

WSN 中一种基于剩余能量级别的负载均衡路由协议

陈志奎,倪晶晶,姜国海,刘 旻
(大连理工大学 软件学院,辽宁 大连 116621)

摘 要:文中提出了一种 WSN 中基于剩余能量级别的负载均衡的分簇路由协议 RELCRP.在簇的建立阶段,RELCRP 采用了基于优先级的簇头选取策略,高优先级的节点能更早地广播簇头竞选通告,从而避免剩余能量低的节点成为簇头.簇间通信采用单跳—多跳混合传输模式,簇头节点根据剩余能量级别切换传输方式,以缓解“热点”问题.仿真结果表明:RELCRP 有效地均衡了网络中节点的能量消耗,延长了网络的生存时间.

关键词:无线传感器网络;分簇;能量均衡;剩余能量级别

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2010)12—0082—05

A Load-Balanced Residual Energy Level Based Routing Protocol in Wireless Sensor Networks

CHEN Zhi-kui, NI Jing-jing, JIANG Guo-hai, LIU Yang

(School of Software, Dalian University of Technology, Dalian 116621, China)

Abstract: A load-balanced residual energy level based clustering routing protocol named RELCRP was proposed. In the stage of cluster formation, it was introduced that a priority based cluster head selection strategy in which node with higher priority was supposed to broadcast cluster head election notice much earlier, while accordingly node with low residual energy was averted to become a cluster head. In inter-cluster communication, a hybrid transmission mode of single-multi-hop was adopted. The cluster head switched transmission mode according to residual energy level so as to alleviate the “hot pot” problem induced by multi-hop transmission. Simulation results indicated that RELCRP efficiently balanced the energy consumptions of all nodes and eventually extended network lifetime.

Key words: wireless sensor networks; clustering; energy balance; residual energy level

1 引言

传感器网络协议的首要设计目标就是高效地使用传感器节点有限的能量,最大化网络生存时间. LEACH 在一定程度上解决了传统平面多跳路由协议占据存储空间多、维护路由表项大等问题,但它没有考虑到节点的剩余能量,这有可能导致剩余能量很小的节点成为簇头节点,从而缩短了网络生命周期.其次,它可能会导致产生的簇头节点过于集中在网络中的某个区域,造成簇内通信耗能过多.最后,LEACH 协议在簇间通信时采用单跳通信,相比于距离基站较远的节点,距离基站较远的节点会更早地耗尽能量.

针对 LEACH 协议存在的问题,大多数分簇路

由协议的研究主要集中在簇头选取公式的改进、簇间多跳路由的选择及非均匀分簇策略的使用等方面^[1-5].在一定程度上延长了网络的生命周期,但没有解决网络负载均衡性的问题.

针对如上问题,文中提出了一种能耗均衡的基于剩余能量级别的分簇路由协议 RELCRP,重点解决了剩余能量较低的节点成为簇头节点、簇头分布不均匀和“热点”三方面的问题,旨在均衡网络中节点能耗,以延长网络生存时间.

2 系统模型

2.1 网络模型

假设 N 个传感器节点随机地分布在一个边长

为 M 的正方形区域内,基站位于传感器区域外.该传感网络还具有如下性质:

(1) 传感器节点与基站(BS)的位置部署后不再移动.

(2) 所有传感器节点的初始能量相同,且不能补充;基站的能量充足.

(3) 传感器节点可以通过基站发射的测试信号强度计算出自己到基站的距离.

(4) 节点可以根据接收者的距离来调节其无线发射功率.

2.2 能量模型

众所周知,感知和计算所需要的能量消耗比通信能量消耗低得多,因此文中仅考虑节点的通信能耗,采用文献[6]提出的能量模型. l 位数据传输 d 距离的发送能耗为:

$$E_t(l, d) = \begin{cases} E_{\text{elec}} * l + \epsilon_{fs} * d^2, & d \leq d_0 \\ E_{\text{elec}} * l + \epsilon_{\text{amp}} * d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

接收 l 比特数据所消耗的能量为:

$$E_r(l) = E_{\text{elec}} * l \quad (2)$$

簇头节点聚合 l 比特数据所消耗的能量为:

$$E_{\text{aggr}}(l) = E_{\text{DA}} * l \quad (3)$$

其中, E_{elec} 指运行和接收电路所需的能耗, E_{DA} 为每聚合 1 比特数据所消耗的能量, ϵ_{fs} 为采用自由空间模型时放大器的能耗系数, ϵ_{amp} 为采用多路衰减模型时放大器的能耗系数, d_0 为临界距离.

