

基于基站划分网格的无线传感器网络分簇算法

衣晓, 邓露, 刘瑜

(海军航空工程学院 信息融合技术研究所, 山东烟台 264001)

摘要: 提出了一种新的无线传感器网络分簇和数据汇聚方法, 即CABSM算法. 在CABSM算法中, 基站通过在网络覆盖区域相互垂直的两个方向发射不同功率半径的信号, 将整个网络划分成近似正方形的单元格, 每个单元格为一个簇. 一级簇头由单元内剩余能量最大的节点担任, 负责簇内数据收集和融合, 并通过簇间数据汇聚方法将处理数据发送给二级簇头. 最终由二级簇头将整个网络数据发送给基站. 仿真结果显示, 算法在网络生存时间上较低功耗自适应集簇分层型协议(LEACH)有更好的表现.

关键词: 无线传感器网络; 簇头; 分簇; 网络寿命

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

A clustering algorithm based on base station meshing for wireless sensor networks

YI Xiao, DENG Lu, LIU Yu

(Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: A new clustering and data-gathering method, named clustering algorithm based on base station meshing (CABSM), is presented. In this algorithm, clusters are formed by virtual grids, which are carved up by base station through transmitting discrete signals in two perpendicular directions. The first Level Cluster Head is chosen by the residual energy, which collects and fuses the data in a cluster, and transmits the result to the second Level Cluster Head based on the inter-cluster data-gathering method. Finally data of the entire network is sent to the base station by the second Level Cluster Head. Simulation result shows that this method provides longer network lifetime than that of low energy adaptive clustering hierarchy (LEACH).

Key words: wireless sensor network; cluster heads; clustering; network lifetime

1 引言(Introduction)

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是由布撒在被监测区域内的大量廉价的传感器节点以自组织形式构成的网络, 其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域里被监测对象的信息, 并发送给观察者^[1]. 由于网络节点能量有限, 且不易补充, 所以节能是WSN研究的主要技术之一. 为平衡网络节点能耗负载, 延长网络寿命, MIT的Chandrakasan等人为WSN设计了一种较为成熟的分簇算法——LEACH算法^[2]. 算法要求在保证网络连通和覆盖的基础上, 通过选取网络中的某些节点作为骨干节点, 负责网络其余节点管理及数据的收集和转发, 控制其他节点通信模块的开关, 减少簇间和簇内节点通信的干扰, 简化路由, 提高网络的能量利用率和网络的通信效率. 在LEACH算法的基础上, 设计者针对LEACH簇头选取算法和数据传输算法提出

DCHS^[3], HEED^[4], TEEN^[5], APTEEN^[6], PEGASIS^[7]等改进算法. GAF^[8]是针对ad hoc网络提出的一种基于网格划分的分簇算法. 在该算法中, 目标监测区域被划分成不同的单元格, 节点按照自己的位置信息被划入相应的单元格, 这种网格划分的思想为无线传感器网络分簇机制提供了新的思路. 通过同样的方法, DAEA^[9]提出了基于网格划分的无线传感器网络分簇算法. 这两种算法执行的前提是节点必须知道自己的地理位置信息和整个目标监测区域的地理位置信息. GAF只考虑了网络的连通性, 而忽略了网络的覆盖要求; DAEA在全局簇头选取时, 引入过多的限制条件增加了全局簇头选取算法的复杂度, 从而增加网络的能耗负载. 无论是通过GPS或定位算法获知节点的位置信息都将增加网络的硬件成本和能耗开支. 文献[10-11]提出基于基站划分的无线传感器网络分簇算法. 算法通过基站广播信号的方

