

基于时间距离与拓扑距离的连通性模型*

刘琳岚^{1,2}, 廖子粮^{1,2}, 徐磊^{1,3}, 舒坚^{1,3}



¹(南昌航空大学 物联网技术研究所, 江西 南昌 330063)

²(南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

³(南昌航空大学 软件学院, 江西 南昌 330063)

通讯作者: 舒坚, E-mail: shujian@nchu.edu.cn

摘要: 网络连通性是描述网络性能的一项重要指标. 机会传感网络中, 节点移动导致网络的拓扑呈动态变化, 这使得机会传感网络连通性的表征面临挑战. 建立机会传感网络的连通性模型, 有助于对机会传感网络的优化和维护. 针对机会传感网络拓扑频繁变化的特点, 基于时空图理论构建其连通性模型, 描述拓扑演化规律; 根据消息的可达性, 考虑消息传输的时间特性和空间特性, 定义了时间距离和拓扑距离, 采用统计产品与服务解决方案软件(SPSS)分析其相关性, 结果表明, 时间距离和拓扑距离无明显相关性; 采用网络快照间的时间距离与拓扑距离构建整网连通性模型. 实验结果表明, 所提出的模型能够从整体上刻画出机会传感网络的连通性; 与基于 Katz 中心性的网络连通度模型相比, 该模型能够更好地反映整网连通度的变化.

关键词: 机会传感网络; 时空图; 连通性模型; 时间距离; 拓扑距离

中文引用格式: 刘琳岚, 廖子粮, 徐磊, 舒坚. 基于时间距离与拓扑距离的连通性模型. 软件学报, 2018, 29(Suppl. (1)): 32-42. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18004.htm>

英文引用格式: Liu LL, Liao ZL, Xu L, Shu J. Connectivity model based on temporal distance and topological distance. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2018, 29(Suppl. (1)): 32-42 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18004.htm>

Connectivity Model Based on Temporal Distance and Topological Distance

LIU Lin-Lan^{1,2}, LIAO Zi-Liang^{1,2}, XU Lei^{1,3}, SHU Jian^{1,3}

¹(Internet of Things Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

²(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

³(School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Connectivity is an important metric of network performance. In opportunistic sensor networks (OSNs), the frequent topology change caused by node mobility leads to the challenges of representation of connectivity. Building connectivity model for OSNs is helpful for its optimization and maintenance. After analyzing the topological characteristics of OSNs, this paper constructs connectivity model based on temporal-spatial graph theory, which is employed to describe the topological evolution law. According to the message reachability, temporal distance and topological distance are defined based on message transmission temporal and spatial characteristics. The correlation between them is also analyzed by statistical product and service solutions (SPSS), and the results show that there is no obvious correlation. Thus temporal distance and topological distance of each snapshots are employed to construct overall network connectivity. Experimental results show that the proposed model can better depict the network connectivity of OSNs, and comparing with the connectivity model based on Katz centrality, it can represent the connectivity changes better.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61762065, 61363015, 61262020); 江西省自然科学基金(20171ACB20018, 20171BAB202009, 20171BBH80022); 江西省研究生创新专项资金(YC2018-S371)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61762065, 61363015, 61262020); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20171ACB20018, 20171BAB202009, 20171BBH80022); Innovation Foundation for Postgraduate Student of Jiangxi Province (YC2018-S371)

收稿时间: 2018-05-01; 采用时间: 2018-08-30

Key words: opportunistic sensor network; temporal-spatial graph; connectivity model; temporal distance; topological distance

机会传感网络(opportunistic sensor networks,简称 OSNs)^[1]是利用节点移动产生的相遇机会,通过“携带-存储-转发”机制实现网络通信的自组织网络,具有延迟容忍网络的间歇性连通、频繁割裂、时延高等特点,是一种网络连通状态随时间演变的新型网络^[2]。本文研究场景如图 1 所示,网络中存在多个连通子区域,子区域之间互不连通,区域间节点不存在传统的通信链路,通过 Ferry 节点与区域节点间的机会式接触,将感知数据传输至 Sink 节点。根据消息传输的特点,可以将该网络划分为 3 层结构,底层为区域内的感知节点,中间层为 Ferry 节点,顶层为 Sink 节点^[3]。

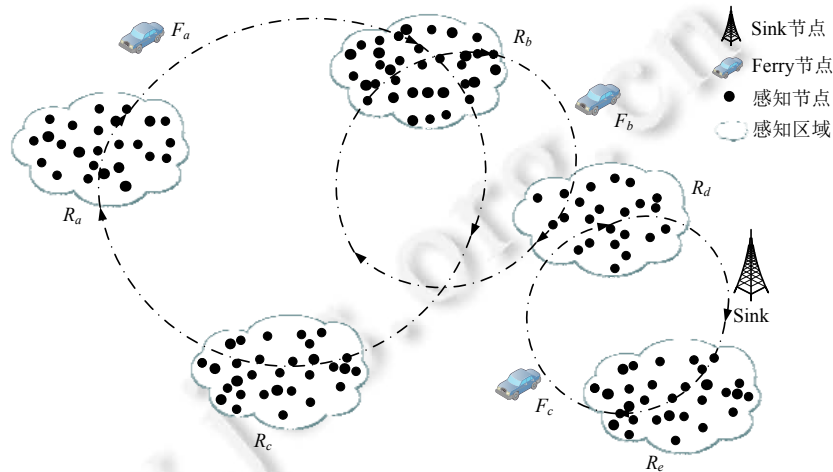


Fig.1 Scenario of OSNs

图 1 机会传感网络场景图

OSNs 是以“携带-存储-转发”机制进行消息传输,不需要源节点和目标节点存在实时的通信链路,因此非常适用于野生动物监测、军事侦察、农业监测等网络易分裂的恶劣环境。与机会网络中消息随机性传递不同,本文研究的多区域 OSNs 中 Ferry 节点是消息传递的核心,两者的拓扑变化存在差异,因此需要构建 OSNs 的连通性模型,有助于网络的优化和维护。本文第 1 节分析了相关研究,第 2 节构建时空图模型,第 3 节建立整网连通度模型,第 4 节仿真实验,第 5 节总结全文。

