

移动无线传感器网络自适应信标交换算法^{*}

张衡阳¹⁺, 李莹莹¹, 刘云辉²

¹(国防科学技术大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

²(香港中文大学 机械自动化工程学系,香港)

Adaptive Beacon Exchange Algorithm in Geographic Routing for Mobile Wireless Sensor Networks

ZHANG Heng-Yang¹⁺, LI Ying-Ying¹, LIU Yun-Hui²

¹(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China)

+ Corresponding author: E-mail: hareed@163.com

Zhang HY, Li YY, Liu YH. Adaptive beacon exchange algorithm in geographic routing for mobile wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008,19(11):3033-3041. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/3033.htm>

Abstract: To address the phenomenon of temporary communication blindness resulted from fixed period beacon exchange in mobile wireless sensor networks, an adaptive beacon exchange algorithm is proposed. The key idea is that work node calculates variable beacon period according to characteristic value relative to up node. idle node calculates variable beacon period according to characteristic value 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 its overtime to wait for the feedback beacon. The simulation shows that the adaptive beacon exchange algorithm can acquire high reach rate for eliminating the phenomenon of temporary communication blindness, especially in work-node-sparse sceneries, with low consumption. So the algorithm is scalable and applicable to large-scale mobile wireless sensor networks.

Key words: mobile wireless sensor network; phenomenon of temporary communication blindness; adaptive beacon exchange algorithm; characteristic value; reach rate; consumption

摘要: 针对移动无线传感器网络中周期性信标交换引起的通信暂盲现象,提出一种自适应信标交换算法.在该算法中,工作节点根据相对于上游节点的特征量动态地计算下一次信标交换周期,空闲节点根据相对于所有邻居节点的特征量动态地计算下一次信标交换周期,或者采用周期性信标交换.该算法可以根据网络通信性能要求调整门限概率值来得到合适的信标交换周期;并通过信标反馈等待超时的方法删除被选择为下一跳但已移出的节点.仿真实验结果表明,该算法在工作节点稀疏型网络中不但提高了数据包传送成功率,而且降低了控制开销,可适用于大规模移动无线传感器网络.

关键词: 移动无线传感器网络;通信暂盲现象;自适应信标交换算法;特征量;数据包传送成功率;控制开销

^{*} Supported by the Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60334010, 60475029, 60675056 (国家自然科学基金)

Received 2007-06-21; Accepted 2007-09-04

中图法分类号: TP393

文献标识码: A

在移动无线传感器网络中,信标交换有着广泛的应用,尤其是在基于地理位置信息的贪婪地理路由协议中,信标交换用来构建和维护邻居节点表,为路由的转发策略提供依据.目前大部分使用信标交换的路由协议^[1-7]采用周期性信标交换,但这种周期性的信标交换会产生通信暂盲现象.在规模较大的移动无线传感器网络中,通信暂盲现象更为严重,大大降低了数据传送成功率.周期性信标交换较早地应用在 OSPF 协议^[7]中,后来 Chakeres 等人在文献[8]中对 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两倍比较合适.Wolfson 等人在文献[9]中提出了当实际位置与数据库位置的差值超过所设定的门限值时即发送信标来更新位置数据库的方法.Karumanchi 等人在文献[10]中提出一种数据传送时触发信标发送的方法.文献[11]中提出了一种信标发送的算法,主要思想是节点每移动 S 米就发送一个信标,指出其性能与所设定的 S 有关,但是在文献中没有给出 S 的计算方法,只是给出定性的分析.文献[11]还提出一种反应式信标交换方法,当转发节点收到数据并要转发该数据时即发送向周围广播一个信标,设定一个等待时间门限值,收到该信标的邻居节点反馈一个信标,转发节点在等待时间门限值内收到信标来构建和更新邻居节点表,这种方法是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,因此会引入大量的时延.文献[11]针对上述问题提出了一种事件驱动的信标发送算法,平时进行周期性信标发送,当有数据传送时,处在传送路径上的节点发送一个触发信标,收到触发信标的节点依次广播同类型的信标进行反应式的信标交换.但是,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.上述的相关工作主要是分析了信标交换的周期大小与网络系统性能的关系,从策略上给出解决方法,或是定性地给出信标发送的周期与移动速率相关,而没有给出计算信标交换周期的具体计算方法.

本文提出了一种自适应信标交换算法:工作节点根据相对于上游节点的特征量来动态地计算下一次信标交换周期,空闲节点根据相对于所有邻居节点的特征量来动态地计算下一次信标交换周期,或者采用周期性信标交换.该算法可以根据网络通信性能要求调整门限概率值来得到合适的信标交换周期,并通过信标反馈等待超时的方法删除被选择为下一跳但已移出的节点.仿真结果表明,该算法能够有效地消除 MWSN 中由于周期性信标交换引起的通信暂盲现象,在工作节点稀疏型网络中,不但大大提高了数据传送成功率,而且还降低了控制开销,具有良好的 QoS 性能.

