temporal graph, and network connectivity degree is achieved by computing temporal path, temporal distance, and connectivity effectiveness. Furthermore, network connectivity degree is proposed to depict connectivity of OSN. The simulation results show that network connectivity degree can reflect connectivity of OSN more accurately in different experiment scenarios.

Key words: opportunistic sensor networks; connectivity; network connectivity degree; temporal graph

机会传感网络(OSN, opportunistic sensor networks)是一种利用节点移动带来相遇机会实现通信的自组织网络^[1], 能够以较低成本实现大范围感知, 具有延迟容忍网络(DTN, delay tolerant networks)的间歇连接、频繁割裂、时延高等特征, 其网络连通状态变化频繁. 如图1所示, 各监测区域(Region)内节点感知到的消息通过移动节点(Ferry)携带转发至汇聚节点(Sink), 实现整网连通.

目前, 国内外对机会传感网络的研究主要致力于

转发机制、节点移动模型^[2]和缓存管理. 连通性作为衡量网络性能的重要指标, 是保证网络正常运行的前提. 由于OSN的网络拓扑变化频繁, 无法用传统的图模型对其直接建模, 从而对准确获取网络连通性带来了巨大的挑战. 笔者研究了OSN的连通性表征方法, 为OSN连通性的进一步研究提供参考.

1 相关工作

Adhoc网络中, 节点传输半径、节点度、节点密

收稿日期: 2017-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(61762065, 61501218, 61262020); 江西省自然科学基金项目(20171ACB20018, 20171BAB202009); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2014-S409)

作者简介: 舒 坚(1964—), 男, 教授, E-mail: shujian@nchu.edu.cn.

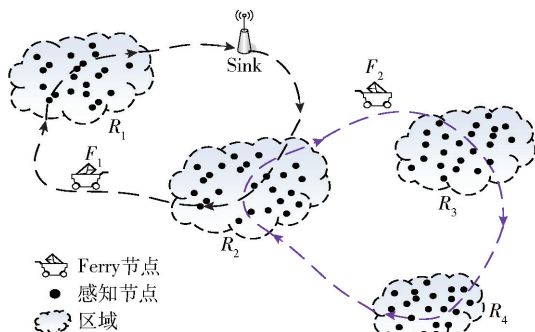


图1 机会传感网络场景示意图

度等因素对连通性具有重要影响。Xue 等^[3]基于占用理论分析了节点度和网络连通性的关系,指出均匀分布的网络中,当平均节点度小于 $0.074 \log n$ 时,网络近似不连通,平均节点度高于 $5.177 4 \log n$ 时,网络近似 1 连通;Wan 等^[4]基于随机几何图理论,分析了在节点均匀分布的单位面积区域中网络保持 k 连通所需的渐近临界传输半径。上述研究针对节点部署较为密集的网络,不适合用来分析网络拓扑较为稀疏且长时间处于分割状态下的 OSN。

根据 DTN 网络的消息传递特性,可采用演化图 (EG, evolving graph) 和时间图 (TG, temporal graph)^[5]对 DTN 网络建模,将动态网络划分为连续的快照序列 (snapshot),分析其拓扑变化规律。Chaintreau 等^[6]采用随机时间图对机会网络建模,

提出求解动态网络时间直径 (temporal diameter) 的方法,实验结果表明,时间直径越短,网络的连通性越高;Nicosia 等^[7]基于时变图理论 (TVG, time varying graph) 分析了 DTN 的最大连通分量,并提出了最大连通分量的计算方法。OSN 以 Sink 节点为中心,感知消息按照一定规律流向 Sink 节点,连通分量、网络直径不能准确地反映整网的连通性。

为了较准确地表征 OSN 的连通性,根据 OSN 的特性,采用时间图对其进行连通性建模,定义整网连通度为表征机会传感网络连通性的参数;定期从网络获取快照,生成网络快照集,并将其转化成邻接矩阵集;通过邻接矩阵集计算整网连通度。