法将整个目标监测区域按到基站距离的远近划分成不同的级. 在文献[10]中, 不同级区域内的节点成为簇头的概率不同, 距离基站越近的级, 其区域内的节点成为簇头的概率越大. 在完成簇头选取后, 算法再依据LEACH的成簇思想形成簇, 并建立以距离基站最近的簇头为根节点的簇头路由树. 在文献[11]中, 网络按划分的级成簇, 即处于同一级区域的节点构成一个簇, 同一簇内的节点再按PEGASIS的成簇思想形成一条单链, 簇头按离基站由远到近的顺序转发数据, 最终由离基站最近的簇头将网络数据发送给基站. 通过上述分析可以看出, 在这两种算法中, 距离基站较近的节点承担着较重的转发任务, 通信消耗的能量也相对较大, 导致节点间的通信能耗负载相对不均衡. 基于文献[8-9]网格分簇算法优点和文献[10-11]基站划分级数思想, 提出基于基站划分网格的无线传感器网络分簇算法. 算法在节点不获知自身地理位置信息的情况下, 首先采用基站划分网格和网格成簇的方法解决动态网络簇头数随时间变化, 簇频繁重构等问题; 其次, 算法在簇头选举时考虑了节点的剩余能量和其与基站的通信能耗; 最后, 算法通过簇间数据算法使网络始终只有一个节点与基站进行通信, 有效地减小了网络簇头与基站的通信能耗. 算法特点是: 对节点的硬件要求低, 节省了网络的成本; 簇头选取方法简单, 且在选取时考虑了网络节能和平衡节点负载; 通过簇间数据转发路径规划的方法进一步节省网络能耗, 从而使其适合应用于能量和计算能力有限的无线传感器网络.

2 网络模型与能耗模型(Network model and energy consumption model)

2.1 网络模型(Network model)

文献[12]对以下几种常用的部署方法进行了研究: 随机部署、规则部署以及计划部署. 随机部署是指部署后节点在部署区域内呈现为均匀分布; 规则部署是指置放的节点构成规则的拓扑结构, 比如格子; 而计划部署是指在监测现象的高发区其节点的部署密度也较高. 在计划部署中, 虽然节点在部署区域内呈非均匀分布, 然而在一个较小的范围内, 节点的分布仍可近似为均匀分布. 假设 N 个初始能量相同的同构的传感器节点随机的布置在区域为 $M \times M$ 的正方形区域内, 网络具有如下特性: 首先, 节点无需获知自身的地理位置信息, 部署后不随时间的推移而移动; 其次, 基站位于离传感器网络较远的区域, 网络中的节点能直接与基站通信; 最后, 基站在网络的初始化阶段可移动. 需要说明的是: 在网络模型特性假设中, 算法假设基站可移动并不是说基站随时间时刻移动的, 而是在网络的初始化阶段执行一定的初始化程序期间是需要移动的, 在网

络进入工作期间基站是固定不动. 实际上, 对于监测区域外围易到达的应用场景, 这一过程是容易做到的. 基站可以在固定部署前完成在目标监测区域某一方向上的若干次信息广播后移至目标监测区域的与此前方向垂直的另一个方向并固定部署. 这一过程也可以在不移动基站的情况下, 通过外部的其他发射设备完成.

2.2 能耗模型(Energy consumption model)

传感器节点能耗的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块, 且绝大部分能量是消耗数据的收发上. 因此, 本文在计算节点能耗时仅考虑通信模块的能耗. 节点发送 l bit信息的能耗为

$$E_{TX}(l, d) = \begin{cases} l \times E_{elec} + l\varepsilon_{fs}d^2, & d < d_0, \\ l \times E_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d > d_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中: E_{elec} 为发射/接收电路发射/接收单位比特信息的能耗, ε_{fs} , ε_{mp} 为发射放大器电路在单位面积内传播单位比特信号消耗的能量, $d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}$ 为一个门限距离, 当节点间的通信距离小于 d_0 时, 采用自由空间信道模型, 当节点间的通信距离大于等于 d_0 时, 采用多径衰落信道模型^[13]. 节点接收 l bit信息的能耗 $E_{RX}(l)$ 为

$$E_{RX}(l) = l \times E_{elec}. \quad (2)$$

簇头进行数据处理和融合时, 处理 l 比特数据, 需要的能量损耗为 E_{DA} .

$$E_{da-fu}(l) = l \times E_{DA}. \quad (3)$$

根据文献[2], 信道模型能量损耗参数: E_{elec} 取值为50 nj/bit, ε_{fs} 取值为10 pj/bit/m², ε_{mp} 取值为0.0013 pj/bit/m⁴, E_{DA} 取值为5 nj/bit/singal.

