

# 基于节点移动和协作转发的异构传感器网络路由协议

王 镇, 刘学军

(南京工业大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 211816)

**摘 要:** 在异构传感器网络中, 超级节点有着重要的意义. 针对异构传感器网络中超级节点能量消耗过快的问题, 提出了一种新的分簇路由协议(MCC). 通过在簇头移动控制策略来使簇内负载更加均衡; 在簇间数据传输时引入了节点协作转发机制, 提高了分簇协议的数据传输性能. 通过 NS2 仿真验证, 结果表明, MCC 协议不仅降低了簇首能耗, 而且使网络能耗更加均匀, 延长了网络寿命.

**关键词:** 异构传感器网络; 簇首节点; 移动控制策略; 协作转发机制

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2012)01-0062-05

## Heterogeneous Sensor Network Routing Protocol Based on the Movement Control and Collaboration

WANG Zhen, LIU Xue-jun

(College of Information Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** A new cluster-based routing protocol was proposed to solve the problem that energy of super nodes decrease fast in heterogeneous sensor network. Firstly cluster head movement control strategy makes the network load more balanced. Then node forward collaboration mechanism enhances the clustering transmission performance. The protocol was verified by NS2 simulator. Simulation results demonstrate that this protocol not only can decrease the energy consumption, but also make the network energy consumption more balanced and prolong the network lifetime.

**Key words:** heterogeneous sensor network; cluster head node; movement control strategy; forward collaboration mechanism

### 1 引言

无线传感器网络(WSN)是一种能在事先没有构建网络基础设施的环境下,由传感器节点组成的一种自组织、自管理的网络.研究表明,异构传感器网络能够显著地提高网络生存周期和稳定性,因此,最近的一些实际传感器网络更趋向于采用异构的网络结构,异构传感器网络的研究也成为一个新的热点.

本文主要研究能量异构、节点均匀分布的无线传感器网络路由问题,即网络中存在具有较多能量的少数超级节点,这些节点均匀分布在网络中.通

常,以超级节点为簇头形成若干个簇.簇头之间形成骨干网,将感知数据传送到基站(Sink 节点).在无线传感器网络中,传输能耗是最主要的能耗形式.尽管簇头节点具有较多的能量,但是由于承担了主要的数据传输任务,能量消耗很大.一旦簇头节点因能量耗尽而失效,将形成能量空洞,该簇内的数据将无法传送到 Sink 节点.因此,研究如何有效地降低簇头的能量消耗具有重要意义<sup>[1-2]</sup>.在一个簇内,距离簇头较远的节点往往具有更大的能量消耗,有效地平衡簇内节点的能量消耗,对于延长整个网络的生命周期具有重要的作用.

本文针对上述问题,通过引入簇首移动控制策

**收稿日期:** 2011-05-03; **修回日期:** 2011-06-10

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61073197);江苏省科技支撑计划(SBE201077457)

略和节点协作转发机制提出了一种新的异构传感器网络路由协议 MCC(routing protocol based on the Movement Control and Collaboration).

## 2 相关研究工作

Yun Wang 等<sup>[3]</sup>研究了异构网络中的网络覆盖和连通性,研究结果表明,引入少量具有较大传输半径的节点可以极大地减少网络中所必需的节点数量. Yarvis 等<sup>[4]</sup>研究了链路异构(节点具有不同通信半径)和能量异构(节点具有不同的能量)两种情况下,超级节点的合理数量和优化的位置,他们提出了一种典型的方法:以 Sink 点为树根,建立一棵优化的路由树,由此确定超级节点的数量和位置. 杨文国等<sup>[5]</sup>研究了具有两类无线传感器节点组成的异构监测网络,假设普通传感器的发射/感知半径是可以在某个范围内调节的,而两类传感器所携带的能量是固定的,给出了考虑连通覆盖约束条件的求解网络寿命的最优化模型. 温俊等<sup>[6]</sup>研究了异构无线传感器网络的最小转发连通覆盖问题.

与上述研究不同,本文主要研究能量异构、节点均匀分布的传感器网络路由问题. 在实际应用的网络中,具有较大能量的超级节点通常作为中继节点转发数据,其作用相当于簇头节点.

## 3 MCC 路由协议设计

针对异构传感器网络中超级节点能量消耗过快的问题,本文提出了一种新的分簇路由协议 MCC,通过引入簇首移动控制策略和节点协作转发机制,提高了数据传输的性能,节省了簇首的能量消耗. MCC 协议的主要思想:首先,在簇的划分时,选用 GAF 协议所采取的划分策略;其次采用簇首移动控制策略,使簇首在簇内的位置更有利于簇内节点能耗的均衡;最后,簇首间通过建立的层次路由树选择一条最优的路径把数据传送给基站. 数据传输过程中,引入了节点协作转发机制,不仅提高了可靠性,还大大节省了簇首的能量消耗,延长了整个网络的生命周期.