1 相关研究

描述静态网络连通性时,通常采用节点的介数、节点的度和网络直径等指标,它们对描述静态网络连通性具有重要意义。文献[4]提出小世界模型,通过调节 ρ 值可以实现规则网络到小世界网络,小世界网络至随机网络的过渡;文献[5]分析了节点覆盖与区域覆盖之间的关系,节点根据本地节点密度选择合适的通信范围,利用 Rule K 算法选出的工作节点提供高质量的网络连通性覆盖;文献[6]利用 Castalia 模拟器对无线传感网络进行建模,改变节点发射功率和区域大小进行大量实验,分析了发射功率和区域大小对网络连通性的影响;文献[7]分析了水下光波无线传感器网络的通信特点,分析了通信范围、网络密度和束波宽度对水下光波无线传感器网络连通性的影响;文献[8]采用概率矩阵对航线网的连通性进行研究。

动态网络的连通性研究可为其动态演化提供形式化描述^[9,10]。文献[11]考虑了大规模集群无线网络中节点的非均匀分布和移动性,基于节点之间的相关程度,推导出簇头节点的最优分布,最小化了临界传输范围;文献[12]分析了社交网络中的时间指标,从非时变性和时变性两方面分析了一系列时间窗口的时变子图,定义了时间距离、中心度等参数描述网络连通效率;文献[13]基于时间图理论,提出特征路径长度、速率、网络效率、强连通分量

等动态网络连通性指标;文献[14]通过选择相对速度和邻居节点数,应用模糊逻辑推举群首,建立高稳定性车节点群集,针对群内和群间链路连通性,推导了群内节点连通概率与车辆分布密度间的关系和群间连通概率与群间间距、车辆分布密度间的关系;文献[15]比较了 Ad hoc 网络中主动路由协议和被动路由协议,分析并验证了选择 OLSR(optimized link state routing protocol)协议作为空地自组织网络的路由协议能缩短网络的时延;文献[16]研究了车辆间距与连续车辆的相对速度之间的实际关系,分析了时间静态连接、低移动性连接和高移动性连接 3 个不同移动环境中车辆的连通性;文献[17]利用了基于网格的方法将网络区域分成小网格,在每个网络中选择一个移动节点,并将冗余的移动节点覆盖其他区域,以提高网络的覆盖率;文献[18]在连通性的概率覆盖增强算法上,构建覆盖空洞的修补半径,利用节点的移动距离和修补半径,给出修补策略,以增强网络覆盖和连通性;文献[19]针对机会网络的特点,定义了聚合图、连接次数、连接时间和平均连接时间,以分析机会网络中各节点间的连通性,并给出网络中心性度量;文献[20]结合静态图中的 Katz 中心度,提出动态通路,以评价动态网络中节点的转发能力;文献[21]基于时序图模型,定义了复杂网络中的节点度、节点接近数和节点中心度。

为了更好地刻画机会传感网络整网的连通性,本文针对多区域 OSNs 消息传输的特点,采用时空图描述其拓扑结构随时间变化的规律,建立时空图模型;定义各节点间的行程,根据消息的可达性^[13],考虑 OSNs 消息传输的时间和空间的特性,定义时间距离和拓扑距离,构建整网连通度模型。

2 时空图模型

多区域 OSNs 的一个场景如图 1 所示,包括 5 个感知区域、4 个 Ferry 节点和 1 个 Sink 节点。区域内节点随机移动,感知物理世界;Ferry 节点按固定路径移动,负责收集消息并传递感知数据;Sink 节点固定不动,负责汇聚感知消息。

为了获取多区域 OSNs 的动态拓扑信息,需要建立网络模型。本文将各网络快照的相关信息合并,简化标识出链路出现的快照时间,构建时空图模型。定义时空图如下:

定义 1. 时空图 G 。

时空图 G 是一个三元组,定义为

$$G = (V, E, \Gamma) \quad (1)$$

其中, V 表示节点集合, E 表示集合 V 上的边集, Γ 表示节点发生连接时刻的集合。

时空图 G 可表示为在时间 $t_0 < t_1 < \dots < t_i < \dots < t_{end}$ ($t_i \in [t_0, t_{end}]$) 上有序的时空子图集合 $\{G_{t_1}, G_{t_2}, \dots, G_{t_i}, \dots, G_{t_{end}}\}$, 其中, $G_{t_i} = \{V_{t_i}, E_{t_i}, \Gamma_{t_i}\}$ 是时间窗口 $[t_i, t_{i+1}]$ 内的时空子图。

本文利用固定的时间间隔,将网络划分为一系列时间上有有序的网络快照,分析网络快照以获取感知区域内动态拓扑信息。假设图 1 场景内网络运行时长为 T ,从 t_0 时刻开始,每隔 Δt 对网络获取一次快照,那么网络在 t_1, t_2, t_3, t_4 时刻下的网络快照如图 2 所示。

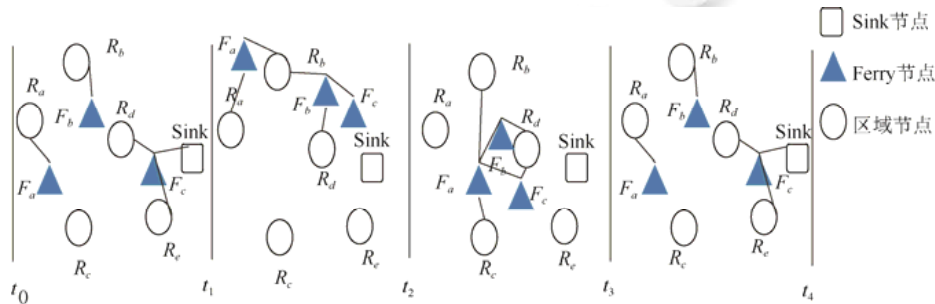


Fig.2 Network snapshot at t_1, t_2, t_3 and t_4

图 2 t_1, t_2, t_3, t_4 时刻下的网络快照

假设网络在运行中没有节点的退出和加入,因此结合各个网络快照的拓扑信息和时间信息,可得 OSNs 时空

图模型如图 3 所示.

