

应急多跳无线网络中的节点移动方案

张康荣, 林基明, 郑霖

(桂林电子科技大学广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 当网络中存在分割现象时, 吞吐量的增加容易导致网络拥堵。造成网络分割的关键问题是网络中存在关键节点, 关键节点是大量网络路由的公共节点, 这导致关键节点能耗提高和网络通信效率降低。对此, 提出了一种基于依赖关系图的节点移动方案以弥补网络分割。首先, 通过依赖关系图来确定网络中导致拥堵的关键节点, 然后, 选择关键节点的邻节点, 在该节点拓扑不变的条件下, 按最短连通距离的方向移动, 建立关键节点位置的备份路由。仿真结果表明, 与已有的节点移动方案相比较, 所提方案在网络连通率、覆盖率、网络生命周期性能上都有明显的提升。

关键词: Ad hoc 网络; 依赖关系; 移动节点; 关键节点

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00061

Node mobility scheme in emergency multi-hop wireless network

ZHANG Kangrong, LIN Jiming, ZHENG Lin

Guangxi Key Laboratory of Wireless Communication & Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract: When there is a segmentation phenomenon in the network, the increase in throughput easily leads to network congestion. The key problem that causes network segmentation is that there are key nodes in the network. The key nodes are public nodes of a large number of network routes, which lead to the increase of energy consumption of key nodes and the decrease of network communication efficiency. A node mobility scheme based on dependency graphs to compensate for network segmentation was proposed. Firstly, the key nodes that cause congestion in the network were determined through the dependency graph. Then, the neighboring points of the key nodes were selected. Under the condition that the topology of the nodes were unchanged, moving in the direction of the shortest connected distance to establish a backup route of the key node position. The simulation results show that compared with the existing node mobility schemes, this scheme has significant performance improvements in network connectivity, coverage and network life cycle.

Key words: Ad hoc network, dependency, mobile node, key node

1 引言

无线自组网具有无中心、自组织和多跳路由等特点, 在各种场合下都能够快速组网, 特别适合应急通信这类场合。应急情况下, 多个应急业务可能需要同时通过一个中继节点来转发数据, 该中继节点被称为“关键节点”^[1-2]。关键节点的存在严重影响了应急业务的传输, 容易造成网络拥堵, 因此,

在应急情况下, 对关键节点的研究尤为重要。

近年来, 许多文献对 Ad hoc 网络中关键节点的探测算法进行了研究。文献[3]采用深度优先搜索 (DFS) 算法, 它是一种集中式的算法, 但是 DFS 算法仅适应于中、小规模的网络, 不适合大型网络。文献[4]论述了防止网络关键节点的算法, 首先探测到网络中存在的链路, 然后, 利用节点路径痕迹来发现网络中的关键节点。文献[5]研究基于节点

收稿日期: 2018-02-26; 修回日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61362006, No.61571143)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61362006, No.61571143)

稳定度预测机制的 Ad hoc 网络重探测关键节点的算法, 对网络拓扑分割的发现具有重要意义。但是节点需要感知邻居节点的移动速度, 这一步骤实现起来相对复杂。文献[6]中研究了通过本地信息探测关键节点的方法及其管理对网络的重要性。

移动性是 Ad hoc 网络的一个基本特征, 当网络中出现拥堵、链路信息无法实现有效传输时, 通过移动网络中现有的节点解决网络拥堵问题是有效方法之一。文献[7]提出一种在应急网络中的自支持协同网络 (SCAN, self-supported congestion-aware networking) 方法, 通过应急节点的自主移动, 解决网络分割问题, 但是应急节点的移动破坏了应急区域网络的连通性, 导致网络性能下降。文献[8]提出一种利用节点移动来构造两连通网络的分布式算法, 通过关键节点相邻的 2 个不同域中的邻节点的移动, 使 2 个邻域构成两连通网络。文献[9]提出的机器人网络双向连接 (RNB, robots network biconnected) 算法不基于节点的位置信息, 而是采用接收信号强度来估计节点的移动方向。

