

# 一种基于可信度的异构网络汇聚路由协议

许金生,周鸣争\*,朱程,叶青

(安徽工程科技学院 安徽省电气与传动控制重点实验室,安徽 芜湖 241000)

**摘要:**无线传感器网络使用多跳通信的模式从感测区域中收集环境数据。为了延长网络的寿命,提出一种基于可信度的异构网络汇聚路由协议。利用节点的剩余能量、可信度以及节点与汇聚节点之间距离选择簇首。在可信度高于一定阈值的前提下,能量剩余高和距离基站较近的节点比能量剩余少和距离基站较远的节点拥有更多的机会成为簇首,模拟实验结果表明,该协议减少了网络中的能量消耗,延长了网络的生命周期。

**关键词:**无线传感器网络;可信度;异构;汇聚路由

**中图分类号:**TP393

**文献标识码:**A

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,简称 WSNs)是由部署在感测区域大量的微型的、具有感知、计算和通信能力的传感器节点,通过无线自组网的方式形成一个多跳的自组网系统<sup>[1]</sup>。但由于节点的能量、计算资源、通信能力和节点可靠性都是十分有限的。所以,设计有效的路由协议来延长网络的寿命是重要的挑战。目前,路由协议可分为平面路由和层次路由两大类<sup>[2]</sup>。异构传感器网络(heterogeneous sensor networks)是指由多种不同类型的传感器节点构成的网络<sup>[3]</sup>。其中能量异构是最重要的异构类型,在无线传感器网络中放置少量的能量异构的节点可以有效地延长网络寿命和增加网络的可靠性。

本文中提出了一种基于可信度的异构网络汇聚路由协议。在分层的异构传感器网络中以分布式的方式选择簇头,簇首选取的概率依赖于节点的剩余能量,节点距离基站(sink)的距离和节点的可信度。在可信的节点中,剩余能量高且与 sink 节点之间的距离短的节点当选簇首的概率大;反之,节点当选簇首的概率小。该方法充分利用了网络本身的性质,能够得到一个更合理和更稳定的簇的分布。

## 1 THNAR 协议的设计

### 1.1 网络模型

设  $N$  个传感器节点均匀地分布在一个二维平面区域( $M \times M$ )中,且满足如下的性质:(1)传感器一旦布置就不再移动,节点明确自身的位置,且节点在网络中的标识唯一;(2)节点能量异构;(3)节点具有感测半径  $R_s$  和通信半径  $R_t$ ,且  $R_s > R_t$ ;(4)网络中仅固定单个位于网络中心的基站;(5)无线发射功率可控。

### 1.2 无线通信模型

本文采用与文献[4]相同的无线通信模型。若节点  $A$  在向距离  $d$  以外的节点  $B$  发送字节为  $L$  bit 的数据包时,其数据发送的能耗为:

$$E_{TX}(L, d) = \begin{cases} L * E_{elec} + L * \epsilon_{fs} * d^2 & \text{if } d \leq d_0 \\ L * E_{elec} + L * \epsilon_{mp} * d^4 & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_{elec}$  表示发送每比特数据运行传输电路或接收电路所耗能量;  $d$  表示发送者和接收者之间的距离。

$B$  节点接收  $A$  节点发送的  $L$  bit 数据,其无线接收装置所消耗的能量为:  $E_{RX} = L * E_{elec}$ 。

### 1.3 优化簇首个数( $k_{opt}$ )的确定

每轮成簇的过程中,簇首消耗的能量和簇成员消耗的能量分别为:

$$E_{CH} = \left(\frac{N}{k} - 1\right)E_{RX} + \frac{N}{k} * L * E_{DA} + E_{TX}(L, d_{to sink}) \quad (2)$$

$$E_{nonCH} = E_{TX}(L, d_{to CH}) \quad (3)$$

收稿日期:2009-05-25

基金项目:安徽省高校自然科学基金资助项目(2003kj036)

作者简介:许金生(1983-),男,安徽庐江人,硕士研究生。

通讯作者:周鸣争(1958-),男,安徽枞阳人,教授,硕士。

式中: $k$ 表示网络中簇的个数; $d_{\text{tosink}}$ 表示簇首和sink节点之间的距离。

假设簇首节点的位置坐标为 $(x_i, y_i)$ 和sink节点之间的距离的平方的期望值可通过以下公式计算:

$$E[d_{\text{tosink}}^2] = \frac{1}{M^2} \int_0^M \int_0^M (x_i^2 + y_i^2) dx_i dy_i = \frac{2}{3} M^2, \quad (4)$$

