

## 时间演化图的机会传感网络连通均衡性模型\*

江文良<sup>1,2</sup>, 舒坚<sup>1,2</sup>, 孟令冲<sup>1,3</sup>, 刘琳岚<sup>1,3</sup>



<sup>1</sup>(南昌航空大学 物联网技术研究所, 江西 南昌 330063)

<sup>2</sup>(南昌航空大学 软件学院, 江西 南昌 330063)

<sup>3</sup>(南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

通讯作者: 刘琳岚, E-mail: liulinlan@nchu.edu.cn

**摘要:** 网络连通是网络正常通信的保证, 网络连通均衡性是反映网络连通情况的一项重要指标. 机会传感网络的拓扑随时间动态变化, 使得传统的图模型不再适用于机会传感网络, 如何准确刻画机会传感网络的连通均衡程度是研究的目的. 定义移动节点的贡献度、聚集系数和连通均衡度, 采用连通均衡度表征整个网络的连通均衡情况, 基于时间演化图对机会传感网络连通均衡性进行建模. 仿真实验结果表明, 连通均衡性模型可以反映出整个网络的连通均衡情况, 为机会传感网络的演化研究及维护提供支撑.

**关键词:** 机会传感网络; 时间演化图; 贡献度; 聚集系数; 连通均衡; 移动节点

中文引用格式: 江文良, 舒坚, 孟令冲, 刘琳岚. 时间演化图的机会传感网络连通均衡性模型. 软件学报, 2017, 28(Suppl. (1)): 61-70. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17007.htm>

英文引用格式: Jiang WL, Shu J, Meng LC, Liu LL. The connected equilibrium model for opportunistic sensor networks based on temporal varying graph. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2017, 28(Suppl. (1)): 61-70 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17007.htm>

## The Connected Equilibrium Model for Opportunistic Sensor Networks Based on Temporal Varying Graph

JIANG Wen-Liang<sup>1,2</sup>, SHU Jian<sup>1,2</sup>, MENG Ling-Chong<sup>1,3</sup>, LIU Lin-Lan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(Internet of Things Technology Institute, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

<sup>2</sup>(School of Software, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

<sup>3</sup>(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Connectivity is the guarantee of network communication, and connective equilibrium is an important indicator of the network connectivity. With the frequent changes of topology of opportunistic sensor network, the traditional graph model is not applicable for modeling opportunistic sensor network. This paper aims at how to accurately depict the connective equilibrium degree of opportunistic sensor network. The contribution degree and clustering coefficient of ferry nodes are defined, and connective equilibrium degree is defined as well, which can reflect the connectivity balance of the network. The connective equilibrium model of opportunistic sensor network is proposed based on the temporal varying graph. The simulation results show that the proposed model can reflect the connective equilibrium of the network. Furthermore, it can provide an effective support for exploiting involution and maintenance of opportunistic sensor network.

**Key words:** opportunistic sensor network; temporal varying graph; contribution degree; clustering coefficient; connective equilibrium; ferry nodes

机会传感网络(opportunistic sensor networks, 简称 OSN)是一种不需要源节点和目标节点之间存在完整链

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61363015, 61762065); 江西省自然科学基金(20171ACB20018, 20171BAB202009)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61363015, 61762065); Natural Science Foundation of Jiangxi Province of China (20171ACB20018, 20171BAB202009)

收稿时间: 2017-05-15; 采用时间: 2017-09-23

路,利用节点移动带来相遇机会实现通信,时延和分裂可容忍的自组织网络<sup>[1]</sup>.OSN 是一种网络连通状态高度变化的网络,具有节点移动性、节点间间歇性连接、高延迟和节点资源有限等特点,易造成移动节点的缺失或失效,从而导致整个网络的连通均衡性下降,甚至不连通.OSN 以“存储-携带-转发”路由模式实现节点间的通信,能够处理网络分裂、时延等传统无线网络技术不能解决的问题,实现恶劣条件下的网络通信,可应用于缺乏基础通信设施的乡村网络<sup>[2]</sup>、应对紧急突发事件的场合等.OSN 场景如图 1 所示,感知节点发送消息至移动节点,移动节点通过一次或多次转发将消息发送至 Sink 节点,区域与区域间的连通具有机会性和间歇性的特点<sup>[3]</sup>.

连通均衡性作为 OSN 网络性能的重要指标,是保证网络均衡通信的前提.目前,改善 OSN 消息投递性能的研究主要致力于消息转发机制<sup>[4]</sup>.OSN 中 Ferry 节点的缺失或失效,将影响网络的连通均衡性,降低消息投递成功率.本文针对 OSN 时变性、间歇性连通的特点,刻画机会传感网络运行过程中的连通均衡情况,有利于分析整网的连通状态,为 OSN 的演化研究及维护提供支撑.