本文提出一种基于依赖关系图的节点移动方案, 利用节点之间的依赖关系, 准确地找出在吞吐量增加的情况下网络中可能出现的拥堵节点。此外, 与传统的寻找关键节点的方法不同, 本文考虑节点的剩余能量信息, 能够增加节点探测的准确性。并针对移动问题, 在基于机器人网络双向连接 RNB 算法的基础上, 研究设计了基于依赖关系图的单节点移动方案 (SNM-RNB, single node move robot network biconnected)。与传统 RNB 算法为了消除单连通网络, 利用邻接信息找到彼此相邻的 2 个节点相互移动不同, 本文在此基础上提出一种新的节点移动方案。选择关键节点上一跳的邻节点中与目标节点信号强度最强的节点, 通过移动来解决网络关键节点的问题。仿真结果表明, 与已有解决网络拥堵方案相比较, 本文提出的方案可以在不增加网络节点和改变网络连通的情况下, 解决网络拥堵, 提升网络整体性能。

2 系统网络模型

用图 $G=(V, E)$ 为 WANET 进行紧急服务建模, V 表示一组网络节点, E 表示节点的一组有向链路 $\langle u_i, u_j \rangle$, $u_i, u_j \in V$ 。如果节点 i 到节点 j 的传输功

率 P_{ij} 大于或等于 $\beta d_{ij}^\alpha (P_{ij} \geq \beta d_{ij}^\alpha)$, 则存在链路 $\langle u_i, u_j \rangle$, 反之亦然。其中, β 是传输质量参数, d_{ij} 是节点 i 和 j 之间的距离。 E_i 表示初始能量, \bar{E}_i 表示剩余能量 (单位为 J), 发生应急业务的节点用 $Emg_i(t)$ 表示, 其中, i 是无线节点编号, t 是发生的时间, 用于紧急服务的 WANET 系统模型如图 1 所示。

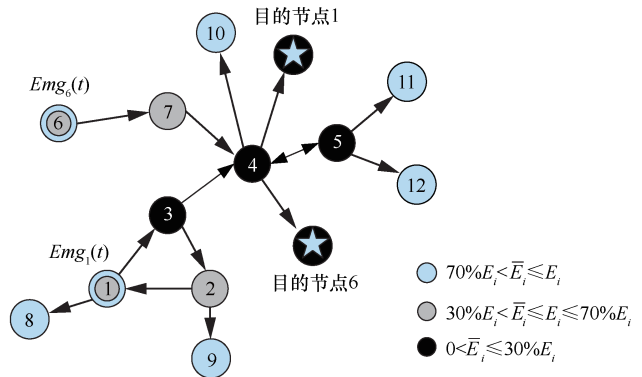


图 1 系统模型

如图 1 所示, 处于紧急情况 (双圈) 的节点要分别与它们的目的地 (带星节点) 进行通信。可能会同时发生多个紧急情况 (例如, 在时间 t_1 发生紧急情况 $Emg_1(t)$ 和 $Emg_6(t)$)。在系统模型中, 用节点的颜色代表它们的能量状态, 蓝色表示节点剩余能量处于高能量水平 (大于 70%), 灰色表示节点的剩余能量在其初始能量的 30%~70%, 其他节点的剩余能量低于 30%, 也是网络中容易拥堵的节点。

3 基于依赖关系的节点探测算法

在 WANET 中每个源节点通过许多中继节点将应急信息发送到目的节点。利用有向图来描述节点的通信方向, 并通过有向图来确定节点的依赖关系, 找到网络中容易出现拥堵的节点, 即寻找的关键节点。

在 WANET 中, 每一个源节点通过多个中继节点将信息发送到目的节点, 用依赖图 (DG) 来表示节点的依赖关系。定义依赖关系图 $G'=(N, L)$ 为网络中顶点和边的集合, 每个节点 u_i 都对应集合 N 中的一个节点, L 表示所有边的集合。在依赖关系图中, 当存在一组边的序列 $\langle u_1, u_2 \rangle, \langle u_2, u_3 \rangle, \dots, \langle u_{j-1}, u_j \rangle$, 其中 u_1, u_2, \dots, u_j 为不同的节点, 且 $u_1 = u_j$, 则由这些节点构成的链路为一个依赖循

