

一种新的基于能量消耗速率模型的分簇路由协议

罗四维 侯孟书 周益民

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

摘要 无线传感器网络中通常采用分簇路由协议来减少能耗,但仍然存在节点能量消耗快且不均匀的问题。鉴于经典的低功耗自适应集簇分层型协议 LEACH 的簇头选举过程中,没有考虑节点能量消耗速率和普通节点到 sink 节点距离的局限性,提出了一种新的分簇路由协议。仿真实验表明,新协议能够使节点能量均匀分布,降低节点能量消耗,延长传感器网络的生存周期。

关键词 无线传感器网络,分簇,路由协议,节能

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Novel Energy Dissipation Rate Model Based Clustering Routing Protocol

LUO Si-wei HOU Meng-shu ZHOU Yi-min

(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Using energy-efficient routing protocol, wireless sensor networks can save much energy, but there are still the problems of rapid and uneven energy consumption. LEACH, called low energy adaptive clustering hierarchy routing protocol, is one of the most classical routing protocols, which ignores both the rate of energy dissipation and the distance between normal node and sink node during the election of cluster header. Focusing on these limitations, a novel clustering routing protocol was proposed. Experimental results show that the new protocol makes the consumption of energy more balanced, decreases energy dissipation and extends the lifetime of sensor network.

Keywords Wireless sensor network, Clustering, Routing protocols, Energy conservation

1 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)由基站(base station, BS)、少量数据汇聚节点(sink node)和大量传感器节点(sensor node)组成^[1]。传感器节点由它携带的电池进行供电,存在着节点能量有限、节点部署之后难以进行及时能量补充等问题。

传感器节点内部由传感器模块、处理器模块、无线通信模块以及能量供应模块组成,能量消耗问题在前3个模块中均有涉及。D. Estrin^[2]提到,通常情况下在单个节点中,无线通信模块消耗了大部分的能量。因此,提出相应的节能路由协议,以减少通信过程中大量的能量消耗,成为研究人员关注的焦点。

Tack Jin Kwon^[3]首次提出通过分簇的方式来解决传感器网络中能量消耗的控制问题。W. B. Heinzelman^[4]将分簇的思想引入到无线传感器网络的路由协议中,以高效利用网络中节点有限的能量,并且使得节点能量的消耗更加均匀,从而延长整个网络的生存周期。

LEACH,即低功耗自适应集簇分层型协议^[4],是最早提出的基于分簇的无线传感器网络的路由协议。LEACH通过随机轮转的方式,在每一轮的开始阶段进行簇头的选举工作,

使得整个网络中节点的能量消耗能够随机、均匀地分布,达到延长网络生存周期的目的。在数据传输阶段,LEACH利用数据融合的技术,减少传输过程的数据量,节省通信过程的能量消耗。

簇头选举方面,LEACH中的每个节点通过随机函数产生一个0到1的随机数,如果该随机数小于已经定义好的阈值 $T(n)$,那么该节点就被选举为下一轮的簇头节点。阈值 $T(n)$ 的计算见式(1)。

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

式中, p 代表簇头节点占节点总数目的最佳比例, r 表示当前协议的运行轮数, G 是在最近的 $1/p$ 轮中未被选为簇头节点的集合。通过阈值公式 $T(n)$,可以保证每个节点在最近的 $1/p$ 轮中仅能有一次机会被选举为簇头节点。

M. J. Handy^[5]提出了一种簇头选举阶段考虑传感器节点剩余能量的路由协议。该协议在LEACH协议的基础上,针对簇头选举过程中存在的可能会选取能量较少的节点作为簇头的问题,将节点的剩余能量作为切入点,选举最适合的节点作为簇头节点。该协议提出了式(2)和式(3)两种改进的簇头选举方式。

到稿日期:2011-07-30 返修日期:2011-10-01 本文受国家自然科学基金(61073177)资助。

罗四维(1989—),男,博士生,主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络,E-mail:luosiwei422@gmail.com;侯孟书(1971—),男,博士后,副教授,主要研究方向为计算机网络、分布式系统、无线传感网络;周益民(1980—),男,博士,讲师,主要研究方向为视频图像压缩。

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})} \cdot \frac{E_{current}}{E_{max}}, & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (2)$$

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p}{1-p \cdot (r \bmod \frac{1}{p})} \left[\frac{E_{current}}{E_{max}} + (r \bmod \frac{1}{p}) \cdot \left(1 - \frac{E_{current}}{E_{max}} \right) \right], & n \in G \\ 0, & n \notin G \end{cases} \quad (3)$$

