

一种全局能量均衡的路由协议

洪利, 杨淑玲

HONG Li, YANG Shu-ling

中国石油大学 计算机与通信工程学院 通信工程系, 山东 东营 257061

Communication Engineering Department, School of Computer Science and Communication Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China

E-mail: ysl1981@tom.com

HONG Li, YANG Shu-ling. Overall energy-balanced routing protocol. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 86-89.

Abstract: Clustering techniques can increase utilization of energy and scalability for wireless sensor networks. This paper proposes an novel Overall Energy-Balanced Routing protocol (OEBR) in order to solve the problem of unbalanced energy consumption in the clustering techniques. Selecting part nodes with more residual energy to take tentative cluster heads, via compute similitude (distance) form a tentative cluster head to nodes which in the range of R broadcast radius, according similitude, tentative cluster heads compete final cluster head. Propose a communication model which combines single hop with multi-hop to perform inter-cluster communication, according to the threshold of energy and distance to change communication model between single hop and multi-hop. Simulation results show that the proposed routing protocol the clustering schema balances the overall energy consumption, and prolongs the network lifetime well.

Key words: wireless sensor networks; clustering; energy balanced

摘要: 利用分簇技术可以提高无线传感器网络的能量利用及网络的可扩展性。针对分簇技术的能耗不均衡问题提出了一种新的全局能量均衡的路由协议(OEBR)。选取剩余能量较高的部分节点作为候选簇首,通过计算候选簇首到 R 传播半径中成员节点的聚类相似度(距离),以聚类相似度作为条件竞争为簇首。提出一种单跳和多跳相结合的通信方式实现簇间通信,根据能量和距离阈值使节点在单跳、多跳模式转换。仿真实验表明,该路由协议有效地平衡了全局能量消耗,并显著地延长了存活时间。

关键词: 无线传感器网络;分簇;能量均衡

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.027 **文章编号:** 1002-8331(2010)02-0086-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

无线传感器网络是由大量微型传感器节点通过无线通信方式形成的新型自组织网络系统。它综合了传感器技术、嵌入式技术、无线通信技术、分布式协作信息处理技术等,可以被广泛地应用于环境监测、工业控制、生物医疗以及国防军事等领域。无线传感器网络的节点由于采用微型电池供电,且放在恶劣的工作环境中,一般很难进行充电或替代,因此传感器网络存在严重的能量约束问题。所以,传感器网络协议的首要设计目标就是要高效地使用传感器节点的能量,延长网络的存活时间。将传感器节点组织成簇的形式可以有效地减少能量消耗,许多能量高效的路由协议都是在簇结构的基础上设计的^[1-9],其中包括 LEACH^[1]、HEED^[2]、EEUC^[3]等。

在以分簇方式组织的传感器网络中,路由分为簇内通信和簇首与汇聚点间的通信(有时也称作簇首间通信)两部分。当簇成员与簇首之间传输数据时,可以采用单跳通信的方式,这样易于调度。但是由于簇内成员节点与簇首距离不同,距离簇首远的节点其能量消耗过快造成网络生命周期缩短。当簇首与基

站传输数据时,簇首与基站采用单跳方式通信,远离基站的簇首会因传送数据能耗太高而快速死亡。为了降低能量消耗,簇首与基站之间常常采用多跳方式通信,选择靠近基站的簇首作为数据跳转节点,以降低远离基站簇首的能量消耗。由于靠近基站的簇首在把自身数据传输给会基站的同时,还转发来自远离汇聚点的簇首的数据,易出现能量消耗过快而较早死亡的问题。

针对以上问题基于 LEACH 协议思想提出了一种新的全局能量均衡的路由协议,在选择簇首阶段,通过剩余能量来调节生成随机数的大小选取剩余能量较高的节点为候选簇首来竞选簇首,再采用 k -means clustering 中计算聚类相似度思想,通过计算候选簇首到 R 传播半径范围内成员节点的相似度(距离),来确定簇首,从而达到均衡簇内节点的能量消耗目的。在簇间通信中提出一种单跳和多跳相结合的通信方式,根据能量和距离阈值使节点在单跳、多跳模式转换,弥补了只采用单跳和多跳路由时簇首能量消耗不均衡问题。OEBR 协议主要是从网络全局出发均衡节点的能量消耗,延长网络的存活时间。

作者简介: 洪利(1969-),男,博士在读,副教授,主要研究方向:无线通信与传感器网络;杨淑玲(1981-),女,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络。