$d_{\text{toCH}}$ 表示簇成员节点(坐标为 $(x, y)$ )和簇首的距离,可通过如下方法计算:

$$E[d_{\text{toCH}}^2] = \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy = \frac{M^2}{2\pi k}, \quad (5)$$

$\rho(x, y)$ 表示成员节点分布的密度。

将式(4)、(5)分别代入式(2)、(3)中,有每轮中网络中节点消耗的总能量为:

$$E_{\text{total}} = k(E_{\text{CH}} + \frac{N}{k} E_{\text{nonCH}}) = 2NLE_{\text{elec}} + NLE_{\text{DA}} + kL\epsilon_{\text{mp}} d_{\text{tosink}}^4 + NL\epsilon_{\text{fs}} d_{\text{toCH}}^2 \quad (6)$$

对式(6)关于系数 $k$ 求导,有: $k_{\text{opt}} = \frac{M}{d_{\text{tosink}}^2} \sqrt{\frac{N}{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{fs}}}{\epsilon_{\text{mp}}}} = \frac{3}{2M} \sqrt{\frac{N\epsilon_{\text{fs}}}{2\pi\epsilon_{\text{mp}}}}$ ,当 $M = 100, N = 100, \epsilon_{\text{fs}} = 10$  pJ/bit/m<sup>2</sup>,  $\epsilon_{\text{mp}} = 0.0013$  pJ/bit/m<sup>4</sup>时,解得: $k_{\text{opt}} \approx 5$ ,与文献[4]得出的结论一致。仿真实验中,本文取优化簇首的个数( $k_{\text{opt}}$ )为5。

#### 1.4 异构网络的组成

文献[5]提出一种二级异构网络成簇协议,简称为SEP。在二级异构网络中,仅存在两种初始能量不等的传感器节点:高级节点和普通节点。设 $E_0$ 表示节点的初始能量, $m$ 表示高级节点所占的比例, $\alpha(>1)$ 表示高级节点和普通节点初始能量的比值。 $N$ 个传感器节点的异构网络,其初始能量之和为: $[m(1+\alpha) + (1-m)]NE_0$ 。因此,异构网络的初始总能量比同构网络的初始总能量多 $m\alpha$ 倍,等同于比同构网络多 $m \times \alpha \times N$ 个普通节点。

#### 1.5 可信度的计算

节点的可信性<sup>[6]</sup>是无线传感器网络的研究基础,可信性包含可用性、可靠性、安全性、健壮性等。簇首节点接收成员节点发送的数据,依据以下公式计算该簇内的汇聚结果:

$$Agg = \sum_{i=1}^n T_i \times S_i \quad (7)$$

式中: $Agg$ 表示簇首计算的汇聚结果; $T_i$ 表示节点的可信度(初始值为1,其值位于0~1); $S_i$ 表示节点 $i$ 感测的数据。

当单个簇的汇聚结果计算完成以后,根据簇内节点发送数据与 $Agg$ 的差异性,利用以下公式更新节点的可信度,作为下一次计算 $Agg$ 的参数。

$$T_i = \begin{cases} T_i - wR_i & \text{if } S_i \neq Agg \\ T_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $w$ 表示权值系数; $R_i$ 表示发送不同感测数据值的节点个数( $n'$ )与簇内总节点个数( $n$ )的比值,即: $R_i = n'/n$ 。

可信度的更新有如下的优点:若某个节点被捕获或一段时间内频繁的发送异常数据,那么,其可信度的值将不断减少,当可信度小于某个阈值(在初始化时设定,  $T_{\text{threshold}}$ ),我们可以视该节点为失效的节点或恶意节点,在簇首选择时,概率低;反之,可信度越高的节点,那么该节点发送的数据值对汇聚结果(即 $Agg$ )影响较大,在簇首选择时,概率高。

#### 1.6 簇首的选举概率

簇首选举概率用以下公式表示:

$$p_i = \begin{cases} \frac{k_{\text{opt}}}{(1+m\alpha)} \left( \theta \frac{E_i(r)}{E_{\text{total}}(r)} + (1-\theta) \frac{1/\text{dis}(n_i, n_{\text{sink}})}{D_{\text{total}}(r)} \right), & \text{if } n_i \text{ is a normal node and } T_i \geq T_{\text{threshold}} \\ \frac{k_{\text{opt}}(1+\alpha)}{(1+m\alpha)} \left( \theta \frac{E_i(r)}{E_{\text{total}}(r)} + (1-\theta) \frac{1/\text{dis}(n_i, n_{\text{sink}})}{D_{\text{total}}(r)} \right), & \text{if } n_i \text{ is an advanced node and } T_i \geq T_{\text{threshold}} \\ 0, & \text{if } T_i < T_{\text{threshold}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $E_i(r)$ 表示节点当前一轮剩余的能量; $\text{dis}(n_i, n_{\text{sink}})$ 表示节点 $n_i$ 和sink的距离; $\theta$ 代表能量和距离影