由图 3 可知,在连续时间下,感知节点可由路径 $R_a \rightarrow F_a \rightarrow F_c \rightarrow \text{Sink}$ 将消息传递至 Sink 节点.

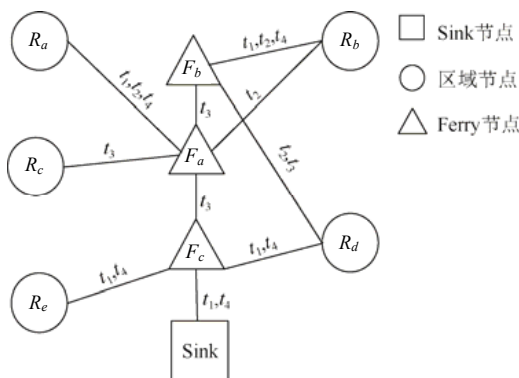


Fig.3 Temporal-Spatial graph model of OSNs

图 3 OSNs 时空图模型

3 连通性建模

本节根据消息的可达性,定义符合多区域机会传感网络的节点通信行程,在此基础上,定义时间距离和拓扑距离两种机会传感网络连通性指标,利用统计产品与服务解决方案软件(statistical product and service solutions, 简称 SPSS)分析两者的相关性,构建整网连通性模型.

3.1 连通性指标构建及分析

动态网络中,对于连通性分析通常采用节点间的连通时间间隔.当节点间存在直接连边时,连通时间间隔能较好的衡量节点间的连通性,但是,当节点间不存在直接连接,消息通过多跳进行转发,此时节点间连通,而采用连通时间间隔衡量节点间连通性为 0,因此连通时间间隔不适用于描述 OSNs 的连通性.

可达性能直观地表示节点间消息通信的状况,即节点间是否连通.文献[22]分析了消息可达性,进一步研究了与可达性相关的网络连通特征,但是它仅仅考虑了瞬时联系下的可达性,并未从连续时间进行考虑.文献[23]给出了时间可达图的概念,通过实际运用验证了时间可达图模型对网络的分析能力,并且分析了在持续连接下边的建立和边传输时延,通过时间可达图,得到给定时延下的动态网络可达性的演化图,但是该文献并未考虑时延等因素对于可达性的影响.因此本文在消息可达性的基础上结合 OSNs 连通性指标,综合考虑了网络的连通性能.

由于 OSNs 的拓扑结构随时间变化的特性,因此在 OSNs 中节点的链路状态无法用经典的路径表示.为此本文给出了行程 J 定义.

定义 2. 行程 J .

时空图 $G=(V,E,\Gamma)$ 中节点对 (u,v) 之间的一次行程定义为

$$J = \{(e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots, (e_i, t_i), \dots, (e_j, t_j), \dots, (e_k, t_k)\} \tag{2}$$

其中, $e_i \subseteq E$, $from(e_i), to(e_i)$ 分别表示有向边 e_i 的源和目的节点, t_j 表示行程从节点 j 出发的时间, t_k 表示网络运行时间, τ 为单个消息在直接连接的两个节点间传输需要的时间.

对于 $\forall t_i, t_j \in [t_1, t_k]$, 行程 J 满足以下条件:

- (1) $from(e_i)=u, to(e_k)=v; \Leftrightarrow$ 行程 J 中源节点和目的节点分别为 u 和 v .
- (2) $to(e_i)=from(e_{i+1}); \Leftrightarrow$ 行程 J 中 t_i 时刻到达的节点与 t_{i+1} 时刻出发的节点相同.
- (3) $\forall t \in [t_j, t_{j+\tau}], \rho(e_j, t)=1; \Leftrightarrow$ 行程 J 中, 给定消息传输时间内, 一定存在边的建立.
- (4) $t_{i+1} > t_i + \tau. \Leftrightarrow$ 行程 J 中, 消息的传输时间小于边建立的时间.

在给定时间片内,源节点和目的节点之间可能存在多个行程,由于长行程能更好地反映网络的拓扑结构,因此本文选取最长行程作为该时间片内两节点间的行程.

3.1.1 连通性指标的构建

在 OSNs 中,Ferry 节点的移动,导致 Ferry 节点与区域节点和 Sink 节点间的动态连接,这使得消息在传递的过程中具有时间特性和空间特性.因此本文在此两种特性的基础上,定义时间特性指标和空间特性指标:时间距离、拓扑距离.以此表征 OSNs 的连通性,时间距离和拓扑距离定义如下.

定义 3. 时间距离.

行程 $J = \{(e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots, (e_i, t_i), \dots, (e_j, t_j), \dots, (e_k, t_k)\}$, 节点 u 与节点 v 之间的时间距离为

$$P_{ij}(u, v) = arr(J_{u,v}) - dep(J_{u,v}) \quad (3)$$

其中, $arr(J_{u,v})=t_k$ 为行程的到达节点 v 的时间, $dep(J_{u,v})=t_1$ 为行程从节点 u 出发时间.

定义 4. 拓扑距离.

行程 $J = \{(e_1, t_1), (e_2, t_2), \dots, (e_i, t_i), \dots, (e_j, t_j), \dots, (e_k, t_k)\}$, 节点 u 与节点 v 之间的拓扑距离为

$$|J|_h = n \quad (4)$$

其中, n 为行程中节点 u 与节点 v 之间的路由跳数.