3 CABS算法(CABS algorithm)

3.1 网格划分阶段(Phase of network gridding)

算法的思想是网络在完成部署后, 利用基站在相互垂直的两个方向发射不同功率半径的广播信号将网络划分成多个近似于正方形的虚拟单元格. 虚拟单元格的面积近似相等, 每个单元格为一个簇. 划分的方法是: 基站首先在网络的一个方向(例如图1中位于网络的正右边)广播初始功率半径 r 的信号:

$$r = \frac{M}{n} + d_{toBS}. \quad (4)$$

基于网络的模型, n 为网络划分的级数, M 为网络的边长, d_{toBS} 表示基站到网络覆盖区域的边长中点的垂直距离. 信号传输半径 r 与发射功率 P_{tw} 的关系为

$$P_{rw} = \frac{P_{tw} \cdot Gt \cdot Gr \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot r^2 \cdot l}, \quad (5)$$

其中: P_{rw} 为节点通信模块的最小接收功率, Gt 为发

射天线增益, G_r 为接收天线增益, λ 为信号工作波长, l 为系统损耗因子, 系统损耗因子取决于传输损耗、接收机失配损耗、天线波束形状损耗等因素. 处于初始广播信息半径内的节点接收广播信号, 并被定义归属网络此方向的第1级. 网络在完成第1级划分后, 处于网络第1级覆盖区域内的节点关闭通信模块, 进入睡眠状态. 之后, 基站增加发射半径 r 进行第2次信号广播, 第2次信号广播的半径

$$r = \frac{2M}{n} + d_{\text{toBS}}$$

接收到第2次广播信号的节点被定义归属网络此方向的第2级, 并关闭自身的通信模块. 基站进行第 m 次广播的信号半径

$$r = m \cdot \frac{M}{n} + d_{\text{toBS}},$$

m 是一个小于 n 的整数. 处于半径

$$r > (n - 1) \cdot \frac{M}{n} + d_{\text{toBS}}$$

的节点被定义归属网络第 n 级, 图1中分成4级.

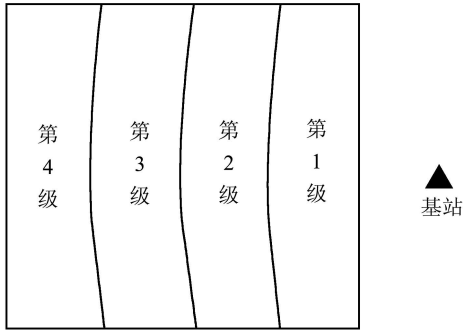


图 1 网络级数划分示意图

Fig. 1 Sketch map of network series

基站在目标监测区域的一个方向完成网络级划分后, 移动至与第1阶段划分方向垂直的另一个方向(如图1中基站位于网络的正上方). 同样地, 基站在此方向上将网络划分成与第1阶段划分相同的级数. 经过基站不同方向的两级划分后, 每个节点拥有归属于不同方向的两个级数值. 图1中网络被划分成4级 \times 4级, 见图2.