环。例如, 图 2 中 s_1 、 s_2 、 s_3 就构成一个依赖循环, 由依赖循环可将网络中的节点分为 2 种, 即在依赖循环中的节点和不在依赖循环中的节点。由依赖关系可知, 在依赖循环中的节点容易发生拥堵现象, 为了模拟网络拥塞, 判断节点是否为关键节点, 判断节点是否满足如下要求之一

$$|L_i| \geq \sqrt{|V|} \quad (1)$$

$u_i \in L_i$

$$OD(L_i) \geq |L_i| \quad (2)$$

$u_i \in L_i$ $u_i \in L_i$

其中, $|V|$ 表示网络中的节点数量, $|L_i|$ 表示依赖性循环 L_i 中的节点数量。OD(L_i) 为依赖循环 L_i 的出度^[7], 满足条件之一即关键节点。

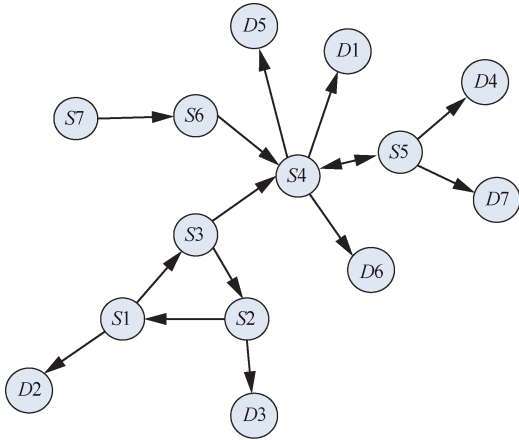


图 2 网络依赖关系

4 SNM-RNB 算法的系统模型

基于 RNB 算法, 为了消除单连通网络, 利用邻接信息找到彼此相邻的 2 个节点相互移动。本文提出一种新采用单节点移动的算法——SNM-RNB 算法, 该算法首先对关键节点上一跳的邻节点按信号强度进行排序, 选出与下一跳邻节点信号强度最强的节点进行连接, 建立关键节点的备份路由, 消除关键节点带来的拥堵^[11-12]。

考虑 m 个节点构成的 Ad hoc 网络, 假设每个节点具有唯一的 ID 并用 $n_i (i \in [1, m])$ 来表示。节点之间的通信通过全向天线接收和发送信号, 假设无线信道采用相同的传播模型, 节点之间的距离 d 按 $\alpha (\alpha \geq 2)$ 次方衰减。 p_t 为发送功率, 常数 k 反映收、发设备的工作特性。本文采用自由空间模型^[13-17], 则 $\alpha = 2$, 接收功率 p_r 可以表示为

$$p_r = kp_t d^{-\alpha} \quad (3)$$

表 1 给出 SNM-RNB 算法中用到的符号含义。

符号	含义
$P_r(n, m)$	节点 n 与节点 m 之间的信号强度
$d(n, m)$	节点 n 与节点 m 之间的距离
n_c	关键节点
$s_{i,k}$	与移动节点 n_{mc} 不同群的第 k 个呼叫邻节点
$n_{cd}(i)$	节点 n_i 的限制节点
n_{mc}	移动节点
n_{ig}	目标连接节点
$P_c(x)$	n_{mc} 接收到来自 n_c 的信号强度
$P_{ig}(x)$	n_{mc} 接收到来自 n_{ig} 的信号强度
P_{HT}	节点收到信号的最大功率

4.1 移动节点与目标节点的计算

网络中节点的移动应保证原有拓扑连接关系不被破坏, 因此, 节点的移动将受到其邻节点的制约, 制约节点移动的点称为移动节点的限制节点。移动节点的距离限制如图 3 所示, 假设节点 O 为移动节点, A 和 B 为其邻节点, 节点 O 的移动不能与 A 和 B 断开连接, 则称其为移动节点 O 的限制节点。

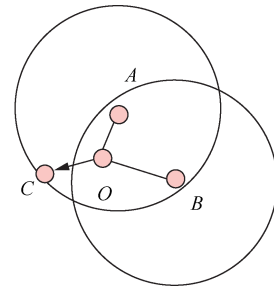


图 3 移动节点的距离限制

移动节点方向夹角如图 4 所示, 假设 n_c 为网络中容易出现拥堵的关键节点, 其中, 节点 n_i 表示关键节点 n_c 的上一跳节点的邻节点, 则节点 n_i 的移动将受其邻节点 $n_{i,j}$ 的限制, j 为限制移动节点移动的节点个数, n_i 的限制节点记作 $n_{cd}(i)$, 可表示为

$$n_{cd}(i) = \{n_{i,j} | \arg \min \lambda_i \cos \theta_j, j = 1, 2, \dots, N-1\} \quad (4)$$