3 基于剩余能量级别的分簇路由协议

3.1 剩余能量级别 REL

为了衡量节点剩余能量之间的差异,文中引入了剩余能量级别.设节点的初始能量为 E_0 ,若将节点的初始能量划分为 m 个等级(即节点的初始能量级别为 m),那么每个等级的能量为 $E_{\text{plevel}} = E_0/m$.在网络初始化时,每个节点的剩余能量级别均为 m ,但随着节点能量的消耗,其剩余能量级别也随之下降,在某个时刻网络中节点 i 的剩余能量级别为

$$\text{REL}_{i\text{-cur}} = \lceil E_{i\text{-cur}}/E_{\text{plevel}} \rceil \quad (4)$$

其中, $E_{i\text{-cur}}$ 为节点 i 当前的剩余能量, $\lceil E_{i\text{-cur}}/E_{\text{plevel}} \rceil$ 表示大于等于 $E_{i\text{-cur}}/E_{\text{plevel}}$ 的最小整数.由式(4)可知,节点的剩余能量级别为 $[1, m]$ 之间的正整数.

在簇头选取阶段,RELCRP 根据节点的剩余能量级别确定优先级并最终确定节点发送簇头竞选通告需要等待的时延,若初始能量级别 m 的取值过

小,那么节点的剩余能量级别就不能合理地体现节点剩余能量之间的差异,在簇头选取的过程中可能会将剩余能量少的节点选取为簇头节点.在数据传输阶段时,簇头通过比较自身和邻居簇头的剩余能量级别切换传输方式,若取值过小,那么即使剩余能量差别很大的节点也处于同一剩余能量级别,此时簇间数据传输就相当于采用多跳传输模式,不能缓解“热点”问题.因此初始能量级别 m 的取值对 RELCRP 协议的性能有着十分重要的影响.

3.2 基于优先权的簇头选取策略

LEACH 协议中的簇头选取采用随机的方式,产生的簇头节点个数不确定,而且可能会集中在网络中的某个区域,簇头分布极不均匀,从而导致个别节点因距离簇头太远而过度消耗能量.此外,LEACH 协议在簇头选取的过程中没有考虑节点的剩余能量,这种随机选取簇头的方式不能避免让剩余能量较少的节点成为簇头节点的可能性.为了解决这两方面的问题,文中提出的簇头选取机制充分考虑节点的剩余能量级别这一因素,通过节点的优先级控制节点发送簇头竞选通告的时延,从而让局部区域内剩余能量级别较高的节点成为簇头节点;同时通过规范簇头的竞选广播半径使得簇头更为均匀合理地分布在感应区域中,从而延长整个网络的生命周期.

每个传感器节点维护 Timer_election 和 Timer_termination 两个计时器. Timer_election 计时器用于控制节点竞选簇头需等待的时延,剩余能量级别不同, Timer_election 的值也不同. Timer_termination 用于控制整个网络的簇头选取阶段的时间, Timer_termination 到时,则簇头选取阶段结束.簇头选取一开始,网络中的所有节点便分布式地初始化其计时器 Timer_termination 的值,然后根据自己的剩余能量级别按照式(5)确定其优先级.

$$P = \text{REL}_{i\text{-cur}}/\alpha \quad (5)$$

其中, $\text{REL}_{i\text{-cur}}$ 为节点 i 当前的剩余能量级别, α 是系统可调的参数.接着节点根据优先级确定其竞选簇头需要等待的时延 $t_{\text{elec}} = 1/P$,然后将计时器 Timer_election 设置为 t .节点的剩余能量级别越高,其优先级就越高,广播簇头竞选通告需要等待的时延越小.此处根据节点的剩余能量级别而非节点的剩余能量来确定簇头竞选时延主要有两方面的原因:首先,并不是只有剩余能量最多的节点才能竞选簇头,接近于最高剩余能量的节点也具有竞选簇头的机会;其次采用剩余能量级别确定竞选时延减少了频