本文第 1 节对邻居节点表构建和维护中采用周期性信标交换所带来的通信暂盲现象进行描述,并对移动无线传感器网络进行建模.第 2 节用概率统计的数学方法分析和推导转发节点相对于单个邻居节点或多个邻居节点信标交换周期的具体计算.第 3 节详细阐述自适应信标交换算法的设计思想.在第 4 节中利用 NS-2.30 仿真平台,将采用自适应信标交换算法的 GVAR 协议与传统 GPSR^[4]算法在即时吞吐量、数据传送成功率和控制开销三个方面进行仿真比较.第 5 节给出简要结论.

1 问题描述与网络建模

1.1 问题描述:通信暂盲现象

通信暂盲现象就是由于周期性信标交换所提供的邻居节点位置信息不准确,转发节点选择的下一跳节点移出其通信范围而导致通信暂时性的中断,而且这种通信中断在面向无连接的网络协议中对上游节点来说是盲的.下面具体分析通信暂盲现象在贪婪地理路由协议^[1,3,4,6]中的两种情况.

(1) 网络中所有节点的通信范围为 $R=100\text{m}$, $t=0$ 时刻节点 j 所处位置与节点 i 的距离 $r=90\text{m}$,如图 1 所示,被节点 i 选择作为下一跳节点,并以 $v=5\text{m/s}$ 径向往外匀速移动,那么在 $t=2\text{s}$ 时节点 j 移出了节点 i 的通信范围.如果信标发送的周期 $T=4\text{s}$,使用周期性信标交换的协议,在两个周期的时间里没有收到邻居节点的信标才认为该邻居节点已经移出并把它从邻居节点表中删除^[4,8],因此要到 $t=8\text{s}$ 时节点 i 才把节点 j 从自己的邻居节点表中删除.从 $t=2\text{s}$ 到 $t=8\text{s}$ 期间,节点 i 使用 $t=0$ 时刻节点 j 的位置,在没有其他更合适的节点时,将一直把节点 j 当作

邻居节点并选择它作为下一跳节点,当传输层采用面向无连接的传输协议时,就会造成通信中断,并且节点 i 并不知道这种通信中断,因此称为通信暂盲现象。

(2) 在上述过程中节点 i 在 $t=8s$ 时删除了邻居节点 j ,重新进行下一跳选择,此时选择的依据是各个邻居节点在上一次信标交换所提供的位置信息,根据这些不准确的位置信息选择的下一跳节点可能已经移出了节点 i 通信范围,从而造成了通信中断,而节点 i 并未发觉到通信中断的存在,这是通信暂盲现象的另一种表现。

大量的数据会因通信暂盲现象而丢失,降低了数据传送的成功率.减小信标发送的周期,会相应减少通信暂盲现象的时间,但是会带来因信标交换频繁而引入过多的控制开销,且会阻塞信道,消耗大量不必要的能量^[8].为了解决这种因周期信标交换带来的问题,有必要设计一种新的信标交换算法,旨在能够及时地反应邻居节点的变化情况,提高邻居节点表的构建与维护的准确性和实时性,为下一跳节点的选择提供可靠的依据.本文提出一种自适应信标交换算法,在不增加或少量增加控制开销的情况下,该算法能够减少和消除通信暂盲现象,提高数据包传送成功率。

1.2 网络建模^[12]

移动无线传感器网络可表示为图 $G(V,E)$,其中 V 为网络中移动节点集, E 为节点间能够互相通信的双向链路集, $N(i)$ 表示为节点 i 的邻居节点集.对于由运动节点所组成的自组织系统,可以用包含节点位置、节点运动速率、节点运动方向和节点通信距离这 4 个因素的特征量来表征其状态.令节点 i 的特征量为 a_i ,在直角坐标系下 a_i 可表示为

$$a_i(t) = ((x(i,t), y(i,t)), v(i,t), \theta(i,t), R_i).$$

其中, $(x(i,t), y(i,t))$ 表示节点 i 在 t 时刻的位置坐标, $v(i,t)$ 表示节点 i 在 t 时刻的运动速率, $\theta(i,t)$ 表示节点 i 在 t 时刻的运动方向, R_i 表示节点 i 的通信距离。

