

异构无线传感器网络分簇路由机制^①

徐世武, 王 平

(福建师范大学 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福州 350007)

摘 要: 详细分析了经典 LEACH 分簇算法及其优缺点后, 在 LEACH 算法的基础上, 针对异构无线传感器网络, 即节点承担的角色不同, 节点传输数据率不同的研究背景下, 提出了一种 RDCR 分簇路由算法, 算法在选择簇首节点的时候, 充分考虑节点传输数据率不同, 通过适当的调整节点成为簇首的门限值, 降低高速率节点成为簇首的概率与频率, 从而延长了高速率节点的生存时间。通过 MATLAB 软件仿真表明, 相比于 LEACH 算法, RDCR 算法能够延长高速率节点的生存时间, 提高了整个网络的稳定期。

关键词: 无线传感器网络; 分簇路由协议; LEACH; RDCR; 性能分析

Clustering Routing Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Network

XU Shi-Wu, WANG Ping

(Key Laboratory of OptoElectronic Science and Technology for Medicine of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The paper analyzes the detail advantages and disadvantages of LEACH algorithm. A RDCR algorithm is proposed based on LEACH algorithm. It involves the heterogeneous Wireless Sensor Networks, i.e. different nodes play different roles and different nodes have different data transfer rates. In the choice of cluster head node, the novel algorithm considers the different data transfer rates among different nodes. Compared with LEACH algorithm, RDCR algorithm adjust the threshold of node to be cluster head. It reduces the probability and frequency of high rate nodes to be cluster head, which lengthen life of high rate nodes. According to MATLAB software, simulation results show that RDCR algorithm can lengthen longer life of high rate node and better the stability of the entire network than LEACH.

Key words: wireless sensor networks; clustering routing protocol; LEACH; RDCR; performance analysis

无线传感器网络因其固有的特性与能量的有限性, 设计一种节能高效的路由算法迫在眉睫^[1]。目前关于无线传感器网络的路由协议大概可以分为平面路由协议与分簇路由协议, 平面路由协议, 所有网络节点的地位是平等的, 拓扑性能差, 无法均衡整个网络节点的功耗, 容易导致部分节点过早死亡而影响整个网络的性能, 因此不太适用于无线传感器网络。而分簇路由机制, 将整个网络动态的分成不同的簇, 随机的选择簇首节点, 将功耗均衡的分配到网络中的每个节点, 非常适合于无线传感器网络的特征要求^[2]。在目前的分簇路由机制中, MIT 的几位作者提出的 LEACH 分簇算法^[3]应该也是比较经典的, 该算法几乎贯

穿了以后分簇路由机制的发展。DCHS 分簇^[4]算法则是在 LEACH 协议的基础上引入了节点当前的能量与初始能量来降低网络中低能量节点成为簇首节点的概率, 从而提高了整个网络的性能。还有根据节点初始能量异构, 提出的 EEHC 分簇算法^[5], 根据节点初始能量的不同等级, 分别采用不同的门限值来选择簇首。还有 MEAC 分簇协议^[6], 在选择簇首节点时, 充分考虑了节点初始能量与传输速率的不同。还有采用模糊逻辑数学原理, 根据节点的能量、分布情况提出的 CHEF 分簇算法^[7], 在同构网络中, 相比于 LEACH 算法, CHEF 性能提高了 22.7%。本文也是在 LEACH 算法的基础上, 根据节点传输速率不同的情况下, 对其

① 基金项目:福建省自然科学基金(2008J0211);福建省教育厅资助项目(JB09071,JB09076)

收稿时间:2011-06-14;收到修改稿时间:2011-07-07

进行改进与完善。

1 LEACH分簇路由算法分析

为了提高整个网络的生存时间，将功耗均衡的分配到网络中的每个节点，麻省理工学院的 Wendi Rabiner Heinzelman 等人提出了一种低功耗的自适应路由协议^[3]，LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) 协议。在 LEACH 协议中，每个传感器节点都有机会充当簇首节点，簇首节点的选择主要依据网络中所需要的簇首节点个数与到目前为止每个节点已经充当过簇首节点的次数来判定的。网络中每个节点在 0 到 1 之间随机选择 1 个数，如果选择的数小于规定阈值 T(n),则该节点就充当为簇首节点。T(n)的计算如式(1)所示。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \left(r \bmod \frac{1}{p} \right)} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中，p 表示在无线传感器网络中簇头节点所占的百分比，r 为当前循环次数，G 是在前 1/p 轮中未充当过簇首节点的集合。LEACH 算法通过设置 T(n) 值，以保证每个节点在 1/p 轮内都有机会充当一次簇首节点，从而平衡了节点的能量消耗。其中 1/p 轮为一个回合。在簇首节点选择完成后，簇首节点通过广播告知整个网络自己已经成为簇首节点，这时网络中的非簇首节点可以根据接收到的信号强度来决定自己要属于哪个簇，选择信号强度最强的源节点作为自己的簇首节点，并告知相应的簇首节点，自己已经成为簇内组员。簇形成后，簇首通过广播方式告知，并为簇内每一个节点分配一个 TDMA 通信时隙。只有在属于自己的时隙内，成员节点才可以向簇首节点发送数据，保证了簇中的通信不出现冲突。在簇首节点与簇内节点确定后，进入稳定阶段，簇内节点则将需要传输的数据，通过之前分配的时隙传输到簇首节点，以避免数据传输之间的干扰，簇首节点则将接收到的簇内节点的消息进行数据融合后，传输到基站，从而减少了整个网络的数据量与能耗。数据传输结束后，则整个网络将重新进入下一轮的簇首选择阶段。

