一种非均匀分簇的路由算法

何 超[1] 王 琨[2]
(西安电子科技大学物理与光电工程学院 西安 710071)[1] (西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)[2]

摘 要 在对经典的分簇路由算法进行分析的基础上,以延长网络生存时间为宗旨,从节点入簇、孤立节点的处理和簇间传输等方面进行设计,提出了一种非均匀分簇的路由算法。与EEUC和UCRA算法相比,该算法的节点能量利用率更高,有效延长了网络生存时间。

关键词 无线传感器网络,分簇路由算法,非均匀分簇,生存时间
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.011

Non-uniform Clustering Routing Algorithm

HE Chao[1] WANG Kun[2]
(School of Physics and Optoeletronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)[1]
(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)[2]

Abstract On the basis of analyzing the classical clustering routing algorithms, in order to prolong the network survival time, through designing nodes in a cluster, the treatment of isolated nodes and transmission between clusters and so on, a non-uniform clustering routing algorithm was proposed. Compares with EEUC and UCRA algorithm, the energy utilization of nodes of the proposed algorithm is higher, and the network survival time is obviously increased.

Keywords Wireless sensor network, Clustering routing algorithm, Non-uniform clustering, Survival time

1 概述

无线传感器网络路由算法就是寻找无线网络节点数据传输路径的算法,一般分为平面路由算法和层次路由算法。层次路由算法也称分簇路由算法,就是在传感器节点比较多、地理环境比较复杂的处所将若干个节点分成一个簇,簇根据一定的规则选出一个簇头,每个簇中的成员把信息传递给簇头,再通过各个簇头之间的相互通信把信息传递到基站。常见的经典分簇算法有LEACH算法、RDCA算法等。下面对当前已有的路由算法进行简单介绍。

LEACH算法是一个非常经典的无线传感器网络分簇路由算法[1],很多分簇算法都是基于它进行改进而被提出的。LEACH算法产生的簇的大小和范围不定[2],容易造成节点能耗差别较大,不利于信息的传递和能量的节约;同时,簇头采取一跳的方式直接与基站通信,传输距离远,能量消耗大。为了弥补单跳算法在大规模网络中的不足,效果更好的多跳算法[3]被提出。随着人工智能的兴起,很多智能算法如遗传算法[4]、粒子群算法、蚁群算法等被运用到路由算法的簇头选举和簇间路径选择中,有效提高了网络的性能。

文献[5]提出了非均匀分簇算法(Energy-Efficient UnevenClustering,EEUC),其通过调节不同簇的规模来改善多跳路由产生的"热区"[6]问题。文献[7]采用非均匀分簇,利用蚁群算法进行簇间路由选择,有效均衡了节点的能量消耗,延长了网络生存时间。文献[8]提出了一种基于非均匀分簇的能量有效的无线传感网络路由算法(UCRA),它包括一种加权的非均匀分簇算法和簇间最小能耗多跳路由算法,但算法中有2个参数不能确定,不能确定最优取值。文献[9]提出了一种非均匀分区算法,使靠近基站的区的规模较小,在每个区内再分簇,采用3层网络结构,通过簇内单跳通信、簇首与区首单跳通信和区首间的多跳转发有效延长了网络生存时间,但选择区头和簇头会耗费不少能量,而该文献只考虑了通信能耗,实际应用可能还需改进 。路由算法的均匀分簇要求每个簇中节点数目必须相等;非均匀分簇不要求每个簇内节点数目相等,具体数目由算法设定或随机产生。为了延长网络生存时间,本文主要从节点入簇和簇间传输两方面考虑,设计了一种非均匀分簇的路由算法,称作BECA算法(Balanced Energy Clustering Algorithm)。该算法对节点入簇进行限制,使越靠近基站的簇覆盖面积越小,簇的数量越多,为靠近基站的节点转发数据预留更多能量,从而均衡了离基站不同距离的节点的能量消耗,同时对未能入簇的孤立节点进行了

到稿日期:2016-07-16 返修日期:2016-10-15 本文受国家自然科学基金(61101142)资助。
何 超(1990-),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:505722924@163.com;王 琨(1974-),男,博士,副教授,主要研究方向为网络与系统安全。