式中, $E_{current}$ 代表节点目前的剩余能量, E_{max} 代表节点的初始能量, r_s 表示某个节点连续未被选为簇头节点的轮数。簇头选举时考虑节点的剩余能量,在一定程度上能有效地利用传感器节点的有限能量,延长整个传感器网络的生存周期。但是该协议没有考虑簇头节点的分布情况。如果选出的簇头节点离 BS 较远,通信过程中的能量消耗就会急剧增加,导致过快消耗整个网络能量及缩短生存周期。

HEED^[6] 协议是一种能量有效的分布式分簇路由协议。该协议在簇头选举阶段重点考虑节点剩余能量,同时涉及节点度的问题。尽管该协议相比早前的协议能够更加有效地利用节点有限的能量,且适当增加了传感器网络的生存周期,但是它没有考虑簇头节点的分布问题。若簇头节点分布不均匀,那么簇头节点与普通节点的通信耗能必将急剧增加,同样会导致整个网络能耗增加,缩短网络生存周期。

EECS^[7] 协议在簇头选举过程考虑了节点的剩余能量,扩展了 LEACH 协议关于簇的形成算法,根据簇与 BS 的距离来动态构建簇,使簇的分布更加均匀。该协议能够使簇与 BS 的通信能耗均匀分布,减少不必要的能量消耗,延长网络的生存周期。但是该协议没有考虑节点能量的历史消耗情况。如果节点能量消耗速率较快,即使当前节点的剩余能量较多,随着协议的继续运行,该节点的自身能量储备也会急剧减少,导致过快消耗簇头节点能量,不能完成簇头节点的工作。所以,该协议在簇头节点推举过程中存在一定的选举局限性。

近年来,研究人员提出很多改进的算法。马玉刚等^[8] 提出一种基于固定分簇的簇头节点轮转改进协议,但其存在簇头节点范围有限、能量消耗不均匀的问题。彭铎等^[9] 提出一种限制簇规模的簇间多跳路由协议,但其未考虑节点的能量因素,在能量节省方面考虑欠周全。Hesham Abusaimh 等^[10] 提出一种簇头选举过程中考虑节能的基于 Zigbee 技术的改进协议,但该协议没有考虑簇头节点与 sink 节点的距离问题。Inbo Sim 等^[11] 针对实际情况提出一种簇头选举过程中考虑节点能量和当选为簇头节点的次数的改进协议,但其并未涉及节点的位置信息。

本文针对无线传感器网络路由协议中存在的能量消耗过快、网络生存周期较短的问题,提出一种基于能量消耗速率模型的分簇路由协议 EDRMC (Energy Dissipation Rate Model based Clustering routing protocol)。新协议在簇头选举的过程中综合考虑节点能量消耗速率和普通节点到 sink 节点的距离,达到了减少节点能量消耗、均匀传感器网络能量分布的目的。

2 EDRMC 协议

2.1 条件假设

根据无线传感器网络的应用场景,不失一般性,假设:

1) BS 位置固定,并且远离传感器节点组成的网络;

2) 传感器节点同构且能量有限;

3) 传感器节点一经部署位置即固定;

4) 传感器节点能量消耗速率稳定且固定。

基于以上 4 点假设,本文提出的新的路由协议更侧重于野生动物生活区域检测、恶劣地区环境检测等实际应用场景,同时上述 4 条假设在现实中也存在相当多的对应场景。

2.2 模拟环境的网络模型

沿用 W. B. Heinzelman^[12] 提出的网络模型,即图 1 所示的无线电能量消耗模型。无线电能量损耗参数 $E_{dec} = 50 \text{ nJ/bit}$, 并假设传输过程耗能 E_{Tx} 、接收过程耗能 E_{Rx} 参数取值与 E_{dec} 相同。根据传输距离的不同,设定一个距离阈值 d_0 。当传输距离小于 d_0 时,采用空闲信道模式;距离大于或等于 d_0 时,采用信道多路径模式^[13]。因此,当协议需要传输距离为 d 、数据包大小为 l 比特(bit)的消息时,无线电消耗的能量为

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} l \cdot E_{dec} + l \cdot E_{fs} \cdot d^2, & d < d_0 \\ l \cdot E_{dec} + l \cdot E_{mp} \cdot d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (4)$$

当节点接收数据包大小为 l bit 的消息时,需要消耗的能量为

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = l \cdot E_{dec} \quad (5)$$