3.1.2 指标相关性分析

本文在机会网络模拟工具(opportunistic network environment simulator,简称 ONE)中设置不同场景的仿真实验获取样本数据,并利用 SPSS 分析拓扑距离和时间距离的 Pearson 相关性,Pearson 相关性以及描述性统计量见表 1 和表 2.

Table 1 Pearson correlation

表 1 Pearson 相关性分析

	拓扑距离	时间距离
拓扑距离 Pearson 相关性	1	0.184
显著性(双侧)	-	0.000
N	5 322	5 322
时间距离 Pearson 相关性	0.184	1
显著性(双侧)	0.000	-
N	5 322	5 322

Table 2 Descriptive statistics

表 2 描述性统计量

	均值	标准差	N
拓扑距离	4.635 1	1.714 07	5 322
时间距离	799.882 1	247.010 92	5 322

N 表示仿真实验所得样本数,由表 1、表 2 可知,实验获得样本数为 5 322,拓扑距离和时间距离之间的 Pearson 相关性系数小于 0.3,表明两者无明显的相关性;两者的显著性为 0,表明了两者的差异性极为显著.因此可采用拓扑距离和时间距离构建整网连通度模型.

3.2 整网连通度模型

在 OSNs 中,区域内产生的消息都是以 Sink 节点为目的节点,因此本文在消息可达基础上,以 Sink 节点为中心,考虑成功传递至 Sink 节点的消息和未到达 Sink 节点的节点信息(如消息超过最大存活时间等),构建整网连通度模型.对于 OSNs 场景,考虑 Sink 对各个感知区域的接收性,构建的 OSNs 连通度模型定义如下.

$$C = \frac{\sum_{N=1}^N P_{is} \times |J|_s}{\sum_{N=1}^N D_{ij} \times |J|_h + \sum_{N=1}^N P_{is} \times |J|_s} \quad (5)$$

其中, N 为时间片的个数, P_{is} 为消息存活时间(time to live,简称 TTL)内,区域节点至 Sink 节点的时间距离, $|J|_s$ 为

TTL 内,区域节点至 Sink 节点的拓扑距离 D_{ij} 为区域至 Sink 过程中因超过 TTL 被移除的节点的时间距离, $|I_d|$ 为对应的节点 i 至节点 j 拓扑距离. 由于在实验中网络丢弃节点数目很少, 所以不考虑网络运行中被丢弃节点的信息.

3.3 整网连通度模型算法

整网连通度算法通过遍历节点通信记录, 得到在 TTL 时间内到达 Sink 节点的时间距离和拓扑距离, 再通过遍历消息的 ID 号得到超过消息生存时间被移除节点消息的时间距离和拓扑距离.

算法 1. Connectivity degree algorithm.

输入: 节点通信记录 NC 、仿真时长 $[t_{start}, t_{end}]$ 、快照间隔时间 ΔT .

输出: $Mean(Conn)$ -连通度.

步骤 1. 遍历节点通信记录 NC , 若当前记录节点是第 1 次出现转向步骤 2, 否则转向步骤 3.

步骤 2. 产生两条逆向且通信时间连续的边加入由 $Edge$ 组成的 $HashConnections$.

步骤 3. 若通信记录是“up”连接, 则将通信记录写入 $HashConnections$, 否则转向步骤 4.

步骤 4. 判断断开节点是否是 Sink 节点, 若不是, 则将哈希表 $HashConnections$ 中通信记录删除, 并将仿真的连接时长、初始连接时间以及断开时间写入 $(T-D)_{del}$ 中, 否则转向步骤 5.

步骤 5. 将哈希表 $HashConnections$ 中通信记录取出, 并将仿真的连接时长、初始连接时间以及断开时间写入 $(T-D)_{sink}$ 中.

步骤 6. 遍历已被删除节点 $(T-D)_{del}$ 矩阵, 若矩阵中同时存在 n 个被删除的节点 R_i , 判断 R_i 的节点 ID 是否相同, 若相同, 则利用 n 计算 R_i 的 T 和 D 的均值, 组成新矩阵 $((T-D)_{del})_{new}$.

步骤 7. 由 $[t_{start}, t_{end}]$ 以及 ΔT , 确定时间片的数量为 $N=(t_{end}-t_{start})/\Delta T$.

步骤 8. 以 ΔT 对 $((T-D)_{del})_{new}$ 以及 $(T-D)_{sink}$ 矩阵进行切片得到与之对应的 N 个时间片下的矩阵, 计算矩阵对应位置的时间距离以及拓扑距离的乘积, 根据构建的整网连通度计算各时间片的整网连通度 $Mean(Conn)$.

步骤 9. 输出 $Mean(Conn)$.

算法 1 利用了图的广度优先遍历算法, 首先遍历 $(T-D)_{del}$, 找到其中重复节点, 取其时间距离与拓扑距离均值, 将其依次加入队列, 不断的对矩阵 $(T-D)_{del}$ 进行遍历, 直至求出所有被删除节点的时间距离和拓扑距离, 组成新矩阵 $((T-D)_{del})_{new}$, 之后根据 $((T-D)_{del})_{new}$ 、 $(T-D)_{sink}$ 计算整网连通度的矩阵序列.

4 实验设计与分析

设计两种实验场景, 通过分别改变 Ferry 节点的速度和个数来模拟网络连通性的变化, 验证本文模型的有效性.

4.1 实验设计

ONE 是基于 Java 的可二次开发的机会网络仿真平台, 其中包含强大的生成移动轨迹的工具, 可采用不同的路由协议模拟转发数据, 仿真结束后, 可观察设置场景内各节点的模拟交互情况以及实验结果. 本文建立两种实验场景, 通过改变 Ferry 节点速度和 Ferry 节点个数模拟 3 种连通状况.