收稿日期: 2008-08-19 **修回日期:** 2008-11-28

2 相关技术

文献[1]LEACH 协议是最早提出的一种聚类协议, 是通过等概率地随机循环选择簇头, 将能量负载平均的分配到网络每个节点上。在簇生成阶段, 每个节点产生一个 0-1 之间的随机数, 并根据当前轮数计算出一个门限值, 如果某节点在前 $1/p$ (p 为簇首的比率) 轮内未担任过簇首, 并且随机数小于门限值, 则该节点成为簇首, 然后, 簇首向所有节点广播自己成为簇首的消息, 普通节点则根据接收到的广播信号的强度来判断自己与簇首的距离, 并以簇成员的身份加入与之最近的簇。簇间通信采用单跳。LEACH 算法选择簇头具有极大的随机性, 未考虑节点剩余能量, 容易出现部分簇首剩余能量已经很小, 但仍被选为簇首节点的情况, 这种情况下此节点的能量很容易很快耗尽, 不利于延长整个网络寿命。

文献[3]HEED 是一种混合式路由的聚类协议, 以剩余能量为标准随机选出部分节点作为候选的聚类首领, 然后以聚类内部的通信代价为竞争标准竞争产生最终的首领, 此算法需要在簇半径内进行多次消息迭代, 由此带来的通信开销显著增加。

文献[6]EEUC 是一种非均匀的分簇算法, 簇间采用多跳通信的方式, 为了均衡簇首的能量消耗, 分簇时靠近基站的簇具有较小的竞争半径, 使得其簇成员数目相对较少, 以节省簇首能量供数据转发是使用。该协议考虑了簇首能量消耗不均衡问题, 优化了网络节点的能量消耗, 但未考虑簇内消耗不均衡问题, 控制也较复杂。

3 网络模型

考虑一个由 N 个传感器节点随机均匀分布的网络, 其应用场景为周期性的数据收集, 并具有如下性质:

(1) 数据汇聚点位于一个方形观测区域 M 的外侧。传感器节点和汇聚点 BS 在部署后均不在发生位置移动。

(2) 所有的节点都是同构的, 均具备数据聚合的能力。

(3) 每个传感器节点都有一个唯一的标识(ID), 从 1 到 N 。

(4) 链路是对称的。若已知发送方的发射功率, 接受方可以根据信号的强度计算二者间距离的近似值。

(5) 节点可以根据到信号接受方距离的远近调节发射功率以节省能量。

这里采用与文献[2]相同的无线传输能量消耗模型。当发送节点与接受节点的距离小于 d_0 时, 采用自由空间模型, 即发送方发送数据的能耗与距离的 4 次方成正比。发送方发送 1 bit 的数据到距离为 d 的接收方所消耗的能量为:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l \in_{jc} d^2 & (d < d_0) \\ lE_{elec} + l \in_{mp} d^4 & (d \geq d_0) \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{elec} 表示发射电路消耗的能量, \in_{jc} 和 \in_{mp} 为放大功率所消耗的能量, d_0 为常量。

节点接收 l bit 的数据所消耗的能量为:

$$E_{Rx}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

4 OEBR 协议

OEBR 是一种类似 LEACH 的路由协议, 按数据收集周期(以下称为一轮)执行, 每一轮由 3 个阶段组成: (1) 选举簇首阶段; (2) 形成簇阶段; (3) 数据传输。

在网络部署阶段, 让基站以一定的功率向网络内广播一个

消息 HELLO_MSG。传感器节点根据接收信号的强度计算出自己到基站的近似距离, 在和基站通信时依据这个距离来选择适当的发射功率。

4.1 簇首与候选簇首的选择

在全局范围内预先设定一个 0 到 1 之间的阈值 T , 用来控制参加聚类首领竞选的节点比例。每个节点生成 0 到 1 之间的随机数, 记为 μ_0 。为了保证剩余能量较高的节点成为聚类首领候选节点, 将节点剩余能量与网络平均能量的差值与节点初始能量的比值的负指数函数作为其随机数的大小调节权值, 见公式(3)

$$\mu = \mu_0 \times \exp\left[-\frac{E_n(i) - \bar{E}}{E_0}\right] \quad (3)$$

式(3)中, E_0 为该节点的初始能量, $E_n(i)$ 为第 i 个节点的剩余能量且在 E_0 到 0 之间变化, \bar{E} 为网络平均能量。当节点剩余能量 $E_n(i) \geq \bar{E}$ 时, $\frac{E_n(i) - \bar{E}}{E_0} \in [0, 1]$; 当 $E_n(i) < \bar{E}$ 时, $\frac{E_n(i) - \bar{E}}{E_0} \in$