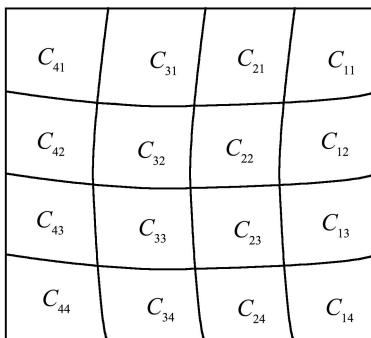


图 2 网络网格划分示意图

Fig. 2 Sketch map of network grids

完成网格划分后, 节点根据两次接收到的不同的基站信号确定自己所处的单元格, 基站广播的信息包括: 基站到网络的距离、广播的信号半径以及网络划分的级数等信息. 节点则根据接收的两次信息计算自己所处的单元格.

3.2 簇头选取阶段(Phase of cluster head selecting)

实际上CABSM算法的网络拓扑是一个3层的体系结构. 普通节点构建网络的底层, 每个单元格为一个簇, 单元格中选取的簇头为一级簇头, 一级簇头为网络的中层, 再从一级簇头中选取一个节点担任二级簇头, 二级簇头为网络的最高层. 因此网络中的簇头选取分为: 一级簇头选取和二级簇头选取两个阶段.

1) 一级簇头选取.

考虑一级簇头承担的任务为: 汇聚簇内信息并转发给二级簇头, 为网络内部通信, 因此, 在一级簇头选取时选取网格内剩余能量最大的节点担任网格内的一级簇头. 首先, 网格内节点进行信息交换, 交换的方法是网格内每个节点广播信息, 其余节点接收信息的方式进行信息交换. 而后, 剩余能量最大的节点的当选为簇头. 节点当选为簇头后广播结果信息, 广播信息包括节点ID、剩余能量、所处的单元格 C_{ij} 以及一个标明此信息为此单元格控制信息的头信息. 同一单元格的节点接收广播信息并向簇头回复一个同样的信息. 广播信息的半径不超过虚拟单元格 C_{ij} 对角线的距离.

2) 二级簇头选取.

二级簇头承担的主要任务为: 汇聚网络数据并转发给基站. 在二级簇头选举时考虑了节点的剩余能量 E_{residual} 和其与基站的通信能耗 E_{rx} . 显然, 选取 E_{residual} 较大, E_{rx} 较小的节点可以节约网络能耗, 并避免能量少的节点率先死亡. CABSM算法利用式(6)计算各个一级簇头的 Q 值, 并选取 Q 最大的一级簇头担任二级簇头.

$$Q = \frac{E_{\text{residual}}}{E_{\text{rx}}}. \quad (6)$$

3.3 数据传输阶段(Phase of data transmission)

依据网络的3层拓扑结构, 数据传输同样分为两个阶段: 簇内数据传输阶段和簇间传输阶段.

1) 簇内数据传输.

簇内数据传输的方法与LEACH一样, 簇头给簇内节点分配一个固定的数据传输时隙, 节点在簇头分配的时隙内将数据发送给簇头. 每一轮的最后一次数据传输, 数据采集节点将自己的剩余能量信息和采集数据一起发送给簇头, 簇头选择剩余能量最大的节点担当下一轮的簇头.

2) 簇间数据传输.

簇间数据汇聚是一级簇头的数据沿转发路径向二级簇头汇聚的过程. 由于网格内的一级簇头需要周期性轮换, 而周期性地簇头数据转发路径建立会消耗大量的网络能量. 考虑到目标监测区域在完成网格划分后, 网格的规模及网格内的节点是固定的, 规划网格间的数据转发路径相对容易, 一级簇头可以沿规划的网格间的路径转发数据. 依据目标监测区域划分的网格可以将整个网络定义为一个矩阵 A_{mm} .

$$A_{mm} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中: $m \times m$ 为网络中划分的网格数, 亦即网络中一级簇头的个数. 每一个元素代表一个网格, 假设二级簇头由 a_{ij} 中的节点担任, 则数据在簇间的转发路径如图3所示.