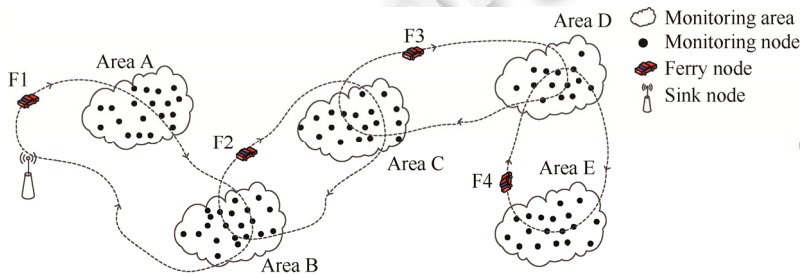


Fig.1 OSN scene diagram

图 1 OSN 场景示意图

## 1 相关研究

与本文相关的研究工作主要包括网络建模、连通性和网络均衡 3 个方面.

静态网络一般将节点作为图的顶点,节点间的连通线路作为图的边,这些由顶点和边组成的图就是描述该网络的静态模型.动态网络的拓扑结构频繁变化,不宜用静态图中的方法对网络建模.OSN 链路的变化和消息的转发具有不确定性,且链路的建立与断开具有明显的时间进化特征,因此常采用演化图 EG(evolving graph)<sup>[5,6]</sup>和时间变化图 TVG(temporal varying graph)<sup>[7,8]</sup>对网络进行建模,其核心思想是通过用时间离散化的方法将动态网络划分为连续的快照序列(snapshot),对相邻快照间采用时间相关的分析方法;文献[7]采用时间变化图描述网络的演变,对时变网络进行了分类.

文献[9]研究网络始终保持  $k$  连通需要的临界通信半径;文献[10]采用消息投递成功率、消息投递时延反映延迟容忍网络的连通性;文献[11]对无线传感器网络进行分簇,将节点能量、节点通信半径和链路质量共 3 个连通性参数线性组合并与网络可达率结合,综合描述网络的连通性;文献[12]研究 OSN 中区域连通度和 Ferry 节点连通度,采用灰关联分析法筛选出影响连通度的因素,构建连通度模型;文献[13]提出基于连接效率的拓扑控制算法,为每个节点分配发射功率电平,生成最小连通性约束条件下最小化能量消耗的网络拓扑,可实现能量消耗与网络连接之间更好的均衡;文献[14]提出一种车载自组织网络的分析模型,采用概率密度函数计算网络的连通性,仿真实验验证了模型的合理性.

文献[15]利用纳什均衡优化 Ad-hoc 网络的拓扑结构;文献[16]研究 Ad-hoc 网络的拓扑控制问题,指出强连通网络中存在纳什均衡,在非强连通网络中不一定存在纳什均衡;文献[17]提出分布式共享协议算法对 Ad-hoc 网络的拓扑进行纳什均衡,仿真实验表明能够达到趋于均衡的稳定点;文献[18]提出一种车载自组织网络的分散式中继选择算法,能够使网络达到纳什均衡状态,仿真结果证明该算法能够获得较高的能量利用率、传输可靠性和网络均衡性;文献[19]通过合作传输提高通信性能,提出纳什均衡协作传输策略,仿真结果表明利用合作竞争

的优势,避免了不必要的竞争,提高了网络的传输速率.上述研究的目的是使 Ad-hoc 网络的拓扑结构达到均衡状态,本文的目的是刻画机会传感网络运行过程中的连通均衡情况,采用时间演化图建立 OSN 的连通均衡模型,定义连通均衡度衡量其连通均衡性.

## 2 模型的建立与假设

### 2.1 相关假设

为了便于研究,做出如下假设.

- (1) 如图 1 所示,设各个感知区域内的感知节点数量不变;
- (2) 将一个感知区域抽象成一个超级节点,称为区域节点;
- (3) 如图 2 所示,从  $t_0$  时刻开始,  $t_{\max}$  时刻结束,每隔  $\Delta t$  时间长度对整个网络取一次时间快照.假设在任何一一个时间快照内,网络拓扑保持稳定.  $t_0$  时刻的网络快照为  $G_0$ ,将该时刻的快照作为时间区间  $[t_0, t_0 + \Delta t]$  内的网络拓扑,  $t_1$  时刻(即  $t_0 + \Delta t$  时刻)的网络快照为  $G_1$ ,则其后每隔  $\Delta t$  所观察到的快照序列依次为  $\{G_1, G_2, \dots, G_{\max}\}$ .

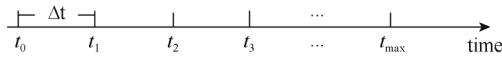


Fig.2 OSN time interval

图 2 OSN 时间间隔

### 2.2 时间演化图

如图 1 所示,OSN 由感知区域、Ferry 节点和 Sink 节点这 3 部分组成,以存储-携带-转发的路由模式实现节点间通信.OSN 在不同快照内的拓扑信息如图 3 所示.