响簇首选举概率的比重;  $E_{\text{total}}(r)$  和  $D_{\text{total}}(r)$  则分别表示网络中的剩余能量的总和以及所有节点与 sink 节点的距离的倒数之和, 即:

$$E_{\text{total}}(r) = \sum_{i \in N, E_i(r) > 0} E_i(r), D_{\text{total}}(r) = \sum_{i \in N, E_i(r) > 0} 1/\text{dis}(n_i, n_{\text{sink}}) \quad (10)$$

显然, 网络中簇首个数的期望值为  $\sum p_i = k_{\text{opt}}$ . 由此得到节点  $n_i$  在每轮用于决定是否成为簇首的门限:

$$T(n_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 - p_i \times (r \bmod \frac{1}{p_i})}, & \text{if } i \in G \\ 0, & 0 \end{cases} \quad (11)$$

## 1.7 算法描述

THNAR 算法在 LEACH 算法的基础上有所改进, 每轮分为四个阶段: 簇首选举、簇的形成、数据传输和可信度的更新. 下面针对具体过程进行算法的描述.

(1) 簇首选举. 当网络开始运行时, 需要计算当前节点的剩余能量和它距离 sink 节点的距离. 根据式 (10) 计算网络中所有节点与 sink 节点的距离的倒数之和  $D_{\text{total}}$ , 网络中该轮剩余能量的总和  $E_{\text{total}}$ . 如果该节点的可信度  $T$  不为 0, 将式 (9) 代入式 (11) 中计算阈值  $T(n)$ . 其后, 每个节点随机生成 0 到 1 之间的数, 如果节点产生的随机数(Random) 小于  $T(n)$ , 它才能成为簇首.

(2) 簇的形成. 当簇首选定之后, 每个簇首用非持续的 CSMA(carrier-sense multiple access) MAC 协议向全网广播自己成为簇首的消息, 该消息称为 ADV(ADvertisement message). 消息中包括簇首的 ID 号和包头标识以表明该消息是簇首当选消息. 其他节点在 ADV 消息广播阶段接收该消息. 如果当前节点在一定时间间隔内接收多个 ADV 消息, 那么它根据接收消息的强度指示 RSSI(Received Signal Strength Indicator) 选择离自己最近的那个簇加入, 并用非持续的 CSMA MAC 协议发送加入请求信息 (JOIN message) (其中包括节点的 ID 号、簇首的 ID 号和节点的可信度  $T$ ) 给相应的簇首节点, 完成簇的建立. 最后, 簇首节点采用 TDMA 方法为簇中的每个节点分配向其传送数据的时隙. 并以广播的形式发送到簇内所有的节点, 保证簇内每个节点只在相应的时隙内进行数据传输, 而在其他时间内进入休眠状态, 减少了能量的损耗.

(3) 数据的传输. 簇内节点与节点之间的通信和簇首与 sink 节点的通信均采用单跳通信方式, 成员节点将感测数据发送给簇首节点, 簇首节点依据式 (7) 计算汇聚结果  $Agg$ , 并发送给 sink 节点.

(4) 可信度的更新. 数据的传输阶段后, 簇首将汇聚结果  $Agg$  和  $R_i$  发送给本簇内的成员节点, 成员节点接收  $Agg$  和  $R_i$ , 据根据可信度更新式 (8) 重新计算新的可信度.

## 2 模拟实验及分析

本节对提出的 THNAR 与 SEP 和 LEACH 在网络的生命周期 (这里定义为网络中首个节点死亡的时间), 网络的总能耗两个方面进行比较. 仿真工具使用 NS2(Network Simulation Version2). MAC 层采用类似 802.11DCF 的算法, 并且在 ACK 消息中稍带节点的能量信息. 其他仿真参数如表 1 所示.

