

## 基于链路断开概率的自适应信标交换算法

张衡阳 郑博 陈校平 于佳

(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

(hareed@163.com)

## An Adaptive Beacon Exchange Algorithm Based on Link Broken Probability

Zhang Hengyang, Zheng Bo, Chen Xiaoping, and Yu Jia

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077)

**Abstract** In mobile wireless sensor networks, greedy geographical routing protocols usually adopt a period beacon exchange algorithm to build and update neighbor table, which brings about the phenomenon of temporary communication blindness in the mobility scenery. To address this problem, we propose a new adaptive beacon exchange algorithm based on link broken probability which corresponds with the running time of mobility scenery. Impact of node mobility on network connectivity is analyzed based on the Markov chain model of link status. The formula of link broken probability is derived from theoretical analysis. Then, the work node calculates variable beacon period according to the link broken probability threshold relative to up node. Idle node calculates variable beacon period according to the threshold link broken probability relative to its all neighbors. The threshold probability can be adjusted to meet the performance requirement of networks. Forwarding node removes the next hop from neighbors table, if it did not receive the feedback beacon after two beacon periods. The adaptive beacon exchange algorithm can get the accurate neighbors table and mitigate the phenomenon of temporary communication blindness. Simulation shows that the proposed algorithm can obtain high packet success delivery ratio and low consumption. So it is scalable and applicable to large-scale mobile wireless sensor networks.

**Key words** mobile wireless sensor network; greedy geographical routing; beacon exchange; temporary communication blindness; neighbor table

**摘要** 在移动无线传感器网络中,贪婪地理路由协议采用周期性信标交换算法来构建和维护邻居节点表会导致通信暂盲现象.针对该问题,首先从理论上分析节点移动对网络连通性的影响,对节点间的链路状态进行 Markov 链建模,分析推导出链路断开概率的计算公式.根据链路断开概率与运动时间的一一对应关系,提出一种基于链路断开概率的自适应信标交换算法,提高邻居节点表的构建与维护的准确性与实时性,为贪婪地理转发策略提供可靠的依据,减缓节点移动带来的不利影响.仿真结果表明,该算法不但提高了数据分组传送成功率,而且还降低了控制开销,适用于对传输可靠性和能耗要求高的移动无线传感器网络.

**关键词** 无线传感器网络;贪婪地理路由协议;信标交换;通信暂盲现象;邻居节点表

中图法分类号 TP393

邻居节点表的构建与维护是基于地理位置信息的贪婪地理路由协议<sup>[1-4]</sup>的基础,是贪婪转发策略选择下一跳节点的依据。但是,节点的移动使得网络拓扑不断发生变化,各个节点需要不断地进行信标交换,分布式动态地构建和维护各自的邻居节点表。目前贪婪地理路由协议大多采用周期性信标交换算法,研究发现,该算法在移动环境中会导致通信暂盲现象<sup>[5-7]</sup>,严重影响数据传输的可靠性;同时,不参与数据传输的大量空闲节点依然采用与工作节点一样的信标交换周期,消耗了大量不必要的能量。

为了克服因周期信标交换算法在移动环境中存在的通信暂盲现象问题,文献[6]为本文前期工作,其中移出概率的计算方法是基于节点在移动区域范围内近似均匀分布的特性进行简化求解。本文从理论上分析节点移动对网络连通性的影响,对节点间的链路状态进行 Markov 链建模,分析推导出链路断开概率的计算公式,根据链路断开概率与运动时间的一一对应关系,提出一种基于链路断开概率的自适应信标交换算法,从而提高邻居节点表的构建与维护的准确性与实时性,为贪婪地理转发策略提供可靠的依据。

## 1 信标交换算法的相关工作

周期性信标交换算法较早地应用在 OSPF 协议<sup>[8]</sup>中,后来 Chakeres 等人<sup>[9]</sup>对 IEEE 802.11 协议中的周期性信标交换进行了充分的研究,认为邻居节点表项的寿命为信标交换周期的 2 倍比较合适。Wolfson 等人<sup>[10]</sup>提出当实际位置与数据库位置的差值超过所设定的门限值时,便发送信标来更新位置数据库的方法。Chen 等人<sup>[11]</sup>提出一种自适应位置更新策略,结合移动预测方法和按需学习方法来发送信标。Heissenbuttel 等人<sup>[12]</sup>提出 3 种信标交换算法:1)基于时间。运动快的节点信标发送周期比运动慢的节点短;2)基于距离。节点每移动一定的距离便发送一个信标;3)基于速率。移动速率越快的节点信标发送频率越高。Giruka 等人<sup>[13]</sup>也提出 3 种信标交换算法:1)基于距离。和文献[12]类似;2)反应式信标交换,在每次数据转发之前进行邻居节点表的构建与维护,需要一定的时间,会引入大量的时延。3)事件驱动的信标发送算法,这种触发的反应式信标会涉及到整个网络,在数据传送频繁的网络中,控制开销将会大大增加。Yao 等人<sup>[14]</sup>提出一种自适应信标交换算法,节点在链路断开之前发送信标来达

到消除通信暂盲现象的目的。文中所采用的分析是一种极限情况,缺乏理论推导分析。Ingelrest 等人<sup>[15]</sup>提出一种 TAP (turnover based adaptive HELLO protocol)算法,在无需硬件测速的情况下,根据新旧邻居节点轮替的快慢来自适应地调整信标交换的发送周期。

上述算法从不同程度上改善了周期性信标交换算法性能,但是,这些算法缺乏数学上的理论推导分析,没有区分节点的工作状态,远离传输路径的空闲节点与工作节点采用相同的信标交换周期会引入不必要的控制开销,消耗不必要的能量,缩短了网络的使用寿命。

