

基于能量均衡的无线传感器网络路由算法*

吴三斌^{1,2}, 柳 强³, 李成博¹, 王小明¹

(1. 陕西师范大学 计算机科学学院, 西安 710062; 2. 中国移动通信集团宁夏有限公司, 宁夏 吴忠 751100; 3. 西安人福电子科技有限公司, 西安 710065)

摘 要: 针对路由选择模式是影响无线传感器网络寿命的关键因素之一, 提出了一种新的 WSN 路由算法 IG-PSR-2。首先将前向区域划分为面积相等的四个子区域, 然后选择节点能量方差最小的子区域作为路由选择区域, 最后用概率机制在路由选择区域中选择下一跳节点。仿真实验表明, IGPSR-2 能有效均衡网络节点能量消耗, 从而延长网络生命周期。

关键词: 无线传感器网络; 能量均衡; 前向区域; 环形区域

中图分类号: TP393.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1465-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.073

Based on energy balance routing algorithm for wireless sensor networks

WU San-bin^{1,2}, LIU Qiang³, LI Cheng-bo¹, WANG Xiao-ming¹

(1. School of Computer & Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2. China Mobile Communications Corporation Ningxia Ltd., Wuzhong Ningxia 751100, China; 3. Xi'an Renfu Electronics & Technology Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: The routing schema is one of the key factors that influences the lifetime of wireless sensor networks (WSNs). This paper proposed a new routing algorithm IGPSR-2 for WSNs. Firstly, it divided forward direction region evenly into four parts according to area. Secondly, it chose the region with minimal energy variance as the routing select region. Finally, it selected the next hop node by probability schema from routing select region. The simulation results show that IGPSR-2 is able to not only effectively balance the energy consume, but also prolong the lifetime of WSNs.

Key words: wireless sensor networks (WSNs); energy balancement; forward region; annular region

随着传感器、嵌入式计算与网络通信三种技术的迅速发展, 以及大量感知信息获取、处理等应用的迫切需求, 无线传感器网络应运而生并快速成为研究热点^[1]。无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSNs) 是由大量具有数据感知、数据存储和通信能力的传感器节点通过多跳自组织方式构成的分布式网络系统。作为全新的信息获取与处理手段, 因其更贴近物理世界而成为互联网向物联网拓展的关键技术之一, 并作为物联网的感知神经末梢, 在军事、环境监测、抢险救灾、生态保护、交通管理、医疗卫生等诸多领域有着十分广阔的应用前景。

无线传感器节点自身体积小、计算能力弱、存储空间有限且自备供电系统 (如电池等) 同样有使用时限, 所以各项工作能力受限是 WSNs 的基本特征, 且其能量受限表现得尤为显著。怎样高效地利用能量、延长网络寿命是当前研究所面临的重要挑战, 针对此涌现出大量的节能路由算法及其相关研究^[2]。文献[3]通过拉格朗日对偶分布式算法和广泛的数值模拟来解决网络寿命最大化问题; 文献[4]通过查询汇聚节点周围节点的能量, 沿着六边形周边进行数据转发, 来均衡网络能量消耗、延长网络生命周期; 文献[5]实验结果显示, 当网络中一个节点寿命结束时, 所有节点的平均剩余能量将超过

90%, 使得无线传感器网络的路由算法在节能方面的研究仍然存在问题。因此, 如何更有效地提高能量利用率、延长网络寿命, 将成为 WSNs 研究领域一个长期的热点。

1 相关工作

Karp 等人^[6]提出了无状态贪婪周边转发路由 GPSR (greedy perimeter stateless routing for wireless networks), 协议中转发节点首先计算自己到汇聚节点的距离, 并在自己的邻居节点中找一个到目标节点距离最小的邻居节点作为下一跳转发节点; 当所有邻居节点到目标节点的距离都比自己远时, 该节点采用周边转发模式寻找下一跳节点。该算法通过局部最优的贪婪思想, 节点无须维护网络拓扑, 其路由开销较小。但是该算法很容易导致局部区域内单个节点能量较早耗尽, 使整个网络过早瘫痪。NADRR^[7]中转发节点通过计算前向邻居节点横坐标平均值、纵向距离的平均值等参数来确定前向转发区域的大小, 保证算法时间复杂度变小, 但其同样没有考虑转发节点周围邻居节点的能量变化情况。

DEER 算法的转发节点首先预测出链路中最优总跳数和数据传输速率的节点作为当前转发节点; 然后依次选择出下一

收稿日期: 2011-08-22; **修回日期:** 2011-09-23 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (60773224, 60970054); 国家教育部科学技术研究重点项目 (107106); 国家教育部留学回国人员科研基金项目

作者简介: 吴三斌 (1984-), 男, 陕西榆林人, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络 (wusanbin@163.com); 柳强 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为网络信息安全; 李成博 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络; 王小明 (1964-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、普适计算。