节点 j 是节点 i 的邻居节点,令节点 j 相对节点 i 的特征量为 a_{ij} ,表示如下:

$$a_{ij}(t) = ((x(i,j,t), y(i,j,t)), v(i,j,t), \theta(i,j,t), R_i, R_j).$$

$(x(i,j,t), y(i,j,t))$ 表示在 t 时刻节点 j 相对节点 i 的坐标, $v(i,j,t)$ 表示在 t 时刻节点 j 相对节点 i 的相对运动速率, $\theta(i,j,t)$ 表示在 t 时刻节点 j 相对节点 i 的运动方向. R_i 和 R_j 分别表示节点 i 和节点 j 的通信距离。

本文作以下假设:① 网络中所有节点的通信距离相同,即 $i \in \forall(V), j \in \forall(V)$, 有 $R_i=R_j$.② 每个移动节点都知道自己所处位置的坐标 $(x(i,t), y(i,t))$.③ 网络中的节点作随机运动,其运动速率 v 和运动方向 θ 服从以下均匀分布并相互独立: $v \sim U[0, v_{\max}]$, $p(v) = \frac{1}{v_{\max}}$, $v \in [0, v_{\max}]$, $\theta \sim U[0, 2\pi]$, $p(\theta) = \frac{1}{2\pi}$, $\theta \in [0, 2\pi]$, $p(v, \theta) = p(v)p(\theta)$, 其中 v_{\max} 根据具体运动场景取值,不同的运动场景取值不一样.④ 当时间段 Δt 较小时,在 Δt 时间内 v 和 θ 为恒定值。

2 自适应信标交换周期的计算方法

假定在 t_0 时刻节点 j 相对节点 i 的特征量 $a_{ij}(t_0)$,如图 2 所示.

$$a_{ij}(t_0) = ((x(i,j,t_0), y(i,j,t_0)), v(i,j,t_0), \theta(i,j,t_0), R).$$

当 Δt 较小时,根据前述假设④可得节点 j 经过 Δt 时间后出现的位置为

$$(x(i,j,t_0) + v(i,j,t_0)\Delta t \cos(\theta(i,j,t_0)), y(i,j,t_0) + v(i,j,t_0)\Delta t \sin(\theta(i,j,t_0))).$$

节点 j 移出节点 i 通信范围的表达式:

$$(x(i,j,t_0) + v(i,j,t_0)\Delta t \cos(\theta(i,j,t_0)))^2 + (y(i,j,t_0) + v(i,j,t_0)\Delta t \sin(\theta(i,j,t_0)))^2 \geq R^2.$$

由上式可得节点 j 移至节点 i 边界处时 Δt 的临界值:

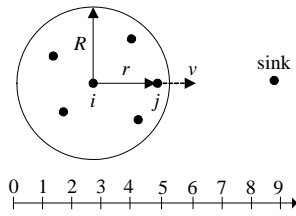


Fig.1 Phenomenon of temporary communication blindness

图 1 通信暂盲现象

$\Delta t =$

$$-\frac{(x(i, j, t_0)\cos(\theta(i, j, t_0)) + y(i, j, t_0)\sin(\theta(i, j, t_0))) + \sqrt{R^2 - r(i, j, t_0)^2 + (x(i, j, t_0)\cos(\theta(i, j, t_0)) + y(i, j, t_0)\sin(\theta(i, j, t_0)))^2}}{v(i, j, t_0)}$$

其中, $r(i, j, t_0)^2 = x(i, j, t_0)^2 + y(i, j, t_0)^2$, $r(i, j, t_0)$ 表示在 t_0 时刻节点 j 到节点 i 的距离。

$\Delta t = f((x(i, j, t_0), y(i, j, t_0)), v(i, j, t_0), \theta(i, j, t_0))$, 由假设③已知 $v(i, j, t_0), \theta(i, j, t_0)$ 的分布密度, 计算出 Δt 的概率密度 $p(\Delta t)$ 后可得:

$$P(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} p(t)dt = P_0.$$

设定一个门限概率值 P_0 便可以得到相应信标交换周期 Δt 。

上述这种求概率密度的方法由于 $\Delta t = f(v(i, j, t), \theta(i, j, t))$ 比较复杂, 计算量较大, 求 Δt 的概率密度 $p(\Delta t)$ 很困难, 在实际运算中可以采用下述直接求概率法:

经过 Δt 时间后节点 j 相对于节点 i 移动的最大距离为 $l = v_{\max}^{ij} \cdot \Delta t$, 这里 $v_{\max}^{ij} = 2v_{\max}$, 节点 j 出现的范围随着 Δt 的增大而增大, 可分为以下 3 种情况, 如图 3 所示。

1. 当 $l \leq R - r$ 时, 节点 j 出现的范围在节点 i 的通信范围内, 因此移出概率 $P(out) = 0$ 。
2. 当 $R - r < l \leq R + r$ 时, 可分析得到:

$$P(out) = \iint_{\Omega} p(v)p(\theta)dv d\theta = \int_{V_-}^{V_+} p(v) \int_{-\phi(v)}^{\phi(v)} p(\theta) d\theta dv.$$