## 2 基于链路断开概率的自适应信标交换算法

在移动场景参数确定的条件下,链路断开概率和运行时间在统计意义上具有一一对应的关系<sup>[6]</sup>,设定一个链路断开概率门限值,对应链路的一个剩余链路寿命值,可用这个时间来触发下一次信标交换。基于上述原理,提出一种基于链路断开概率的自适应信标交换算法:根据网络系统的 QoS 要求设定链路断开概率门限值,工作节点根据它与上游转发节点的相对状态动态地计算相对应的剩余链路寿命,空闲节点根据所有邻居节点的相对状态动态地计算相对应的平均剩余链路寿命,作为下一次信标交换的周期,通过按需信标交换、信标等待反馈超时删除过期节点的方法准确地构建和维护传输路径上的邻居节点表,为贪婪转发提供准确可靠的依据。其中,基于移动模型分析节点移动对网络连通性能的影响和计算链路断开概率是自适应信标交换算法的理论依据。

### 2.1 链路断开概率的计算

本文采用 SGM 移动模型<sup>[16]</sup>分析节点移动对网络连通的影响。在移动场景参数确定的条件下,假设在初始时刻节点 1 和节点 2 之间的链路已经存在。从文献[16]可知,如果将节点的运动时间以时隙  $\Delta t$  进行等分,每一个时隙即为一步,在第  $k$  步时节点 1 和节点 2 的运动速度分别是  $v_{1k}$  和  $v_{2k}$ ,用  $v_k$  和  $\rho_k$  分别表示第  $k$  步时节点 2 相对节点 1 的相对速度和相对距离,如图 1 所示,可得式(1)和式(2),其中  $\theta_k$  均匀分布于  $[0, \pi)$ 。

$$\rho_k = \sqrt{\rho_{k-1}^2 + v_k^2 - 2\rho_{k-1}v_k \cos \theta_k}, \quad (1)$$

$$\theta_k = \arccos \frac{\rho_{k-1}^2 + v_k^2 - \rho_k^2}{2\rho_{k-1}v_k}. \quad (2)$$

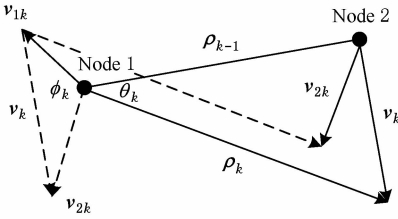


Fig. 1 Relative movement of two nodes.  
图1 两节点相对运动关系示意图

将两节点之间的相对距离  $\rho$  定义为分离距离,  $\rho$  随着节点运动而不断地发生变化. 约定初始时刻分离距离用  $\rho_0$  表示, 第  $k$  步分离距离用  $\rho_k$  来表示. 将节点的通信半径  $R$  以  $\epsilon$  等分为  $L = \frac{R}{\epsilon}$  份, 如图 2

所示:

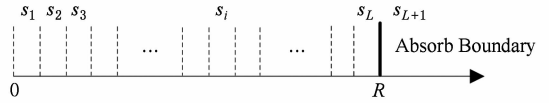


Fig. 2 State space of separate distance.  
图2 分离距离  $\rho$  的状态空间

当链路存在时,  $\rho$  一定处在  $[0, L\epsilon]$  区间内. 如果  $\rho \in [(i-1)\epsilon, i\epsilon], i \in [1, L]$ , 则定义  $\rho$  处于状态  $s_i$ . 链路断开时, 即  $\rho_N > R$  时的情形记为状态  $s_{L+1}$ . 随着节点不断地运动,  $\rho$  所处状态将不断变化, 可以用具有吸收边界的 Markov 链来描述  $\rho$  的状态变化过程<sup>[17]</sup>, 如图 3 所示:

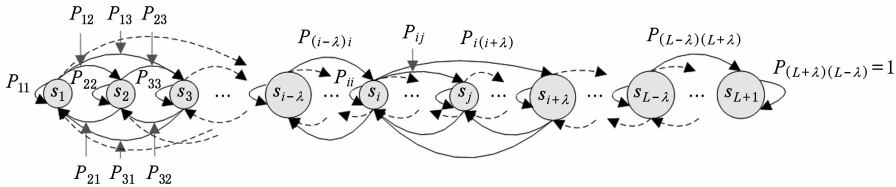


Fig. 3 State space transition of separate distance.  
图3 分离距离  $\rho$  的状态空间转移示意图

$s_{L+1}$  为该 Markov 过程的吸收边界, 状态  $s_{L+1}$  表示节点 2 移出节点 1 的通信范围, 链路断开, 该 Markov 过程结束.  $\rho_{k-1} \in s_i$  经过 1 步到达  $\rho_k \in s_j$  的概率为一步转移概率  $P_{ij} = Pr\{\rho_k \in s_j | \rho_{k-1} \in s_i\}$ , 分离距离  $\rho$  最多跨跃  $\lambda = \left\lceil \frac{2v_{\max}}{\epsilon} \right\rceil$  个状态,  $v_{\max}$  表示节点最大运动速率.