2 基于节点异构的分簇路由算法设计

因为在大规模的无线传感器网络中，每个节点所

扮演的角色不近相同，因此它们在接受任务时节点的传输速率与频率不同，有些节点的传输速率快，频率高，相对能量消耗也快，有些节点的传输速率较慢，频率低，相对能量消耗也较慢，这时采用 LEACH 分簇协议，高速率节点必将较早死亡，从而影响整个网络的性能。因此我们应该根据实际情况，适当的降低高速率节点成为簇首节点的概率与频率。我们根据整个网络中节点传输速率的不同，我们将整个网络分成两类节点，一类传输速率比较高的，我们称之为高速率节点，另外一类速率相对较低的，我们称之为正常节点。在 LEACH 协议的基础上，我们提出了一种基于节点传输速率不同的分簇路由算法，RDCR 算法。

2.1 节点能量传输模型

节点接收和发送消息所消耗的能量遵循式(2)和(3)的规律^[3-7]。L 为传输信息的比特数，d 为节点之间距离。ε_{fs} 与 ε_{mp} 为我们使用的天线放大模型决定。

$$E_{Tx}(L, d) = \begin{cases} LE_{elec} + L\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ LE_{elec} + L\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E_{Rx}(k) = LE_{elec} \quad (3)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$$

2.2 簇首节点的选择

假设在一个面积 A 等于 M*M 平方米内随机均匀分布 N 个节点，包括两类节点，一类我们称之为正常节点，并假设在每轮中其平均传输速率为 V₀，令一类节点我们称之为高传输速率节点，并假设其在每轮中平均传输速率为 V₀(1+a)，a 为高速率节点传输速率大于正常节点传输速率的比例部分。假设高传输速率节点所占的比例为 m，从能量传输模型中，我们可以看出节点大部分能量消耗在节点发送消息上，而且成次方的关系，因此我们主要考虑节点发送消息消耗的能量对簇首节点选择的影响。假设传输每 bit 消息的能耗为 E₀，则我们可以得到在每轮时间 T₀ 内，整个网络节点总的传输能量消耗为

$$E_{Total} = (1-m) \cdot N \cdot V_0 \cdot T_0 \cdot E_0 + m \cdot N \cdot (1+a) \cdot V_0 \cdot T_0 \cdot E_0 \quad (4)$$

$$= V_0 \cdot T_0 \cdot E_0 \cdot N \cdot (1+ma)$$

从公式(4)中我们可以看出，相比于同构网络中，即所有节点都为正常节点情况下，每个节点的传输速

率都为 V_0 情况下,总的能量消耗 $V_0 \cdot T_0 \cdot E_0 \cdot N$,异构网络每轮消耗的能量是同构网络的 $(1+am)$ 倍,因此为了保持整个网络的性能,我们应该适当的提高高速率节点成为簇首节点每回合的轮数,降低其成为簇首节点的频率。相反我们应该降低正常速率节点成为簇首节点的每回合轮数,适当的提高正常速率节点成为簇首的频率,RDCR 算法簇首节点选择总体上为以下四步。

第一步:根据实际需要确定簇首节点比例,并保持其期望值 $E(CH)$ 不变。

第二步:判断节点的类型。

第三步:如果节点类型为高速率节点,我们将其每回合成为簇首节点的轮数从 LEACH 算法中的 $1/p$ 调整为 $(1+am)/p$,并调整其相应成为簇首节点的阈值。

第四步:如果节点类型为正常速率节点,我们将其每回合成为簇首节点的轮数从 LEACH 算法中的 $1/p$ 调整为 $\{(1+am)/p[1+(am)/(1-m)]\}$,相比于高速率节点的回合,我们称其为异构回合。并调整其相应成为簇首节点的阈值。