跳转发节点,构成整条传输链路。算法虽然可以得到高可靠的端到端服务质量,但是带来了大量路由能量开销。HREEMR路由算法通过构造多条源节点到 sink 节点的路径,用其中的一条作为数据转发主路径,一旦主路径传输失效后,可以从备选路径中选择一条替代,该协议同样在发现和维护多条路径方面产生很大的开销。文献[8]是专门针对无线传感器网络节点能量消耗不均衡而提出的一种非均匀分布的路由算法。算法首先通过在网络中建立最小跳数场和路径节点最小能量场,使得数据传输能够沿着能耗最优的路径向汇聚节点转发,该算法虽然在网络寿命和能量均衡方面得到了很大的提高和改善,但是无线通信能量消耗通常不满足能量消耗三角不等式。文献[9]从均衡节点能量消耗的角度设计了基于模糊梯度的能量均衡路由协议。为了更好地实现全局的能量均衡消耗,该协议首先对节点间的梯度值进行模糊分级,并利用等级选择策略和质量评价函数相结合选择下一跳转发节点,利用低能量节点的拒绝与推荐策略为剩余能量较低的节点进行负载分流,以实现局部能量均衡消耗,但是节点在维护和计算时较为困难和复杂。

MCP 算法能有效均衡网络能量消耗,该算法是一个基于多路径路由的最大容量路由算法,其首先选择一条节点能量最大的路径进行路由。该算法虽然能较好地实现局部区域能量均衡问题,但它带来了路径中跳数增大,使得数据传输的时延高,并且未能有效地解决 sink 附近区域能量消耗过快的问题。在前面的工作^[10]中,笔者研究了通过计算转发节点的邻居节点剩余能量分布情况对节点前向区域进行划分,并在选定的区域内通过节点概率传输机制在前向区域内选择下一跳节点,并且验证了该算法的有效性和收敛性。本文将基于前向子区域面积的大小,确定转发子区域的传输半径大小 R ,提出了一种新的基于能量均衡的路由算法 IGPSR-2(improved greedy perimeter stateless routing-2)。算法综合考虑了 WSNs 中节点分布的随机性以及各节点能量消耗的不均匀性等影响因素,确保了路由选择过程中能量消耗均衡,以达到延长无线传感器网络寿命的目的。

2 网络模型与问题分析

2.1 网络模型

本文将无线传感器网络抽象为一个平面图 $G = (V, E)$ 。其中: $V = \{n_i | n_i \text{ 为整个网络中的传感器节点}, i = 1, 2, \dots, m\}$ 为传感器节点集合; $E = \{\langle n_i, n_j \rangle | n_i \in V, n_j \in V, d_{ij} \leq \min(R_i, R_j), i, j = 1, 2, \dots, m\}$ 为任意两个能够直接通信的节点之间的链路集合,满足 $E \in V \times V$;源节点、汇聚节点和普通节点随机布设在监测区域内,并且每个节点可以通过 GPS 定位系统获取各自的地理位置信息;若节点 n_i 与节点 n_j 互为邻居节点,须满足: $n_{\text{member}}(i) = \{n_j | d_{ij} \leq \min(R_i, R_j), n_i \in V, n_j \in V\}$ 。其中: d_{ij} 为节点 n_i 与节点 n_j 的欧氏距离;源节点记为 source 节点,汇聚节点 sink 记为节点 n_s 。与文献[10]相同的是,本文中所有传感器节点一旦布设下去其位置是固定不变的,并且每个节点的能量消耗完后不再给予补充。所有节点的传输范围均为 R 。无线传感器能量模型中节点所消耗的能量通常由发射端电路耗损和接收端电路耗损两部分组成,即传输距离为 d 且发射 q bit 的信息包所损耗能量 $E_{TX}(q, d)$ 为^[11]

$$E_{TX}(q, d) = E_{\text{elec}} \times q + E_{\text{amp}} \times q \times d^k \quad (1)$$

其中:参数 k 满足 $2 < k < 4$ 。 k 的取值与传输介质有直接关系,如当障碍区较多, k 的取值较大;与无线质量对信号发射质量也有关,通常情况下取 $k = 3$,即通信传输损耗能量与发射距离的三次方成正比。

节点接收 q bit 信息包所损耗的能量公式 $E_{RX}(q)$ 为

$$E_{RX}(q) = E_{\text{elec}} \times q \quad (2)$$

其中: E_{elec} 表示发射、接收电路传输 1 bit 信息的无线电耗能; E_{amp} 表示发射放大器将每 bit 消息传送单位面积(m^2)所耗的能量。文中仿真参数 $E_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}$, $E_{\text{amp}} = 0.1 \text{ nJ/bit/m}^2$, q 代表数据包的大小。

2.2 IGPSR-1 算法前向区域的划分

IGPSR-1(improved greedy perimeter stateless routing-1)算法:GPSR 算法中距 sink 节点较近的邻居节点如果多次承担数据接收或者数据转发任务,节点能量容易耗尽,导致转发节点的前向区域出现大面积路由空洞,致使整个网络生命周期缩短,网络性能也有所下降。为了均衡网络中节点能量消耗,防止网络过早出现路由空洞,文献[12]通过移动 sink 动态调节自己的地理位置,间接缓解周围节点数据转发带来的能耗。