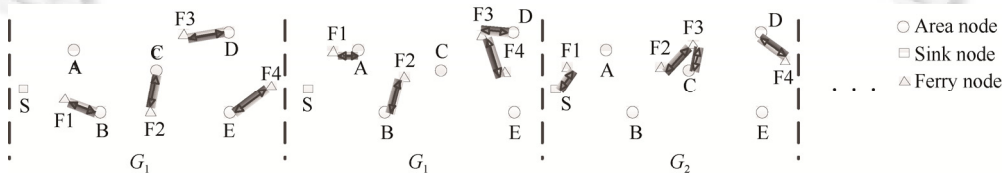


Fig.3 OSN topology information

图 3 OSN 的拓扑信息

**定义 1(赋权时间演化图).**

在有限时间序列  $T \subseteq N = [t_0, t_{\max}]$  内,  $G_i$  为时间间隔  $[t_i, t_{i+1}]$  ( $i = 0, 1, \dots, \max - 1$ ) 内的静态子图,则由  $[t_i, t_{i+1}]$  内所有的静态子图构成的集合即赋权时间演化图为  $S_G = \{G_1, G_2, \dots, G_{\max}\}$ , 其中  $G_i = (V(i), E(i), w)$ ,  $V(i)$  为  $t_i$  时刻的顶点集,  $E(i)$  为  $t_i$  时刻的边集,  $w$  为边上的权值集合(即链路建立时的快照时间序列),  $w$  为正实数.

考虑到 OSN 拓扑随时间变化,将时间因素添加到网络模型中.文献[5]基于演化图动态网络建模,但没有考虑边建立的时间,文献[6]中演化图模型的边赋有权值,但权值表示边建立时间和持续时间的和,本文中 OSN 的网络模型的边仅考虑边建立的时间.因此,根据假设和定义 1,在链路上增加权值,如图 4 所示,每条链路上的数字序列代表该链路建立时的快照时间序列,如区域节点 A 和 Ferry 节点 F1 链路的权值为  $\{0, 1, \dots\}$ ,代表在  $t_0$  时刻和  $t_1$  时刻的网络快照内连通.将一系列连续时间步上观察到的子图序列进行整合得到赋权时间演化图.

由图 4 可知,路径 A、F1、S 在  $t_0 - t_2$  时间内连通,表明赋权时间演化图可以反映出 OSN 的时间延续性,消息的传递路径具有典型的时间向性.因此,本文采用赋权时间演化图刻画 OSN 运行过程中的连通均衡情况.

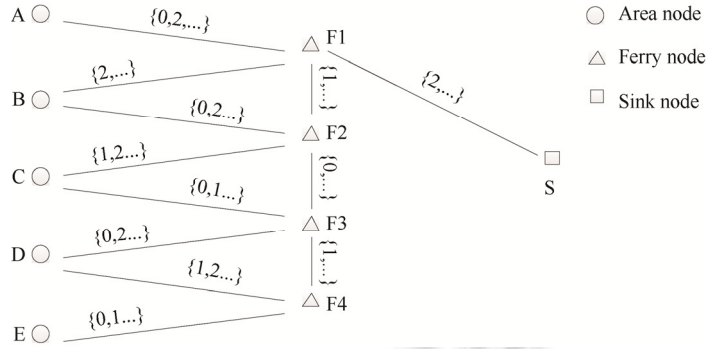


Fig.4 Time evolution graph model with weights

图4 带权值的时间演化图模型

### 2.3 连通均衡性建模

Ad-hoc 网络均衡性的研究大多是利用纳什均衡来优化网络拓扑,使拓扑结构达到均衡状态,但没有对网络的连通均衡性分析.而对于 OSN 这种具有时向性的特殊动态网络,分析 OSN 运行过程中的连通均衡状况有助于网络拓扑的优化.OSN 中感知消息从区域节点到 Sink 节点需要经过 Ferry 节点的转发,Ferry 节点对整个网络的通信起着至关重要的作用.本节定义了 Ferry 节点贡献度和 Ferry 节点聚集系数,进一步求出节点介数和连通均衡度,通过连通均衡度判定 Ferry 节点对网络均衡性的影响,并根据 Ferry 节点对网络连通均衡性影响的差异来衡量 OSN 的连通均衡性.

**定义 2(Ferry 节点贡献度).**

OSN 中,时间区间为  $T=[t_0, t_{\max}]$ ,区域节点  $V(i)$  和 Sink 节点  $V(j)$  组成节点对  $\{v(i), v(j)\}$ ,则  $D_e(i, j)$  称为 Ferry 节点  $V(e)$  关于链路  $\{v(i), v(j)\}$  的节点贡献度,其中  $D_e(i, j)$  的定义见式(1).

$$D_e(i, j) = \begin{cases} 0 & \{v(i), v(j)\} \text{不连通} \\ \frac{1}{R_e} & \text{Ferry节点经过 } \{v(i), v(j)\} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $R_e$  表示  $\{v(i), v(j)\}$  路径上除  $V(i)$  和  $V(j)$  外的节点数量.