其中, $\phi(v) = \pi - \arccos\left(\frac{(v \cdot \Delta t)^2 + r^2 - R^2}{2 \cdot r \cdot v \cdot \Delta t}\right)$, $V_- = \max\left(0, \frac{R-r}{\Delta t}\right)$, $V_+ = \min\left(v_{\max}^{ij}, \frac{R+r}{\Delta t}\right)$ 。

3. 当 $l > R + r$ 时, θ 可以取 $[0, 2\pi]$ 的任一值, v 应该满足 $\frac{R+r}{\Delta t} < v < v_{\max}^{ij}$, 因此有

$$P(out) = \iint_{\Omega} p(v)p(\theta)dv d\theta = \int_{\frac{R+r}{\Delta t}}^{v_{\max}^{ij}} p(v) \int_0^{2\pi} p(\theta) d\theta dv.$$

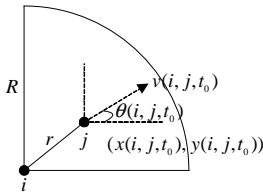


Fig.2 Characteristics value $a_{ij}(t_0)$ at time t_0
图 2 t_0 时刻的特征量 $a_{ij}(t_0)$

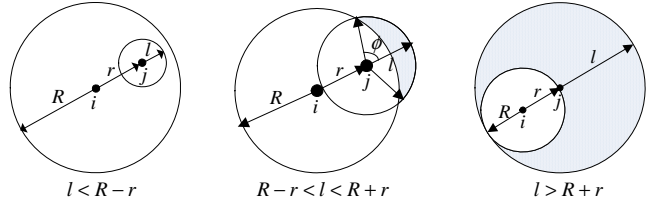


Fig.3 Circle area with radius l of node j increases with Δt growing
图 3 节点 j 出现的范围 l 随 Δt 的变化

根据 $P(out)$ 的表达式可以分析出影响通信暂盲现象的 4 个因素:

- ① 信标交换周期 T : 信标交换周期越大, 经过一个周期后, 节点 j 移出节点 i 概率的 $P(out)$ 越大, 通信暂盲现象越严重, 如图 4(a) 所示。
- ② 节点的最大移动速率 v_{\max} : 场景中节点的运动速度越大, 经过一个周期后, 其移动出现的范围也会越大, 节点 j 移出节点 i 的概率越大, 如图 4(a) 所示。
- ③ 节点的通信半径 R : 节点的通信半径越大, 其覆盖范围越大, 经过一个周期后, 节点 j 移出节点 i 概率的 $P(out)$ 越小, 如图 4(b) 所示。
- ④ 节点间的距离 r : 节点 j 越靠近节点 i 的边缘, 即两节点的距离越大, 节点 j 移出节点 i 的概率越大, 如图 4(b) 所示。

$P(out)$ 随时间 Δt 的增大而增大, 设定门限概率值 P_0 , 通过 $P(out) = P_0$ 即可求出相应的 Δt 。选定的 P_0 越小, 得到的信标交换周期 Δt 越小, 当 $P_0 = 0$ 时, 信标交换周期 Δt 为 $\frac{R-r}{v_{\max}}$, 此时在下一个周期内, 节点 j 移出节点 i 的通信范

围的概率 $P_0=0$,即不会产生通信暂盲现象.根据以上分析,在给定随机运动场景后,即在节点通信范围 R 和节点的最大运动速率 v_{\max} 已知的情况下,解决通信暂盲现象的关键在于如何设定节点的信标交换周期.采用较小的固定周期可以有效地减少通信暂盲现象,但是没有考虑到网络中节点的工作状态,对于空闲节点来说频繁的信标交换带来的能量消耗完全没有必要,所以信标交换算法在考虑节点间相对特征量的同时,还应考虑节点的工作状态.

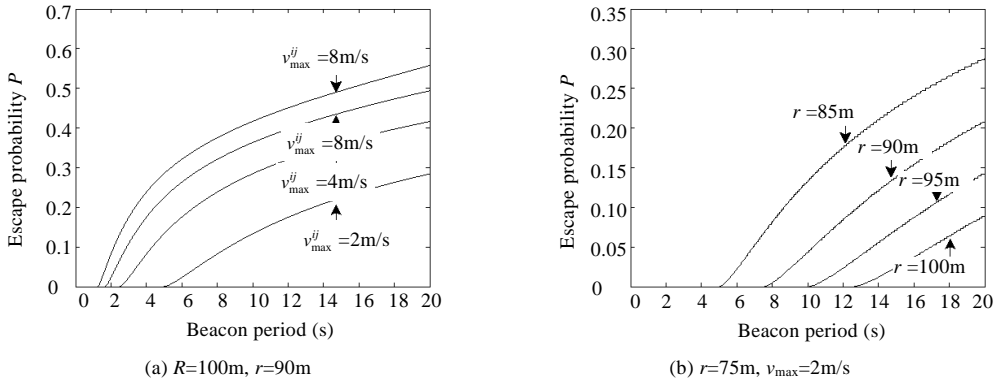


Fig.4 $P(out)$ is function of T, R, r and v_{\max}^{ij}

图 4 $P(out)$ 为 T, R, r 和 v_{\max}^{ij} 的函数

3 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 3 个部分:

① 网络节点根据自身的工作状态来自适应地选择信标交换周期计算.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),为了保证数据传输的不中断,工作节点应及时地向传给它数据的上游节点发送信标,准确反映自己的地理位置,以供上游节点作出合理的下一跳节点的选择.它的信标发送对上游节点负责,只需获取上游节点的位置、移动状态信息等特征量,并求出相对上游节点的相对特征量,利用相对特征量及门限概率值 P_0 求出相应的下一次信标交换的周期,并进入时间调度器进行信标发送.如果是空闲节点(不参与数据传输的节点),则需获取所有邻居节点的特征量,分别求出相对于它们的特征量和信标发送周期 $\Delta t_n, n=1, 2, 3, \dots, K$,再求它们的期望值 $\Delta t = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^K \Delta t_n$, 进入时间调度器进行信标发送.在实际应用中,为了进一步节省能耗,减少节点运算复杂度,空闲节点的信标交换可采用简单的周期性信标交换,其算法流程设计如图 5 所示.

② 采用信标反馈等待超时的方法来解决通信暂盲现象的第 2 种情况.具体做法如图 6 所示,网络中所有节点当第 1 次被其他节点选择为下一跳节点而成为工作节点时,立即向其上游节点反馈一个信标告知其在通信范围之内和准确的地理位置,随后按照工作节点的自适应信标交换算法进行信标发送.如果上游节点在一定时间(一般为 4 个数据包发送周期)内没有收到刚刚选择的下一跳节点的信标反馈,即认为该节点已经移出了其通信范围,重新进行下一跳节点的选择,方法简单,且能够很好地避免通信暂盲现象的产生.

③ 网络中的节点根据网络性能自动调整信标交换周期.如图 7 所示,当网络中数据传送率性能低于要求时,控制中心以一定的步进 ΔP 减少 P_0 ,并向全网进行一次性广播,网络中的工作节点根据 $P(out)=P_0$ 计算出的信标交换周期也会相应地减少;当网络的控制开销太大且数据传送率性能高于要求时,控制中心以一定的步进 ΔP 增大 P_0 ,并向全网进行一次性广播,网络中的工作节点根据 $P(out)=P_0$ 计算出的信标交换周期也会相应地增大,可以减少信标的发送量,降低控制开销.