### 3.1 能量模型

采用文献[2]给出的传感器节点的能量模型,即将一个  $k$ -bit 分组(kit)信息传送距离  $d$ ,收发器的发送耗能为:

$$\begin{aligned} E_{Tx}(k, d) &= E_{Tx-\text{elec}}(k) + E_{Tx-\text{amp}}(k, d) \\ &= E_{\text{elec}} \times k + \epsilon_{\text{amp}} \times k \times d^2 \end{aligned} \quad (1)$$

收发器的接收耗能为:

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-\text{elec}}(k) = E_{\text{elec}} \times k \quad (2)$$

其中,  $E_{\text{elec}}$ J/bit 表示发射装置或接收电路每发送或接收单位 bit 的耗能;  $\epsilon_{\text{amp}}$ J/bit/m<sup>2</sup> 表示发射放大器将每比特传送单位平方米所耗的能量.

### 3.2 簇的划分和簇首选择

采取 GAF 路由协议的簇划分策略,如图 1 所示. 令  $r \leq \frac{R}{\sqrt{5}}$ , 其中  $R$  是节点最大发射半径,这样可以保证相邻两个单元格内的任意两个节点能够直接通信,从而减少数据的丢失,提高可靠性. 假设节点发射半径可调,其感知半径远小于最大发射半径,而且,超级节点足够多,能保证每个虚拟单元格内有一个超级节点,从而形成以各个超级节点为簇首的分簇网络.

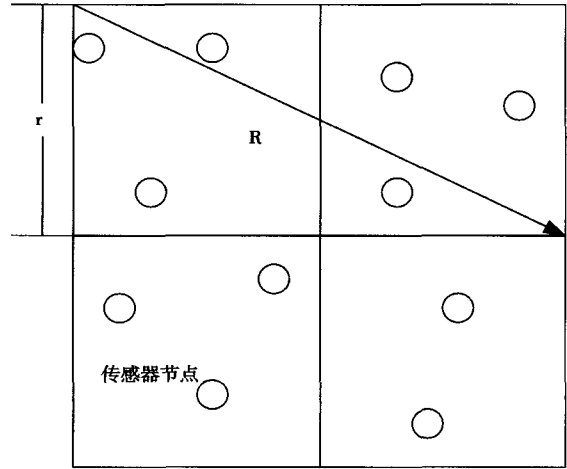


图1 路由协议虚拟单元格

### 3.3 簇首移动控制策略

本文在节点移动控制策略<sup>[3]</sup>的基础上加入了能量限制,提出了簇首移动控制策略来使簇内能耗更加均衡. 无线传感器布局优化的过程中,簇首根据所受合力的大小和方向移动相应的距离,直到达到受力平衡或可移动距离的上限<sup>[4]</sup>. 为了简化算法,只考虑节点的力的作用,并且不考虑节点被配置到检测区域边界的情况. 假设簇首  $i$  通过簇内普通节点发现获得自身与簇内普通节点之间的距离和角度,即得到如下簇内普通节点矢量序列  $\vec{r}_j = r_j \angle \theta_j, j=1, 2, \dots, N$ . 因为本文提出的簇首移动控制策略是分布式的,所以簇首只根据一跳簇内普通节点信息和能量因素计算移动方向和移动量  $\vec{F}_i = \frac{E_i}{E_j} F_i \angle \varphi_i, j=1, 2, \dots, N$ . 其中  $E_i$  代表簇首  $i$  的能量,  $E_j$  代表簇内普通节点  $j$  的能量,下面将详细描述簇首节点移动控制策略.

本文提出的节点移动控制策略根据节点间的作用力来确定簇内普通节点对簇首  $i$  的分力:

$$\vec{F}_j = \frac{E_i}{E_j} F_j \angle \varphi_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中

$$F_j = \frac{E_i}{E_j} \frac{|r_j - \bar{r}_i|}{N}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} \theta_i, & (r_j \geq \bar{r}_i) \\ \theta_j - \pi, & (r_j < \bar{r}_i, \theta_j \geq \pi) \\ \theta_j + \pi, & (r_j < \bar{r}_i, \theta_j < \pi) \end{cases} \quad (5)$$

根据力的合成法则确定簇首  $i$  的合力, 也即是簇首  $i$  的移动方向和移动距离, 如图 2 所示.

$$\vec{F}_i = \frac{E_i}{E_j} F_i \angle \varphi_i, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