$s_{L+1}$  为吸收边界,  $\pi^{(0)} \mathbf{P}_{L+1}$  表示节点 2 经过一步移出节点 1 通信范围的概率, 即链路断开概率. 由 Markov 链的多步转移性质, 根据  $\pi^{(0)}$  和  $\mathbf{P}$  便可得多步转移后的链路断开概率. 初始状态为  $\pi^{(0)}$  分布的分离距离  $\rho_0$  经过  $k$  步后链路断开概率为

$$\pi_{s_{L+1}}(k) = \pi^{(0)} \mathbf{P}_{L+1}^k. \tag{8}$$

2.1.1 初始状态分布  $\pi^{(0)}$

$\rho_0$  初始状态为  $s_i$ , 初始状态分布  $\pi^{(0)}$  向量中第  $i$  个元素为 1, 有式(9):

$$\pi^{(0)} = (0, 0, \dots, 1, \dots, 0). \tag{9}$$

2.1.2 一步转移概率矩阵  $\mathbf{P}$

第  $k-1$  步  $\rho_{k-1}$  处于状态  $s_i$ , 第  $k$  步  $\rho_k$  处于状态  $s_j$ ,  $\rho_k$  一定处于  $[\rho_{k-1} - v_{\max}, \rho_{k-1} + v_{\max}]$  区间范围内, 即  $j \in [\max(1, i-\lambda), \min(i+\lambda, L+1)]$ , 因此可得式(10):

$$P_{ij} = Pr\{\rho_k \in s_j | \rho_{k-1} \in s_i\} = \frac{\int_{(j-1)\epsilon}^{j\epsilon} \int_{(i-1)\epsilon}^{i\epsilon} f_{\rho_k | \rho_{k-1}}(\rho_k | \rho_{k-1}) f(\rho_{k-1}) d\rho_{k-1} d\rho_k}{\int_{(i-1)\epsilon}^{i\epsilon} f(\rho_{k-1}) d\rho_{k-1}}, \tag{10}$$

由边缘概率公式可得:

$$f_{\rho_k | \rho_{k-1}}(\rho_k | \rho_{k-1}) = \int_0^{2v_{\max}} f_{\rho_k | \rho_{k-1}}(\rho_k | \rho_{k-1}, v_k) f(v_k) dv_k, \tag{11}$$

用  $\pi^{(0)}$  表示  $\rho_0$  所处状态的概率分布:  
 $\pi^{(0)} = (\pi_{s_1}(0), \pi_{s_2}(0), \dots, \pi_{s_L}(0), \pi_{s_{L+1}}(0)),$  (3)  
 用  $\pi^{(1)}$  表示经过 1 步后  $\rho_1$  所处状态的概率分布, 用  $\mathbf{P}$  来表示状态之间的一步转移矩阵:  
 $\pi^{(1)} = (\pi_{s_1}(1), \pi_{s_2}(1), \dots, \pi_{s_L}(1), \pi_{s_{L+1}}(1)) = \pi^{(0)} \mathbf{P}.$  (4)  
 用  $\pi^{(k)}$  表示经过  $k$  步后  $\rho_k$  所处状态的概率分布:  
 $\pi^{(k)} = (\pi_{s_1}(k), \pi_{s_2}(k), \dots, \pi_{s_L}(k), \pi_{s_{L+1}}(k)) = \pi^{(0)} \mathbf{P}^k,$  (5)  
 $\mathbf{P}$  可以写成  $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_i, \dots, \mathbf{P}_{L+1}],$   $\mathbf{P}_i$  表示  $\mathbf{P}$  中第  $i$  列向量. 根据向量的乘法, 可将式(4)(5) 改写为

$$\pi^{(1)} = \pi^{(0)} \mathbf{P} = [\pi^{(0)} \mathbf{P}_1, \pi^{(0)} \mathbf{P}_2, \dots, \pi^{(0)} \mathbf{P}_i, \dots, \pi^{(0)} \mathbf{P}_{L+1}], \tag{6}$$

$$\pi^{(k)} = \pi^{(0)} \mathbf{P}^k = [\pi^{(0)} \mathbf{P}_1^k, \pi^{(0)} \mathbf{P}_2^k, \dots, \pi^{(0)} \mathbf{P}_i^k, \dots, \pi^{(0)} \mathbf{P}_{L+1}^k]. \tag{7}$$

$f(v_k)$ 表示相对速率  $v_k$  的概率密度分布.  $\theta_k$  均匀分布于  $[0, \pi)$ , 有  $f(\theta_k) = \frac{1}{\pi}$ , 可推导出式(12):

$$f_{\rho_k | \rho_{k-1}}(\rho_k | \rho_{k-1}, v_k) = f(\theta_k) \times \left| \frac{\partial \theta_k}{\partial \rho_k} \right| = \frac{2\rho_k}{\pi \sqrt{4\rho_{k-1}^2 v_k^2 - (\rho_{k-1}^2 + v_k^2 - \rho_k^2)^2}}, \quad (12)$$

而  $f_{\rho_k | \rho_{k-1}}(\rho_k | \rho_{k-1})$  可表示为式(13):

$$f_{\rho_k | \rho_{k-1}}(\rho_k | \rho_{k-1}) = \int_0^{2v_{\max}} \frac{2\rho_k f(v_k)}{\pi \sqrt{4\rho_{k-1}^2 v_k^2 - (\rho_{k-1}^2 + v_k^2 - \rho_k^2)^2}} dv_k, \quad (13)$$

计算一步转移概率的关键在于计算节点相对速率  $v_k$  的概率密度分布. 由图1分析可得:

$$v_k = \sqrt{v_{1k}^2 + v_{2k}^2 - 2v_{1k}v_{2k} \cos \phi_k}, \\ \phi_k = \arccos \frac{v_{1k}^2 + v_{2k}^2 - v_k^2}{2v_{1k}v_{2k}},$$

$\phi_k$  均匀分布于  $[0, \pi)$ ,  $f_{\phi_k}(\phi_k) = \frac{1}{\pi}$ , 由 Jacobean 转换可得  $v_k, v_{1k}, v_{2k}$  的联合概率密度:

$$f_{v_k, v_{1k}, v_{2k}}(v_k, v_{1k}, v_{2k}) = f_{\phi_k, v_{1k}, v_{2k}}(\phi_k, v_{1k}, v_{2k}) \times \left| \frac{\partial \phi_k}{\partial v_k} \right| = \frac{2v_k f_{\phi_k, v_{1k}, v_{2k}}(\phi_k, v_{1k}, v_{2k})}{\sqrt{4v_{1k}^2 v_{2k}^2 - (v_{1k}^2 + v_{2k}^2 - v_k^2)^2}}, \quad (14)$$