整个网络中,共有  $n$  个区域节点,由公式(1)可知,对于任意 Ferry 节点  $V(e)$ ,遍历节点对  $\{v(i), v(j)\}$  可求得 Ferry 节点  $V(e)$  对整个 OSN 的贡献度为  $D_e$ .

$$D_e = \sum_{i=1}^n D_e(i, j) \times \frac{1}{n}, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

OSN 中,不同区域之间的连通是依靠 Ferry 节点的移动,将区域内的消息携带并转发到另一个区域.因此,Ferry 节点对网络的连通的影响程度可以用 Ferry 节点的贡献度来表示.

**定义 3(Ferry 节点聚集系数).**

时间区间  $T=[t_0, t_{\max}]$  内,Ferry 节点的聚集系数表示节点与网络中其他节点联系的紧密程度.若 Ferry 节点  $V(e)$  的所有第 1 跳邻居的集合是  $N_e(t_0, t_{\max})$ ,第 1 跳邻居数量为  $k_e(t_0, t_{\max})$ ,节点  $V(e)$  的时间序列邻居子图  $G_t^{N_e(t_0, t_{\max})}$ ,  $t=t_0, t_1, \dots, t_{\max}$ ,则节点  $V(e)$  的聚集系数  $C_e$  定义见式(3).

$$C_e = \frac{\sum_{t=t_0}^{t=t_{\max}} \# \text{of edges in } G_t^{N_e(t_0, t_{\max})}}{\tau \cdot \frac{k_e(t_0, t_{\max})[k_e(t_0, t_{\max})-1]}{2}} \quad (3)$$

其中,  $\tau = (t_{\max} - t_0)$  为消息最大存活时间,  $T=[t_0, t_{\max}]$  内邻居节点之间最多有  $k_e(t_0, t_{\max})[k_e(t_0, t_{\max})-1]/2$  条边,节点

$V(e)$  的邻居节点之间存在的边数为  $\sum_{t=t_0}^{t=t_{\max}} \text{\#of edges in } G_t^{N_e(t_0, t_{\max})}$ .

时间演化图中,任意时刻的拓扑总是与前一时刻的拓扑紧密相关,说明节点之间具有聚集性,针对 OSN 的特点,采用 Ferry 节点的聚集系数度量 Ferry 节点与其他节点联系的紧密程度.

**定义 4(节点介数).**

为了便于分析,对 Ferry 节点贡献度和聚集系数进行归一化处理,得到 Ferry 节点介数,见式(4).

$$p_e = \frac{D_e}{\sqrt{\sum_{e=1}^m D_e^2}} + \frac{C_e}{\sqrt{\sum_{e=1}^m C_e^2}} \quad (4)$$

其中,  $m$  为 Ferry 节点的个数,节点介数可以反映 Ferry 节点对整个 OSN 连通的影响程度.

**定义 5(连通均衡度).**

OSN 中, Ferry 节点之间的差异体现了网络连通的不均衡状况,可用 OSN 的连通均衡度来衡量网络的连通均衡性,见式(5).

$$\rho = 1 - \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{e=1}^m (p_e - \bar{p}_e)^2} \quad (5)$$

其中,  $\bar{p}_e = \frac{1}{m} \sum_{e=1}^m p_e$  表示节点介数的均值,  $\rho \geq 0$ , 若  $\rho$  值越大表示节点的介数差别不大,即节点对网络连通的影响力相差不大,则网络的连通均衡性越好.

若 OSN 的连通均衡性不好,即 Ferry 节点的介数差别很大.大介数 Ferry 节点出现故障,将导致网络中的数据出现拥塞,网络的连通均衡性快速下降.构造稳定、连通均衡的 OSN,网络的 Ferry 节点的介数差别不大,这样网络的负荷分布更加均匀,即网络的连通均衡性更好.

### 3 算法的设计与分析

本节提出时间演化图构造算法的目的是为获得各个时间快照的网络拓扑结构,并将变化的网络拓扑映射到邻接表中,方便在连通均衡性模型中计算 Ferry 节点贡献度.提出链路节点数量算法的目的是为遍历当前节点的邻接表,计算出链路的节点数量列表,方便在连通均衡性模型中计算 Ferry 节点聚集系数.通过将时间演化图构造算法和链路节点数量算法应用到连通均衡性模型中可分别得到 Ferry 节点的贡献度和聚集系数,进一步可求出节点介数和连通均衡度,通过连通均衡度量 OSN 的连通均衡性.

#### 3.1 时间演化图构造算法

由第 2.2 节可知,时间演化图模型是由连续时间片上的网络快照得来的.根据机会网络的特点, Ferry 节点在各时间片上存储的邻居列表可反映出网络快照.图 3 所示的网络快照对应的移动节点邻居列表见表 1.

**Table 1** Node neighbor list of Ferry node corresponding snapshot  
**表 1** 网络快照对应的 Ferry 节点邻居列表

	F1	F2	F3	F4
$G_0$	B	C	D	E
$G_1$	A	B	D, F4	F3
$G_2$	S	F3	C, F2	D

网络快照转化后得到的时间演化图模型可以由邻接表表示,该邻接表对于同一个节点不同的相遇时间片,当做一个单独的节点处理.例如,图 4 所示的 A 节点,采用  $A \rightarrow (F1, 0) \rightarrow (F1, 1)$  的形式,即以 A 节点开始的链表将有两个节点,分别是 (F1, 0) 和 (F1, 1).本算法先构造一个边集矩阵(edge\_matrix)作为辅助,进而构造邻接表.