2 连通性建模

针对多感知区域的环境监测,每个区域采用传感网络进行部署。设区域内节点密集,连通程度较高,可将 OSN 中的单个感知区域抽象成一个感知节点。

2.1 时间图模型

为了获得网络的拓扑信息,从 t_0 时刻开始,每隔时间步 Δt 获取一次网络快照。 t_1 ($t_1 = t_0 + \Delta t$) 时刻的网络快照为 $G(t_1)$,将 $G(t_1)$ 作为区间 $[t_1 - \Delta t, t_1]$ 内的网络拓扑,则从 t_0 时刻起,每隔 Δt 的网络快照序列为 $\{G(t_1), G(t_2), \dots, G(t_r)\}$,如图 2 所示。

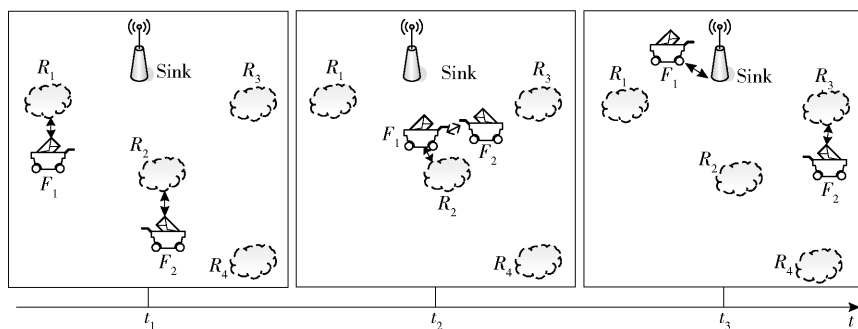


图2 网络快照

定义 1 时间图 $G_{t_0, t_r} = \{G(t_1), G(t_2), \dots, G(t_r)\}$ 是离散时间 $t_0 < t_1 < \dots < t_r \in T = [t_0, t_r]$ 下的有序图集。其中, $G(t) = (V(t), E(t))$ 表示 G 在 t ($t \in [t_0, t_r]$) 时刻的时间子图, $V(t)$ 和 $E(t)$ 分别表示 t 时刻的顶点集和边集,且对于 $\forall t \in [t_0, t_r]$, 有 $|V(t)| = N$ 。

网络运行过程中,节点的数量不变,因此可将各快照的相关信息合并,如图 3 所示。虽然每个快照下的网络都不连通,但是依靠 Ferry 的移动,区域

R_1, R_2 的消息能够传递至 Sink。可见,时间图模型适用于节点间歇性链接、拓扑频繁变化的网络,如 OSN。

时间图中,消息传递路径具有典型的时间向性,不能用传统的“路径”来描述。根据图 3 给出时间路径的定义如下。

定义 2 时间 $[t_0, t_r]$ 内, $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 为时间图 G_{t_0, t_r} 上的不重复节点集合,若存在与之对应的时间序列 $\{t_1, t_2, t_3, \dots, t_\delta\}$, 即 $t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_\delta \leq t_r$,

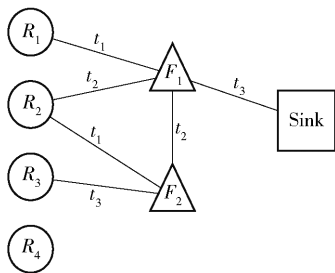


图 3 时间图模型

且对任意两节点 i, j , 满足 $V_1 \equiv i, V_n \equiv j$, 则称存在时间路径, 使得节点 i 通向节点 j , 记为 $\psi_{ij}(t_0, t_\tau)$.

$\psi_{ij}(t_0, t_\tau) = \infty$ 表明节点 i 至节点 j 不存在时间路径. 图 3 中, $[t_0, t_3]$ 内, R_4 不存在通向 Sink 节点的时间路径, 则 $\psi_{R_4S}(t_0, t_\tau) = \infty$, S 表示 Sink 节点.