表 1 实验参数

实验中的参数	参数值	实验中的参数	参数值
节点个数	100	$E_0, m, \alpha, E_{\text{elec}},$	2J, 0.3, 3.5, 50 nJ/bit
分布区域	$100 \times 100(\text{m}^2)$	最优簇首个数 $k_{\text{opt}}$	5
sink 节点位置	(50, 50)	$\epsilon_{\text{fs}}, \epsilon_{\text{mp}}$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup> , 0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>
数据包长度	500 bytes	$T_{\text{threshold}}$	0.2
信息包长度	25 bytes	仿真时间	1 000 (轮)

由图 1 可知, 随着  $\theta$  值不断增大, 网络的生命周期也不断延长. 原因是: 能量因素在簇首选择的过程中的决定作用不断提升, 也就是剩余能量多的节点, 成为簇首的概率大. 因而避免了能量少且距离 sink 节点近的节点因频繁成为簇首, 能量消耗过快而快速死亡. 当  $\theta \approx 0.65$  时, 网络的生命周期达到最大值, 仿真实验中取  $\theta = 0.65$ .

图 2 可知, THNAR 均比 LEACH 和 SEP 网络的生命周期长. 由于在簇首的选择上引入能量和距离的

因素,同时以节点的可信度作为参考值,限制了簇首的个数,使得网络中簇首的分布趋于均衡,平均了每个簇中成员节点的个数,有效地延长了网络的生命周期。同时图3可知,簇首的分布趋于均衡,成员节点和簇首的通信距离合适,同时簇首之间通过多跳的方式和 sink 节点通信,与 SEP 相比,有效地节省了总能耗。

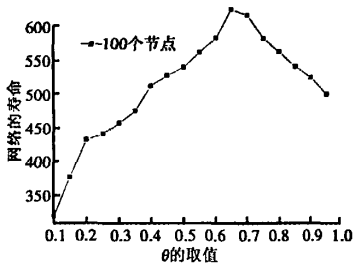
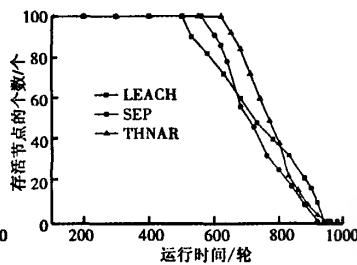
图1  $\theta$  值的大小

图2 网络的寿命

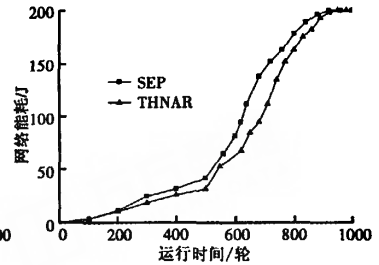


图3 网络的能耗

### 3 总结

本文提出一种基于可信度的异构网汇聚路由协议。在分层的异构传感器网络中以分布式的方式选择簇头,簇头的选取概率依赖于节点的剩余能量和节点距离 sink 节点的距离,并以节点的信任度作为参考值,并给出了可信度的计算公式。这样,在选择簇首时,可信度高,节点的能量多且距离 sink 节点近的节点,成为簇首的概率大,均衡了网络中节点能量的消耗,延长了网络的生命周期。仿真实验结果表明该协议是有效的。

### 参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. Wireless sensor networks: a survey[J]. Comput. Netw., 2002, 38(4): 393-422.
- [2] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325-349.
- [3] Yarvis M, Kushalnagar N, Singh H, et al. Exploiting heterogeneity in sensor networks[C]//IEEE INFOCOM 2005. Miami, FL, USA: IEEE Communications Society, 2005: 878-890.
- [4] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking. Seattle, Washington, United States: ACM, 1999. 174-185.
- [5] Smaragdakis G, Matta I, Bestavros A. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]//In Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications, 2004.
- [6] Hur J, Lee Y, Yoon H, et al. Trust evaluation model for wireless sensor networks[C]//Proc. of the ICAC 2005, Piscataway: IEEE Computer Society, 2005: 491-496.

## An aggregation routing protocol of heterogeneous networks based on trust

XU Jin-sheng, ZHOU Ming-zheng, ZHU Cheng, YE Qing

(Anhui Provincial Key Laboratory of Electric and Control,  
Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Wireless Sensor Networks collects environmental data from sensing area through multi-hop communication model. In order to prolong the network lifetime, A Trust-degree based Heterogeneous Networks Aggregation Routing protocol (THNAR) is proposed. Cluster-heads are elected by residual energy of node, the distance between node and sink node, and node's trust degree. Under the premise of the condition that node's trust degree is greater than or equal to some certain threshold value, the probability of nodes with more residual energy and closing to sink node who are selected as cluster-heads is larger than that of nodes with less residual energy and far from sink node. Simulation results show that the proposed protocol reduces energy consumption and prolongs network lifetime.

**Key words:** wireless sensor networks; trust-degree; heterogeneous; aggregation routing