繁的计算和更新,同时由于剩余能量级别为正整数,Timer_election 的值更便于维护。

若节点的簇头竞争计时器 Timer_election 到期且该节点还没有接收到周围其他节点发送的簇头竞选通告,那么该节点将自己的状态更改为 cluster_head,并以半径 r 广播簇头竞选通告,簇头竞选通告中包括簇头节点的标识、簇头节点的剩余能量以及簇头到基站的距离。在该节点广播半径内的其他节点不再发送簇头竞选通告。为了产生合理的簇头个数,此处簇头竞选广播半径 r 采用文献[7]中提出的值:

$$r = \lambda * \sqrt{A/(K * \pi)} \quad (6)$$

其中, A 为整个传感区域的面积, K 为簇头节点的个数, λ 为大于 1 的距离修正系数。

若节点的簇头竞争计时器 Timer_election 尚未到期,而节点接收到了周围其他节点发送的簇头竞选通告,则表示其通信范围内存在剩余能量级别更高的节点担任簇头,此时该节点就将自己的状态更改为 cluster_member。每个成员节点维护一个候选最佳簇头集合。在 Timer_election 计时器到期之前,节点每收到一个簇头竞选通告,便将对应簇头的相关信息记录到该集合中。当 Timer_termination 计时器到期时,簇头选取阶段结束,网络进入簇的建立阶段。为了保证 Timer_termination 到期时,所有节点不是簇头节点就是成员节点,Timer_termination 计时器的值设置为 $t_{\text{ter}} = \frac{\alpha}{\min \text{REL}}$, minREL 的取值为 1。基于优先权的簇头选取策略保证了在以 r 为半径的圆内只有一个簇头节点,较为合理地将簇头节点分布在整个网络中。

3.3 簇的建立

簇的建立主要是成员节点选择最佳簇头并向其发送加入消息的过程。在 LEACH 协议中,每个成员节点选择距离自己最近的簇头加入,这种方法没有考虑到剩余能量较低的簇头节点的负载。因此,在 RELCRP 中引入了剩余能量作为成员节点选择最佳簇头的指标之一。若成员节点只接收到一个簇头竞选通告,那么该成员节点就向对应簇头发送加入消息。若成员节点收到不止一个簇头竞选通告,那么该节点根据候选最佳簇头集合中的信息,计算各个簇头对应的权重值,选择距离自己更近、剩余能量更多(即权重最小)的簇头作为最佳簇头,并向其发送加入消息。权重函数的定义如下:

$$w(N_k, C_i) = \frac{d(C_i, N_k)}{d_{\max}(C, N_k)} + 1 - \frac{E_{\text{res}}(C_i)}{E_{\max_{\text{res}}}(C)} \quad (7)$$

其中, N_k 是成员节点, C 为 N_k 接收到的簇头竞选通告对应的簇头的集合; $d(C_i, N_k)$ 为簇头集合 C 中簇头 C_i 到成员节点 N_k 的距离, $d_{\max}(C, N_k)$ 为簇头集合 C 中簇头到 N_k 的最大距离; $E_{\text{res}}(C_i)$ 为簇头集合 C 中簇头 C_i 的剩余能量, $E_{\max_{\text{res}}}(C)$ 为簇头集合 C 中簇头节点的最大剩余能量。加入剩余能量作为选择最佳簇头的指标有利于减轻剩余能量低的簇头的负担。