式中, E_{fs} 和 E_{mp} 属于无线电的传输参数,且 $E_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$, $E_{mp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^2$ 。同时在数据的传输过程中,引入数据融合的概念,且数据融合参数 $E_{DA} = 5 \text{ nJ/bit/signal}$,将相邻节点检测到的冗余数据进行融合处理,减少数据的传输量,从而降低节点的能量消耗,延长网络的生存周期。

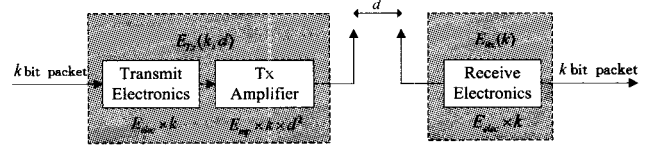


图1 无线电能量消耗模型

EDRMC 每一轮的运行包括 3 个步骤,即簇头的选举、簇的形成和数据的传输。EDRMC 第一轮运行过程与 LEACH 协议完全相同。从第二轮开始,每一轮在簇头选举阶段采用 EDRMC 协议提出的方法,簇的形成和数据传输阶段与 LEACH 协议相同。图 2 示出了新协议的时间序列。



图2 协议的时间序列图

2.3 协议分析

现有的簇头选举改进算法主要集中在节点剩余能量的多少。由于簇头节点要承担数据的融合以及到 sink 节点的传输任务,比普通节点要消耗更多的能量,因此要选择剩余能量多的节点作为下一轮的簇头。但仅通过节点剩余能量的多少来选举簇头节点也存在一些弊端。一方面,节点剩余能量较多,但是根据前面协议运行的情况发现,该节点能量消耗的速率快。相应地,在协议后续运行中,此类节点剩余能量偏少,会出现能量不足而难以完成数据融合及任务传输的情况,则在接下来的簇头选举过程中,这类节点就不能被选为簇头节点。另一方面,由于簇头节点与 sink 节点之间采用单跳网络,如果两者之间距离较远,那么节点在通信过程中的能量开

销将会加大,因此簇头选举过程需要考虑与 sink 节点的距离因素。

除此之外,通过对经典 LEACH 协议分析可知,尽管预先定义了簇头节点数目占总节点数目的最佳比例,但是每一轮选举出的簇头节点数目总是在最佳比例附近上下浮动,使得协议的稳定性很差。EDRMC 协议通过限制每一轮簇头节点的数目不超过已经定义的最佳比例数目,来提高协议运行的稳定性,减少簇头选举过程额外的能量消耗,节省节点能量,从而延长网络的生存周期。

2.4 协议描述

EDRMC 协议在簇头选举过程中,综合考虑节点能量消耗速率和普通节点到 sink 节点的距离两方面因素。它致力于降低单个节点的能量消耗,以期达到所获得的整个传感器网络的能耗分布更加均匀、延长网络生存周期的目的。EDRMC 协议从整体上可分为两个阶段。

第一个阶段与 LEACH 协议完全相同,在簇头选举方面依据阈值计算式(1)来选举簇头。因为所有节点是同构的,在协议的第一个阶段,每个节点拥有相同的初始能量,所以无需针对节点能量消耗速率以及节点到 sink 节点的距离的不同进行区别对待。

第二个阶段开始,采用新协议 EDRMC 来选举簇头节点。簇头选举过程采用式(6)给出的阈值计算式,即

T(n)_m = { [p / (1 - p * (r mod 1/p))] * [w1 * (1 - E_current / E_max) + w2 * 1/D], n in G; 0, n not in G }

式中,D 表示普通节点与 sink 节点的距离,w1 与 w2 是参数控制因子,并且 w1 + w2 = 1,p,r,E_current,E_max 所代表的意义与式(3)相同。从 T(n)_m 计算式中可以看出,新协议关于簇头选举阶段综合考虑了节点能量的消耗速率 w1 * (1 - E_current / E_max) 以及普通节点到 sink 节点的距离 w2 / D 两方面的因素,并通过 w1 以及 w2 两个因子来调整节点能量消耗速率与到 sink 节点距离的比例关系。

簇头节点选举过程结束之后,普通节点将根据距离远近加入距离最近的簇头节点并形成簇,然后进行数据传输。这两个阶段,协议的具体运行过程与 LEACH 协议相同。

3 仿真实验结果

利用 MATLAB 仿真工具对 EDRMC 协议进行仿真实验,并与经典协议 LEACH[4] 和现有的改进算法 LEACH-D[5]、HRDCS[14] 进行对比。实验环境配置: Pentium(R) Dual-Core CPU E2210 @2.20GHz, 2GB RAM, MATLAB R2010a, Windows 7/32bit。