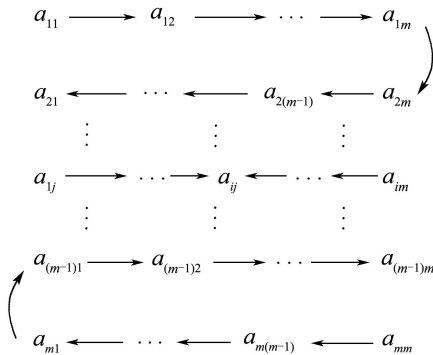


图3 一级簇头数据汇聚模型

Fig. 3 Data gather model of 1st Level Cluster Head

簇间数据汇聚的具体过程是: 在一级簇头完成簇内数据收集和融合后, 二级簇头向转发路径上两端的一级簇头发送数据汇聚请求, 请求信息包括二级簇头的ID、请求信息和一个标明此信息为控制信息的头信息. 路径上两端的一级簇头接收到请求信息后, 沿图3所示的路径转发数据, 中间节点在转发数据前执行融合操作, 最终由二级簇头将结果数据发送给基站.

需要说明的是: 当 m 为奇数时, 采用图3的数据汇聚方式; 当 m 为偶数时, 采用图3中前 $m - 1$ 行的数据汇聚方式. 算法的执行过程是周期性的. 每轮循环包括: 簇头选取阶段和数据传输阶段, 在完成数据传输后, 进行下一轮簇头选取和数据传输.

3.4 CABSMM算法流程图(Flow chart of CABSMM)

CABSMM算法流程如图4所示.

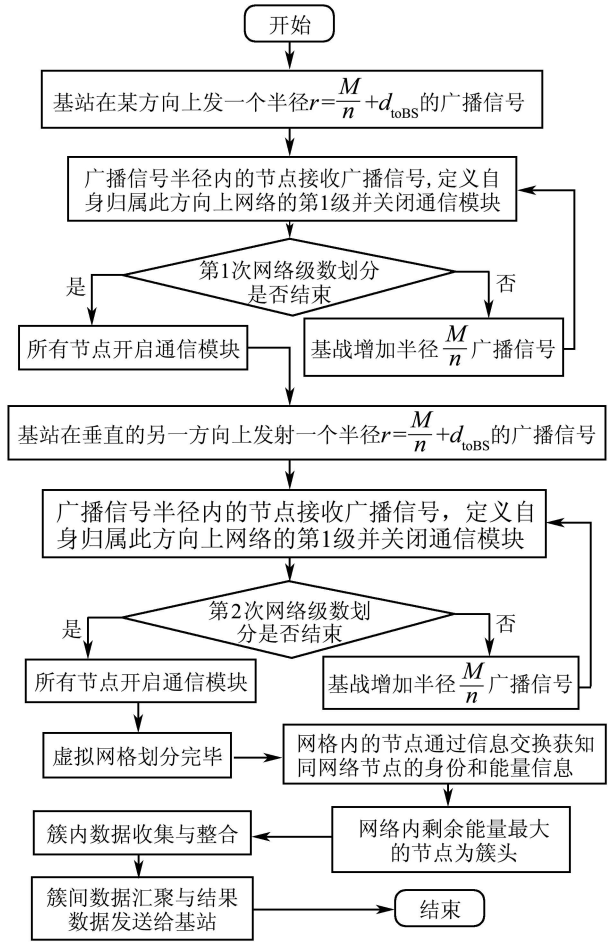


图4 CABSMM算法流程图

Fig. 4 Flow chart of CABSMM

4 仿真与性能分析(Simulation and performance analysis)

4.1 仿真参数设置(Simulation setting)

为测试CABSMM的性能, 本节以MATLAB为仿真平台, 对CABSMM进行了仿真实验, 并与LEACH进行了性能比较. 为不失一般性, 本章在设置仿真环境参数时, 参考LEACH的仿真参数设置, 具体参数设置如下: 在 $M \times M$ 的网络范围内随机分布 N 个同构的节点, 基站位置为 $(M/2, 3M/2)$, 节点的初始能量为 $0.5J$, 节点通信的能耗参数如第2.2节所述. 每个数据包的大小固定为 4000 bit , 控制包的大小为 100 bit . 当节点的能量等于零时, 定义节点死亡.