因为  $\phi_k, v_{1k}$  和  $v_{2k}$  之间相互独立,  $f_{\phi_k}(\phi_k) = \frac{1}{\pi}$ , 式(14)可进一步写为

$$f_{v_k, v_{1k}, v_{2k}}(v_k, v_{1k}, v_{2k}) = \frac{2v_k f_{v_{1k}}(v_{1k}) f_{v_{2k}}(v_{2k})}{\pi \sqrt{4v_{1k}^2 v_{2k}^2 - (v_{1k}^2 + v_{2k}^2 - v_k^2)^2}}, \quad (15)$$

由边缘概率公式可得式(16):

$$f_{v_k}(v_k) = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} \left\{ v_k f_{v_{1k}}(v_{1k}) f_{v_{2k}}(v_{2k}) \right\} / \pi \sqrt{4v_{1k}^2 v_{2k}^2 - (v_{1k}^2 + v_{2k}^2 - v_k^2)^2} dv_{1k} dv_{2k}, \quad (16)$$

必须首先求出  $f_{v_{1k}}(v_{1k})$  和  $f_{v_{2k}}(v_{2k})$ , 即单个节点运动速率的概率密度, 由文献[16]可得式(17):

$$f_{v_{1k}}(v_{1k}) = \frac{1}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min} + 1} \sum_{l=\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \sum_{j=1}^l \frac{l}{j} f_{v_a} \left( \frac{v_{1k} l}{j} \right) + \frac{(M+1)}{\beta_{\max} - \beta_{\min} + 1} \sum_{l=\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \sum_{j=1}^l f_{v_{\beta}(j)}(v_{1k}) \frac{1}{E\{T\} + E\{T_{\rho}\}} + \frac{M}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min} + 1} \sum_{l=\epsilon_{\min}}^{\epsilon_{\max}} \sum_{j=1}^l f_{v_{\epsilon}(j)}(v_{1k}) \frac{1}{E\{T\} + E\{T_{\rho}\}} +$$

$$\frac{1}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min} + 1} \sum_{l=\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} \sum_{j=1}^l \frac{l}{l-j} f_{v_{\beta}} \left( \frac{v_{1k} l}{l-j} \right) \frac{1}{E\{T\} + E\{T_{\rho}\}} + \frac{E\{T_{\rho}\} \delta(v_{1k})}{E\{T\} + E\{T_{\rho}\}}, \quad (17)$$

同理  $f_{v_{2k}}(v_{2k})$ .

当  $L \geq \epsilon$  时, 即当  $L$  足够大,  $\epsilon$  足够小的时候,

$\rho_{k-1} \approx \left(i - \frac{1}{2}\right)\epsilon, \rho_k \approx \left(j - \frac{1}{2}\right)\epsilon$ , 因此  $P_{ij}$  可近似为

$$P_{ij} \approx \left\{ f_{\rho_k | \rho_{k-1}} \left( \left(j - \frac{1}{2}\right)\epsilon \mid \left(i - \frac{1}{2}\right)\epsilon \right) f_{\rho_{k-1}} \left( \left(i - \frac{1}{2}\right)\epsilon \right) \times \epsilon \times \epsilon \right\} / \left\{ f_{\rho_{k-1}} \left( \left(i - \frac{1}{2}\right)\epsilon \right) \times \epsilon \right\} = \epsilon \times f_{\rho_k | \rho_{k-1}} \left( \left(j - \frac{1}{2}\right)\epsilon \mid \left(i - \frac{1}{2}\right)\epsilon \right). \quad (18)$$

通过上述分析可以求出一步转移矩阵  $\mathbf{P}$ , 通过式(8)(9)求出  $\rho_0$  经过  $k$  步的链路断开概率. 可以得出以下结论:

- 1) 随着节点间分离距离的增大, 链路断开概率增大.
- 2) 节点的通信半径越大, 链路断开概率随之而减小.
- 3) 场景中节点的运动速率越大, 链路断开概率增大.
- 4) 节点的平稳运动时间越大, 链路断开概率增大.
- 5) 节点的拐弯概率越大, 链路断开概率减小.
- 6) 链路断开概率随着暂停时间的增大而减小.

在给定节点通信范围和节点运动参数的情况下, 减缓通信暂盲现象的关键在于合理设定信标交换周期. 针对网络系统对可靠性的要求, 可以设定链路断开概率门限值  $P_{Th}$ ,

$$\pi_{s_{L+1}}(k) = \pi^{(0)} \mathbf{P}_{L+1}^k = P_{Th}, \quad (19)$$

通过式(19)便可求出相应的信标周期  $T = k \cdot \Delta t$ .  $P_{Th}$  越小, 信标交换周期  $T$  越小, 当  $P_{Th} = 0$  时, 对应的信标交换周期  $T$  的最大值为  $\frac{R - \rho_0}{2v_{\max}}$ . 在下一个周期  $T$  内, 链路断开概率  $\pi_{s_{L+1}}(k) = 0$ , 即不会产生通信暂盲现象.

## 2.2 自适应信标交换算法的设计

自适应信标交换算法主要包括以下4个部分:

- 1) 网络节点根据自身的工作状态自适应地选择信标交换周期计算方法.