文献[10]从均衡节点剩余能量方面设计了一种有效的路由算法,其思想是当某转发节点需要从其邻居节点中选择下一跳节点时,该节点首先计算前向区域内邻居节点的剩余能量,并对其前向区域进行划分多个子前向区域的操作;然后比较所划分子前向区域内节点的平均剩余能量,选择具有节点剩余能量方差最小的子前向区域作为该节点的路由转发域。在图 1 中,当前向子区域份数 k 取值 4 时,节点 n_i 将其前向区域划分为 4 份子前向区域,即子前向区域 S_0 为 MNP;子前向区域 S_1 为 IMPB;子前向区域 S_2 为 IBEQ;子前向区域 S_3 为 EQT,直线 l 垂直于线段 IS ,垂足为 I 。

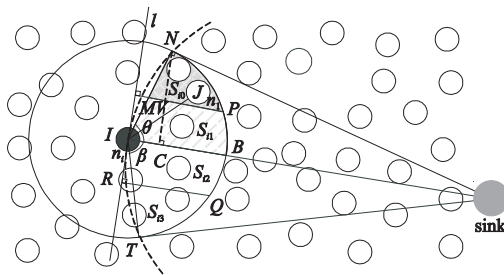


图1 IGPSR-1中前向子区域划分

IGPSR-1 算法的前向区域划分机制中转发节点的前向区域定义为:以节点 n_i 的传输范围所构成的圆形区域与以 sink 节点为圆心且以 sink 到转发节点的距离 d_{is} 为半径的圆形区域的公共相交部分。对节点 n_i 在划分的前向子区域内选择转发节点时按照式(3)进行选择。

$$S_{ik} = \{n_j | n_j \in V, d_{ij} \leq R, \theta_{ij} \leq \beta/2, (1 - (n+1)/k)R \leq d_{ij}(n_j, n_i, n_s) \leq (1 - n/k)R, k = 0, 1, 2, \dots, (k-1)\} \quad (3)$$

其中: n 表示节点 n_i 所对应的 k 个子前向区域的下标。由式(3)可以计算出各个子前向区域内节点 n_i 的所有邻居节点。

3 能量均衡的路由算法

3.1 IGPSR-2 算法前向区域的划分

IGPSR-2(improved greedy perimeter stateless routing-2)算

法:IGPSR-1 前向区域划分考虑了节点的剩余能量,在很大程度上均衡了网络中节点的能量消耗,延长了网络整体寿命。但是在划分前向子区域时,转发节点邻居区域内的节点落在任何一个子前向区域的计算概率不一样,很明显得到以下结论:

定理 1 前向子区域 S_{i0} 的选择概率小于 S_{i1} 的选择概率。

证明 设事件 S_{ik} 发生的可能性大小为 p_{ik} , 其对应的区域面积为 $S_{ik}(i)$, 节点 n_i 的前向区域面积为 S , 由古典概率得

$$p_{ik} = \frac{S_{ik}(i)}{S}, \text{ 而}$$

$$\begin{aligned} S_{i0}(i) &= S_{\Delta} \text{NMV} + \int_{R \cos \theta}^{\frac{\sqrt{3}}{2}R} \left(\sqrt{R^2 - x^2} - \frac{R \sin \theta}{2} \right) dx = \\ &= \frac{R^2 \sin \theta \cos \theta}{8} + \left(\frac{x}{2} \sqrt{R^2 - x^2} + \frac{R^2}{2} \arctan \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}} - \frac{R \sin \theta}{2} x \right) \Big|_{R \cos \theta}^{\frac{\sqrt{3}}{2}R} = \\ &= \frac{1}{16} R^2 \sin 2\theta + \left(\frac{\sqrt{3}}{8} - \frac{\pi}{12} \right) R^2 - \frac{\sqrt{3}}{4} R^2 \sin \theta + \frac{1}{2} R^2 \theta \\ S_{i1}(i) &= S_{\text{扇形}} \text{INB} - S_{\text{扇形}} \text{MNP} = \\ &= \pi R^2 \frac{\theta}{2\pi} - \left(S_{\Delta} \text{NMV} + \int_{R \cos \theta}^{\frac{\sqrt{3}}{2}R} \left(\sqrt{R^2 - x^2} - \frac{R \sin \theta}{2} \right) dx \right) = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{4} R^2 \sin \theta - \frac{1}{16} R^2 \sin 2\theta - \left(\frac{\sqrt{3}}{8} - \frac{\pi}{12} \right) R^2 \end{aligned}$$

要证明定理 1 成立,则只需证明 $S_{i1}(i) \geq S_{i0}(i)$, 显然该关系式与转发节点的传输半径和偏移角度 θ 的大小有着直接关系,不妨取 $0 \leq \theta \leq \pi$, $R = 50$, 如图 2 所示。