簇头每收到一个成员节点的加入消息,便向该成员节点发送确认消息,确认消息中包含该成员节点对应的时隙信息,成员节点收到该确认消息后进入休眠状态,只有在属于自己的时隙才向簇头发送数据。当所有的成员节点都加入到相应的簇之后,簇头节点广播路由消息,该路由消息包括簇头的身份标识,到基站的距离以及簇头的剩余能量级别。由于在簇头选取阶段,簇头广播竞选通告的半径被限定为 r ,为了使相邻的簇头之间能够相互通信,所以簇头广播路由消息的半径为 $2r$ 。每个簇头接收到其他簇头广播的路由消息后,将消息中的信息记录在邻居簇头集合中。当所有的簇头都广播了路由消息后,每个簇头都获得了邻居簇头的信息,簇的建立阶段结束。

3.4 数据传输

为了缓解“热点”问题,文中提出的簇间通信机制采用单跳和多跳相结合的方式。簇头节点判断自身和候选下一跳簇头的剩余能量级别,若簇头节点的剩余能量级别低于候选下一跳簇头的剩余能量级别,则簇头采用多跳的方式将数据发送到基站;否则,簇头通过单跳的方式直接将数据发送到基站。RELCRP 协议的数据传输阶段的基本过程如下:

① 簇内成员节点在各自分配的时隙将采集到的数据以单跳的方式发送到各自的簇头节点,在不属于自己的时隙,成员节点处于休眠状态。当完成簇内成员的数据收集后,簇头节点将接收到的数据进行融合以消除冗余。

② 簇头 C_i 根据式(8)从邻居簇头集合中选择出比自己距离基站更近,剩余能量级别更高的簇头节点,以确定其候选下一跳簇头集合 C_{LCH} :

$$C_{\text{LCH}} = \left\{ \begin{array}{l} C_j \mid d(C_j, BS) < d(C_i, BS) \\ \wedge d(C_i, C_j) < d(C_i, BS) \\ \wedge \text{REL}_{C_{\text{LCH}}} \geq \text{REL}_{C_{\text{cur}}} \end{array} \right\} \quad (8)$$

其中, $d(C_j, BS)$ 表示簇头 C_j 到基站的距离, $d(C_i, BS)$ 表示簇头 C_i 到基站的距离, $d(C_i, C_j)$ 表示簇头 C_i 到簇头 C_j 的距离, $REL_{C_{i,cur}}$ 为节点的剩余能量级别, $C_{i,CH}$ 为满足条件的簇头节点的集合。

③ 若 $C_{i,CH}$ 为空, 则代表邻居簇头节点到基站的距离都比 C_i 远, 或者到基站比 C_i 近的邻居簇头节点的剩余能量级别都比 C_i 低, 此时簇头 C_i 直接将数据发送给基站, 并跳转到⑥。

④ 若 $C_{i,CH}$ 中只有一个簇头节点 C_j , 那么 C_i 选择 C_j 作为下一跳路由节点, 并将数据转发给簇头 C_j . 簇头 C_j 成为簇头 C_i 并跳转到②。

⑤ 若 $C_{i,CH}$ 中不止一个簇头节点, 那么 C_i 从集合 $C_{i,CH}$ 中选择出使得转发数据通信开销

$$cost = d^2(C_i, C_j) + d^2(C_j, BS) \quad (9)$$

最小的簇头 C_j 作为下一跳路由节点, 并将数据转发给簇头 C_j , 以保证整个发送过程中通信开销的最小化. 簇头 C_j 成为簇头 C_i 并跳转到②。

⑥ 基站接收簇头 C_i 发送过来的数据。

通过比较簇头节点和邻居簇头节点之间剩余能量级别的差别, 簇头节点在单跳传输方式和多跳传输方式之间进行切换. 这种混合传输方式的使用有效地将簇头节点之间的剩余能量差控制在了一定的范围内. 相比于 LEACH 和 PEGASIS, RELCRP 将能耗更均匀地分布在簇头节点中, 避免了距离基站较近和较远节点的过早死亡, 从而延长了网络的生命周期。

4 仿真实验

文中采用 MATLAB 作为实验平台, 从网络生存时间和能量均衡因子这两个评价标准来对 LEACH 和 RELCRP 进行性能比较^[8]. 网络的生存时间定义为网络中第一个节点失效(当节点的剩余能量小于节点失效能量 E_{in} 时, 该节点被认为失效)的时间, 用轮数表示. 能量均衡因子指的是网络中节点的最大剩余能量与最小剩余能量的比值. 能量均衡因子越大, 代表网络中节点的能耗越不均。