如图4所示, 节点首先判断自己的工作状态, 如果是工作节点(参与数据传输的节点), 只需要获取

上游节点的位置,根据式(19)计算出相应的信标交换周期并向上游节点发送信标,准确反映自己的地理位置,供上游节点做出合理的下一跳节点选择.如果是空闲节点,则需获取所有邻居节点的特征量,分别求出相对于它们的信标发送周期  $T_n, n = 1, 2, 3, \dots, N$ , 计算它们的平均值  $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n$ , 并将  $\bar{T}$  作为该节点的信标发送周期,并进入时间调度器进行信标发送.

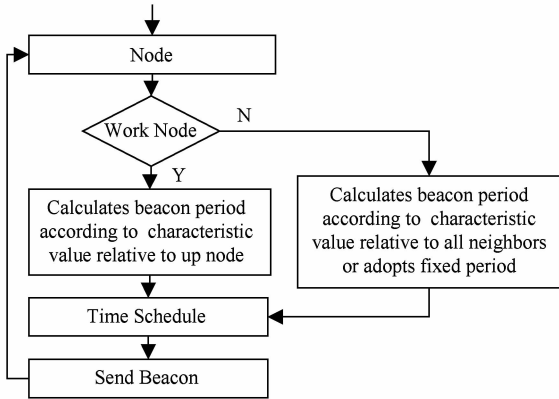


Fig. 4 Adaptive beacon exchanges scheme.

图4 自适应信标交换算法

2) 按需信标交换.

如图5所示,当节点第一次被其他节点选择为下一跳节点成为工作节点时,立即向周围邻居节点发送生命值(TTL)为1跳的请求信标,并设置一个等待时间门限,收到请求信标的邻居节点立即回复一个信标,报告其位置信息.该节点便根据这些回复信标更新邻居节点表.如果在等待时间门限内没有收到邻居节点表中某个节点的信标反馈,便认为该邻居节点已经移出了其通信范围,并将其从邻居节点表中移除,通过该方法可以使得传输路径的节点

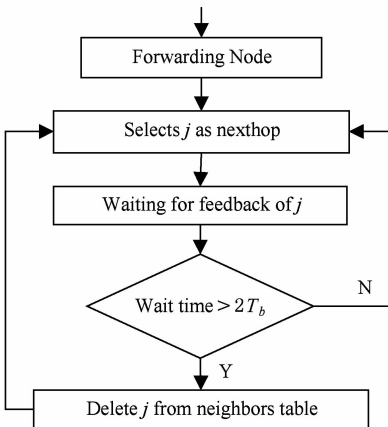


Fig. 5 Feedback scheme.

图5 信标反馈等待超时流程图

维护着一张比较准确的本地拓扑图,为贪婪转发策略提供准确的依据.

3) 根据网络性能自动调整链路断开概率门限值  $P_{Th}$ .

如图6所示,当网络数据分组传送成功率低于应用要求时,控制中心以一定的步进  $\Delta P$  减小链路断开概率门限值  $P_{Th}$ ,并向全网进行一次性广播,网络中的工作节点根据  $\pi_{s_{L+1}}(k) = P_{Th}$  计算的信标交换周期会相应地减小,逐步达到相应的 QoS 要求.当网络的控制开销太大且数据分组传送成功率高于要求时,控制中心以一定的步进  $\Delta P$  增大链路断开概率门限值  $P_{Th}$ ,并向全网进行一次性广播,网络中的工作节点根据  $\pi_{s_{L+1}}(k) = P_{Th}$  计算出的信标交换周期也会相应地增大,从而可以减少信标的发送量,降低控制开销.

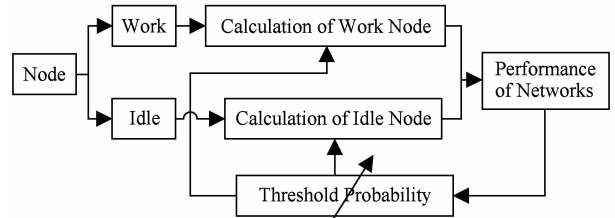


Fig. 6 Adaptive feedback scheme.

图6 自适应反馈方法

4) 过渡带内的最小信标发送周期.

当传输路径上两个相邻工作节点的距离  $d$  接近最大通信距离  $R$  时,由式(19)计算得到的信标交换周期非常小,会带来很大的控制开销,与数据分组发生碰撞的概率增大,阻塞通信信道.在实际应用中一般要限定信标交换周期的最小值.一旦限定信标交换周期的最小值,在节点的通信边缘处会存在一个不稳定连接区域,节点运动会引起通信暂盲现象的发生.为了消除通信暂盲现象,这里采用过渡带的方法<sup>[5]</sup>,在最小信标交换周期内,所选择的下一跳节点不会因运动而移出转发节点的通信范围.在保持通信不中断的情况下,平稳地过渡到下一轮所选择的下一跳节点.文献<sup>[5]</sup>详细描述过渡带半径大小的设计及其对平均路由跳数的影响.

3 算法模拟仿真

采用自适应信标交换算法的贪婪地理路由协议称为 GVAR,并与 GPSR 在采用相同运动场景和业务场景条件下进行比较,两者使用相同的空洞处理算法,只是构建邻居节点表时 GPSR 采用周期性信

标交换算法,而 GVAR 采用自适应信标交换算法. 采用即时吞吐量、数据分组传送成功率、控制开销 3

个评价参数. 仿真平台使用 NS-2.30<sup>[18]</sup>, 仿真场景设置如表 1 和表 2 所示.