3.1 参数列举

本文仿真实验所涉及的主要参数在表 1 中给出。其中,通过调整两个参数因子 w1 与 w2 的比例关系,可以逐步优化新协议的运行效率以及能量利用率。

表 1 试验相关的参数

参数类型	取值
实验区域	(0,100) × (0,100)
节点总数目 n	100
sink 节点位置	(50,150)
簇头节点最佳比例 p	0.05
节点初始能量 Emax	0.5 J
数据传输/接收耗能 Eelec	50 nJ/bit
信道空闲模式参数 Efs	10 pJ/bit/m²
信道多路径模式参数 Emp	0.0013 pJ/bit/m²
节点数据融合参数 EDA	5 nJ/bit
数据包长度 packetLength	4000 bit
控制包长度 ctrPacketLength	100 bit
参数因子 w1	0.2
参数因子 w2	0.8

3.2 仿真实验

由于传感器节点随机分布的特征,结果会呈现一定的分布。本文通过综合考虑和分析,全部选取有效数据进行比较。

实验 1 揭示了协议运行的轮数与剩余节点数目之间的关系。通过 100 次仿真实验,得出 EDRMC 与其余 3 种协议的性能对比图,如图 3 所示。由于数据量大,不能一一展现,在表 2 中只列举出部分实验数据。

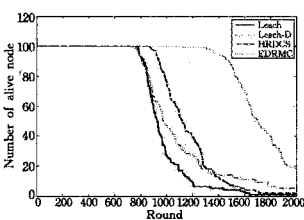


图 3 协议轮数与剩余节点数目的关系

表 2 协议运行的轮数与剩余节点数目之间的关系

Test	Alive Node				First Node Dead				Half Node Dead			
	LEACH	LEACH-D	HRDCS	EDRMC	LEACH	LEACH-D	HRDCS	EDRMC	LEACH	LEACH-D	HRDCS	EDRMC
1	1	9	3	25	754	736	874	1274	925	984	1125	1698
2	1	6	2	15	755	716	850	1228	945	949	1129	1747
3	1	9	3	19	754	739	857	1265	966	981	1130	1674
4	1	5	2	18	775	758	878	1303	930	984	1119	1700
5	2	6	3	21	783	676	892	1231	941	1000	1118	1750
6	1	10	1	21	761	731	814	1328	927	984	1136	1757
7	1	5	1	16	782	696	859	1148	942	990	1138	1745
8	1	8	2	25	760	759	830	1329	938	986	1110	1787
9	1	4	2	22	764	723	860	1320	935	988	1120	1769
10	1	9	2	21	772	769	856	1291	951	1000	1105	1771

表 2 中展示了实验过程中的 3 个性能对比参数,分别是协议运行最大轮数(本文取值为 2000 轮)时剩余节点的数目(Alive Node),第一个节点死亡时协议总的运行轮数(First

Node Dead,FND)和一半数目的节点死亡时协议总的运行轮数(Half Node Dead,HND)。结合图 3 和表 2 分析可知,EDRMC 与经典 LEACH 协议相比,在 FND 的时间上有

66.9%的提升,在 HND 的时间上有 81.3%的提升。与 LEACH-D 协议相比,在 FND 和 HND 上分别有 71.9%和 75.0%的提升。与 HRDCS 协议相比,分别有 46.6%和 51.4%的提升。这些明显的提升皆归功于 EDRMC 协议在簇头选举过程中综合考虑了节点能量的消耗速率以及普通节点到 sink 节点的距离问题,因此能够有效地延长整个网络的生存周期。

实验 2 揭示了传感器网络总的能量消耗与协议运行轮数之间的关系。通过 100 次仿真实验,得出新协议与其余 3 种协议在能量消耗方面的对比关系,如图 4 所示。同理,表 3 中