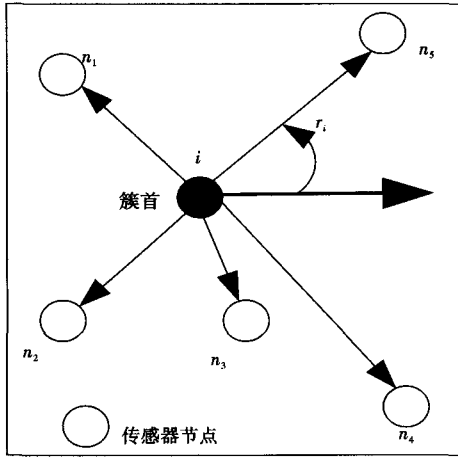


图 2 节点移动控制策略示意

由公式(3)~(6)可以看出, 引入能量因素后, 当  $\frac{E_i}{E_j} > 1$  时, 即簇内普通节点  $j$  的能量小于簇首能量时, 簇首受到簇内普通节点的力大于未引入能量因素时簇首所受到的力, 因而就会加强向靠近能量小的节点移动的趋势; 当  $\frac{E_i}{E_j} < 1$  时, 即簇内普通节点  $j$  的能量大于簇首能量时, 簇首受到簇内普通节点的力小于未引入能量因素时簇首所受到的力, 因而就会加强向远离能量大的节点移动的趋势. 由于加入了能量限制因素, 所以簇内的能量消耗更加均衡, 从而大大延长了网络生命周期.

传感器网络一定是多节点系统. 对于多节点系统中的移动簇头节点来说, 性能指标(候选利亚普诺夫函数)定义如下:

$$V_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m_i} k_i (\|p_{ij}\| - d_{ij})^2 + \frac{1}{2} k_w \|v_i\|^2 \quad (7)$$

其中,  $\|p_{ij}\| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  和  $d_{ij}$  分别

是簇头节点和簇内普通节点之间的实际和期望距离.  $\vec{p}_{ij}$  是在簇头节点  $i$  坐标系中, 从簇头节点  $i$  到簇内普通节点的向量.  $m_i$  是  $i$  的簇内普通节点的个数.  $k_i$  和  $k_w$  是虚拟势场势能和节点动力学动能的参数. 则簇头节点  $i$  的控制输入为:

$$u_i = -\frac{\partial V_i}{\partial p_i} - \frac{\partial V_i}{\partial v_i} = -F_i - k_w v_i \quad (8)$$

$$\vec{F}_i = \frac{E_i}{E_j} F_i \angle \varphi_i = \sum_{j=1}^{m_i} k_i (\|p_{ij}\| - d_{ij}) \frac{\vec{p}_{ij}}{\|p_{ij}\|} \quad (9)$$

$\vec{F}_i = \frac{E_i}{E_j} \{F_{ix}, F_{iy}\}$  是由簇内普通节点对簇首节点  $i$  产生的虚拟势场力. 因为除了簇头其他节点都是静止的, 那么容易证明, 上面所讨论的控制器是全局收敛的. 因此, 可以证明, 基于簇首节点  $i$  的分布式移动控制策略能够保证整个系统全局收敛.

### 3.4 簇间路由和簇头向基站传送数据

在已有的分簇路由协议中, 簇首负责与基站的通信, 如果簇首距离基站很远, 仍采用单跳通信, 那么能量损耗将采用多径衰落模型<sup>[2-5]</sup>, 这会造成簇首能量的过快消耗. 本文解决办法是, 当簇首距离基站较近时, 簇首直接与基站通信; 当簇首距离基站较远时, 通过贪心算法, 建立一个簇首间层次路由树, 以多跳的方式, 选择最优路径, 并且通过邻居节点协作机制把数据传送给基站.

采用簇头之间多跳的方式向基站传送数据, 虽然减少了远离基站的簇首的能量消耗, 但是增加了其他簇首的能量消耗. 针对以上问题, 本文在簇首向基站传输数据的过程中采用了节点协作转发机制, 并使用半径  $L$  限制协作节点的选择范围, 减少了协作节点过多而造成的额外能量消耗. 假设节点的部署服从均匀分布,  $L$  的计算公式如(10),  $\lambda$  为密度;  $m$  为每跳期望参与的协作节点数. 同时,  $L$  还应小于节点的通信半径  $R$ .