实验场景 1 如图 4 所示, 场景中有 4 个感知区域 (R_a, R_b, R_c, R_d) 、3 个 Ferry 节点 (F_a, F_b, F_c) , 感知区域内各感知节点的通信半径为 50m 以保证区域内部具有良好的连通性, Ferry 根据设定的路径移动, 收集途经区域中节点的感知数据, 通过多跳转发至 Sink 节点.

时间片长度为 1 200s, 在网络运行过程中, 每经过 20s, 各感知区域 (R_a, R_b, R_c, R_d) 随机产生一个以 Sink 节点为目的节点的感知数据消息. 仿真实验进行 20h, 每隔 20min 统计一次该时间段内的整网连通度. 通过调整 Ferry 节点的移动速度模拟 3 种连通状况(连通性好、连通性一般、连通性差)的网络, 进行仿真. 具体的参数设置见表 3.

重新设置场景, 实验场景 2 如图 5 所示, 网络存在 5 个感知区域 $(R_a, R_b, R_c, R_d, R_e)$ 和 4 个 Ferry 节点 (F_a, F_b, F_c, F_d) . 时间片的长度为 1 200s, 在网络运行中, 各通信区域每隔 20s 随机产生一条消息发往 Sink 节点, 在 Ferry 节点速度不变的基础上, 通过改变 Ferry 节点个数模拟网络连通性的变化, 进行仿真实验.

实验时间设置为 20h, 每隔 20min 统计一次该时间段内的整网连通度. 实验开始后, 按照图 5 中(a)4 个 Ferry

节点场景进行仿真实验,进行至 400min 时,计算该时间段内的整网连通度,移除 Ferry 节点 F_a ,按图 5 中(b)3 个 Ferry 节点场景继续实验至 800min,计算最近 400min 内的整网连通度,移除 Ferry 节点 F_c 后再按图 5 中(c)2 个 Ferry 节点场景继续实验至 1 200min,计算最近 400min 内的整网连通度.详细的实验参数设置见表 4.

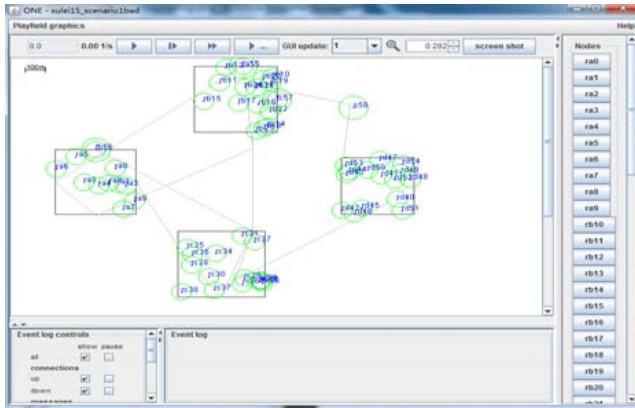
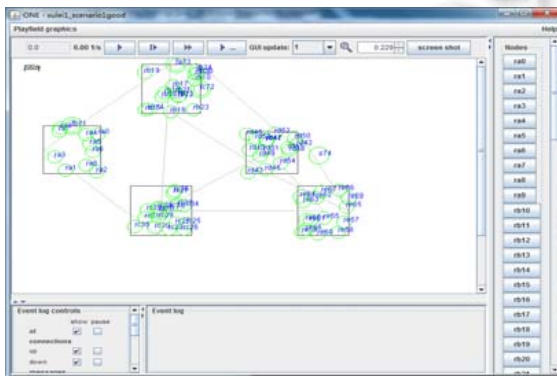


Fig.4 Experimental Scenario 1
图 4 实验场景 1

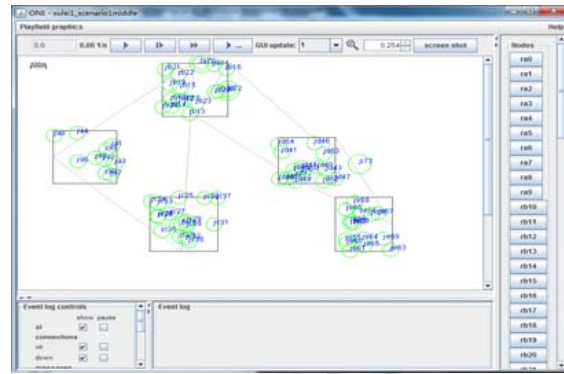
Table 3 Experimental parameters
(experimental Scenario 1)

表 3 主要实验参数(实验场景 1)

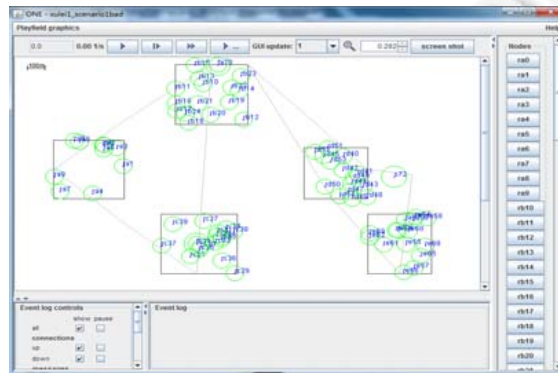
仿真参数	值
实验时长(h)	12
区域面积(m×m)	335×330,860×870, 220×190,1035×1050
区域节点数(个)	10,15,15,15
Ferry 节点通信半径(m)	30,50,70
消息产生间隔(s)	20
F_a 速度范围(m/s)	1.5-2,3-5,5-10
F_b 速度范围(m/s)	1.5-3,4-6,6-9
F_c 速度范围(m/s)	1-2,5-6,7-9
TTL(s)	1 200