**算法 1.** Temporal varying graph build algorithm.

输入:Ferry 节点邻居列表——neighbor;

输出:邻接表——aset.

- 1) Begin
- 2) For Each node in neighbor
- 3)     edge\_matrix.add (node, ferry, time);
- 4) End For
- 5) For Each time in edge\_matrix
- 6)     aset.add(source\_node, dest\_node, time);
- 7) Return aset
- 8) End For
- 9) End

算法 1 使用了边集矩阵作为辅助空间,其大小为  $(N_R \times N_F)$ ,两个非嵌套的循环完成模型建立.假设待测网络场景中感知区域的个数  $N_R$ ,Ferry 节点的个数  $N_F$ ,时间片的个数  $N_t$ ,则算法 1 的空间复杂度为  $O(N_F \times N_R)$ ,时间复杂度为  $O(N_F \times (N_R + N_t))$ .

### 3.2 链路节点数量算法

时间演化图构造算法将变化的网络拓扑映射到邻接表中,链路节点数量算法通过遍历当前节点的邻接表,计算出链路的节点数量列表,算法描述过程见算法 2.

**算法 2. Node number algorithms (aset,v).**

输入: aset——邻接表,v——初始节点

输出: countList——节点数量列表

- 1) 初始化队列 queue,并设置链路节点数量为 count=0.
- 2) 将起始节点 v 添加到 queue 中.
- 3) 判断 queue 是否为空,若不为空转向步骤 4),否则转向步骤 9).
- 4) 取出队首节点 v,邻居节点计数值 i=0.
- 5) 判断节点 v 是否有第 i 个邻居 u,若有则转向步骤 6),否则退回步骤 3).
- 6) 访问第 i 个邻居节点,判断第 i 个邻居节点的时间片是否不小于当前值,若满足转向步骤 7),否则转向步骤 8).
- 7) 更新节点 v 和节点 u 之间的节点数量 count,并写入数量列表 countList,将邻居节点 u 写入 queue,转向步骤 3).
- 8)  $i=i+1$ ,退回步骤 5).
- 9) 返回节点数量列表 countList.

算法 2 利用了图的广度优先遍历算法的思想,遍历节点的邻接表,随时间依次更新链路节点数量,不断对节点进行遍历,求出所有链路的节点数量.

## 4 仿真实验设计与分析

### 4.1 仿真实现设计

本文实验在机会网络仿真平台(opportunistic networks environment,简称 ONE)上进行,为了验证模型的合理性设计 3 组对应不同的实验场景的对比实验,即实验 4-1、实验 4-2 和实验 4-3.采集不同时间片下网络状态数据,并将整理后的数据代入公式(1)~公式(5)得到网络的连通均衡度.整个实验的模拟时长为 12 小时,每隔 20 分钟作为一个统计周期,对网络的吞吐量和整网连通均衡度进行一次统计.将网络的吞吐量作为判定网络的连通均衡程度的指标,同时将网络吞吐量与计算得到的整网连通均衡度进行对照比较,网络的吞吐量高说明网络的连通均衡性好,否则,连通均衡性差.仿真过程中主要相关实验参数见表 2,实验场景如图 5 所示.

3 组实验场景的具体设置如下:

(1) 实验 4-1: 整个场景中有 2 个 Ferry 节点按设定的轨迹移动,如图 5(a)中的不规则曲线。

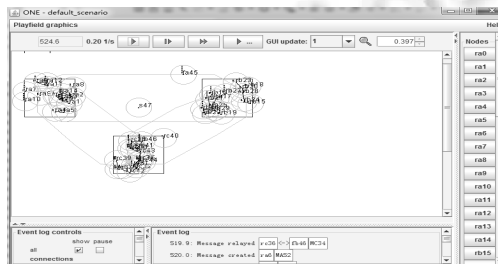
(2) 实验 4-2: 整个场景中有 4 个 Ferry 节点按设定的轨迹移动,如图 5(b)中的不规则曲线。

(3) 实验 4-3: 整个场景中的 Ferry 节点的数量分别设置为 2、4、6、8 4 种情况,并且 Ferry 节点在给定的区域范围内随机移动,如图 5(c)所示。

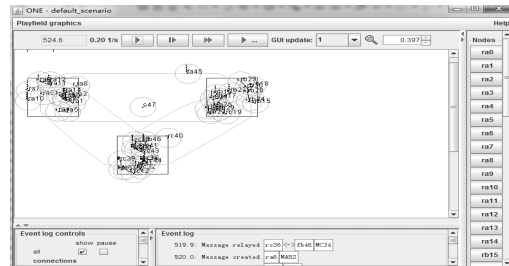
**Table 2** Parameters of simulation experiment