妥善处理，簇间采用多跳传输，通过其他簇头的中转发送数据到基站。实验结果表明，该算法能显著延长网络的生存时间。

2　算法模型

无线传感器网络中各种路由算法的网络模型和能量模型基本都是按照经典的模型结构来设计的，目前已有算法基本都是如此。本文所设计的是一种非均匀分簇的簇间多跳路由算法，其使用的多跳路由算法的模型借鉴了前人已有的研究，具体论述可参考文献[10]的相关模型；并假设各节点能从基站知道所有节点在整个网络环境中相对基站的坐标[8]，不考虑相邻节点采集的冗余数据的融合问题。

3　算法的设计

随机分簇会导致靠近基站的节点转发大量数据，使其能量消耗过大，不利于能量均衡，从而影响网络的生存时间。为了减少靠近基站的节点的“热区”效应，使靠近基站的簇和远离基站的簇的能量消耗尽量均衡，可以从增加靠近基站的簇的起始能量和减少簇内通信能量消耗两方面进行设计。由于网络规模较大时簇头无法直接发送数据到基站，而且传输距离较远时能耗呈几何增加，因此为了延长网络的生存时间，设计了一种簇间多跳传输方法。

3.1　簇头的选择

假设各节点的初始能量相同，节点成为簇头的概率为 0.1，簇头的选择方法与 LEACH 算法一致，过程如下：

(1)网络中能量没有耗尽的所有节点随机产生一个(0,1)之间的数，同时产生一个公式 $T(n)$：

$$T(n)=\begin{cases}\dfrac{p}{1-p(r \bmod \frac{1}{p})}, & N\in G\\ 0, & N\notin G\end{cases} \tag{1}$$

其中，p 是节点成为簇头的比例，为 0.1；r 为当前的轮数；G 为还没有被选中担任过簇头的节点的集合。

各个节点比较自己的随机数和 $T(n)$的大小，如果随机数小于 $T(n)$，则以广播的方式向周围节点宣布自己成为簇头。

(2)为了均衡节点能量，每次重新选择簇头时不再选择之前已经担任过簇头的节点。

(3)重复步骤(1)、步骤(2)的过程进行 10 次分簇后，所有节点基本都已成过簇头，下一轮再次分簇时，取消对已经担任过簇头的节点不能再被选为簇头的限制，所有节点都可以被选为簇头，从步骤(1)开始重新执行。

按此过程，每 10 次分簇为一个循环，直至所有节点的能量耗尽。

3.2　节点入簇的限制

由算法模型的条件可以计算出每个节点与基站的距离 $d(i)$。当所有簇头都选举出来后，该簇头 i 所允许加入的成员节点的数目 $m(i)$由式(2)决定。

$$m(i)=[d_{\max}/d(i)](1/p-1) \tag{2}$$

其中，$d_{\max}$表示簇头离基站最远的距离，p 是簇头占节点总数的概率。

设节点的最大通信距离为 $r_{\max}$，为了相邻簇头之间进行通信，同一个簇内成员节点离簇头的最大距离应为 $r_{\max}/2$，那么该簇头 i 所允许加入的成员节点离簇头的最大距离 $r(i)$由式(3)决定。

$$r(i)=[d(i)-d_{\min}+L/8](r_{\max}/2)/(d_{\max}-d_{\min}) \tag{3}$$

其中，$d_{\min}$表示簇头离基站最近的距离，L 表示网络仿真的正方形区域的边长。

簇头形成后，成员节点入簇时簇头 i 所允许加入的成员节点的数目不能超过 $m(i)$，簇头 i 所允许加入的成员节点离簇头的最大距离不能超过 $r(i)$。由此，簇头到基站的距离越近，该簇内允许加入的成员节点数目越多，所允许加入的成员节点离簇头的最大距离越小。

由此便可通过增加靠近基站的簇的起始能量和减少簇内通信能量消耗两方面来降低靠近基站的簇头先死亡的可能性，从而均衡不同的簇之间的能量消耗。

3.3　节点入簇的方法

(1)在确定簇头之后，簇头 i 向周围节点发送自己成为簇头的消息，接收到信息的节点便计算出自己与簇头 i 的距离。

(2)如果所计算的距离小于 $r(i)$，该节点就向距离符合的簇头发送入簇请求，簇头将其纳入备选成员节点的范围，然后根据簇成员数目限制选择离簇头 i 最近的前 $m(i)$个作为正式成员节点，如果候选成员节点数量小于 $m(i)$，则把所有候选成员节点作为正式成员节点，然后向正式成员节点发出准许入簇的信号，同时向落选的备选成员节点发出拒绝入簇的信号。