(a) 4 个 Ferry 节点



(b) 3 个 Ferry 节点



(c) 2 个 Ferry 节点

Fig.5 Experimental Scenario 2

图 5 实验场景 2

Table 4 Experimental parameters (experimental Scenario 2)

表 4 主要实验参数(实验场景 2)

仿真参数	值
实验时长(h)	12
区域面积(m×m)	400×395,410×400,430×400,360×345,360×400
区域节点数(个)	10,15,15,15,15
Ferry 节点通信半径(m)	30,50,70
消息产生间隔(s)	20
F_a 速度范围(m/s)	8-10
F_b 速度范围(m/s)	8-10
F_c 速度范围(m/s)	8-10
F_d 速度范围(m/s)	8-10
TTL(s)	1 200

4.2 实验分析

对于 OSNs 而言,并没有评估连通性模型的标准,此前对连通度模型研究中通常采用消息投递成功率或投递时延作为衡量网络连通度的参考,因此本文中采用消息投递成功率作为模型的对比来验证模型的有效性。

保持 Ferry 节点个数不变,改变 Ferry 节点速度,将实验场景 1 数据导入 Matlab 工具计算出整网连通度和消息投递成功率.结果如图 6 和图 7 所示。

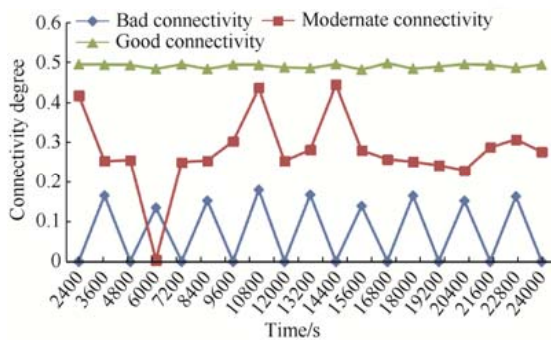


Fig.6 Line graph of network connectivity changes over time (Ferry node speed change)

图 6 整网连通度随时间变化折线图 (Ferry 节点速度改变)

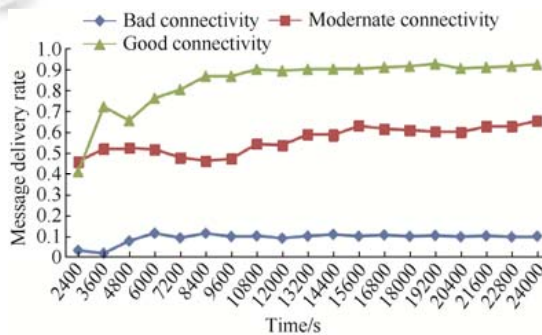


Fig.7 Line graph of message delivery success rate changes over time (Ferry node speed change)

图 7 消息投递成功率随时间变化折线图 (Ferry 节点速度改变)

从图 6 可以看出,网络连通度值的区间为 0-0.6,随着 Ferry 节点速度的加快,整网连通度也随之提升,且相同速度下,整网连通度值波动不大,不同速度下,整网连通度值在图中表现出层次关系.从图 7 可以看出,消息投递成功率随着 Ferry 节点速度的下降而变小,与整网连通度类似,在不同速度下,消息投递成功率呈现出层次关系.对比图 6 和图 7,可以看出,由定义(5)计算得到的整网连通度不仅可以从整体上反映整网连通性的变化情况,并且连通度变化趋势与消息成功投递概率基本吻合。

保持 Ferry 节点速度不变,改变 Ferry 节点个数,计算实验场景 2 的实验数据,可以得到改变 Ferry 节点个数后,整网连通度和消息投递成功率的变化曲线如图 8、图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出,移除 F_d 后,整网连通度并未发生很大的改变,消息投递成功率因为 F_d 的移除有所下降,但下降幅度不大.此时,整网连通度和消息投递成功率的曲线近似相同.移除 F_c 后,网络的连通性发生较大的变化,整网连通度和消息投递成功率有了明显的下降,两者在数值上都能良好地体现出网络的变化情况.对比图 8 和图 9,可以看出,整网连通度变化趋势与消息投递成功率基本吻合.因此本文构建的整网连通度模型能够很好地反映连通性变化的差异,也能较好地反映网络的连通程度。

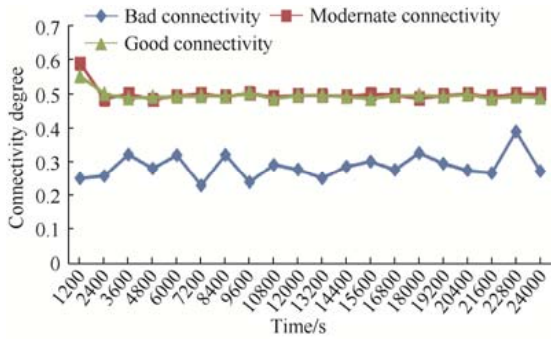


Fig.8 Line graph of network connectivity changes over time (Ferry node number changes)

图 8 整网连通度随时间变化折线图 (Ferry 节点个数改变)

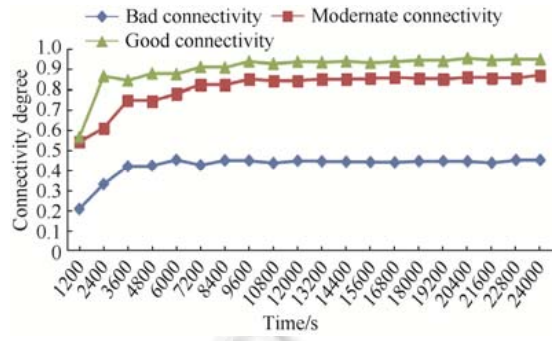


Fig.9 Line graph of message delivery success rate changes over time (Ferry node number changes)

图 9 消息投递成功率随时间变化折线图 (Ferry 节点个数改变)

为了进一步验证模型性能,本文将文献[24]中实验数据导入整网连通度模型,对比分析本文构建的整网连通度模型与基于 Katz 中心性网络连通度模型的优劣,计算得到整网连通度与消息投递成功率如图 10~图 12 所示.