**Table 1 Setting of Simulation Sceneries for Adaptive Beacon Exchange**

**表 1 自适应信标交换算法仿真场景设置**

Parameter	Sceneries and Node Number( <i>Nodes</i> ) ( $150^2 = 150 \times 150$ )/m <sup>2</sup>					Velocity/ (m · s <sup>-1</sup> )
	150 <sup>2</sup>	200 <sup>2</sup>	250 <sup>2</sup>	300 <sup>2</sup>	350 <sup>2</sup>	
GPSR	150 <sup>2</sup>	200 <sup>2</sup>	250 <sup>2</sup>	300 <sup>2</sup>	350 <sup>2</sup>	0, [0, 2], [1, 3], [2, 4],
GVAR	10	20	30	40	50	[3, 5], [4, 6]

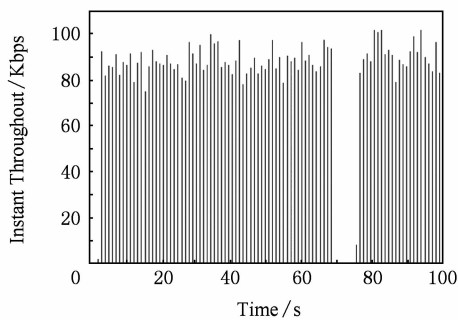
**Table 2 Setting of Simulation Sceneries for Adaptive Beacon Exchange**

**表 2 自适应信标交换算法仿真场景设置**

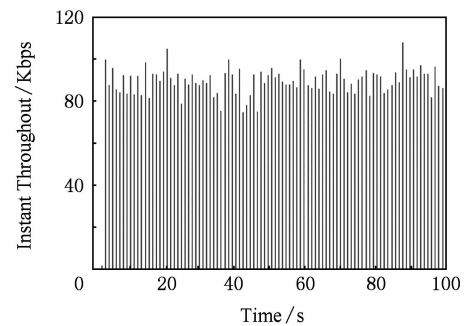
Parameter	Radio Radius/m	Data Type/b	Data Rate/s	Beacon Period/s	Simulate Time/s
GPSR	100	CBR512	10	5	100
GVAR	100	CBR512	10	Adaptive	100

图 7 可以直观地看出:采用周期性信标交换算法的 GPSR 协议由于通信暂盲现象出现了数据包

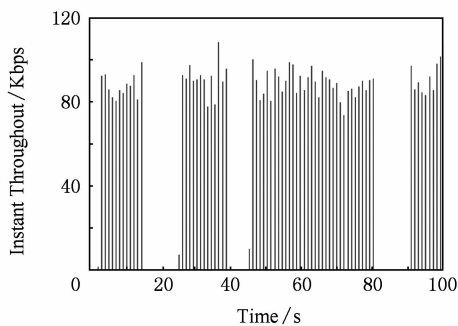
的丢失,并且随着网络规模增大变得更为严重,而采用自适应信标交换算法的 GVAR 协议基本消除了



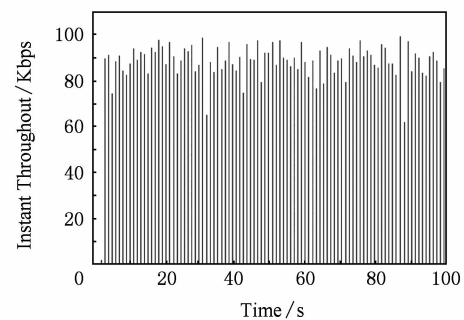
(a) GPSR, *Nodes* = 20



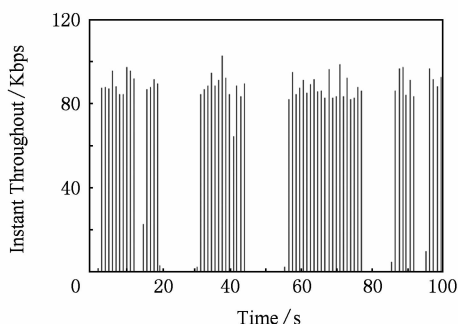
(b) GVAR, *Nodes* = 20



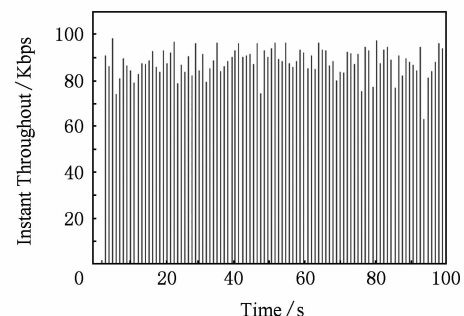
(c) GPSR, *Nodes* = 30



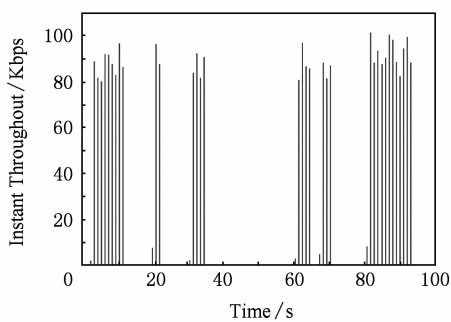
(d) GVAR, *Nodes* = 30



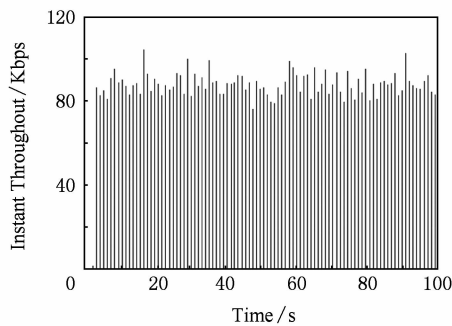
(e) GPSR, *Nodes* = 40



(f) GVAR, *Nodes* = 40



(g) GPSR, Nodes = 50



(h) GVAR, Nodes = 50

Fig. 7 Instant throughput of GPSR and GVAR.