目前, 网络寿命的定义通常可以分为3种: 第1种是定义网络开始运行到网络第一节点死亡的时间跨度为网络寿命; 第2种是定义网络开始运行到网络中有一半节点死亡的时间跨度为网络寿命; 第3种是定义网络开始运行到网络所有节点死亡的时间跨度为网络寿命. 本文中的网络寿命采用第一种定义方式.

4.2 仿真结果分析(Evaluation of performance)

1) 网络存活节点数与网络运行时间的关系.

图5是在 $M = 100\text{ m}$, $N = 100$ 时, 当 n 取 2, 3, 4 时, 即网络被划分成 4, 9, 16 个网格时, 仿真得到的 LEACH 和 CABS M 网络存活节点数与网络时间之间的关系图。

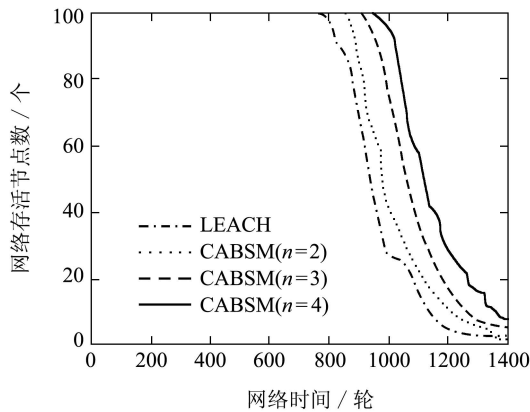


图 5 网络存活节点与网络运行时间关系

Fig. 5 Simulation results between living nodes and network lifetime

从图中可以看出, 在监测区域被划分成 4, 9, 16 个网络时, CABS M 在网络寿命上相比于 LEACH 有较好的表现, 并随 n 取值的增加而表现的越好。当 n 取 10, 即网络被划分成 100 个网格时, 如果网络节点均匀分布, 则 CABS M 与 PEGASIS 一样, 网络中的所有节点将构成一条单链。

2) 网络时间与网络通信能耗的关系。

图6是在 $M = 100\text{ m}$, $N = 100$ 时, 当 n 取 2, 3, 4 时, 即网络被划分成 4, 9, 16 个网格时, 仿真得到的 LEACH 和 CABS M 网络通信能耗与网络运行时间之间的关系图。从图中可以看出, 在监测区域被划分成 4, 9, 16 个网络时, CABS M 在网络通信能耗上相比于 LEACH 都有较好的表现, 且随着 n 取值的增加而表现的越节能。

3) 目标监测区域面积变化对网络寿命的影响。

图7是在目标监测区域面积从 $50 \times 50\text{ m}^2$ 到 $250 \times 250\text{ m}^2$, 网络节点 $N = 100$ 时, 经过多次仿真取均值得到的网络寿命和目标监测区域面积之间的关系图。从图7中可以看出, 在网络部署节点不变的情况下, 随着目标监测区域面积的增大, 虽然 CABS M 在网络寿命上较 LEACH 有更好的表现, 但 LEACH 和 CABS M 的网络寿命随着目标监测区域面积的增大都有较大程度的减小。因此, 在网络部署节点不变的情况下, CABS M 的网络寿命并不随着目标监测区域面积的增大而表现相对的越好。

4) 节点部署数量变化对网络寿命的影响。

图8是在节点部署数量从 50 到 250, 目标监测区域面积为 $100 \times 100\text{ m}^2$, 经过多次仿真取均值得到的网络寿命和目标监测区域面积部署节点数量之间的关系图。从图8中可以看出, 在目标监测区域面积固