只列举出部分实验数据。

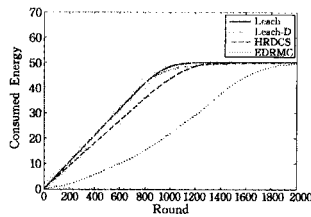


图 4 传感器网络总能量消耗与协议运行轮数的关系

表 3 传感器网络总的能量消耗与协议运行轮数之间的关系

Test	Consumed Energy sets 25				Round sets 1000			
	LEACH	LEACH-D	HRDCS	EDRMC	LEACH	LEACH-D	HRDCS	EDRMC
1	475	476	557	1038	48.89	47.35	43.88	23.49
2	477	474	558	1088	48.43	46.95	43.58	21.87
3	475	476	558	1109	48.48	47.76	43.83	21.23
4	479	484	560	1092	48.60	47.76	43.83	21.23
5	475	484	561	1123	48.99	47.01	43.76	20.24
6	478	480	559	1058	48.69	47.30	44.05	22.89
7	474	473	558	1076	48.94	47.48	43.93	22.71
8	482	472	558	1060	48.66	47.83	43.65	22.61
9	469	483	560	1097	48.81	47.30	43.87	21.48
10	475	478	559	1116	48.60	47.38	43.89	21.03

根据图 4 并结合表 3 中的数据分析可知,EDRMC 协议在传感器网络总能量消耗方面与经典 LEACH 协议和其余两种改进协议相比,有着大幅度的改进。下面将从传感器网络总体能量消耗为初始能量的一半时协议总的运行轮数和协议运行固定轮数时(本文取 1000 轮作为基准)整个传感器网络消耗的能量两个参照因素来进行详细的阐述。

随着协议的运行,当传感器网络消耗掉其初始能量的 50%时,可以发现 LEACH 协议运行 477 轮,LEACH-D 协议运行 478 轮,HRDCS 协议运行 559 轮,而 EDRMC 协议则运行 1082 轮。在传感器网络总的能量消耗方面,本文提出的 EDRMC 协议与其他 3 种协议相比,分别提升了 127.0%, 126.6%和 93.8%。结果说明,在传感器网络总体能量一定的情况下,EDRMC 协议能够运行更长的时间。

当 4 种协议均运行 1000 轮时,LEACH 协议消耗 48.6J 能量,LEACH-D 协议消耗 47.5J 能量,HRDCS 协议消耗 43.8J 能量,而 EDRMC 协议仅消耗 22.0J 能量。与其他 3 种协议相比,EDRMC 协议在能量消耗方面分别节省 121.7%、118.2%和 99.7%。因此,当协议运行固定轮数时,EDRMC 能够消耗更少的能量,获得明显的能量节省,相比已有的改进协议性能得到明显的提升。

结束语 本文针对无线传感器网络经典的分簇路由协议 LEACH 中簇头选举过程的不足,提出了一种新的簇头选举协议 EDRMC。大量的仿真测试表明,新协议能够更加有效地利用节点的能量,延长传感器网络生存周期。未来的工作,将考虑簇头选举过程中的簇头节点分布密度、覆盖范围和簇头轮转时间间隔等因素,进一步优化无线传感器网络分簇路由协议中单个节点能量的开销和利用效率。

参 考 文 献

[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,2005:1-3
[2] Estrin D, Sayeed A, Mani S. Wireless Sensor Networks[C]// the Eighth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(MobiCom). 2002(1):IV-5

[3] Kwon T, Gerla M. Clustering with power control[C]// Proc. MILCOM, Atlantic City, NJ, 1999(2)
[4] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient routing protocols for wireless micro-sensor networks[C]// Proc. 33rd Hawaii Int. Conf. System Sciences (HICSS). Maui, HI, 2000(2)
[5] Handy M J, Haase M, Timmermann D. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection [C]// IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, Stockholm, Sweden, Sept. 2002; 368-372
[6] Younis O, Fahmy S. HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad hoc Sensor Networks[J]. IEEE Trans. Mobile Computing, 2004(1): 366-379
[7] Ye M, Li C, Chen G, et al. EECS. An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks[C]// Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC), 24th IEEE International. 2005; 535-540
[8] 马玉刚,周群彪. 基于 LEACH 的无线传感器网络节能算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(6): 1514-1516
[9] 彭铎,张秋余,贾科军. 能量高效的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 计算机工程, 2009, 35(17): 123-125
[10] Abusaimh H, Yang Shuang-hua. Dynamic Cluster Head for Lifetime Efficiency in WSN[J]. International Journal of Automation and Computing, 2009, 6(1): 48-54
[11] Sim I, Choi K, Kwon K, et al. Energy Efficient Cluster header Selection Algorithm in WSN[C]// Proceedings of the International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, CISIS. 2009; 584-587
[12] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002(1): 660-670
[13] Rappaport T. Wireless Communications: Principles & Practice [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996
[14] Gao H, Li H, Cheng Y. A hybrid relative distance based cluster scheme for energy efficiency in wireless sensor networks[C]// Proc. IEEE GLOBECOM, Miami, Florida, Dec. 2010; 6-10