其中, θ_j 为移动节点 n_i 与关键节点 n_c 和限制邻节点 $n_{i,j}$ 所形成的夹角, λ_j 是节点 n_i 接收到邻节点信号强度的归一化, 即

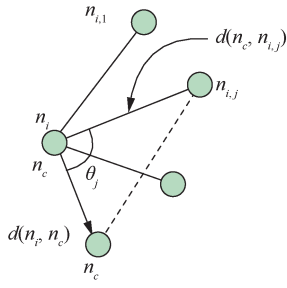


图4 移动节点方向夹角

$$\lambda_j = \frac{P_r(n_i, n_{i,j})}{\sum_j P_r(n_i, n_{i,j})}, j=1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

节点 n_i 与节点 $n_{cd}(i)$ 之间的传输消耗用 $P_{cd}(n_i)$ 表示, n_i 与呼叫邻节点 $s_{i,k}$ 之间的传输消耗用 $P_s(s_{i,k})$ 表示。则在不影响网络连通性的条件下, 移动节点 n_{mc} 应选择 $P_{cd}(n_i)$ 与 $P_s(s_{i,k})$ 之和为最小值时的节点 n_i 。即

$$n_{mc} = \left\{ n_i \mid \min(p_{cd}(n_i) + p_s(s_{i,k})), \right. \\ \left. i=1, 2, \dots, N-1; k=1, 2, \dots, N-2 \right\} \quad (6)$$

由式(3)可知, 节点接收功率与距离有关, 2个节点之间的信号越强, 距离越短。为了使2个节点尽可能连接, 则移动节点 n_{mc} 与 $s_{i,k}$ 信号最强的节点, 即目标节点 n_{ig}

$$n_{ig} = \arg \max P_r(n_{mc}, s_{i,k}), \\ i=1, 2, \dots, N-1; K=1, 2, \dots, N-2 \quad (7)$$

目标链路选择如图5所示, n_{m1} 要想建立 n_c 的备份路由, 就需要与距离最短的 n_{i1} 建立连接。

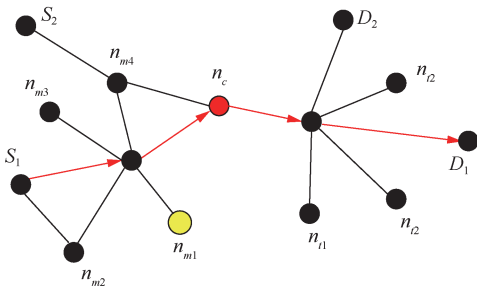


图5 目标链路选择

4.2 节点的移动方案

RNB 算法在搜索过程中利用8个方向的信号强度探索移动方向, 迭代数较多, 需要消耗较多的能量。为了确定搜索方向, 减少能量消耗, 本

文对节点的移动方案进行改进。移动节点对移动方向的搜索是根据节点之间的信号强度来判断的, 因为关键节点处于移动节点和目标节点的两端, 则移动节点的移动方向只需在3个方向进行信号强度的判断, 从而确定移动方向。节点移动如图6所示, 移动方向 θ 为方向的探索移动节点分别在关键节点 n_c 、目标节点 n_{m1} 和角平分线上的信号强度。

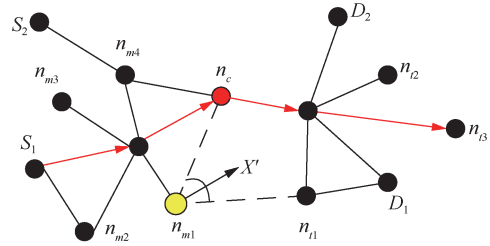


图6 节点移动方向的搜索

移动步长是节点移动的一个重要指标, 相比固定步长的搜索, 变步长的搜索可以根据每移动一个位置后的信号强度来调整。可由节点位于 X_i 时的 $p_{nc}(X_i)$ 和 $p_{ni}(X_i)$, 计算得到移动方向 θ_{i+1} 时的移动距离 δ_{i+1} , 如下

$$\delta_{i+1} = \frac{1}{2} \left[\left[\frac{kP_t}{P_{nc}(X_i)} \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{kP_t}{P_{ni}(X_i)} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \cdot (\cos \theta_{i+1} + \sin \theta_{i+1}) \quad (8)$$