**表 2** 主要实验参数设置

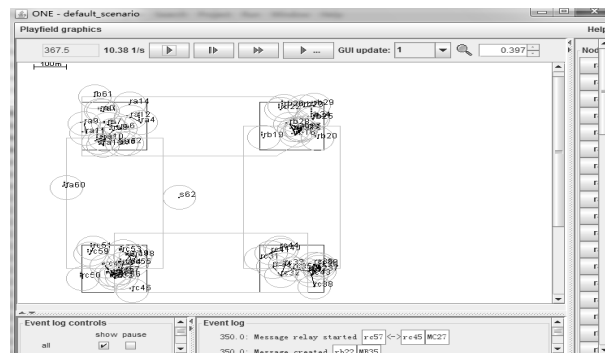
仿真参数	值
区域节点数量/个	15
区域大小/(m×m)	200×200
数据大小/KB	10~20
缓存大小/MB	20
传输速率/(KB/s)	2 000
统计周期/min	20
模拟时间/h	12
消息产生间隔/s	10



(a) Experiment 4-1 simulation of the experimental scene



(b) Experiment 4-2 simulation of the experimental scene



(c) Experiment 4-3 simulation of the experimental scene

**Fig.5** Simulation of the whole network connectivity simulation of the scene

**图 5** 整网连通均衡度仿真实验场景

分析可知,Ferry 节点的通信半径,Ferry 节点数量等因素对网络连通均衡性影响较大,上述 3 个不同的实验场景中,分别调整这些因素.前两个实验场景对网络的连通均衡状态(连通均衡性好、连通均衡性一般、连通均衡性差)进行对比仿真,第 3 个实验场景对不同的 Ferry 节点数量进行对比仿真,具体的实验参数设置见表 3.

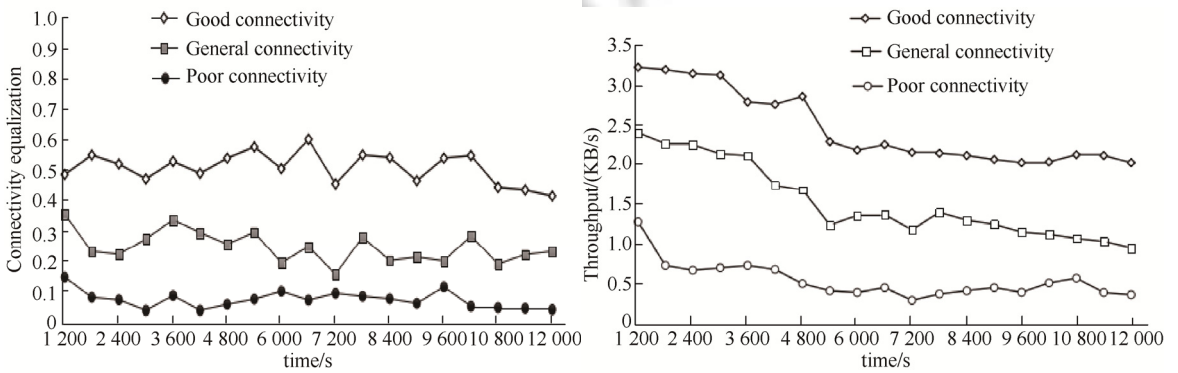


**Table 3** Experimental parameters setting in different scenes

表 3 不同场景的实验参数设置			
仿真参数	值		
场景名称	实验 4-1	实验 4-2	实验 4-3
Ferry 节点数量	2	4	2-8
Ferry 通信半径/m	好: 80 一般: 40 差: 10	好: 80 一般: 40 差: 10	10

4.2 实验结果及分析

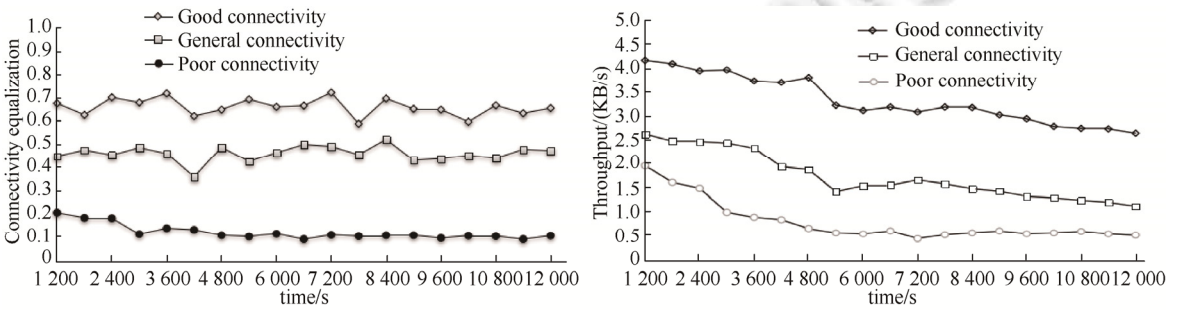
通过实验可以采集到消息传输的数据量、消息的路由信息以及与 Ferry 节点相遇的时间等数据,根据本文提出算法计算网络的连通均衡度与反映网络连通均衡性的网络吞吐量相吻合,能够反映网络的连通均衡状况.仿真实验结果如下图 6~8 所示.