图 7 GPSR 和 GVAR 的即时吞吐量

通信暂盲现象,且与网络的规模无关,具有很好的可扩展性.

图 8 至图 13 为 GPSR 协议和 GVAR 协议在不同的网络规模和不同的节点运动速率情况下的分组传送成功率和控制开销仿真结果.

图 8 说明采用周期性信标交换的 GPSR 协议数据分组传送成功率随着网络规模(路由跳数)的增大而迅速降低,而 GVAR 协议能保持很高的数据分组传送成功率.图 10 和图 12 说明在网络规模相同,节点通信范围相同的条件下,GPSR 协议数据分组传送成功率随着节点运动剧烈程度的增加而降低,而

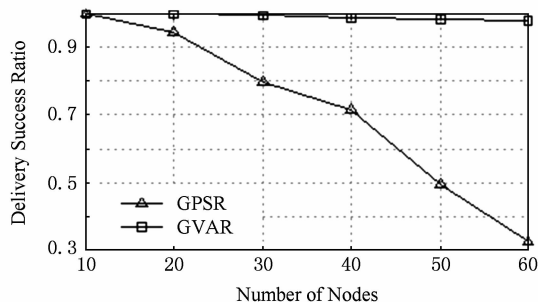


Fig. 8 Packet success delivery ratio(Velocity = [1,3]/m · s<sup>-1</sup>).

图 8 分组传送成功率(Velocity = [1,3]/m · s<sup>-1</sup>)

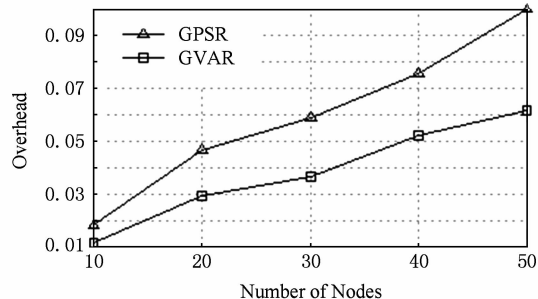


Fig. 9 Overhead(Velocity = [1,3]/m · s<sup>-1</sup>).

图 9 控制开销(Velocity = [1,3]/m · s<sup>-1</sup>)

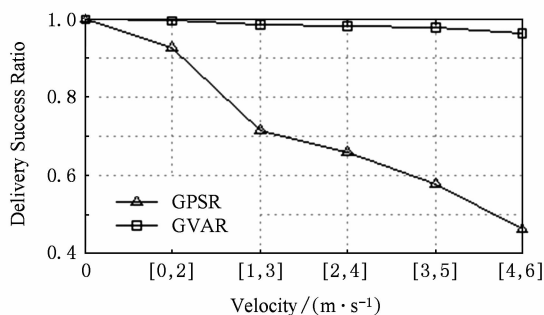


Fig. 10 Packet success delivery ratio(Nodes=40).

图 10 分组传送成功率(Nodes=40)

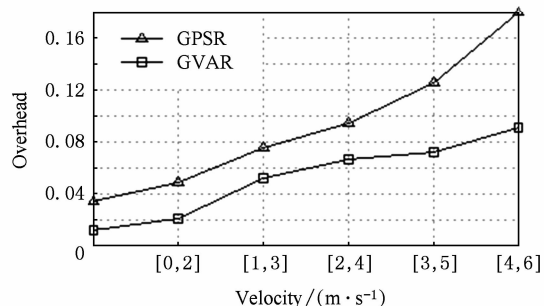


Fig. 11 Overhead(Nodes=40).

图 11 控制开销(Nodes=40)

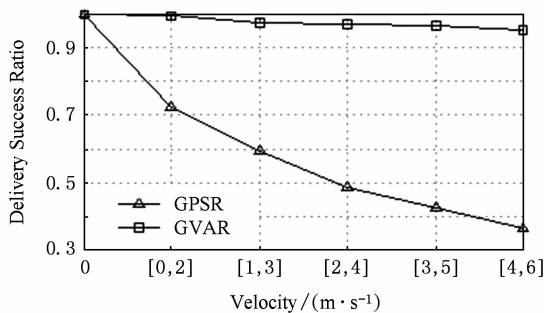
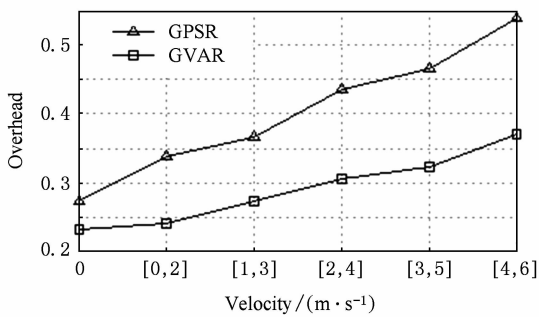


Fig. 12 Packet success delivery ratio(Nodes=300).

图 12 分组传送成功率(Nodes=300)

Fig. 13 Overhead( $Nodes=300$ ).图 13 控制开销( $Nodes=300$ )

GVAR 协议的数据分组传送成功率受网络节点的运动剧烈程度影响不大,对网络拓扑的动态变化具有很好的适应性.图 9 说明随着网络规模(路由跳数)的增大控制开销也逐渐增大.如图 11 和图 13 所示,GPSR 协议由于节点运动速率的增大,数据分组成功传送总数减少,信标分组数目基本不变,导致控制开销有所增加,GVAR 协议中,信标周期随着节点相对运动速率的增大而自适应地减小,导致控制开销也有所增加.但是,使用自适应信标交换算法的 GVAR 协议中控制开销要低于使用周期性信标交换算法的 GPSR 协议,GVAR 协议在控制开销方面的优势更为明显.