定义 3 时间 $[t_0, t_\tau]$ 内, 任意两节点 i, j 之间的最短时间路径称为节点 i 至节点 j 的时间距离, 记为 $D_{ij}(t_0, t_\tau)$, 则

$$D_{ij}(t_0, t_\tau) = \min \{ \psi_{ij}(t_0, t_\tau) \} \quad (1)$$

如图 3 所示, R_2 到 F_2 存在 2 条时间路径:

$R_2 \xrightarrow{t_2} F_1 \xrightarrow{t_5} F_2$ 和 $R_2 \xrightarrow{t_1} F_2$, 后者的到达时间较早, 则 $D_{F_1F_2}(t_0, t_\tau) = t_1 - t_0$.

$D_{ij}(t_0, t_\tau) = \infty$ 表明, 节点 i 至节点 j 不存在时间路径. 节点之间的时间距离越短, 表明节点间连通效率越高. 为便于分析, 对节点距离进行归一化处理, 得到连通效率^[8]以反映节点间的连通情况.

定义 4 连通效率为

$$H_{ij}(t_0, t_\tau) = \begin{cases} 0, & D_{ij}(t_0, t_\tau) = \infty \\ \frac{t_\tau - D_{ij}(t_0, t_\tau)}{t_\tau}, & D_{ij}(t_0, t_\tau) < t_\tau \end{cases} \quad (2)$$

其中 $D_{ij}(t_0, t_\tau) = \infty$ 表示节点 i, j 在时间段 $[t_0, t_\tau]$ 内的时间距离. 节点间的连通效率越高, 表明节点间能在越短的时间内形成直接或间接的“连通链路”, 即两节点间的连通性越好.

定义 5 网络中各区域至 Sink 的连通效率均值称为整网连通度

$$C(t_0, t_\tau) = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P H_{is}(t_0, t_\tau) \quad (3)$$

其中 P 表示网络中感知区域的个数.

2.2 网络快照的时间间隔

为了准确反映网络拓扑的变化情况, 根据网络的平均演化速度确定获取网络快照的时间间隔 Δt . 计算所有 Ferry 节点的平均相遇间隔时间, 取最小

平均相遇间隔时间作为获取网络快照的时间间隔 Δt .

时间 T 内, 假设 Ferry 节点 F_i 与区域、Ferry 或 Sink 发生 X 次相遇, $F_i(t_x)$ 为第 x 次 ($x \leq X$) 相遇的开始时间, 则平均相遇间隔时间为

$$\lambda(F_i) = \frac{1}{X} \sum_{x=1}^{X-1} [F_i(t_{x+1}) - F_i(t_x)] \quad (4)$$

取其中最小平均相遇间隔时间, 得到获取网络快照的时间间隔

$$\Delta t = \min \left\{ \sum_{i=1}^Q \lambda(F_i) \right\} \quad (5)$$

其中 Q 表示网络中 Ferry 节点数量.

3 整网连通度

3.1 算法设计

通过时间片所对应的邻接矩阵序列计算整网连通度.

定义 6 静态无向图 $G(V, E)$ 由 n 个节点 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 和 m 条边 $E = \{\langle v_1, v_2 \rangle, \langle v_2, v_3 \rangle, \dots, \langle v_{n-1}, v_n \rangle\}$ 构成, 对应的 n 阶方阵 $A = (a_{uv})$ ($u, v \in V$) 称图 G 的邻接矩阵.