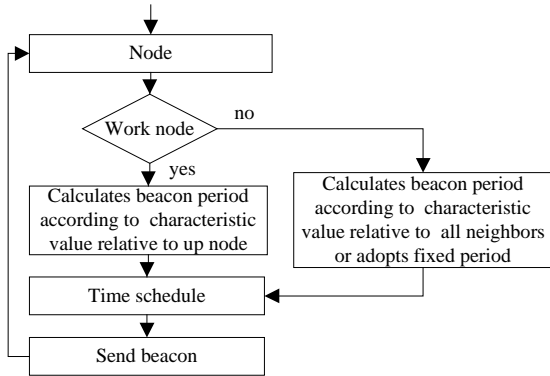


Fig.5 Adaptive beacon exchanges scheme

图 5 自适应信标交换算法

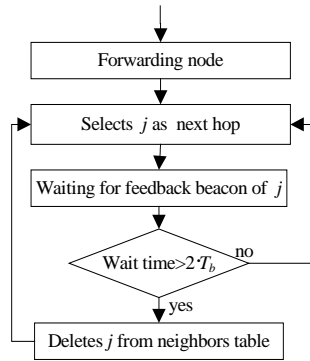


Fig.6 Beacon feedback scheme

图 6 信标反馈方法

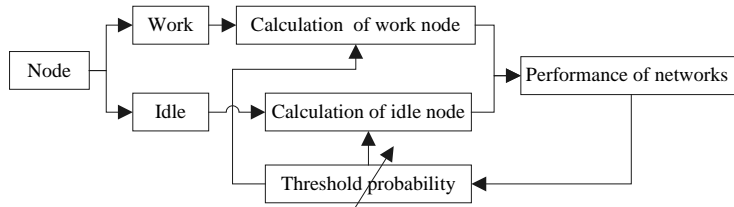


Fig.7 Adaptive feedback scheme

图 7 自适应反馈方法

4 算法仿真

本文把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^[4]在采用相同运动场景和业务场景条件下进行比较(见表 1),两者使用相同的贪婪算法和空洞处理算法,只是构建邻居节点表时 GPSR 采用周期性信标交换,GVAR 采用自适应信标交换算法.评价参数采用以下 3 个:(1) 即时吞吐量(instant throughput)为单位时间(1s)内 sink 节点接收到的数据(Kbit);(2) 数据传送成功率(reach rate)是指在仿真时间内 sink 节点接收到的数据包个数与源节点发送的数据包个数之比;(3) 控制开销(consumption)是指仿真时间内网络中的 beacon 包总量与网络中的 beacon 包和成功发送的数据包总量之比.

本文仿真实验硬件平台:CPU:赛扬 1.5G,memory:512M.软件仿真平台使用由 NS-2.30^[13],运行于 Linux 系统平台.仿真场景设置见表 1.

Table 1 Settings of simulation sceneries

表 1 仿真场景设置

Size (m ²)	Node number	Max velocity (m/s)	Radio range (m)	Packet	GPSR (s)	GVAR	Simulate time (s)
150×150	10	2	100	cbr 512bit	5	variable	100
200×200	20	2	100	cbr 512bit	5	variable	100
250×250	30	2	100	cbr 512bit	5	variable	100
300×300	40	2	100	cbr 512bit	5	variable	100
350×350	50	2	100	cbr 512bit	5	variable	100

从图 8 可以清楚地看到采用周期性信标交换的 GPSR 协议产生了通信暂盲现象,造成了数据包的丢失,并随着网络规模的增大,通信暂盲现象造成的通信中断更为严重.而采用自适应信标交换算法的 GVAR 基本消除了通信暂盲现象,具有很好的可扩展性.

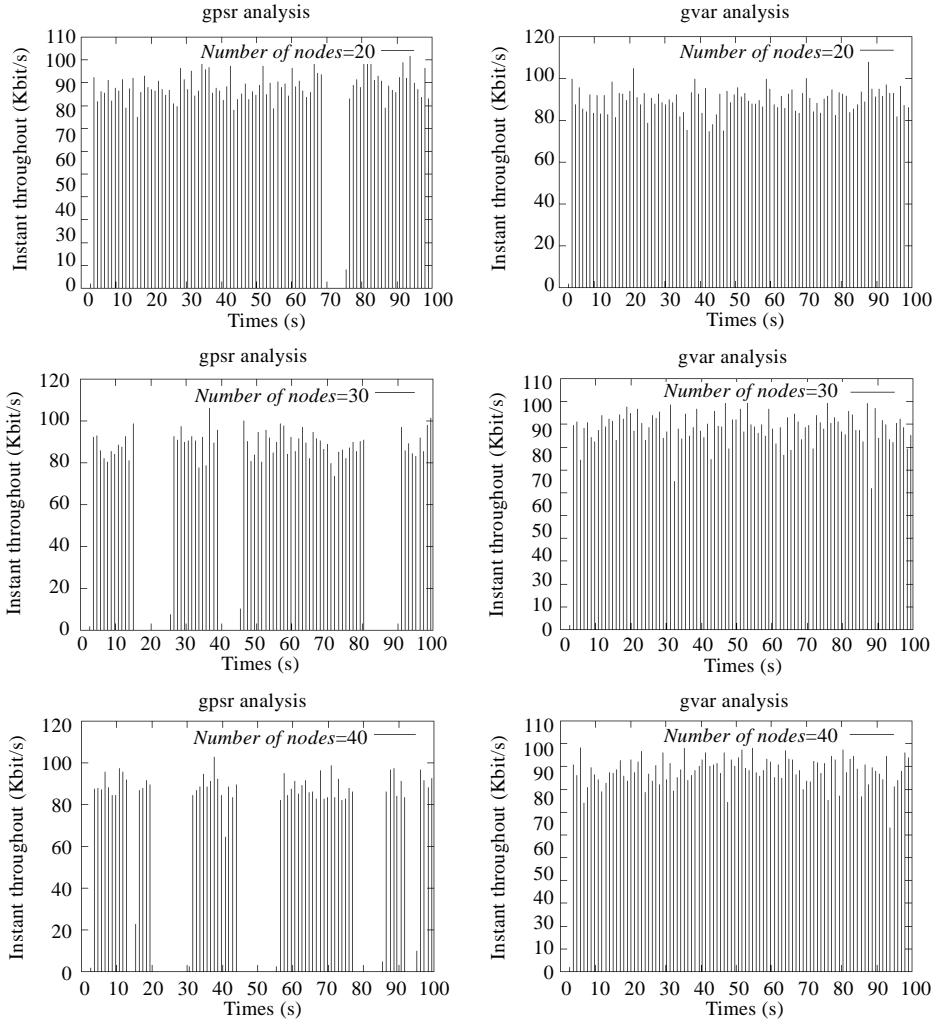


Fig.8 Instant throughput of GPSR and GVAR in sceneries which have 20, 30 and 40 nodes separately