$$L = \sqrt{\frac{m}{\pi\lambda}} \quad (10)$$

如图 3 所示, 在基站节点  $H$  发送查询消息 IN\_MSG(Inquire\_message)后, 簇首  $B$  通过 CTS 应答  $H$  的同时, 发送转发消息 TS\_MSG(Transmit\_message)到离基站较近的簇首节点  $D$ , 请求协助转发. 接收到节点  $B$  的 TS\_MSG 后,  $D$  通过发送协作消息 C\_MSG(Cooperation message), 请求其邻居节点进行协助转发, 侦听到  $D$  的 C\_MSG 消息后, 竞争节点

通过其中的位置坐标计算出簇首 D 与自己的距离, 小于  $L$  的节点, 如 E、F、G 便成为 D 的协作节点, 协作节点根据接收到的  $C\_MSG$  信号的强弱以及自身的剩余能量  $E_{current}$  来确定是否协助簇首 D 转发 B 发送来的数据. 假设胜出的是 E, E 将完成下一跳的数据转发. 在 E 接收失败的情况下, 由 D 的其它协作节点 F 或 G 来完成协作转发. 没有收到数据的 E 不会发送 ACK, 而协作节点 F 或 G, 在限定时间内如果没有收到 E 的 ACK (Acknowledgement), 便开始以“回退竞争”的方式发送  $F\_ACK$  (Failure acknowledgement), 请求替代 E 进行协作转发. 为了避免冲突, 节点在回退的同时侦听信道, 一旦有新的协作节点胜出, 其它协作节点便放弃发送自己的 ACK. 假设胜出的是 G, G 将会完成下一跳的转发任务. 对于 B, 如果在限定时间内没有收到 ACK 或者  $F\_ACK$ , 便开始重发数据. 在协作转发过程当中引入参数  $\eta$  ( $0 < \eta < 100$ ),  $\eta\%$  的数据由簇首的协作转发节点进行转发,  $1-\eta\%$  的数据由簇首进行转发, 从而大大的减轻了簇首的工作负担, 节省了簇首的能量消耗.

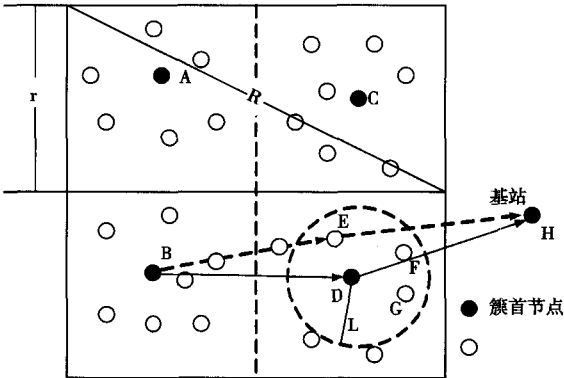


图 3 邻居节点协作转发示意图

在分簇路由中, 簇首在一个簇中担任着非常重要的角色, 一旦簇首失效而同时又没有新的簇首及时替补, 会导致传输数据的丢失. MCC 路由协议在数据传输时, 采用了邻居节点协作机制, 同时在选取协作节点的过程中考虑了节点的剩余能量, 不仅提高了可靠性, 还大大节省了簇首的能量消耗, 延长了整个网络的生命周期.

4 仿真与实验结果分析

为了验证本文协议的有效性, 在 NS2 仿真环境下, 对 100 个节点网络分析比较 GAF、MCC 路由协议在簇首节点能量消耗、网络寿命、网络延迟等方面

的性能.

在  $100m \times 100m$  的区域内随机部署 101 个传感器节点 (包括基站). 在无线传感器网络中, 相对于数据无线发送接收来说, 节点进行计算和储存的能耗基本可以忽略不计, 所以网络的生存时间主要取决于数据传输. 设定节点初始能量为 1J, 发送和接收能耗均为  $0.395nJ/bit$ , 空闲能耗为  $0.039nJ/bit$ . 为了将数据传输的更远, 放大电路功耗为  $100pJ/bit \cdot m^2$ , 通信距离为 40m, 仿真时间 1000s, 数据分组大小为 512byte, MAC 层协议为 IEEE 802.11.

4.1 簇首节点能量消耗

图 4 给出了簇首能量剩余率的比较, 在前 100 秒 MCC 协议簇首能量剩余率低于 GAF 协议, 这是因为 MCC 协议要完成簇首节点的移动控制, 产生了一些控制开销, 消耗了一定的能量. 但经过一定的时间后, 由于采取了簇首节点移动控制策略、邻居节点协作机制, 簇首能量的剩余率明显大于 GAF 协议. MCC 协议的簇首能量剩余率从总体上来说高于 GAF, 初期引起开销的操作平衡了全网的能量, 所以随着时间的推移, 优势更加明显.