若节点 u 和 v 之间存在连边, 则 $a_{uv} = 1$; 否则 $a_{uv} = 0$. 假设在时间图 $G_{t_0, t_\tau} = \{G(t_1), G(t_2), \dots, G(t_\tau)\}$ 中, $t(t_0 < t < t_\tau)$ 时刻对应的邻接矩阵为 $A(t)$, 可达矩阵的计算公式为

$$Y = [I + A(t)]^\theta =$$

$$I + A^2(t) + \dots + A^3(t) + \dots + A^\theta(t) \quad (6)$$

其中 I 表示单位矩阵. 易知, 节点 u 和 v 之间长度小于等于 θ 的路径数量为 Y_{uv} . 由于实际情况中 Ferry 节点的数量不会太多, 在同一个网络快照中最长路径几乎都小于 2, 因此这里仅考虑 3 以内的情况. 令 $B(t) = [I + A(t)]^3$, 若 $B(t)_{uv} \neq 0$, 表示节点 u, v 之间可达.

若时间图 $G_{t_0, t_\tau} = \{G(t_1), G(t_2), \dots, G(t_\tau)\}$ 所对应的邻接矩阵序列为 $A(t_1), A(t_2), \dots, A(t_\tau)$, 令

$$B_m = B(t_1)B(t_2) \dots B(t_m) (t_m \leq t_\tau) \quad (7)$$

显然, 若 $(B_m)_{ij} \neq 0$ ($i \neq j, i \leq n, j \leq n$), 表示节点 i, j 之间存在时间路径. 且由定义 3 可知, 若 $(B_m)_{ij} \neq 0$ 且 $(B_{m-1})_{ij} = 0$, 则 $D_{ij}(t_0, t_\tau) = t_m$.

根据式(2)、式(3)可计算整网连通度, 算法描述如下.

算法 1 连通度算法

输入: 邻接矩阵集、感知区域个数 P 、时间段

$[t_0, t_\tau]$

输出:整网连通度

步骤 1 由邻接矩阵集初始化 d 阶邻接矩阵数量 K ,由感知区域个数 P 初始化区域延时队列 L .

步骤 2 将第 k 个邻接矩阵赋值给 d 阶矩阵 B ,同时初始化循环控制变量 $k=0$.

步骤 3 $k=k+1$;若 k 满足 $k \leq K$,则转向步骤 4;否则转向步骤 7.

步骤 4 计算第 $k+1$ 个邻接矩阵所对应的时间距离 $B=B[I+A(k)]^3$.

步骤 5 若在 B 中有区域 R_i 与 Sink 节点所对应的位置第 1 次出现非零值,转向步骤 6;否则返回步骤 3.

步骤 6 区域 R_i 与 Sink 节点的连通效率时间距离为

$$H_{R_iS}(t_0, t_\tau) = \frac{k\Delta t}{t_\tau - t_0} \quad (8)$$

将其填入对应的区域延时队列 L 中,判断 L 中是否包含所有区域到 Sink 节点的连通效率,若包含,转向步骤 7;否则,返回步骤 3.

步骤 7 计算 L 中区域时间距离的算数平均值,得到并输出整网连通度.

3.2 算法分析

设感知区域个数为 P ,移动节点个数为 Q ,时间片个数为 Z . 算法中辅助矩阵大小为 $(P+Q+1)^2$,辅助数组大小为 P ,因此空间复杂度为 $O((P+Q)^2)$. 计算整网连通度时,需要连续计算矩阵的乘法,使得时间复杂度较大,达到 $O(Z(P+Q+1)^3)$,但是矩阵的维度较小,计算网络连通度所消耗的时间尚可接受.

4 仿真实验

4.1 实验参数及测试指标

在机会传感网络仿真工具(ONE, opportunistic network environment simulator)下,网络消息投递成功率^[8]可反映网络的实际连通情况,主要的实验参数设置如表 1 所示. 实验进行 100 h,每隔 20 min 统计 1 次网络消息投递成功率和整网连通度.

为验证新方法在不同实验场景下的适用性,设计了 3 种不同实验场景,如图 4 所示.

实验 1:Ferry 按照设定的路线移动,数量为 2.

实验 2:Ferry 按照设定的路线移动,数量为 4.