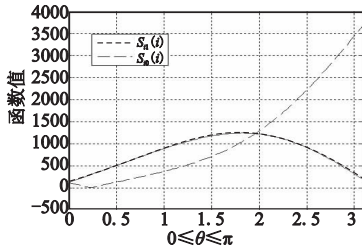


图2 $S_{i0}(i)$ 与 $S_{i1}(i)$ 的面积大小比较

从图 2 明显可以看出有两个交点,可由 MATLAB 求解出两个交叉点: $\theta_1 = 0, \theta_2 = 1.948$ 。事实上当转发节点为 sink 邻居时,转发节点将数据直接传输给 sink 节点,不再传给自己的邻居节点。其次本文中的网络拓扑大小为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$, 传输半径 $R = 50 \text{ m}$, 所以网络中任何两个节点的欧氏距离不大于 $500\sqrt{2} \text{ m}$ 。由公式 $\theta = \arccos(R/(2d_{ik}))$, 当转发节点的位置正好在 sink 转发边缘时,此时 θ 的值最小: $\theta = \arccos(50/(2 \times 50)) = 1.0472$; 当节点位置距 sink 节点最远时,此时 θ 的值最大: $\theta = \arccos(50/(2 \times 500\sqrt{2})) = 1.535$ 。图中显然可看出, $S_{i0}(i) = S_{i3}(i) \leq S_{i1}(i) = S_{i2}(i)$, 当网络传输半径 R 增大时,该关系更明显。

由此,已知算法 IGPSR-1 中转发节点在前向区域 S_{i0} 内与前向区域 S_{i1} 内选择下一跳节点的概率不一样,接下来通过另一种方法来划分节点的前向区域。通过计算节点在自身的区域面积保证节点被选择之前的计算概率值是相等的。图 3 为 IGPSR-2 划分的前向子区域。

$$S_{i01} = \frac{\angle PIW}{2\pi} \cdot \pi R_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\angle PIW}{2\pi} \cdot \pi R^2, R^2 = 2R_1^2 \Rightarrow R_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} R$$

IGPSR-2 的前向区域划分机制中将节点 n_i 的前向区域等分为 k 份,以 $\sqrt{2}/2R$ 为半径画圆,与线段 IP, IS, IQ 交于点 $N, V,$

T 。节点 n_i 在其划分的子前向区域内选择路径转发时作以下限定:a)所有的节点满足 $n_j \in V$;b)节点 n_i 能够确认其所有邻居节点,若邻居节点 n_j 位于以节点 n_i 为圆心、 R 为传输半径的传输范围内,则有 $d_{ij} \leq R$;c)节点 n_i 能够判断某邻居节点是否在区域 β 内,即偏转角 $\theta \leq \beta/2, \theta$ 为以 IJ 和 IS 为边,以 I 为顶点的角 θ 称为节点 i 关于节点 n_j 和节点 n_k 的偏转角 $\theta = \angle JIS$,按式(4)计算:

$$\theta = \arccos \frac{d_{ij}^2 + d_{is}^2 - d_{js}^2}{2 \times d_{ij} \times d_{is}} \quad (4)$$

d)节点 n_j 能够判断属于哪个子前向区域,节点 n_j 用到节点 n_i 的距离和节点偏转角 θ_{ij} 来确定自己属于某个子前向区域(如取 $k=4$,所对应的前向子区域为 $S_{i01}, S_{i02}, S_{i11}, S_{i12}$)。

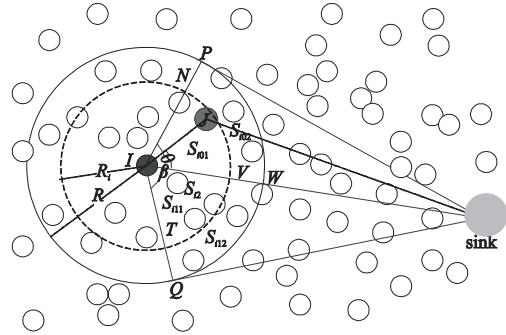


图3 IGPSR-2前向区域划分

综合以上限定得

$$S_{imm} = \{n_j | n_j \in V, \beta(k-4n-4)/2k \leq \theta_{ij} \leq \beta(k-4n)/2k \text{ and}$$

$$\sin(\pi m/4 - \pi/4)R \leq d_{ij} \leq \sin(\pi m/4)R$$

$$m = 1, 2; n = 0, 1, 2, \dots, (k/2 - 1); k \in 2T, T \in \mathbb{Z}^+ \} \quad (5)$$

设节点 n_i 的第 k 个划分子前向区域内有 v_{im} 个传感器节点,用 e_j 表示传感器节点 n_j 当前剩余能量,则区域 S_{ik} 内所有节点的平均能量按式(6)进行计算。

$$E_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{v_{ik}} e_j}{v_{ik}} \quad (6)$$

其中:IGPSR-2 算法中节点 n_i 的路径转发区域(FTR)用伪码描述如下:

Algorithm 1 IGPSR-2 FTR: 转发区域选择算法

input: 传感器节点 n_i 以及节点的能量;

output: 节点 n_i 的前向子区域 S_{imm} ;

begin

1 for $n = 0$ to $(k/2 - 1)$ do

2 for $m = 1$ to 2 do

3 由式(4)计算传感器节点 n_i 的前向邻居节点集合 S_{imm} 和子前向区域内节点个数 V_{imm} ; 计算前向子区域 S_{imm} 中所有节点剩余能量和前向子区域 S_{imm} 内所有节点的平均剩余能量 E_{ij}