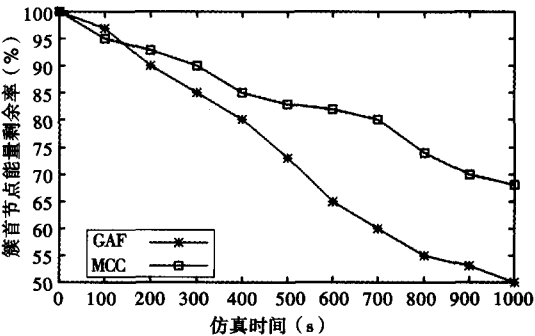


图 4 簇首能量剩余率与时间的关系

4.2 网络寿命

网络寿命是指网络中出现第一个死亡节点 (即耗尽能量的节点) 的网络生存时间.

从图 5 可知, 在网络寿命上 MCC 协议比 GAF 协议提高了将近 220 秒, MCC 协议出现死亡节点和全部节点死亡的时间都很晚, 表明 MCC 协议延长了网络寿命, 有效地平衡了网络能量和负载.

4.3 延迟性

图 6 显示了 GAF、MCC 路由协议在延迟方面的比较结果. 主要原因是 MCC 路由协议引入邻居节点协作机制, 在数据传输过程中簇首需要邻居节点进行协作将数据发送到 Sink 节点, 而 GAF 协

议直接将数据传输给 Sink 节点,因此 MCC 在总体上的延迟略高于 GAF 路由协议,但相差不大。

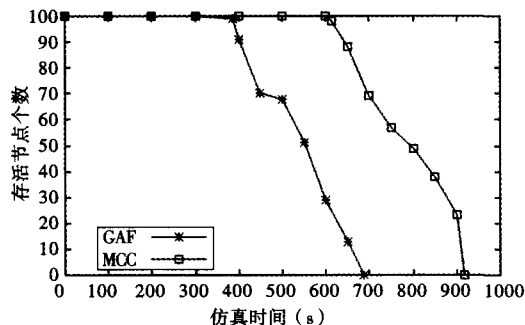


图 5 存活节点数与时间的关系

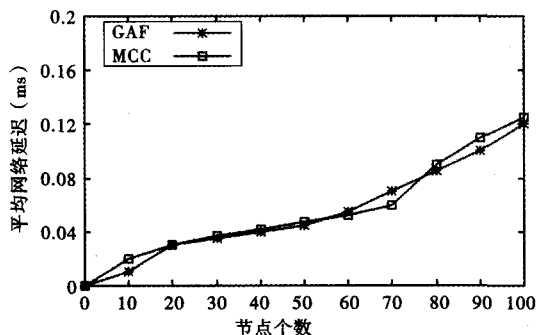


图 6 数据传输时延比较图

## 5 结束语

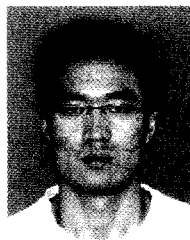
针对 WSN 最关键的能量受限问题,本文在研究异构传感器网络的基础上<sup>[7-8]</sup>,提出了一种新的分簇路由协议 MCC. 该协议引入簇首节点移动控制策略和节点协作转发机制,使得簇首负载和能耗更加均衡,提高了数据传输性能,降低了簇首的能量消耗,延长了网络生命周期,但是在如何降低全网开销、数据传输延迟,以及  $\eta$  最佳取值方面需要进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] 毛莺池,周晓峰,王志坚,等. 能量感知的无线传感器网络覆盖控制协议[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(10): 27-29.

- [2] 刘韬,谢储晖. 无线传感器网络能量均衡路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(10): 5-7.
- [3] Wang Y, Wang X, Agrawal D. Impact of heterogeneity on coverage and broadcast reachability in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the fifteenth International Conference on Compute Communications and Networks. Arlington, VA USA, 2006: 63-67.
- [4] Yarvis M, Kushalnagar N, Singh H, et al. Exploiting heterogeneity in sensor networks [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communication. Miami, FL, 2005: 878-890.
- [5] 杨文国,郭田德,赵彤. 异构监测传感器网络寿命最大化模型及其求解[J]. 计算机学报, 2007, 30(4): 532-538.
- [6] 温俊,蒋杰,方力,等. 异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法[J]. 软件学报, 2010, 21(9): 2304-2319.
- [7] Heinaelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660-670.
- [8] 蔡文郁,张美燕. 基于无线传感器网络可靠性的节点移动控制策略[J]. 计算机科学, 2009, 36(10A): 165-168.

## 作者简介:



王 镇 (1985—), 硕士. 研究方向为传感器网络。



刘学军 (1971—), 博士, 副教授. 研究方向包括数据库、传感器网络等。