定的情况下, LEACH 的网络寿命并没有随着节点部署数量的增加而增长。相比而言, 在目标监测区域面积固定的情况下, CABS M 的网络寿命不但随着节点部署数量的增加而增长, 且随着取值的增加而增长的越明显。即在目标监测区域面积固定的情况下, CABS M 较适用于目标监测区域节点部署量较大的网络。

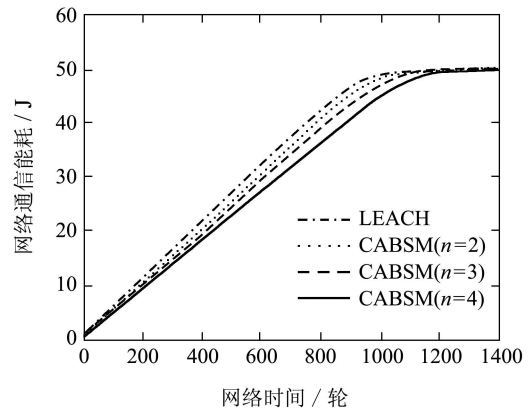


图 6 网络通信能耗与网络运行时间关系

Fig. 6 Simulation results between energy consumption of communication and network lifetime

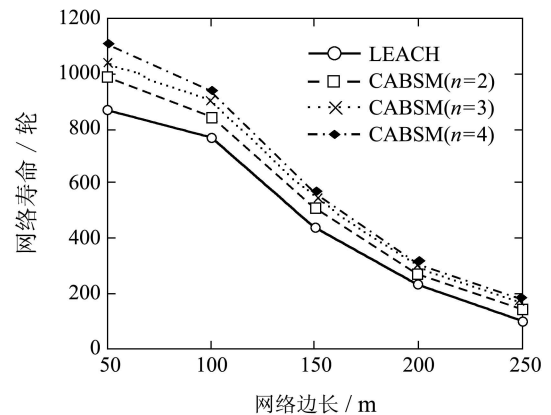


图 7 目标监测区域面积变化对网络寿命的影响

Fig. 7 Simulation results between objective monitoring of regional area and network lifetime

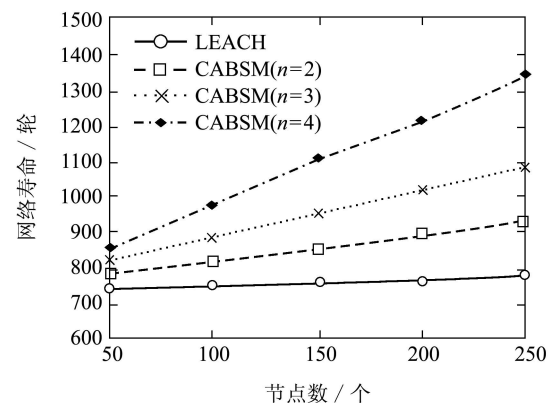


图 8 节点部署数量对网络寿命的影响

Fig. 8 Simulation results between number of deployment nodes and network lifetime

5) 节能原因分析.

相比于LEACH, CABS M在网络寿命和网络通信能耗上具有更好表现的原因是: ① 网络不需要频繁地进行簇构建, 从而减少了网络簇重构的额外能量开销; ② 采用簇头数据转发路径规划的方法, 可以减少簇头路径建立所要消耗的能量; ③ 网络始终只有一个簇头向基站发送信息, 节省了簇头与基站的通信能耗; 最后, 随着 n 取值的增大, 一级簇头间距离的平方和进一步减小, 降低了一级簇头转发数据的能耗. 相比于LEACH, CABS M较适用于目标监测区域节点部署量较大的网络的原因是: ① CABS M网络中始终只有一个节点与基站通信, 从而有效节约了网络与基站的通信能耗; ② 随着 n 取值的增大, 网络内部通信距离得到进一步减小, 网络内部通信能耗进一步减小; ③ 随着 n 取值的增大, CABS M网络中簇的负载更趋于平衡.