鉴于初始能量级别 m 对 RELCRP 协议性能的影响, 首先, 测试初始能量级别 m 与网络生存时间之间的关系, 确定 m 的取值. 图 1 反映了初始能量级别 m 对网络生存时间的影响。

从图 1 中可知, 当 m 取值为 1 时, 网络的生存时间极小, 原因是所有节点的剩余能量级别均为 1, 基于优先级的簇头选取策略相当于随机选取, 并不能避免将剩余能量低的节点选为簇头节点, 这将导

致剩余能量低的节点过早死亡. 大量实验表明当 m 大于等于 10000 时, 网络的生存时间维持在 900~930 轮。

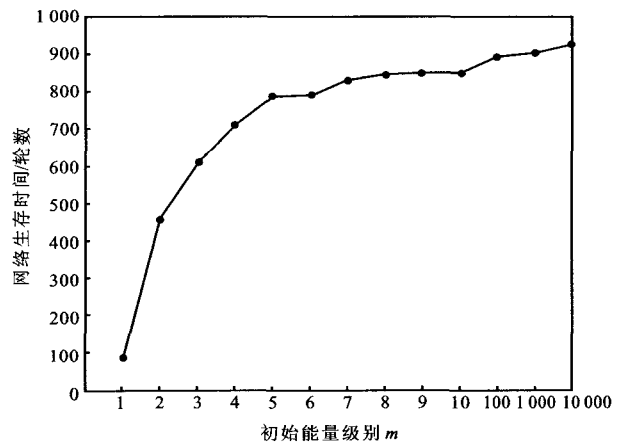


图1 初始能量级别与网络生存时间的关系

在相同的实验参数下, 对 LEACH 协议和 RELCRP 协议($m=10000$)分别独立运行 100 次, 得到的平均网络生存时间分别为 669 轮和 928 轮, 由此可知, 相比于 LEACH, RELCRP 的生存时间提高了约 38.7%。图 2 是在初始能量级别 $m=10000$ 的前提下, 采用 RELCRP 协议和 LEACH 协议时网络中存活节点个数的比较。

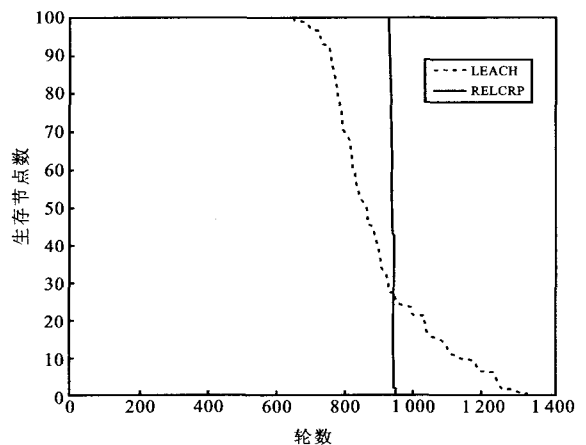


图2 LEACH与RELCRP网络生存时间的比较

可以看出, RELCRP 协议中所有节点的死亡时间非常接近, 第一个节点死亡后, 网络中的其它节点在短时间(约 25 轮)内相继死亡. 而 LEACH 协议中第一个节点死亡和最后一个节点死亡相差约 700 轮。

为了衡量两种协议对能耗均衡性的影响, 文中抽取了两协议在第 700 轮时各节点的剩余能量, 如图 3 所示。

可以看出, 采用 LEACH 协议时, 网络中节点

的能耗极不均衡,在第 700 轮时网络中已经出现失效,节点的最小剩余能量为 0.0001J,最大剩余能量为约 0.2J,能量均衡因子为 2000.采用 RELCRP 协议时,各个节点之间的剩余能量差不多,在 0.12J 上下波动,能量均衡因子为 1.086,原因是 RELCRP 考虑了节点剩余能量级别,平衡了簇内节点、簇头节点之间的能量消耗,从而达到了网络负载均衡和生命周期延长的目的.