实验 3:Ferry 在整网内随机移动,数量不定.

表 1 主要实验参数

仿真参数	值
模拟时间/h	16
统计周期/min	20
区域大小/m × m	600 × 450, 580 × 390 575 × 400, 610 × 395
区域节点数量/个	35, 30, 20, 30
区域节点移动速度/(m·s ⁻¹)	4 ~ 6, 5 ~ 7, 3 ~ 5, 8 ~ 8
区域节点缓存大小/MB	10
消息大小/kB	10 ~ 20
消息产生间隔/s	20

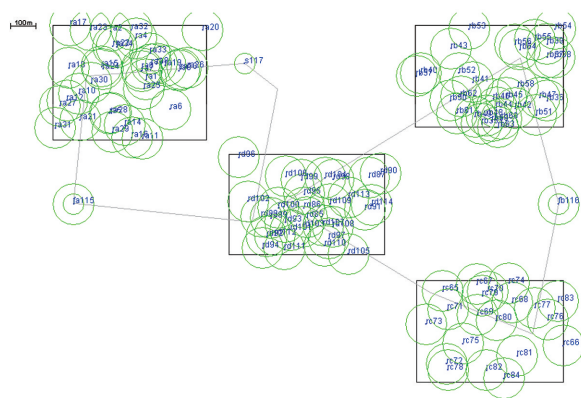


图 4 整网连通度实验场景

在 3 种不同实验场景下调整 Ferry 的移动速度、Ferry 的半径以及 Ferry 的数量等影响连通性的参数. 在实验 1、实验 2 中,分别对不同网络连通状态(连通性好、连通性一般、连通性差)进行仿真. 实验 3 中,对不同 Ferry 数量的网络进行了仿真. 参数设置如表 2 所示.

4.2 实验结果及分析

仿真结果如图 5 ~ 图 7 所示. 3 种不同实验场景下的平均网络消息投递成功率和平均整网连通度如表 3 ~ 表 5 所示.

网络连通性较好时,有较强的消息传递能力,能够在比较短的时间内将区域内产生的消息投递至 Sink 节点,因此,各区域和 Sink 节点之间会有较高的连通效率,消息的投递成功率较高;网络连通性较差时,较多的区域处于分割情况下,没有时间路径连通这些区域和 Sink 节点,导致整网的消息投递成功率较低. 从实验结果可以看出,3 种不同实验场景下,采用笔者定义的整网连通度与网络消息投递成功率实测值的变化情况基本吻合,整网连通度能够反映网络的连通性状况.

表 2 影响连通性参数

场景	Ferry 通信 半径/m	Ferry 数量	Ferry 移动速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Ferry 是否按照 规定路径移动
场景 1	好:90	2	好:8~10	是
	中:40		中:4~5	
	差:20		差:2~4	
场景 2	好:90	4	好:8~10	是
	中:40		中:4~5	
	差:20		差:2~4	
场景 3	90	2,4,6,8	8~10	否