假设正常传输速率节点成为簇首节点的概率为 P_{nm} ,高传输速率节点成为簇首节点的概率为 P_{adv} ,在异构节点网络中,我们对 LEACH 分簇算法的 $T(n)$ 调整为式(5)与(6)所示。

$$T(S_{adv}) = \begin{cases} \frac{P_{adv}}{1 - P_{adv} \left(r \bmod \frac{1}{P_{adv}} \right)} & S_{nm} \in G_1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$T(S_{nm}) = \begin{cases} \frac{P_{nm}}{1 - P_{nm} \left(r \bmod \frac{1}{P_{nm}} \right)} & S_{nm} \in G_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{adv} = \frac{P}{1+am}, \quad P_{nm} = \frac{P}{1+am} \left(1 + \frac{am}{1-m} \right) \quad (7)$$

在公式(5)与(6)中, r 为当前循环轮数, G_1 是在前 $1/P_{adv}$ 轮中高速率节点未充当过簇首节点的集合。 G_2 是在前 $1/P_{nm}$ 轮中正常节点未充当过簇首节点的集合。 $T(S_{adv})$ 为 Nm 个高速率节点成为簇首节点的选择门限阈值。 $T(S_{nm})$ 为 $N(1-m)$ 个正常节点成为簇首节点的选择门限阈值。式(5)表明高速率节点在每 $1/P_{adv}$ 轮后都有机会充当为簇首节点。式(6)表明正常速率节点将在每 $1/P_{nm}$ 轮后都有机会充当为簇首节点,从式(5)与(6)中,我们可以看出正常速率节点成为

簇首节点的概率大于高速率节点,正常节点成为簇首节点的每一回合轮数要小于高速率节点,正常节点成为簇首的频率要高于高速率节点,因此有效的控制了高速率节点成为簇首节点的机会,延长了其寿命,控制力度主要取决于 $[1+(am)/(1-m)]$ 的大小。同时我们可以得到在异构回合中每一轮整个网络中节点成为簇首节点的期望 $E(CH)$,在式(8)中, $E(CH)$ 决定了每一轮中成为簇首节点个数,大小取决于节点总数 N 与实际所需簇首比例 P 两者的乘积。

$$\begin{aligned} E(CH) &= N \cdot (1-m) \cdot P_{nm} + N \cdot m \cdot P_{adv} \\ &= N \cdot (1-m) \cdot \frac{P}{1+am} \cdot \left(1 + \frac{am}{1-m} \right) + N \cdot m \cdot \frac{P}{1+am} \\ &= N \cdot P \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 簇内节点确定与数据传输阶段

由于本文旨在改进 LEACH 分簇路由算法簇首节点的选择阈值 $T(n)$,至于簇内节点的确定,以及数据传输阶段采用与 LEACH 相同的机制,我们不做进一步的改进,本文算法仍然按轮运行,每轮分为簇的建立阶段和数据通信阶段。

3 实验仿真与结果分析

我们采用的仿真软件为 MATLAB,100 个节点随机分布在 $100m \times 100m$ 的区域内,协调器位于中间位置 $(50,50)$,我们通过适当的调整 a 值(高速率节点传输速率大于正常节点传输速率的比例部分)与 m 值(高传输速率节点所占的比例)来比较两种算法的性能。簇首节点的融合率为 0.6, $E_{elec}=50nJ/bit$, $E_{fs}=10pJ/bit/m^2$, $E_{mp}=0.0013pJ/bit/m^4$ 。簇首节点总的比例 $P=0.1$ 。每个节点的初始能量 $E_{in}=0.5J$ 。正常节点传输速率 $V_0=100bit/s$ 。每轮运行时刻 $T_0=40s$ 。

评价一种分簇路由算法性能的好坏,大部分作者都采用网络中第一个节点死亡(FND),一半节点死亡(HNA),最后一个节点死亡(LND)三个指标来判断。因整个网络运行到剩下几个节点后,也没意义了,因此我们把最后一个节点死亡时刻改为 75% 节点死亡时刻来对比两种算法的性能。还有一个重要的性能指标是网络的稳定期,即从第一轮开始运行到第一个节点死亡时期,其实与 FND 是同一个定义。下面我们对两种算法进行详细比对分析,从表 1 我们可以看出,当 $a=1, m=0.3$ 时,相比于 LEACH 算法, RDCR 算法第一个节点死亡时刻延迟了 64 轮,一半节点死亡时刻延迟了 83 轮,75% 节点死亡时刻延迟了 89 轮。同样从表 2 到表 4 我们也可以看出,当 $a=1, m=0.5$ 时,当 $a=2, m=0.3$

时, 当 $a=3, m=0.3$ 时, 相比于 LEACH 算法, RDCR 算法第一个节点死亡时刻、一半节点死亡时刻与 75% 节点死亡时刻都有一定程度的延迟。