4 end for

5 end for

6 在 k 个前向子区域内选取能量方差 $V_{var}(ik)$ 最小的一个前向子区域 S_{imm}

7 输出节点 n_i 的前向子区域 S_{imm}

end

3.2 节点概率传输机制

在无线传感器网络中有许多冗余节点,如果在转发节点内随机发送数据,很容易造成内爆、终端隐藏或者节点能量的浪费,如果能在前向子区域内限制节点被选择的概率,此类情况可避免。目前有众多路由算法研究如何确定节点的被选择概率值大小,但大多只考虑了网络的局部影响因素。如通过预先

计算出每个节点的一个概率值,并在前向区域内通过随机比例函数寻找下一跳节点进行数据转发;或者在前向区域内构造邻居节点的剩余能量和邻居节点到 sink 节点距离的函数来选择下一跳节点作为转发节点,并且可以通过调节节点的被选择权值大小,来满足应用需求。如果能在前向子区域内快速地搜索到一个较优的节点作为下一跳转发节点,便可以有效地减少能量开销,增强网络的健壮性,延长网络的生命周期。

转发节点的前向子区域内的节点 n_j 的传输概率计算公式可以表示为

$$p(N, E, L, \theta) = \begin{cases} \frac{N_j + E_j}{\sum_{j=0}^{V_{ik}} (N_j + E_j)} \cdot \left(1 - \frac{L_j}{\sum_{j=0}^{V_{ik}} L_j}\right) \cdot \cos \theta & |V_{ik}| > 1 \\ 1 & |V_{ik}| = 1 \\ 0 & |V_{ik}| \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中: N_j 表示节点 n_j 的下一跳前向邻居节点数目; L_j 为节点 n_i 到节点 n_s 的欧氏距离; IGPSR-1 中的 V_{ik} 与 IGPSR-2 中的 V_{im} 均表示节点 n_i 的前向子区域内节点个数,式(7)统一用 V_{ik} 来表示。当转发节点的前向子区域内没有邻居节点时,即该前向子区域内出现路由空洞,贪婪转发模式失败,算法启动周边转发模式寻找下一跳转发节点。在前向子区域内一旦有转发节点满足贪婪模式的条件,则节点立即切换到贪婪转发模式,转发节点一直循环寻找下一跳转发节点,直到数据包到达 sink 节点为止。

IGPSR 算法伪码描述如下:

Algorithm 2 IR:IGPSR-2 Routing

input: 传感器节点 n_i , 以及能量 e_i ;

output: 节点 n_i 到节点 n_s 的路径;

begin

1 initialization $N = \text{Node}$, $V_{ik} = 0$, $\text{nexthop} = \emptyset$

2 for $i = 1$ to N do

3 if $\text{next hop}(i) \neq \emptyset$

4 调用算法 1 FTR//由 FTR 选出的前向区域 S_{ik}

5 if $v_{ik} > 0$ //满足条件,进入贪婪模式

6 if ($v_{ik} = 1$)

7 $\text{nexthop}(n_i) = n_j$, $i = j$, Return 步骤 2

8 else

9 for $m = 1$ to v_{ik} do

10 根据式(4)(5)计算前向区域 S_{ik} 内所有节点的传输概率 p_j

11 end for

12 $P_1 = \max\{p_j\}$, $j = t$

13 end if

14 $\text{nexthop}(n_i) = n_j$

15 else

16 节点 n_i 进入周边转发模式, $\text{nexthop}(n_i) = n_j$

17 end if

18 if ($n_j \neq n_s$)

19: $i = j$, goto 步骤 2

20 else

21 goto 步骤 24

22 end if

23 end if

24 output $V_i \rightarrow V_s$ 的路径

end

3.3 算法与分析

时间复杂度是衡量一个算法好坏的重要指标。IGPSR-1 算法与 IGPSR-2 算法时间复杂度相当,两种算法执行时间主要由计算前向子区域平均能量的时间、路径转发过程中计算每个节点的传输概率时间和周边转发模式时间三部分构成。假

定网络中节点数目为 $|V|$, 前向子区域内节点数目 V_{ik} , k 为划分区域的个数(文中的 $k=4$), 则前向子区域内计算平均能量的时间复杂度为 $O(k|V|V_{ik}) = O(|V|V_{ik})$; 在选定的前向子区域内计算每个节点的传输概率的时间复杂度为 $O(V_{ik}V_{ik})$; 周边转发时间复杂度为常数 C 。由此可得 IGPSR 时间复杂度为

$$O(|V|V_{ik} + V_{ik}^2) \quad (8)$$

定理 2 最多不超过 $\lfloor 2\pi/(\pi-2\theta) \rfloor + 1$ 跳, 转发节点到 sink 的距离小于节点 n_i 到 sink 的距离, 否则该路由算法失效。

在最坏情况下, 节点 n_i 将第一跳转发给最远的节点 n_j , 同样 n_j 也这样一直寻找下去, 即需要 $\lfloor 2\pi/(\pi-2\theta) \rfloor + 1$ 跳传回到最初转发节点 n_i 。节点在以 sink 为圆心、 d_{is} 为半径的圆上转发数据, 显然这种概率很小, 当节点选择 θ 范围内的节点作为下一跳转发节点时, 节点就会快速地靠近 sink 移动, 每次节点前进 $R\cos\theta$ 水平距离, 直到在 sink 的区域内。图 4 为圆周转发数据。