5 结论(Conclusions)

针对无线传感器网络特点, 本文提出了一种新的无线传感器网络分簇和数据汇聚方法, 即CABS M算法. 在CABS M算法中, 基站通过在网络覆盖区域相互垂直的两个方向(例如正东方向和正南方向)发射不同功率半径的信号, 将整个网络划分成不同近似正方形的单元格, 每个单元格为一个簇. 一级簇头由单元格内剩余能量最大的节点担任, 负责簇内数据收集和融合, 并通过簇间数据汇聚方法将处理数据发送给二级簇头. 最终由二级簇头将整个网络数据发送给基站. MATLAB环境下的仿真结果显示, 算法在网络生存时间上有较LEACH有更好的表现.

参考文献(References):

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 4 – 23.
(SUN Limin, LI Jianzhong, CHEN Yu, et al. *Wireless Sensor Network*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 4 – 23.)
- [2] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-Efficient communication protocol for wireless micro-sensor networks[C] // *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Maui: IEEE Computer Society Press, 2000: 3005 – 3014.
- [3] MANJESHWAR A, GRAWAL D P. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C] // *Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium*. San Francisco: IEEE Computer Society Press, 2001: 2009 – 2015.
- [4] MANJESHWAR A, AGRAWAL DP. APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks[C] // *Proceedings of the 2nd International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*. Florida: IEEE Computer Society Press, 2002: 195 – 202.
- [5] SZEWCZYK R, FERENCZ A. Energy implications of network sensor designs[J]. <http://www.cs.berkeley.edu/szewczyk/cs252/paper.pdf>.
- [6] KUBISCH M, KARL H, WOLISZ A, et al. Distributed algorithm for transmission power control in wireless sensor networks[C] // *IEEE Wireless Communications & Networking Conference*. New Orleans, Louisiana: IEEE Computer Society Press, 2003: 16 – 20.
- [7] LI L, HALPERN J Y, BAHL P, et al. Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks[C] // *Proceedings of Distributed Computing*. Republic of Indonesia: IEEE Computer Society Press, 2001: 264 – 273.
- [8] AL-KARAKI JN, UL-MUSTAFA R, KAMAL AE. Data aggregation in wireless sensor networks-exact and approximate algorithms[C] // *Proceedings of the IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*. Phoenix: IEEE Computer Society Press, 2004: 241 – 245.
- [9] XU Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing[C] // *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Rome, Italy: IEEE Computer Society Press, 2001: 70 – 84.
- [10] AMIR S Z, BAHMAN A. An energy-efficient protocol with static clustering for wireless sensor networks[J]. *International Journal of Electronics, Circuit and Systems*, 2007, 1(2): 78 – 81.
- [11] 陈楠, 徐塞虹. 无线传感器网络LEACH算法的综合改进[J]. <http://www.paper.edu.cn>.
(CHEN Nan, XU Saihong. Comprehensive improvement of LEACH algorithm for wireless sensor networks[J]. <http://www.paper.edu.cn>.)
- [12] TILAK S, ABU-GHAZALEH N, HEINZELMAN W. Infrastructure tradeoffs for sensor networks[C] // *Proceedings of the 1st International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. Atlanta: ACM Press, 2002: 49 – 57.
- [13] RAPPAPORT T. *Wireless Communications: Principle & Practice*[M]. Engle-wood Cliff, NJ: Prentice-Hall, 1996.

作者简介:

衣晓 (1961—), 男, 副教授, 曾做过博士后研究工作, 硕士生导师, 中国航空学会信息融合分会委员兼秘书长, 中国电子学会高级会员, 主要研究方向为多传感器信息融合、无线传感器网络等, E-mail: yxgx@sohu.com;

邓露 (1961—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制技术, E-mail: starprain332990024@126.com;

刘瑜 (1961—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络节点定位和跟踪技术, E-mail: liuyu77360132@126.com.