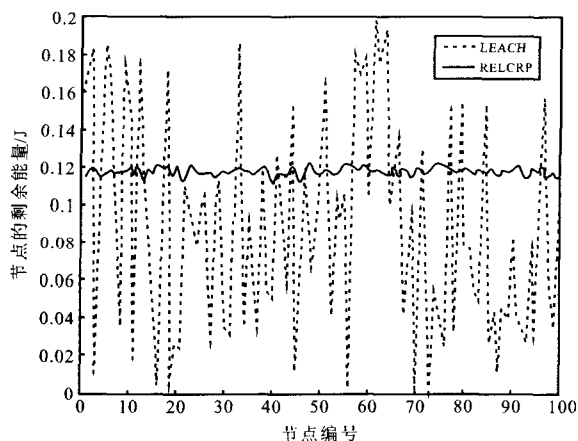


图3 LEACH 与 RELCRP 能量均衡性的比较

图 4 反映了采用 LEACH 协议和 RELCRP 协议时每轮结束后网络中节点的总能量消耗.由图 4 可知,采用 RELCRP 协议比 LEACH 协议更能节省网络中的能量消耗.但当到了第 887 轮时,由于 LEACH 协议下已经有多个失效节点,因此网络中的总能量消耗低于采用 RELCRP 时的总能量消耗.

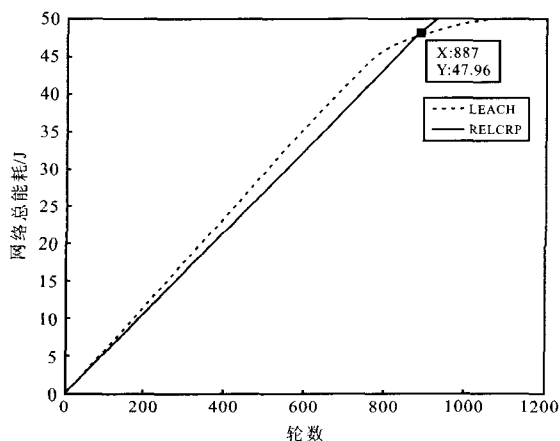


图4 LEACH 与 RELCRP 网络总能耗的比较

的分簇路由协议,它根据节点的剩余能量级别确定节点竞选簇头的时延,保证了局部区域内剩余能量级别较高的节点成为簇头节点.通过约束簇头竞选通告的广播半径缩短了簇内间距,并使簇头节点较为均匀地分布在整个网络中.簇间通信时簇头节点根据自身和候选下一跳簇头节点的剩余能量级别在单跳—多跳路由选择机制间进行切换,缓解了采用多跳传输模式时出现的“热点”问题.仿真结果显示,RELCRP 有效地利用了节点能量,均衡了网络负载,延长了网络的生命周期.

参考文献:

- [1] Younis O, Fahmy S. HEED: a hybrid energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE TransMobile Compute, 2004, 3(4): 366-379.
- [2] Lindsey S, Raghvendra C S. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems[C]// Proc. of the IEEE Aerospace Conf. New York: IEEE Press, 2002(3):1125-1130.
- [3] 万润泽, 侯西梅, 雷建军. 基于无线传感器网络的能量高效的非均匀分簇算法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(9):32-35.
- [4] 张秋余, 彭铎, 刘洪国. 基于能量的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2):674-676.
- [5] 张新秀, 张森, 张振川. 无线传感器网络分簇路由改进算法及其性能[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(2):92-97.
- [6] 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.
- [7] Heinzelman W. Application-specific protocol architectures for wireless sensor networks [D]. Cambridge. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [8] 许国, 胡瑜, 张莹, 等. 一种能量有效的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 天津科技大学学报, 2009, 24(1):58-61.

作者简介:

陈志奎 男, (1968-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为无线通信.

倪晶晶 女, (1985-), 硕士. 研究方向为无线传感器网络.

5 结束语

文中提出了一种基于剩余能量级别的负载均衡