(a) Connectivity equalization (b) Network throughput

Fig.6 Experiment 4-1 connectivity equalization and network throughputs

图 6 实验 4-1 连通均衡度和网络吞吐量



(a) Connectivity equalization (b) Network throughput

Fig.7 Experiment 4-2 connectivity equalization and network throughput

图 7 实验 4-2 连通均衡度和网络吞吐量



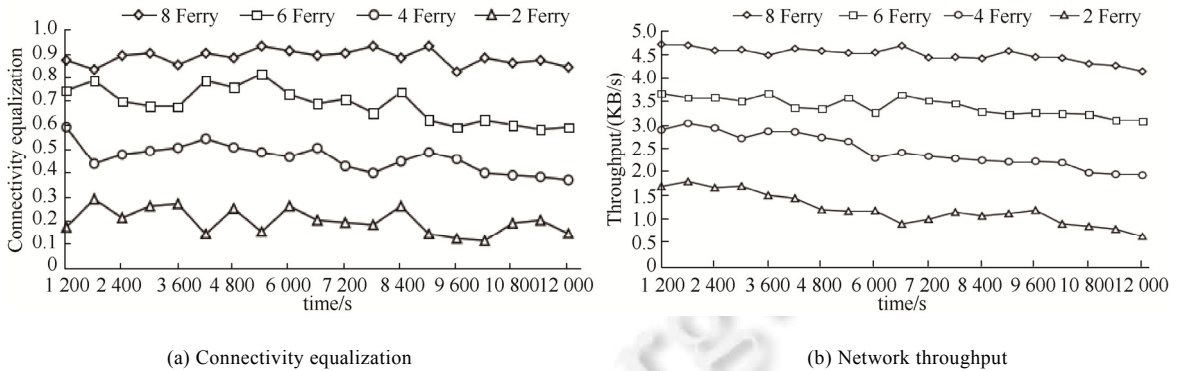


Fig. 8 Experiment 4-3 connectivity equalization and network throughput

图 8 实验 4-3 连通均衡度和网络吞吐量

通过将图 6 的(a)和(b)、图 7 的(a)和(b)、图 8 的(a)和(b)进行对比分析可以发现:每张图中的连通均衡度曲线都界线区分明显且互不相交,网络吞吐量曲线也一样;连通均衡度高的曲线(表示连通均衡性好)对应网络吞吐量大的曲线(表示连通均衡性好),表明算法计算出的网络的连通均衡度与反应网络连通均衡性的网络吞吐量相吻合。

网络的均衡性随着网络中节点的增加而提高,通过对比图 6(a)和图 7(a)可知,图 7(a)所对应实验 4-2 的 3 种状态下的连通均衡度均明显优于图 6(a)所对应实验 4-1,这与图 6(b)和图 7(b)反映出的实际网络连通均衡状况相吻合。通过图 6(b)和图 7(b)可看出,随着网络运行时间的增加网络的吞吐量都有所下降,但是可以明显看出在网络均衡性好的状态下的网络吞吐量下降的时间比较缓慢、下降的幅度较小,这是因为网络连通均衡性好不会造成网络拥塞。Ferry 节点随机移动,增加了 Ferry 节点与区域节点消息投递的概率,那么网络的均衡性较固定部署 Ferry 节点的网络要好。对比图 6(a)、图 7(a)和图 8(a)可知,除 Ferry 节点移动轨迹不同,在其他仿真参数相同的情况下,Ferry 节点随机移动场景下的均衡度比固定 Ferry 移动轨迹场景下的均衡度好。通过图 6(b)、图 7(b)与图 8(b)反映出的网络实际连通均衡度可验证这一情况的合理性。由上述实验结果可知,本文提出的连通均衡度模型可以反映出不同场景下 OSN 的连通均衡性情况,该模型具有合理性。

## 5 结 论

本文针对 OSN 时变性、间歇性连通的特点,采用时间演化图获取 OSN 拓扑变化的信息,在定义 Ferry 节点的贡献度和 Ferry 节点的聚集系数的基础上,定义连通均衡度来刻画 OSN 运行过程中的连通均衡情况。仿真实验验证了本文提出连通均衡性模型的合理性、适用性,下一步会将该模型利用到实际网络中,评价网络的均衡性情况。