图 8 当节点数目为 20,30 和 40 时 GPSR 和 GVAR 的即时吞吐量

图 9 说明采用周期性信标交换的 GPSR 协议在相同的节点运动模型($v_{max}=2m/s$)、相同的节点通信范围($R=100m$)条件下,数据传送成功率随着网络规模(通信链路的跳数)的增大而降低,图 10 和图 11 说明,在网络规模相同、节点通信范围相同的条件下,GPSR 协议数据包传送成功率随着节点运动剧烈程度的增加而降低,而 GVAR 协议的数据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,能够适用于移动无线传感器网络.在 GPSR 协议中由于节点的运动速率的增大,数据包成功传送的总数减少,而 beacon 包数目基本不变,导致控制开销有所增加.而在 GVAR 协议中,信标交换周期随节点之间相对运动速度的增大而自适应地减小,产生的 beacon 包有所增加,导致控制开销也有所增加.GVAR 协议中工作节点采用自适应信标交换算法,空闲节点采用与 GPSR 协议相同的信标交换周期 $\Delta T=5s$,其在控制开销方面相对于 GPSR 协议稍有增加,当空闲节点采用固定信标周期 $\Delta T=10s$ 时(为 GPSR 协议信标交换周期的两倍),GVAR 协议能够基本上消除通信暂盲现象的同时,控制开销也有所降低,仿真结果如图 12 和图 13 所示,tp5 和 tp10 表示空闲节点采用固定信标交换周期 $\Delta T=5s$ 和 $\Delta T=10s$.图 14 说明在大规模的工作节点稀疏型网络场景中(工作节点相对于节点总数来说比较少),GVAR 协议中空闲节点采用固定信标交换周期 $\Delta T=5s$ 和 $\Delta T=10s$ 时的控制开销相对于 GPSR

协议都有所降低.

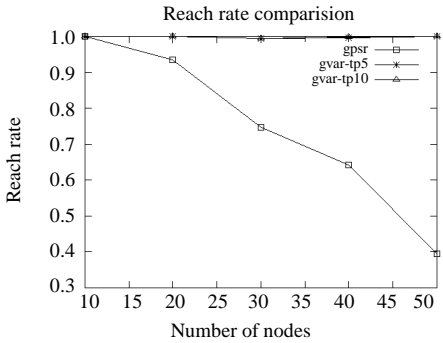


Fig.9 Reach rate vs. nodes ($v_{max}=2m/s$)
图 9 传送成功率与节点数目($v_{max}=2m/s$)

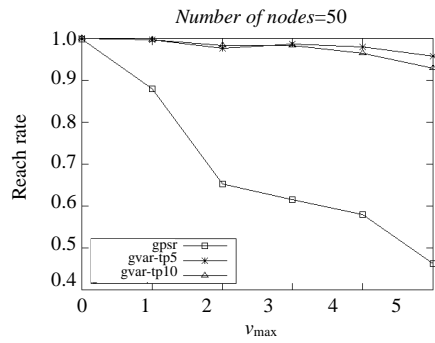


Fig.10 Reach rate vs. v_{max} ($nodes=50$)
图 10 传送成功率与节点速率($nodes=50$)

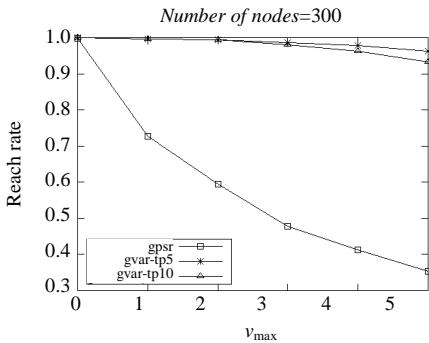


Fig.11 Reach rate vs. v_{max} ($nodes=300$)
图 11 传送成功率与节点速率($nodes=300$)

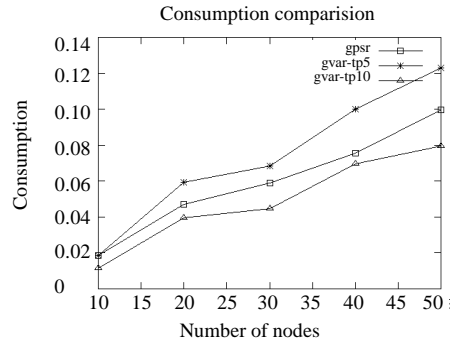


Fig.12 Consumption vs. nodes ($v_{max}=2m/s$)
图 12 控制开销与节点数目($v_{max}=2m/s$)