(3)落选的备选成员节点又向剩下的其他距离最近的簇头发送入簇请求，直到得到准许入簇的信号。

(4)落选的备选成员结点如果没有得到任何簇头准许入簇的信号，则成为孤立节点。孤立节点首先向数目不足 $m(i)$的距离最近的簇头发送入簇请求，如果未能找到符合条件的簇头，就向距离它最近的簇头发送入簇请求，如果还是未能入簇，就直接发送数据到基站。

节点入簇的过程如图 1 和图 2 所示，入簇后簇头要把孤立节点加入时隙分配方案的范围。如果簇头 i 的正式成员节点的数目不足 $m(i)$，且没有收到转发孤立节点的请求，则仍照常完成分簇。所有节点都入簇后，簇头根据将要接收的信息的节点数目确定时分多址分配方案。

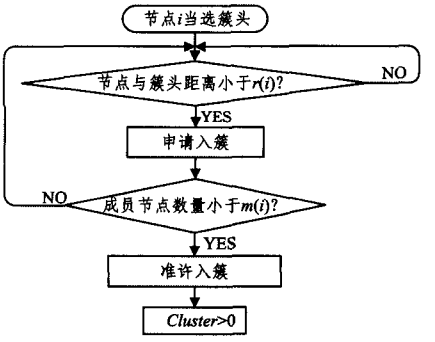

图 1　普通节点入簇的过程

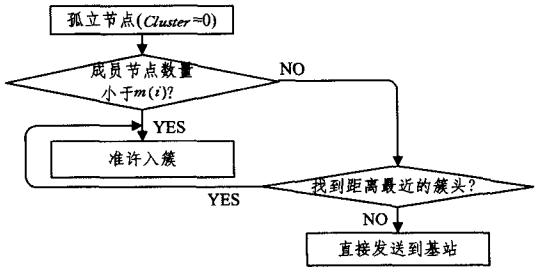

图2 孤立节点入簇的过程

3.4 簇内采集数据阶段

在完成簇头选择以及节点入簇之后，进入簇内采集数据阶段。假设簇内一共有 n 个节点(包括簇头在内)，那么一个簇分为 n 个时隙，每个时隙的时间相同。为了保证各个节点采集数据的情况一致，设定不同簇中的一个时隙的时间也相同，每个节点在属于自己的时隙内采集监测数据并将其发送给簇头，在其余时间则关闭无线电模块使其处于休眠状态以节省能量。

3.5 簇头间的多跳路由算法

当完成网络分簇后，各簇头向汇聚节点报告自己的距离和剩余能量，汇聚节点协助簇头确定簇间信息传输路径，并从多条路径中选出最优路径。下面提出一种完成簇间路径选择的算法。

分簇完成后，基站向所有节点发送信息，簇头 j 收到信息后计算出自己与基站的相对坐标，得到簇头 j 与基站两点的坐标所确定的直线 L_j，设簇头 j 的下一跳中转节点为簇头 i，则可计算出簇头 $i(i\neq j)$ 与直线 L_j 的垂直距离为 $l(i)$。若 $l(i)$ 越小，则簇头数据经过下一跳簇头中转再到基站的传输路径就越接近于直线，通信路径越短，传输能耗越小，越有利于延长网络的生存时间。簇头在自己的通信半径内搜索靠近基站一侧并且 $l(i)$ 值最小的簇头作为自己的下一跳转发节点，其他簇头节点也按此选择各自的下一跳转发节点，由此形成簇间传输路径。$l(i)$ 值的计算方法如下：以基站为原点(设为(0,0))，设簇头节点的坐标为 (a_1,b_1)，其他簇头节点的坐标为 (a_2,b_2)，(a_3,b_3)，(a_4,b_4)，(a_5,b_5)，…，(a_i,b_i)，则簇头和基站两点的坐标确定的直线方程为：

$$y-(b_1/a_1)x=0 \tag{4}$$

中转簇头节点坐标为 (a_i,b_i)，取直线上一点 $(0,0)$，(a_i,b_i) 和 $(0,0)$ 的距离为 $\sqrt{a_i^2+b_i^2}$，向量 (a_1,b_1) 的正交向量为 $(-b_1,a_1)$。设向量 (a_i,b_i) 和 $(-b_1,a_1)$ 的夹角为 α，簇头 (a_i,b_i) 到直线的距离为 $l(i)$，则：

$$\cos\alpha=\frac{l(i)}{\sqrt{a_i^2+b_i^2}}=\frac{a_1b_i-a_ib_1}{\sqrt{a_1^2+b_1^2}+\sqrt{a_i^2+b_i^2}} \tag{5}$$