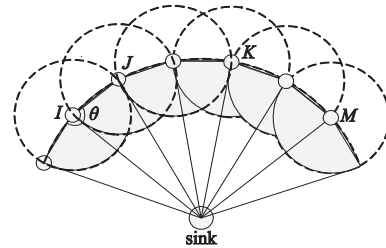


图4 节点圆周转发数据

4 仿真实验

4.1 仿真环境搭建及参数设置

为评估 IGPSR-1 算法与 IGPSR-2 算法性能, 本文与经典的路由算法 GPSR 协议进行比较。仿真平台为 NetTopo^[13], 在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的网络拓扑下, 随机分布 $500 \sim 1000$ 个的节点, 传输半径 $R = 50\text{ m}$, 每个节点的初始能量为 $5 \sim 10\text{ J}$, 数据包大小为 3000 bit 。

以下每个实验仿真结果均为 IGPSR 两种算法在六种网络拓扑结构下分别进行多次实验平均后的结果。图 5 为 $500 \sim 1000$ 个传感器节点随机分布在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的网络拓扑图。

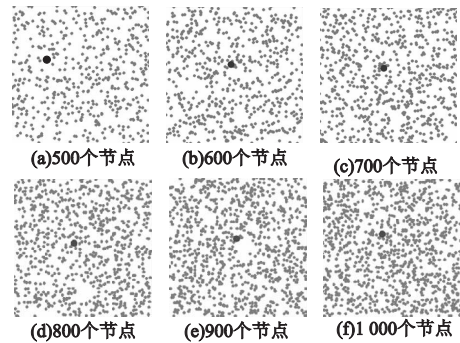


图5 网络拓扑图

4.2 仿真结果及实验分析

本文定义网络寿命为从网络运行开始至第一个节点能量耗尽所经历的时间。实验中用网络发出的数据包数目来间接衡量网络寿命, 在网络寿命内发出的数据包越多说明网络寿命越长。网络寿命是衡量无线传感器网络性能优劣的重要因素, 图 6 给出了网络平均寿命仿真结果。图中表明, IGPSR-1 算法与 IGPSR-2 算法网络平均寿命是 GPSR 算法的两倍以上, 且 IGPSR-2 算法的网络平均寿命高于 IGPSR-1 算法

的网络平均寿命,说明 IGPSR-2 算法较 IGPSR-1 算法能更好地延长网络周期。三种算法的网络寿命随着网络节点数的增多而整体递增。在网络节点数目为 700 时,网络的生命周期出现波动,主要原因是节点随机分布和能量随机分布导致实验结果出现波动的现象,但整体趋势仍是递增的,这在实际预测基本吻合。

图 7 为网络发送相同数据包(1000 个)的情况下,三种算法在不同网络拓扑下能量消耗的比较。可以看出,随着网络节点数目的增多,三种算法都表现出网络能量消耗的增加。因为随着网络节点的增多,增大了网络密度,使得网络在有限寿命内能够发送更多的数据包,从而消耗更多的能量。同时表明,在网络节点个数相同的情况下,IGPSR-1 算法所消耗能量略高于 GPSR,IGPSR-2 算法所消耗的能量最小,说明 IGPSR-2 相比 IGPSR-1 而言能更有效地利用网络,使得无线传感器网络能够得到整体上更充分的利用。

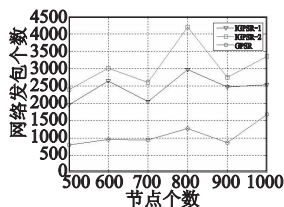


图6 网络平均寿命

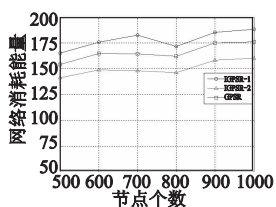


图7 网络消耗能量

网络能量消耗的均衡性是衡量网络性能的另一个重要的指标,如果网络中各节点能量消耗均衡,网络就不会因为部分节点能量过早耗尽而导致网络瘫痪。网络中节点能量消耗的均衡性可以用节点能量方差 E_{var} 来有效地评估节点的剩余能量分布情况。方差越小表明网络能量分布越均衡,网络性能越好;反之,表示网络中节点剩余能量分布越不均匀。

$$E_{var} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i(t) - E_{ave}(t))^2}{n}} \quad (9)$$

其中: $E_i(t) = \{e_i(t) | e_i(t) = e_c(i) - e_{con,i}(t), i = 1, 2, \dots, n\}$, $e_c(i)$ 为节点 n_i 初始能量, $e_{con,i}(t)$ 为节点 n_i 在 t 时间内消耗的总能量, $e_i(t)$ 为节点 n_i 在 t 时刻的剩余能量。平均网络能量为一个网络在 t 时刻的所有节点剩余能量的平均值:

$$E_{ave}(t) = \sum_{i=1}^n E_i(t) / n \quad (10)$$

图 8 为网络能量标准方差变化。图 8 表明, GPSR 算法运行后网络能量方差大于网络初始方差,说明 GPSR 算法并不能很好地均衡网络能量消耗;而 IGPSR-1 算法与 IGPSR-2 算法运行后网络能量方差均小于网络初始方差且相差不大,说明 IGPSR 算法能有效地均衡网络能量消耗;随着网络节点数的增加,三者的网络能量方差逐渐下降,这是因为随着节点的增加,网络的密度增加,相对选择性较大,所以网络能量方差在减小。同时也可以看出, IGPSR-1 算法、IGPSR-2 算法能量均衡性较 GPSR 算法有明显的改进。