## 4 结 论

在贪婪地理路由协议中,信标交换算法用来构建和维护邻居节点表,为贪婪转发策略提供依据.目前,广泛使用的周期性信标交换算法在拓扑变化的移动场景中会带来通信暂盲现象,节点移入非最优问题、节点非最优问题和控制开销效能低的问题,对网络数据传输的实时性和可靠性带来了很大的影响.针对这一问题展开了研究,在 SGM 移动模型的基础上,从理论上分析节点移动对网络连通性的影响,提出了一种基于链路断开概率的自适应信标交换算法.仿真结果表明,自适应信标交换算法能够有效地消除通信暂盲现象,大大提高数据传输可靠性,同时还降低了控制开销,延长了网络使用寿命.

## 参 考 文 献

- [1] Karp B, Kung H T. Greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C] //Proc of the 6th Annual ACM/IEEE Int Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000). New York: ACM, 2000: 243-254
- [2] Fabian Kuhn, Roger Wattenhofer, Yan Zhong, et al. Geometric ad-hoc routing of theory and practice [C] //Proc of the 22nd ACM Symp on Principles of Distributed Computing (PODC 2003). New York: ACM, 2003: 63-72
- [3] Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass routing on geometric networks [C] //Proc of the 11th Canadian Conf on Computational Geometry. Vancouver, Canada: University of British Columbia, 1999: 51-54
- [4] Stojmenovic I, Lin X. Loop-free hybrid single-path/flooding routing algorithms with guaranteed delivery for wireless networks [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2001,12(10): 1023-1032
- [5] Zhang Hengyang, Li Yingying, Liu Yunhui, et al. Transition zone based greedy forwarding strategies for mobile wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(12): 2663-2667 (in Chinese)  
(张衡阳, 李莹莹, 刘云辉, 等. 移动无线传感器网络中基于过渡带思想的贪婪转发策略[J]. 传感技术学报, 2007, 20(12): 2663-2667)
- [6] Zhang Hengyang, Li Yingying, Liu Yunhui. Adaptive beacon exchange algorithm in geographic routing for mobile sensor networks [J]. Journal of Software, 2008, 19(11): 3033-3041 (in Chinese)  
(张衡阳, 李莹莹, 刘云辉. 移动无线传感器网络自适应信标交换算法[J]. 软件学报, 2008,19(11): 3033-3041)
- [7] Zhang Hengyang, Fan Weihong, Wang Ling, et al. Real-time and reliable greedy geographical routing for mobile wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(5): 713-722 (in Chinese)  
(张衡阳, 樊玮虹, 王玲, 等. 一种实时可靠的移动无线传感器网络贪婪地理路由协议[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(5): 713-722)
- [8] Moy J. RFC 2328, OSPF Version 2 [S/OL]. The Internet Society, 1998. [2011-05-08]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt>
- [9] Chakeres I D, Elizabeth M, Belding-Royer E. The utility of hello messages for determining link connectivity [C] //Proc of the 5th Int Symp on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 504-508
- [10] Wolfson O, Jiang L, Sistla P, et al. Databases for tracking mobile units in real time [C] //Proc of the 7th Int Conf on Database Theory (ICDT). Berlin: Springer, 1999: 169-186
- [11] Chen Q, Kanhere S S, Hassan M, et al. Adaptive position update in geographic routing [C] //Proc of IEEE Int Conf on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 4046-4051
- [12] Heissenbuttel M, Braun T. Optimizing neighbor table accuracy of position-based routing algorithms [C] //Proc of IEEE INFOCOM 2005. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 1-13



- [13] Giruka V C, Singhal M. Hello protocols for ad-hoc networks: Overhead and accuracy tradeoffs [C] //Proc of the 6th IEEE Int Symp on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 354-361
- [14] Shen Yao, Cai Yunze, Xu Xiaoming. An adaptive scheme for neighbor discovery in mobile ad hoc networks [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 12(5): 602-629
- [15] Ingelrest F, Mitton N, Simplot-Ryl D. A turnover based adaptive HELLO protocol for mobile ad hoc and sensor networks [C] //Proc of the 15th IEEE Int Symp on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 9-14
- [16] Zhang Hengyang, Xu Dan, Liu Yunhui, et al. A smooth gauss semi markov mobility model for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2008, 19(7): 1707-1715 (in Chinese)  
(张衡阳, 许丹, 刘云辉, 等. 一种平滑的高斯半马尔可夫无线传感器网络移动模型[J]. 软件学报, 2008, 19(7): 1701-1715)
- [17] Zhao Ming, Wang Wenye. The Impacts of radio channels and node mobility on link statistics in mobile ad hoc networks [C] //Proc of IEEE GLOBECOM. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1206-1210
- [18] Fall J, Varadhan K. The ns Manual [EB/OL]. [2008-02-15]. [http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc-stable/ns\\_doc.pdf](http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc-stable/ns_doc.pdf)



**Zhang Hengyang**, born in 1978. Received his PhD degree from the School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology. Lecturer. His current research interests include mobile ad hoc networks, wireless sensor networks and aeronautical communication.



**Zheng Bo**, born in 1982. PhD candidate in the Institute of Telecommunication Engineering, the Air Force Engineering University, Xi'an, China. His current research interests include mobile ad hoc networks.



**Chen Xiaoping**, born in 1974. Received his MSc degree from the Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an, China. Lecturer. His current research interests include wireless ad hoc networks and aeronautical communication.



**Yu Jia**, born in 1984. Received her MSc degree from the Institute of Telecommunication Engineering, the Air Force Engineering University, Xi'an, China. Lecturer. Her current research interests include wireless sensor networks.