距离 $l(i)$ 为：

$$l(i)=\frac{a_1b_i-a_ib_1}{\frac{\sqrt{a_1^2+b_1^2}}{\sqrt{a_i^2+b_i^2}}+1} \tag{6}$$

3.6 算法运行过程总结

所有节点按照上面的方法依次进行簇头选择，按照入簇限制进行入簇。簇内节点采集数据时，在每个时隙中只有分配到该时隙的簇内成员节点和其他簇的簇头可以与本簇的簇头通信；给簇中每个普通成员节点各分配一个时隙，簇头保留一个时隙用于采集自己的数据，并与接收到的各簇内节点和上一跳簇头发送的数据进行融合；然后根据簇头间的多跳路由算法找到下一跳节点，当监听到下一跳节点的信道处于空闲时，将信息发送至下一跳节点。待所有簇都完成这个过程后便完成了一轮算法的运行，然后重新开始运行新一轮的算法，如此循环往复。算法的运行过程如图3所示。

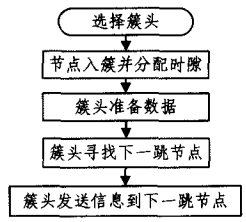

图3 算法的运行过程

4 算法的仿真

相关文献[11-12]表明，节点进行无线通信的能耗远大于休眠时的能耗，也远大于进行算法计算的能耗，因此本文的仿真只考虑节点收发数据和数据无线传输的能量消耗。

4.1 仿真环境

为了分析BECA算法的性能，选择UCRA算法和EEUC算法在MATLAB软件中进行仿真对比。仿真实验的环境为：网络中100个节点随机分布在一个200m×200m的正方形监测区域内，基站在(0,0)处。所有节点的初始能量都为1J，节点的通信半径为100m，数据包长度为4000bit。发送和接收电路的损耗[5]为 $E_{elec}=50\text{nJ/bit}$，$\varepsilon_{fs}=10\text{pJ/bit/m}^2$，$\varepsilon_{amp}=0.0013\text{pJ/bit/m}^4$。EEUC算法的参数 $R_c^0=100$，$c=0.5$。

4.2 结果与分析

图4—图6分别是3种算法的网络生存时间、网络剩余能量和网络存活节点的平均剩余能量的仿真结果对比图。

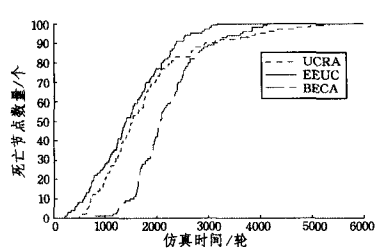

图4 3种算法的网络生存时间的仿真结果对比图

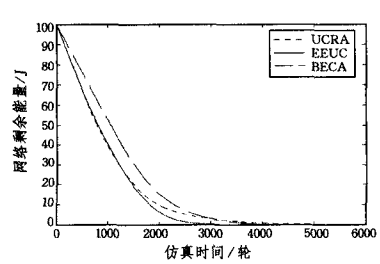

图5 3种算法的网络剩余能量的仿真结果对比图

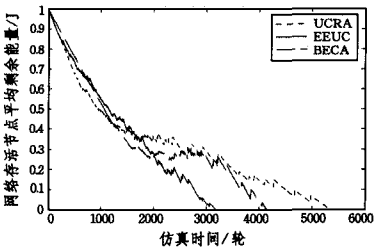

图 6　3 种算法的网络存活节点的平均剩余能量的仿真结果对比图

从图 4 可以看出，EEUC 算法、UCRA 算法和 BECA 算法分别在第 222 轮、第 501 轮和第 799 轮出现第 1 个死亡节点。本文设定从仿真开始到 70%的节点死亡的时间间隔为网络的生存时间。EEUC 算法、UCRA 算法和 BECA 算法分别在第 1781 轮、第 1925 轮和第 2401 轮出现 70%的死亡节点，可见 BECA 算法的网络生存时间长于 UCRA 算法和 EEUC 算法。