在节点移动的过程中, 只要保证与邻节点不断裂的情况下成功与目标链路建立连接, 则移动成功, 此时算法结束。

如果移动节点接收到限制节点的信号强度不大于接收门限 p_{HT} , 即 $P_{nd}(X) \leq P_{TH}$, 节点的移动受到限制, 接收门限为节点所能接收到邻节点的信号强度的最大值, 那么移动节点将停止移动, 然后按照邻节点中节点信号强度的排序, 找到第2个可以移动的节点进行移动, 直到消除网络关键节点。

图7为节点移动前后的网络拓扑图, 移动节点 n_{m1} 移动到最佳位置 X^* , 与目标节点 n_{i1} 建立关键节点 n_c 的备份路径。本文算法的流程为确立移动节点和目标节点, 然后确立使用探索的移动方案将移动节点移动到最佳目标位置, 使2个节点建立连接。

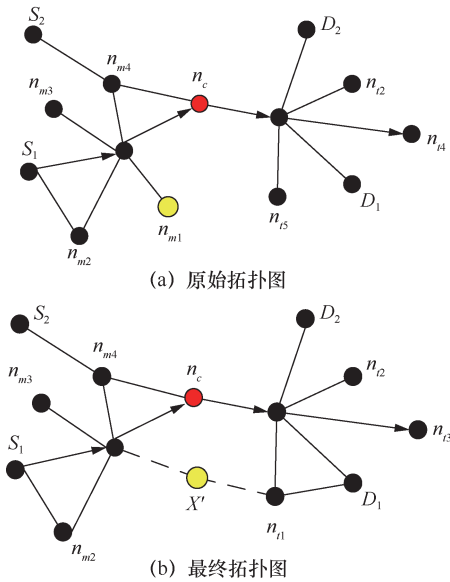


图 7 移动前后的网络拓扑图

5 实验与分析

为了能够全面地分析算法的性能，采用 MATLAB 仿真平台对网络进行仿真，实验仿真参数如表 2 所示。在 1 200 m × 300 m 的矩形区域内，随机分布着 100 个无线自组织网络节点，每个节点使用相同的收/发设备，每个节点的传送范围为 20 m，多个紧急业务随机出现在网络中。仿真将从网络覆盖率、连通性、吞吐量和生命周期 4 个方面进行。

表 2 实验仿真参数	
参数	数值
节点个数	100
仿真范围	1 200 m × 300 m
节点传输范围	20 m
自由共建模型 α	2

由实验分析可得，通过节点移动的方法可以改变网络的拓扑和分布，消除网络关键节点，但是不同的节点数目对网络覆盖率的影响不同。图 8(a)表明，由于单节点移动个数少，只改变了单个节点区域的网络拓扑，而多节点同时移动，造成了多个网络区域的变化及单节点的移动，对网络的影响较小。SCAN 算法利用发生应急业务节点的直接移动，来解决网络拥堵节点的问题，在移动的过程中不仅造成原应急业务节点区域形成新的关键节点，而且节点移动没有考虑节点的连通性。SNM-RNB 算法通过关键节点上一跳的移动，可以避免网络出

现新的关键节点。如图 8(b)所示，SCAN 算法和 SNM-RNB 算法都是为关键节点构造两连通网络，但是 SCAN 算法选取应急业务的节点为移动节点，应急业务节点的直接移动可能会造成新的关键节点或移动不到关键节点的情况，相比较而言，SNM-RNB 算法采用了限制节点，选取邻节点的移动效果更好。