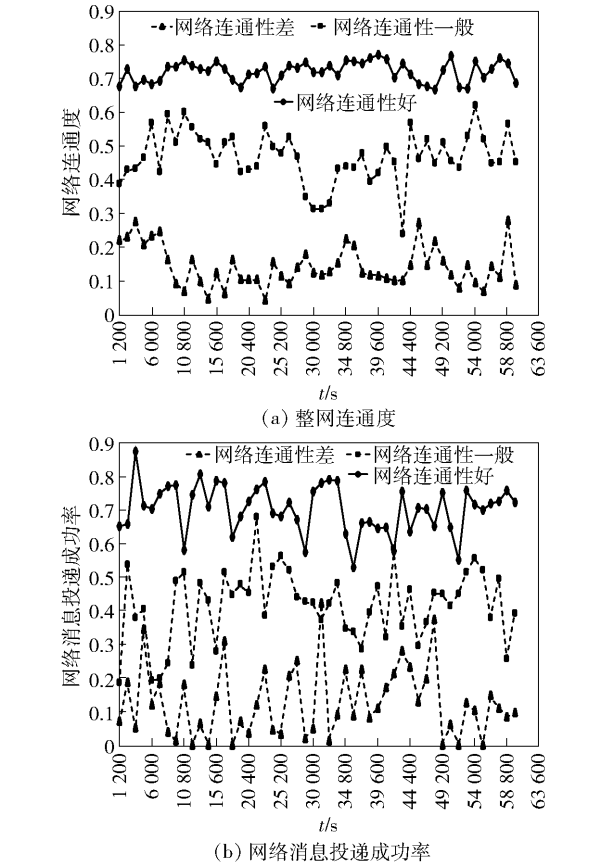


图 5 实验 1 的仿真结果

表 3 实验 1 场景下不同网络连通状况的效果

连通状况	平均网络消息 投递成功率/%	平均整网 连通度/%
差	0.12	0.14
一般	0.42	0.47
好	0.71	0.73

理论上,随着 Ferry 节点数量的增加,网络连通性应有所改善. 对比图 5(a)和图 6(a)可以看出,实验 2 中 3 种不同网络连通状况下的整网连通度均优于实验 1.