## References:

- [1] Wu Y, Li JH, Lin C. Research on security and trust technology in opportunity network. *Journal of Computer Research and Development*, 2013,50(2):278-290 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.7544/issn1000-1239.2013.20111420]
- [2] Liu QL, Hu CF, Zhu DL, Li Y, Zhao WL. Opportunity network node interest community detection and routing strategy. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2014,37(3):62-66 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.13190/j.jbupt.2014.03.013]
- [3] Shu J, Zeng LX, Liu LL. Random graph model for opportunistic sensor networks based on divided area. *Communications in Computer & Information Science*, 2014,418:179-190. [doi: 10.1007/978-3-642-54522-1\_18]
- [4] Ma HD, Yuan PY, Zhao D. Study on the problem of mobile opportunity network routing. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2015,26(3):600-616 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org/1000-9825/4741.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004741]
- [5] Grindrod P, Higham DJ. Evolving graphs:dynamical models,inverse problems and propagation. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2010,466(2115):753-770. [doi: 10.1098/rspa.2009.0456]
- [6] Cai QS, Niu JW. Time evolution model of opportunity network based on independent evolution of edge. *Computer Engineering*,

- 2011,37(15):17–22 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.15.005]
- [7] Casteigts A, Flocchini P, Quattrociocchi W, Santoro N. Time-Varying graphs and dynamic networks. *International Journal of Parallel Emergent & Distributed Systems*, 2010,27(5):387–408. [doi: 10.1007/978-3-642-22450-8\_27]
- [8] Nicosia V, Tang J, Musolesi M, Russo G, Mascolo C, Latora V. Components in time-varying graphs. *Chaos An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2011,22(2):175–R. [doi: 10.1063/1.3697996]
- [9] Wan PJ, Yi CW, Wang L. Asymptotic critical transmission radius for  $k$ -connectivity in wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2015,56(6):2867–2874. [doi: 10.1109/TIT.2010.2046254]
- [10] Medjiah S, Taleb T, Ahmed T. Sailing over data mules in delay-tolerant networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2014,13(1):5–13. [doi: 10.1109/TW.2013.123013.120398]
- [11] Sajadian S, Ibrahim A, Freitas EP, Larsson T. Improving connectivity of nodes in mobile WSN. In: *Proc. of the 25th Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications*. Singapore: AINA, 2011. 364–371. [doi: 10.1109/AINA.2011.81]
- [12] Shu J, Geng XT, Zeng LX, Jang SD. Connectivity factors and connectivity model of opportunistic sensor networks. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2015,38(6):109–114 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.13190/j.jbupt.2015.06.022]
- [13] Xu MM, Yang QH, Kwak KS. Energy-connectivity tradeoff through topology control in wireless ad hoc networks. *ETRI Journal*, 2017,39(1):30–40. [doi: 10.4218/etrij.17.0116.0465]
- [14] Zarei M, Rahmani AM, Samimi H. Connectivity analysis for dynamic movement of vehicular ad hoc networks. *Wireless Networks*, 2017,23:843–859. [doi: 10.1007/s11276-015-1189-4]
- [15] Karakostas G, Markou E. Emergency connectivity in ad-hoc networks with selfish nodes. *Algorithmica*, 2014,68(2):358–389. [doi: 10.1007/s00453-012-9675-x]
- [16] Eidenbenz S, Kumar VSA, Züst S. Equilibria in topology control games for ad hoc networks. *Mobile Networks & Applications*, 2006,11(2):143–159. [doi: 10.1007/s11036-005-4468-y]
- [17] Malanchini I, Weber S, Cesana M. Stochastic characterization of the spectrum sharing game in ad-hoc networks. *Computer Networks*, 2015,81:63–78. [doi: 10.1016/j.comnet.2015.01.010]
- [18] Tian DX, Zhou JS, Sheng ZG, Chen M, Ni Q, Leung VCM. Self-organized relay selection for cooperative transmission in vehicular ad-hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2017,PP(99):1. [doi: 10.1109/TVT.2017.2715328]
- [19] Cao B, Sun X, Li Y, Wang CG, Mei H. Understanding the impact of employing relay node on wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017,PP(99):1. [doi: 10.1109/TVT.2016.2602501]

#### 附中文参考文献:

- [1] 吴越,李建华,林闯. 机会网络中的安全与信任技术研究进展. *计算机研究与发展*, 2013,50(2):278–290. [doi: 10.7544/issn1000-1239.2013.20111420]
- [2] 刘期烈,胡春风,朱德利,李云,赵为粮. 机会网络节点兴趣社区检测及路由策略. *北京邮电大学学报*, 2014,37(3):62–66. [doi: 10.13190/j.jbupt.2014.03.013]
- [4] 马华东,袁培燕,赵东. 移动机会网络路由问题研究进展. *软件学报*, 2015,26(3):600–616. <http://www.jos.org/1000-9825/4741.htm> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004741]
- [6] 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. *计算机工程*, 2011,37(15):17–22. [doi: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.15.005]
- [12] 舒坚,耿潇洒,曾林新,蒋善东. 机会传感网络连通度影响因素与连通度模型. *北京邮电大学学报*, 2015,38(6):109–114. [doi: 10.13190/j.jbupt.2015.06.022]



江文良(1991—),男,江西九江人,硕士生,主要研究领域为机会网络。



孟令冲(1991—),男,硕士生,主要研究领域为机会网络。



舒坚(1964—),男,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络,分布系统,软件工程。



刘琳岚(1968—),女,教授,CCF 专业会员,主要研究领域为无线传感器网络,分布系统。