图 9 为三种算法经 800 次路由发现后,平均跳数的比较。平均跳数越小,说明网络的时延越小。GPSR 在发现过程中,总是寻找距节点 n_i 最近的节点作为转发节点,所以其路径平均跳数最小。IGPSR-2 算法次之, IGPSR-1 算法最大,是因为 IGPSR 算法在其前向区域中选择下一跳节点时综合考虑了邻居节点剩余能量、到 sink 节点的距离、前向邻居节点数目等因素,其选择过程使得平均跳数对比经典的 GPSR 有所增加。

网络寿命定义为从网络运行开始至出现第一个节点能量耗尽结束所经历的时间(与本章实验图 6 中网络寿命定义一致)。实验中同样用网络发出数据包的数目来间接衡量网络寿命。图 10 为同一拓扑下 IGPSR-1 算法、IGPSR-2 算法与 GPSR 算法在仍大小为 800 节点网络拓扑中(与之前的图 6 网络拓扑图 800 节点不一样),通过改变节点的初始能量方差,图 10 为 IGPSR-1 算法、IGPSR-2 算法与 GPSR 算法在相同的能量初始方差下网络最大发包个数的变化。

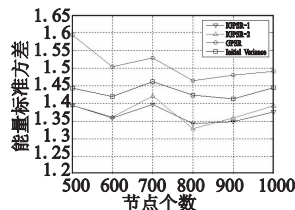


图8 网络能量标准方差变化

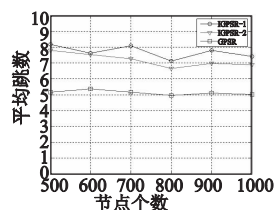


图9 单路径平均跳数

图 10 表明,在相同初始能量方差下, IGPSR-1 算法、IGPSR-2 算法的网络寿命要明显高于 GPSR 算法的网络寿命, IGPSR-1 算法与 IGPSR-2 算法的网络寿命差不多。同时可以看出,随着网络能量标准方差的增大, IGPSR-1 算法、IGPSR-2 算法的网络寿命与 GPSR 算法网络寿命在不断地下降。这主要是因为能量标准方差越大,节点能量分布越不均匀,能量较小的节点如果承担多次路由转发,则较容易死亡,从而使网络寿命缩短。同时也可以说明 IGPSR-1 算法、IGPSR-2 算法能更好地均衡网络能量,延长整个网络寿命。

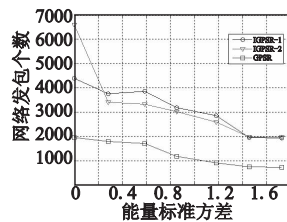


图10 能量方差与网络寿命的变化

5 结束语

本文基于节点剩余能量差别,对当前待转发数据包的节点的前向转发区域进行划分,通过概率选择机制从被选择的转发区域中选择下一跳节点,使得路由算法能快速收敛且有效保证邻居节点能量均衡消耗,从而延长了网络生命周期。实验验证了 IGPSR-2 算法的有效性,其在网络寿命、网络能量均衡消耗方面获得了更优结果。

参考文献:

- [1] ROMAN R, LOPEZ J. Wireless sensor networks and the Internet: a security analysis [J]. *Electronic Networking Applications and Policy*, 2009, 19(2): 249-259.
- [2] GIUSEPPE A, MARCO C, MARIO D F. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey [J]. *Ad hoc Networks*, 2009, 7(3): 537-568.
- [3] MADAN R, LALL S. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. *Wireless Communications*, 2006, 5(8): 2185-2193.
- [4] MARTAA M, CARDEI M. Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2009, 5(5): 542-555.

技术,其时延性能均优于其他两种路由技术。三种路由技术的分组传递率都随着网络负载的增加而下降,而其中非协作路由技术的性能最差。当网络节点数大于30时,所有协议的分组传递率都急剧下降,非协作路由技术和协作路由技术都低于72%,但基于遗传算法的协作路由技术的性能要明显好于它们,始终保持在80%以上,这说明基于遗传算法的协作路由技术适合于场景变化比较大的无线传感器网络。