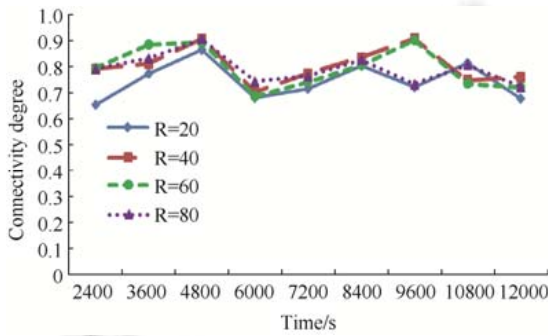


Fig.10 Line graph of network connectivity changes over time based on Katz

图 10 基于 Katz 中心性的网络连通度随时间变化折线图

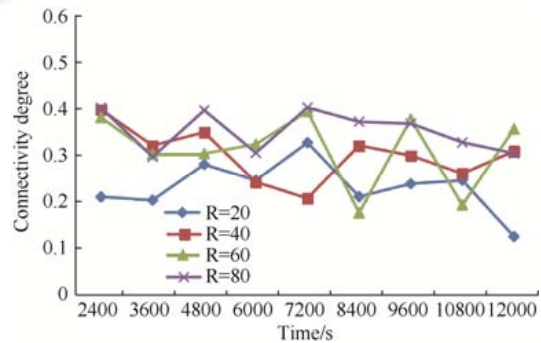


Fig.11 Line graph of network connectivity changes over time

图 11 整网连通度随时间变化折线图

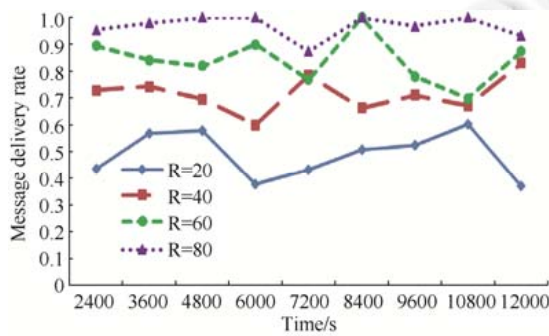


Fig.12 Line graph of message delivery success rate changes over time

图 12 消息投递成功率随时间变化折线图

对比图 10~图 12,可以看出,本文构建的整网连通度模型与基于 Katz 中心性的网络连通度模型均能反映网络连通度的真实情况.但是,当随着区域节点通信半径 R 的变小,网络连通性变差时,基于 Katz 中心性的网络连通

度模型并未出现明显变化,而本文构建的连通度模型能够更好地体现出网络的变化和反映网络连通性的波动情况,为了更好地体现出本文构建的整网连通度模型与基于 Katz 中心性的网络连通度模型对网络连通性发生变化时的区分程度,本文通过计算不同通信半径场景之间差值的方差来衡量模型对网络连通度变化的区分程度,计算结果见表 5.由表 5 可以看出,在不同通信半径场景中,本文构建的整网连通度模型的连通度差值的方差大于基于 Katz 中心性的网络连通度模型,且更接近与消息投递成功率的差值.所以与基于 Katz 中心性的网络连通度模型相比,本文构建的整网连通度模型对不同连通度网络的区分更明显.因此,当网络连通性发生变化时,本文构建的连通度模型的灵敏度更高,且整网连通度曲线与消息投递成功率曲线吻合程度更高.因此,相对于 Katz 中心性连通度模型,本模型更适用于网络拓扑频繁变化的场景.

Table 5 Variance of difference

表 5 差值的方差

模型/消息投递成功率	R=80 与 R=60	R=60 与 R=40	R=40 与 R=20
基于 Katz 中心性的网络连通度	0.005 059 258	0.001 112 711	0.005 278 319
整网连通度	0.006 772 027	0.009 714 63	0.009 456 855
消息投递成功率	0.007 944 742	0.014 619 515	0.015 232 003

5 结束语

本文研究多区域 OSNs 的连通性问题.不同场景下的仿真实验结果表明,构建的整网连通度模型与实际的消息投递成功率吻合程度较高,能够较好地反应网络连通度的变化情况.本文的主要贡献如下.

1) 针对 OSNs 机会性、动态性的特点,将网络划分为一系列快照,获得其拓扑信息,采用时空图构建 OSNs 的时空图模型.

2) OSNs 中,区域内感知消息依靠 Ferry 节点投递至 Sink 节点.根据消息的可达性,综合考虑了消息传输过程的时间和空间特性,定义 OSNs 的连通性指标为时间距离和拓扑距离,结合网络快照间的时间距离和拓扑距离构建了整网连通度模型.

References:

- [1] Xiong YP, Sun LM, Niu JW, Liu Y. Opportunistic networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2009,20(1):124-137 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [2] Eisenman SB, Lane ND, Campbell AT. Techniques for improving opportunistic sensor networking performance. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems. Berlin, Heidelberg, 2008.157-175. [doi: 10.1007/978-3-540-69170-9_11]
- [3] Shu J, Guo K, Liu Q, Liu LL. Research of connectivity parameters in opportunistic sensor networks. Chinese Journal of Computers, 2016,39(5):1067-1080 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11897/SP.J.1016.2016.01067]
- [4] Watts DJ, Strogatz SH. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998,393:440-442.
- [5] Mao YC, Feng GF, Chen LJ, Chen DX. A location-independent connected coverage protocol for wireless sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2007,18(7):1672-1684 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1672.htm> [doi: 10.1360/jos181672]
- [6] Cagatan GKB, Magsumbol JAV, Baldovino R, Sybingco E, Dadios EP. Connectivity analysis of wireless sensor network in two-dimensional plane using Castalia simulator. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management. IEEE, 2017. 1-8. [doi: 10.1109/HNICEM.2017.8269492]
- [7] Saeed N, Celik A, Al-Naffouri TY, Alouini M. Connectivity analysis of underwater optical wireless sensor networks: A graph theoretic approach. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications. IEEE, 2018. 1-6. [doi: 10.1109/ICCW.2018.8403740]
- [8] Luo CY, Song YL, Gao ZZ. Connectivity on fixed air route in aeronautical ad hoc networks. Journal on Communications, 2014, 35(9):147-155 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.09.015]
- [9] Nicosia V, Tang J, Mascolo C, Musolesi M, Russo G. Graph Metrics for Temporal Networks. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [10] Casteigts A, Flocchini P, Mans B, Santoro N. Measuring Temporal Lags in Delay-Tolerant Networks. In: Proc. of the Parallel and Distributed Processing Symp. IEEE, 2011. 209-218. [doi: 10.1109/IPDPS.2011.29]
- [11] Liu X, Zhang J, Liu L, Wu W, Tian X, Wang X, Zhang W, Xu J. Network connectivity with inhomogeneous correlated mobility. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2016,15(6):4307-4320. [doi: 10.1109/TWC.2016.2539168]

- [12] Santoro N, Quattrociochi W, Floccini P, Casteigts A, Amblard F. Time-Varying graphs and social network analysis: Temporal indicators and metrics. In: Proc. of the 3rd AISB Social Networks and Multiagent Systems Symp. London, 2011. 32–38.
- [13] Tang J, Musolesi M, Mascolo C, Latora V. Characterising temporal distance and reachability in mobile and online social networks. ACM Sigcomm Computer Communication Review, 2010,40(1):118–124. [doi: 10.1145/1672308.1672329]
- [14] Qiu GA, Bao ZH, Zhang GA, Zhang SB. Connectivity analysis of passive cluster with high stability in vehicular wireless network. Journal on Communications, 2016,37(11):42–48 (in Chinese with English abstract). [doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2016218]
- [15] Rautu D, Dhaou R, Chaput E. Maintaining a permanent connectivity between nodes of an air-to-ground communication network. In: Proc. of the IEEE IWCMC. IEEE, 2017. 681–686. [doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986367]
- [16] Khan Z, Fan P, Fang S. On the connectivity of vehicular ad hoc network under various mobility scenarios. IEEE Access, 2017,5: 22559–22565. [doi: 10.1109/ACCESS.2017.2761551]
- [17] Dash S, Nayak BP, Mishra BSP, Swain AR. Randomized grid-based approach for complete area coverage in WSN. In: Proc. of the IEEE Int'l Advance Computing Conf. IEEE Computer Society, 2017. 307–312. [doi: 10.1109/IACC.2017.0073]
- [18] Fan XG, Yang JJ, Wang H. Algorithm for enhancing probabilistic coverage in wireless sensor network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(2):418–431 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4837.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004837]
- [19] Islam MA, Iqbal MA, Aleem M, Halim Z. Analysing connectivity patterns and centrality metrics for opportunistic networks. In: Proc. of the Int'l Conf. on Communication, Computing and Digital Systems. IEEE, 2017. 64–70. [doi: 10.1109/C-CODE.2017.7918903]
- [20] Cai Q, Niu J, Qu G. Identifying high dissemination capability nodes in opportunistic social networks. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Shanghai, 2013. 4445–4450. [doi: 10.1109/WCNC.2013.6555294]
- [21] Kim H, Anderson R. Temporal node centrality in complex networks. Physical Review, 2012,85(2):605–624. [doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.026107>]
- [22] Holme P. Network reachability of real-world contact sequences. Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics, 2005,71(2):46–119. [doi: 10.1103/PhysRevE.71.046119]
- [23] Whitebeck J, Amorim MDD, Conan V, Guillaume JL. Temporal reachability graphs. In: Proc. of the ACM MobiCom. Istanbul, 2012. 377–388.
- [24] Shu J, Xu L, Jiang S, Meng L. Connected model for opportunistic sensor network based on Katz centrality. Computer Science & Information Systems, 2017,14(1):735–750. [doi: 10.2298/CSIS161210026S]

附中文参考文献:

- [1] 熊永平,孙利民,牛建伟,刘燕. 机会网络. 软件学报, 2009,20(1):124–137. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3467.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2009.03467]
- [3] 舒坚,郭凯,刘群,刘琳岚. 机会传感网络连通性参数研究. 计算机学报, 2016,39(5):1067–1080. [doi: 10.11897/SP.J.1016.2016.01067]
- [5] 毛莺池,冯国富,陈力军,陈道蕃. 与位置无关的无线传感器网络连通性覆盖协议. 软件学报, 2007,18(7):1672–1684. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1672.htm> [doi: 10.1360/jos181672]
- [8] 罗长远,宋玉龙,高瞻瞻. 固定航线的航空自组网连通性研究. 通信学报, 2014,35(9):147–155. [doi: 10.3969/j.issn.1000-436x.2014.09.015]
- [14] 邱泰安,包志华,章国安,张士兵. 高稳定被动群集车联网连通性研究. 通信学报, 2016,37(11):42–48.
- [18] 范兴刚,杨静静,王恒. 一种无线传感器网络的概率覆盖增强算法. 软件学报, 2016,27(2):418–431. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4837.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004837]



刘琳岚(1968—),女,江西南昌人,教授,CCF 专业会员,主要研究领域为无线传感器网络,软件工程.



徐磊(1992—),男,硕士,CCF 学生会员,主要研究领域为机会传感网络.



廖子粮(1996—),男,硕士生,CCF 学生会员,主要研究领域为机会传感网络.



舒坚(1964—),男,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为物联网,软件测试,机器学习.