表 1 $a=1 \quad m=0.3$

	FND	HNA	75%
LEACH	533 轮	1078 轮	1172 轮
RDCR	597 轮	1161 轮	1261 轮

表 2 $a=1 \quad m=0.5$

	FND	HNA	75%
LEACH	479 轮	793 轮	1070 轮
RDCR	620 轮	956 轮	1202 轮

表 3 $a=2 \quad m=0.3$

	FND	HNA	75%
LEACH	401 轮	994 轮	1135 轮
RDCR	513 轮	1142 轮	1250 轮

表 4 $a=3 \quad m=0.3$

	FND	HNA	75%
LEACH	285 轮	976 轮	1082 轮
RDCR	420 轮	1158 轮	1227 轮

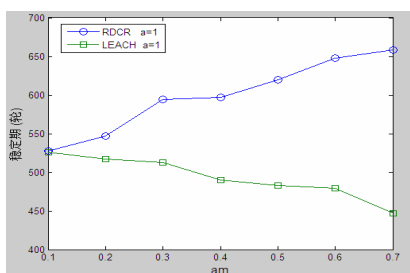


图 1 网络稳定期对比($a=1$)

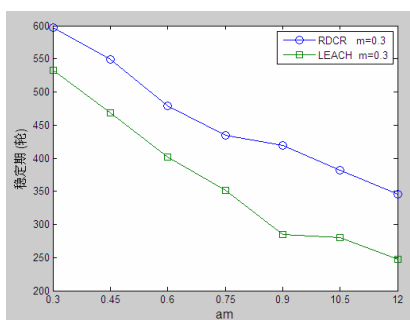


图 2 网络稳定期对比($m=0.3$)

从图 1 中, 横轴为 a 与 m 的乘积, 我们可以看出当 $a=1$ 时, 网络的稳定期随 am 变大或 m 值变大, RDCR 优势越来越明显, 即随着 m 值变大, RDCR 稳定期为上升趋势, 而 LEACH 却呈现下降趋势, LEACH 稳定性越来越差, 从图 2 中, 我们可以看出当 $m=0.3$ 时, 网络的稳定期随 am 变大, RDCR 优势越来越明显,

虽然两者的稳定期都下降了, 但 LEACH 下降速度要快 RDCR。从以上的分析中, 我们可以看出当 a 值相同情况下, m 值越大, 相比于 LEACH 算法, RDCR 算法优势越明显。当 m 值相同情况下, a 值越大, 相比于 LEACH 算法, RDCR 算法优势越明显。从图 1 与图 2 我们也可以看出相比于 a 值的变化, m 值变化对 RDCR 的影响更大, m 值越大, 即高速率节点比例越大, RDCR 性能越优越。

4 结语

无线传感器网络中节点的能量是有限的, 因此高效的路由机制对功耗受限的无线传感器网络是至关重要的, 分簇路由算法是目前无线传感器网络中路由机制研究的方向之一, 本文主要在经典的 LEACH 分簇算法的基础上, 结合网络节点的结构不同, 所承担的任务不同, 根据节点传输速率、频率不同, 传输数据量不同, 将整个网络中的节点分成两类节点, 通过适当的提高低速率节点成为簇首的概率, 提高低速率节点成为簇首节点的频率, 有效的延长了高速率节点的生存时间。仿真表明本文基于节点传输速率异构的分簇算法 RDCR, 相比于 LEACH 算法, 有效的延长了整个网络节点的生存时间, 提高了整个网络的性能。

参考文献

- 1 钟斌, 郭毅松, 李思敏. 一种新颖的 LEACH 簇头选举算法. 计算机系统应用, 2011, 20(2): 216-218.
- 2 乔俊峰, 刘三阳, 曹祥宇. 无线传感器网络中基于节点密度的簇算法. 计算机科学, 2009, 36(12): 46-48.
- 3 Heinzelman WB, Chandrakasan AP, Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro-sensor Networks. Wireless Communications. IEEE Trans.on, 2002, 1(4): 660-670.
- 4 Handy MJ, Haase M, Timmermann D. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection. Proc of the 4th IEEE Cone on Mobile and Wireless Communications Networks. IEEE Communications Society, 2002: 368-372.
- 5 Kumar D, Trilok C, Aseri R, Patel B. EEHC: Energy efficient heterogeneous clustered scheme for wireless sensor networks. Computer Communications, Elsevier, 2009: 662-667.
- 6 Shah GA, Akan OB, Bozyigit M. Multi-Event Adaptive Clustering (MEAC) Protocol for Heterogeneous Wireless Sensor Networks. Proc. 5th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MedHoc-Net 2006), June, 2006.
- 7 Kim JM, Park SH, Han YJ, Chung TM. CHEF: Cluster Head Election mechanism using Fuzzy logic in Wireless Sensor Networks. Proc. of ICACT, 2008: 654-659.