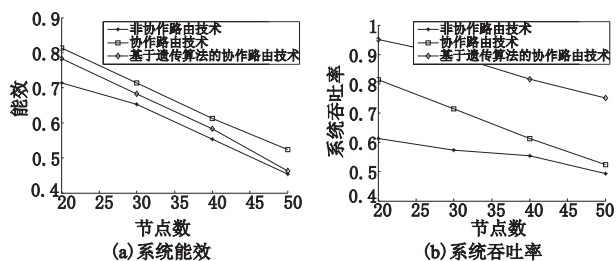


图2 不同网络规模下三种路由技术在能效和吞吐率上的性能对比

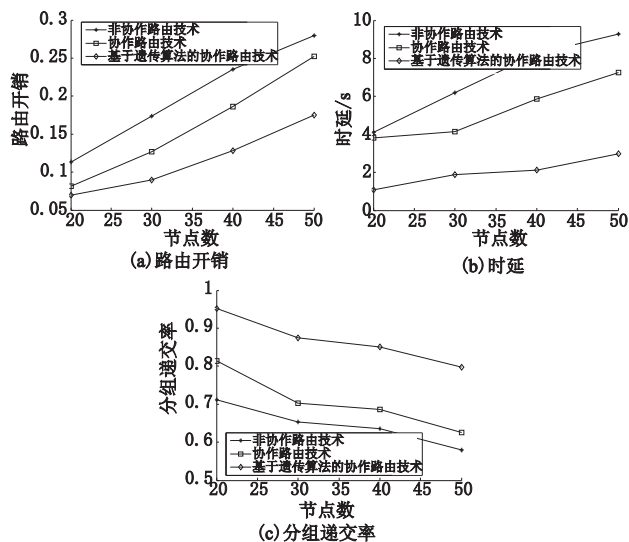


图3 不同网络规模下三种路由技术在路由开销、端到端时延和分组递交率的对比

图2和3表明,基于遗传算法的信道质量预测协作路由技术可以充分利用无线信道资源,合理选择中继节点建立协作路由,在系统有效吞吐率和系统能效以及路由开销、时延和可靠性方面均可以获得良好的性能,是一种非常适合于无线移动传感器网络的路由技术。

4 结束语

针对无线传感器网络动态拓扑结构、动态信道和能量受限等特性,研究了一种适用于无线传感器网络的基于信道质量预测的分布式协作路由技术。采用遗传算法模型预测节点间信道质量,建立了一种基于信道质量的分布式中继选择机制,并据此建立了一种分布式优化协作路由技术。根据 NS-2 和 MATLAB 数学分析表明,遗传算法以较快的收敛速度和较高的可靠性准确地预测了无线链路质量,另一方面该分布式优化协作路由技术在提高无线传感器网络资源利用率的同时有效延长了网络生命周期,验证了该路由技术对于无线传感器网络具有更好的适应性。

参考文献:

- [1] WANG Yan, LIU Le-qing. A cross-layer optimization algorithm for wireless sensor network [C]//Proc of International Conference on Display and Photonics. [S.l.]: IEEE Press, 2010.
- [2] 邹少军. 基于量子遗传算法的无线传感器网络路径优化[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(3): 723-726.
- [3] 蔡凌, 汪晋宽, 王翠荣. 一种粒子群优化的多路路由负载均衡算法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(9): 516-522.
- [4] 孙宝林, 李腊元, 陈华. 基于遗传算法的实时 QoS 多播路由优化算法[J]. 计算机应用, 2004, 24(11): 213-217.
- [5] LI Tao-shen, XIAO Meng. An improved ant colony optimization algorithm for multiple quos anycast routing [C]//Proc of International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering. [S.l.]: IEEE Press, 2010.
- [6] 胡晓东, 李先国, 赵涛. 基于遗传算法的重叠多播路由计算[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(4): 1011-1014.
- [7] 王毅, 张德运, 张栋. 无线传感器网络满足 QoS 带宽需求的能量最优路由方案[J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 810-814.
- [8] 宁欢, 王长山, 郭彬. 遗传算法在片上网络 QoS 路由中的应用[J]. 中国集成电路, 2010, 19(3): 437-440.
- [9] 梁野. 基于遗传算法的资源交互路由优化[J]. 计算机工程, 2011, 37(3): 890-894.

(上接第1469页)

- [5] LIAN J, NAIK K, AGNEW G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2006, 2(2): 121-145.
- [6] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//Proc of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2000: 243-254.
- [7] WANG Xiao-ming, JIANG Xiao-hong, YANG Tao, et al. Node aggregation degree-aware random routing for non-uniform wireless sensor networks[J]. IEICE Transactions, 2011, E94. B(1): 97-108.
- [8] 杨云, 陈拥军, 张敬, 等. 基于最小跳数的 WSN 非均匀分布的路由算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(9): 3446-3448.
- [9] 李戈阳, 曹阳, 高洵, 等. 基于模糊梯度的无线传感器网络能量均

衡路由协议[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(12): 83-87.

- [10] 吴三斌, 王小明, 杨涛, 等. 改进的 GPSR 模型及其仿真分析[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(8): 100-104.
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [12] WANG A, HEINZELMAN W B, SINHA A, et al. Energy scalable protocols for battery-operated micro sensor networks[J]. Journal of VLSI Signal Processing, 2001, 29(3): 223-237.
- [13] SHU Lei, WU Chun, ZHANG Yan, et al. NetTopo: beyond simulator and visualizer for wireless sensor networks [C]//Proc of the 2nd International Conference on Future Generation Communication and Networking, 2008: 17-20.