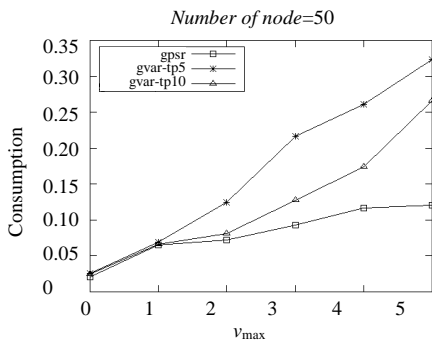


Fig.13 Consumption vs. v_{max} ($nodes=50$)
图 13 控制开销与节点速率($nodes=50$)

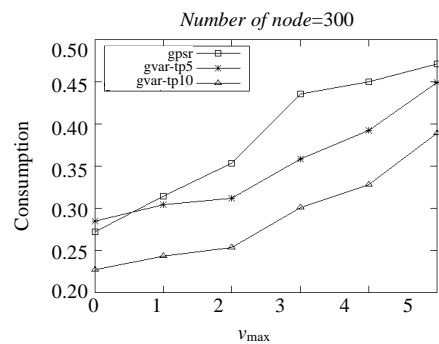


Fig.14 Consumption vs. v_{max} ($nodes=300$)
图 14 控制开销与节点速率($nodes=300$)

5 结论

本文提出了一种自适应信标交换算法,该算法中网络节点可以根据网络系统性能、本身的工作状态和相对于周围邻居节点的特征量来计算出合适的信标交换周期,并通过信标反馈等待超时来及时删除被选择为下一跳但已移出的节点.NS-2 仿真结果表明,该算法能够极大地减少或消除通信暂盲现象,并在工作节点稀疏型网络中,空闲节点可以在不影响通信性能的条件下采用较大的周期进行信标交换,极大地降低了控制开销,节省了

能量的消耗,因此非常适合规模较大,需要构建和维护邻居节点表的移动无线传感器网络。

References:

- [1] Ko YB, Vaidya NH. Location-Aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks. *Wireless Networks*, 2000,6(4):307-321.
- [2] Navas JC, Imielinski T. GeoCast-Geographic addressing and routing. In: Proc. of the 3rd Annual ACM/IEEE Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking. 1997. 66-76. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=262116.262132&coll=GUIDE&dl=GUIDE&CFID=7563193&CFTOKEN=81666054>
- [3] Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass routing on geometric networks. In: Proc. of the 11th Canadian Conf. on Computation Geometry (CCCG'99). 1999.
- [4] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proc. of the MOBICOM. 2000. 243-254.
- [5] Liao WH, Tseng YC, Sheu JP. GRID: A fully location-aware routing protocols for mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE HICSS. 2000.
- [6] Kuhn F, Wattenhofer R, Zhong Y, Zollinger A. Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice. In: Proc. of the 23rd ACM Symp. on Principles of Distributed Computing (PODC 2003). 2003.
- [7] Moy J. Request for comment No 2328. OSPF Version 2 standard track. 1998.
- [8] Chakeres ID, Belding-Royer EM. The utility of hello messages for determining link connectivity. In: Proc. of the 5th Int'l Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) 2002. 2002.
- [9] Wolfson O, Jiang LQ, Sistla P, Chamberlain S, Rishe N, Deng ML. Databases for tracking mobile units in real time. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Database Theory (ICDT). LNCS 1540, Jerusalem: Springer-Verlag,1999. 169-186.
- [10] Karumanchi G, Muralidharan S, Prakash R. Information dissemination in partitionable mobile ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Symp. on Reliable Distributed Systems. 1999.
- [11] Giruka VC, Singhal M. Hello protocols for ad-hoc networks: Overhead and accuracy tradeoffs. In: Proc. of the 6th IEEE Int'l Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2005). 2005.
- [12] Shen H, Shi BX, Zou L, Shi J, Zhou JX. A distributed entropy-based long-life QoS routing algorithm in ad hoc network. *Journal of Software*, 2005,16(3):445-452 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/445.htm>
- [13] http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc-stable/ns_doc.pdf

附中文参考文献:

- [12] 沈晖,石冰心,邹玲,石坚,周建新. Ad hoc 网中基于熵的长寿分布式 QoS 路由算法. *软件学报*, 2005,16(3):445-452. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/445.htm>



张衡阳(1978—),男,湖南祁东人,博士生,主要研究领域为无线自组织网络,卫星通信。



刘云辉(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为人工智能,传感器网络。



李莹莹(1980—),女,博士生,主要研究领域为传感器网络。