3 种算法采用了非均匀分簇和簇间多跳机制，适用于稍大规模的网络，但具体实现方法有所不同。BECA 算法各方面的仿真性能都好于其他两种算法，这主要是由于 BECA 算法较好地考虑了所有节点的能量均衡，减小了少部分节点头先死亡的可能性。从图 5 可以看出，BECA 算法的能量消耗更慢，能量使用更合理；同时从图 6 可以看出，BECA 算法的网络存活节点的平均剩余能量在网络的生存时间内大多数时间都高于其他两种算法，说明 BECA 算法更好地均衡了节点能量。

结束语　本文首先对无线传感器网络路由算法进行了介绍，对路由算法的研究现状进行了分析；然后从延长网络生存时间的角度，提出了一种非均匀分簇的多跳路由算法，该算法对节点入簇进行限制，对孤立节点进行妥善处理并设计了簇间转发路径，性能较 EEUC 算法和 UCRA 算法有了明显改善，平衡了各簇能量消耗，延长了网络生存时间。BECA 算法是一种集中式和分布式相结合的分簇算法，每个节点都要周期性地获取其他节点的位置信息，实际网络中的能量消耗比仿真的能量消耗更大。同时，本文还有一些不足，比如如何计算算法执行时所产生的能耗还有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 4(1): 660-670.

[2] LV T, ZHU Q X, ZHU Y Y. A wireless sensor network cluster with balanced energy consumption Algorithm[J]. Computer Application, 2012, 32(11): 3107-3111. (in Chinese)
吕涛，朱清新，朱玉玉. 一种能耗均衡的无线传感器网络分簇算法[J]. 计算机应用，2012，32(11)：3107-3111.

[3] LU L F, YAN J G. Optimization design of routing protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Simulation, 2010, 27(12): 125-128. (in Chinese)
陆立芳，闫建国. 无线传感器网络路由协议的优化设计[J]. 计算机仿真，2010，27(12)：125-128.

[4] NOYOUZI A, BABANIR F S, ZAIM A H. A new clustering protocol for wireless sensor networks using genetic algorithm approach[J]. Wireless Sensor Network, 2011, 3(11): 362-370.

[5] LI C F, CHEN G H, WU J, et al. A wireless sensor based on non-uniform clustering computer network routing protocol[J]. Chinese Journal of Computer, 2007, 30(1): 27-36. (in Chinese)
李成法，陈贵海，吴杰，等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报，2007，30(1)：27-36.

[6] SORO S, HEINZELMAN W. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clusterg[C]// Proceedings of the 5th International Workshop on Algorithms for Wireless, Moile, Ad Hoc and Sensor Networks. Denver, CO, 2005.

[7] ZHANG R B, CAO J F. Non uniform clustering wireless sensor networks using ant colony optimization Algorithms [J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2010, 44(6): 33-38. (in Chinese)
张荣博，曹建福. 利用蚁群优化的非均匀分簇无线传感器网络路由算法[J]. 西安交通大学学报，2010，44(6)：33-38.

[8] ZHANG R H, JIA Z P, CHENG H Y. Non uniform clustering and minimum energy consumption based on wireless sensor network routing algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(11): 1774-1778. (in Chinese)
张瑞华，贾智平，程合友. 基于非均匀分簇和最小能耗的无线传感网络路由算法[J]. 上海交通大学学报，2012，46(11)：1774-1778.

[9] SUN Y Q, PENG J, LIU T, et al. Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor Network [J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 198-206.

[10] ZHANG W M, LIAO F B. Improved heterogeneous clustering routing algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Sensing Technology, 2015, 28(5): 739-743. (in Chinese)
张文梅，廖福保. 改进的无线传感器网络非均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报，2015，28(5)：739-743.

[11] LARIOS D F, BARBANCHO J, RODRFGUEZ G, et al. Energy emcient wireless sensor network communications based on computational intelligent data fusion for environmental monitoring [J]. ET Communications, 2012, 6(14): 2189-2197.

[12] ESTRIN D. Wireless Sensor Networks Tutorial Part IV: Sensor network protocols[C]// Proc of the ACM Mobil Computing and NetWorking. New York: ACM, 2002: 1-5.