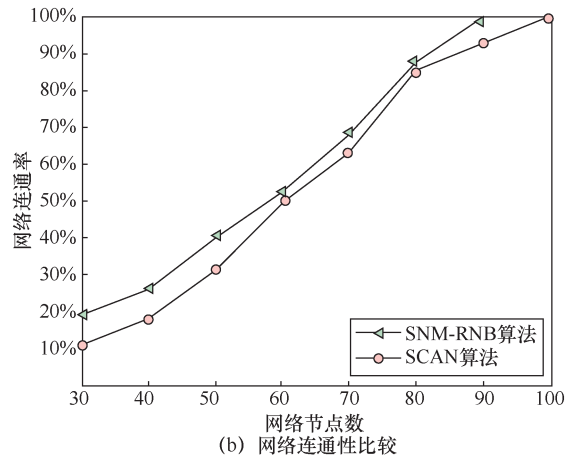
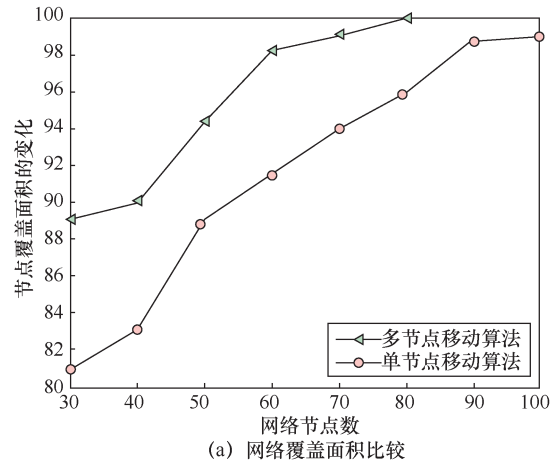


图 8 算法对网络覆盖率和连通性的影响

网络吞吐量和网络生命周期是评估应急服务 WANET 的主要指标，在图 9(a)中，对 SNM-RNB 算法和 RNB 算法、自支持网络算法 SCAN 算法进行比较。SCAN 算法和 RNB 算法虽然用到了节点的移动，但是会造成移动节点周围网络拓扑的变化，SNM-RNB 算法通过邻节点的移动消除关键节点，增加网络的吞吐量。图 9(b)中，SCAN 算法的移动会造成网络出现新的关键节点，破坏网络拓扑，RNB 算法中采用节点相向移动进行处理。在相同节点的情况下，SNM-RNB 算法可以快速地解决关键节点问题。

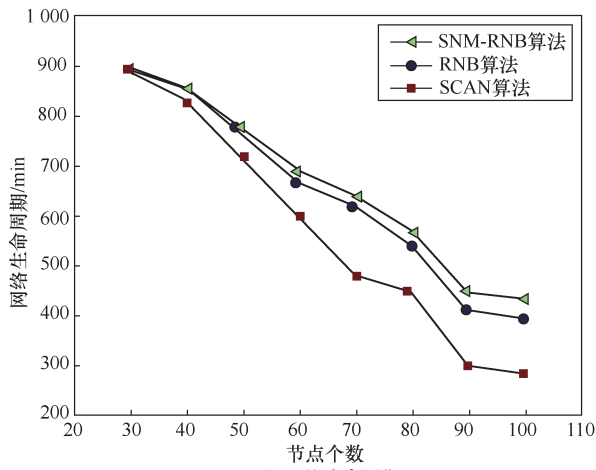
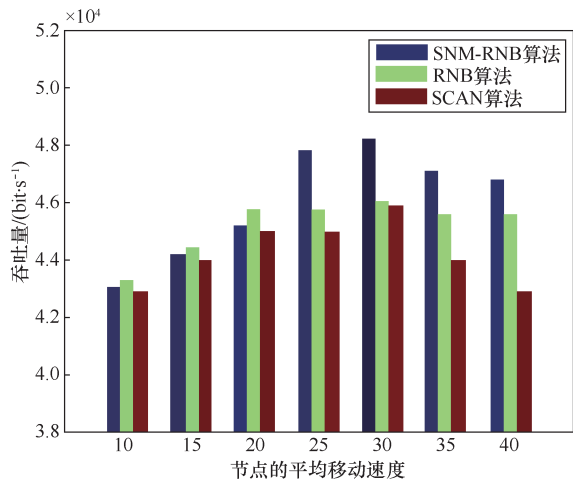


图 9 提出方案的效率

6 结束语

本文基于节点之间的依赖关系和节点的剩余能量, 探测网络中的关键节点, 相对于深度优先搜索 (DSP) 算法, 利用生成树将整个网络构建成两连通网络, 能够更加准确地找到应急情况下可能出现阻塞的节点。为了更好地提升网络性能, 在 RNB 算法基础上, 提出了基于 RNB 的单节点移动算法 SNM-RNB 算法。该算法主要是在关键节点的上一跳邻节点中, 选取不对网络连通性造成破坏的可移动节点, 与关键节点的下一跳建立连接, 从而有效解决网络关键节点问题, 消除网络拥堵。仿真结果表明, 该算法能够在探测出网络关键节点的同时, 不影响网络性能的连通性, 通过单节点的移动来消除关键节点。

参考文献:

[1] 王海涛. 应急通信的研究发展现状和技术手段分析[J]. 信息通信

技术, 2011, 5(5):84-89.