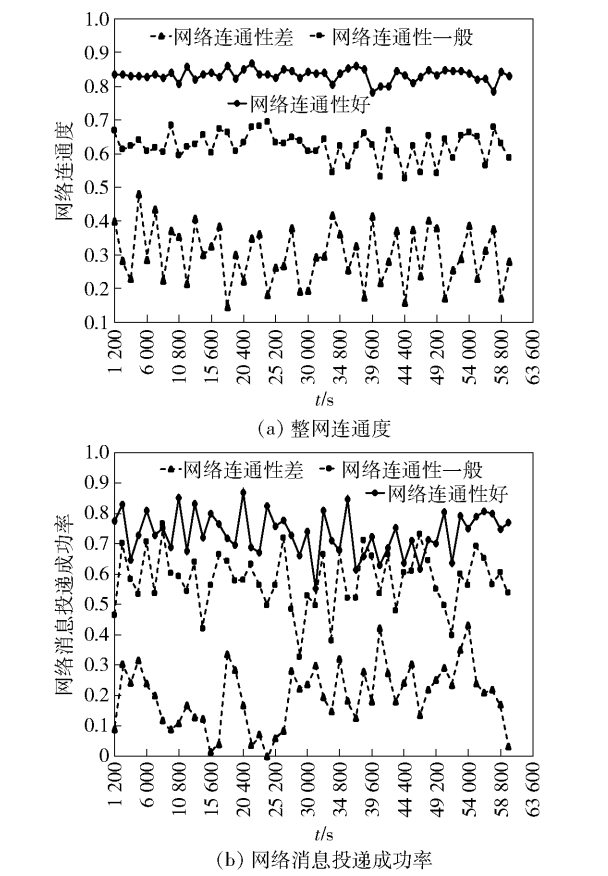


图 6 实验 2 的仿真结果

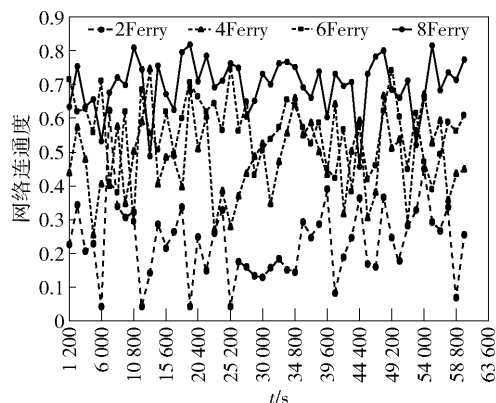
表 4 实验 2 场景下不同网络连通状况的效果

连通状况	平均网络消息 投递成功率/%	平均整网 连通度/%
差	0.19	0.29
一般	0.57	0.62
好	0.73	0.83

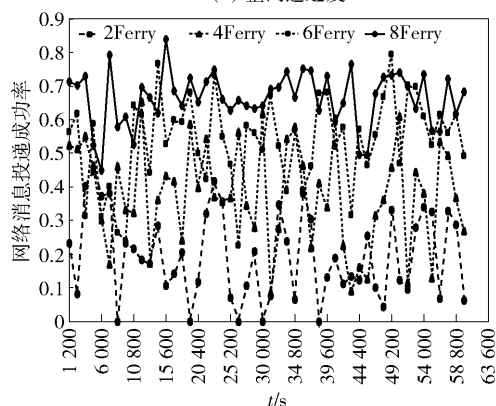
表 5 实验 3 场景下不同 Ferry 数量的效果

Ferry 数量	平均网络消息 投递成功率/%	平均整网 连通度/%
2	0.19	0.23
4	0.37	0.48
6	0.53	0.55
8	0.66	0.69

OSN 中,Ferry 按照设定的路线移动应该比 Ferry 随机移动情况下的网络连通性好. 对比图 5(a)、图 6(a)和图 7(a)可以看出,实验 1 和实验 2 表明整网连通度可以较明显地区分整网的连通性的好坏,实验 3 表明整网连通度在 Ferry 节点随机移动的场景下对连通性的好坏区分能力弱. 图 5(b)、图 6(b)



(a) 整网连通度



(b) 网络消息投递成功率

图 7 实验 3 的仿真结果

和图 7(b) 反映出的网络实际连通情况也说明了这一现象。

由图 4、图 5 可知,采用笔者定义的整网连通度在 3 种不同网络连通状况下均能反映网络连通状况,说明提出的整网连通度具有适用性。

5 结束语

网络连通性是衡量网络性能的重要指标,而 OSN 的连通性具有时间演化性,无法用传统的图模型直接进行建模。针对 OSN 的特点,在采用时间图对 OSN 的连通性进行建模的基础上,提出采用整网连通度表征 OSN 连通性,仿真实验验证了该方法的

适用性。下一步拟对连通性模型展开深入研究,以获得能更准确刻画 OSN 连通性的模型,为改善 OSN 的性能提供依据。

参考文献:

- [1] Chen Qifan, Liu Linlan, Yang Zhiyong, et al. Prediction approach of critical node based on multiple attribute decision making for opportunistic sensor networks [J]. *Journal of Sensors*, 2016, 2016(4): 1-8.
- [2] 吴大鹏, 刘佳, 王汝言. 带有投递概率感知的低开销机会网络路由机制 [J]. *北京邮电大学学报*, 2013, 36(6): 64-68.
Wu Dapeng, Liu Jia, Wang Ruyan. Cost-efficient routing mechanism with delivery probability perception in opportunistic networks [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2013, 36(6): 64-68.
- [3] Xue F, Kumar P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks [J]. *Wireless Networks*, 2004, 10(2): 169-181.
- [4] Wan P J, Yi C W, Wang L X. Asymptotic critical transmission radius for k -connectivity in wireless Ad Hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(6): 2867-2874.
- [5] Scellato S, Leontiadis I, Mascolo C, et al. Evaluating temporal robustness of mobile networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(1): 105-117.
- [6] Chaintreau A, Mtibaa A, Massoulie L, et al. The diameter of opportunistic mobile networks [C] // *Proceedings of the 2007 ACM CoNEXT Conference*. New York: ACM, 2007: 1-12.
- [7] Nicosia V, Tang J, Musolesi M, et al. Components in time-varying graphs [J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2012, 22(2): 1-12.
- [8] Harras K A, Almeroth K C. Inter-regional messenger scheduling in delay tolerant mobile networks [C] // *Proceedings of the 2006 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. New York: IEEE Computer Society, 2006: 93-102.