WANG H T. Research and development status and technical measures of emergency communication[J]. Information and Communications Technology, 2011, 5(5):84-89.

[2] 李虎. Ad hoc 网络中关键节点探测及匿名保护研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
LI H. A study of critical nodes detection and anonymous protection in Ad hoc networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.

[3] GOYAL D, CAFFERY J. Partitioning avoidance in mobile Ad hoc networks using network survivability concepts[C]//International Symposium on Computer and Communications. 2002: 553-558.

[4] BASU P, REDDI J. Movement control algorithms for realization of fault-tolerant Ad hoc robot networks[J]. IEEE Press, 2004, 18(4): 36-44.

[5] BRATISLAV M, NIKOLA M, MIROSLAW M. Prediction of partitioning in location-aware mobile Ad hoc networks[C]//The 38th Hawaii International Conference on System Sciences. 2005: 306-312.

[6] KIM T H, TIPPER D, KRISHNAMURTHY P, et al. Improving the topological resilience of mobile Ad hoc networks[C]//International Workshop on Design of Reliable Communication Networks. 2009: 191-197.

[7] HAN B, LI J, SU J. Self-supported congestion-aware networking for emergency services in WANETs[C]//IEEE INFOCOM. 2011: 891-899.

[8] DAS S, LIU H, KAMATH A, et al. Localized movement control for fault tolerance of mobile robot networks[C]//Icip International Federation for Information Processing. 2007: 1-12.

[9] BUTTERFIELD J, DANTU K, GERKEY B. Autonomous biconnected network of mobile robots[C]//International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile. 2008: 640-646.

[10] FELEGYHAZI M, HUBAUX J P, BUTTYAN A L. Nash equilibria of packet forwarding strategies in wireless Ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(5): 463-476.

[11] AHMADI M. STONE. Keeping in touch. maintaining biconnected structure by homogeneous robots[C]//Twenty-First National Conference on Artificial Intelligence. 2006: 580-585.

[12] LIN J. Distributed mobility control for fault-tolerant mobile networks[C]//Systems Communications. 2005: 61-66.

[13] 张颖. 无线 Ad hoc 网络节点移动部署研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
ZHANG Y. A study of node movement and deployment in wireless Ad hoc networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.

[14] 张颖, 沈中, 常义林. 一种信号强度感知的 Ad hoc 网络节点移动控制算法[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(2):107-110.
ZHANG Y, SHRN Z, CHANG Y L. Signal-aware movement control algorithm for Ad hoc networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(2):107-110.

[15] 王霞, 李旭宏, 张伟, 等. 突发事件下机会网络节点移动模型研究[J]. 枣庄学院学报, 2016, 33(2):103-108.
WANG X, LI X H, ZHANG W, et al. Research on opportunistic network node mobile model under emergencies[J]. Journal of Zaozhuang University, 2016, 33(2):103-108.

- [16] KIM T H, TIPPER D, KRISHNAMURTHY P, et al. Improving the topological resilience of mobile Ad hoc networks[C]//International Workshop on Design of Reliable Communication Networks. 2009: 191-197.
- [17] BRATISLAV M, NIKOLA M, MIROSLAW M. Prediction of partitioning in location-aware mobile Ad hoc networks[C]//The 38th Hawaii International Conference on System Sciences. 2005: 306-312.



林基明 (1970-), 男, 桂林电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、移动通信。

[作者简介]



张康荣 (1990-), 男, 桂林电子科技大学硕士生, 主要研究方向为应急通信。



郑霖 (1973-), 男, 桂林电子科技大学教授, 主要研究方向为无线超宽带通信、无线传感器网络、移动通信、自适应信号处理、扩频通信。