$(-1, 0)$ 。 μ 是节点最后调整后的数值。由于 $\exp\left[-\frac{E_n(i) - \bar{E}}{E_0}\right]$ 随着

$E_n(i)$ 的增大而减小, 并且当节点剩余能量 $E_n(i) \geq \bar{E}$ 时, 在 0 到 1 之间变化, 而当 $E_n(i) < \bar{E}$ 时, 在 1 到 e 之间变化, 因此可以根据这个单调递减的指数函数对产生的随机数作进一步地调整。这样使得剩余能量越大的节点的随机数越小, 越容易小于当前阈值, 而当剩余能量小于网络平均能量时随机数反而很大程度增大, 这样就大大减少了剩余能量小于网络平均能量的节点成为聚类首领候选节点的可能性, 保证了剩余能量较大的节点成为聚类首领候选节点。最后若节点调整后的随机数 μ 小于 T , 则此节点成为聚类首领候选节点, 然后以 R 为传播半径广播一个竞争消息 COMPETE_HEAD, 内容为自身标识(ID), R 最优值取自文献[5]。只有在 R 半径覆盖范围内的节点才能接收到此消息, R 半径内的节点根据接收信号强度计算到此范围内候选首领节点的距离并记录此属性。采用 k -means clustering 中计算聚类相似度思想, 候选首领通过计算到 R 半径内各成员节点的相似度(即距离), 见函数公式(4), 计算各成员节点到候选首领的距离和, 其中距离和最小的最终竞争为簇首。

$$G_j = \sum_{s \in R_j} \|s - c_j\|^2 \quad (4)$$

在公式(4), j 代表第 j 个簇, G_j 是簇 j 中候选簇首 i 的标准公式。 s 是簇 j 的成员节点, R_j 是簇 j 的传播半径, c_j 是第 j 个簇的标号为 i 的候选簇首。根据公式(1)和(2)可知, 当距离 d 很大时, 发送和接收数据所消耗的能量相对于发送数据时功率放大器所消耗的能量可以忽略不计, 因为发送一个数据所消耗的能量主要取决于源节点到目的节点的距离, 因此选择与各成员节点距离和最小的候选簇首为最终簇首节省了总的能量消耗, 并且从公式(4)可以看出, 依据 k -means clustering 中计算聚类相似度思想竞选为簇首的节点距各成员节点距离差距也比较小, 这样在簇内通信时, 避免了出现太多距离簇首很远的节点消耗能量过快而尽早死亡, 均衡了簇内各节点的能量消耗。

4.2 簇形成阶段

每个簇首向 R 范围内的成员节点广播 HEAD_MSG, 内容为首领节点的标识(ID), 剩余能量(E_i)。普通节点接收到此消息加入簇, 并发送 JOIN_MSG 信息给簇首。如果一个节点接收

了多个簇首信息 HEAD_MSG,则综合考虑能量和距离,最终选择一个作为簇首。首先节点计算它到发送 HEAD_MSG 消息的簇首(CH_i)的距离 $d(j, CH_i)$,然后它根据接收到的簇首节点(CH_i)的广播信息 HEAD_MSG 内容计算能量密度 $EnDen(j, CH_i)$,如式(5)

$$EnDen(j, CH_i) = \frac{E_i}{d_{j, CH_i}} \quad (5)$$

在公式(5) J 为节点的 ID 标识符, i 为簇首的 ID 标识符, E_i 为簇首剩余能量,节点 j 加入到 $EnDen(j, CH_i)$ 值大的簇首 CH_i 中。根据公式(5)可知,剩余能量多且距离节点 j 比较近的簇首 CH_i 竞争成功,节点 j 发送 JOIN_MSG 信息加入到簇 CH_i 中,簇首 CH_i 记录节点 ID 及其他属性值。最后簇首给每个簇成员分配 TDMA 时隙。

4.3 簇间单跳和多跳混合通信

完成簇类的形成后,簇首将数据传输到汇聚点,簇首先对簇成员的数据进行融合处理,然后将数据发送至汇聚点。簇首通信间采用恒定单跳和恒定多跳都会因簇首距离不同而导致簇首间消耗不均衡,为此采用单跳和多跳混合通信方式可以均衡簇首之间的能量消耗。首先采用文献[6]思想,先引入一个距离阈值 d_{max} ,若簇首到汇聚点的距离小于 d_{max} ,则它直接与汇聚点进行通信;否则簇首节点选择其他簇首作为中继节点和基站通信,以该簇首内所有节点剩余能量均值 \bar{E}_i 为阈值,选择的中继节点剩余能量需大于 \bar{E}_i ,否则此簇首节点转为单跳,直接与汇聚节点通信。

过程详细如下:

在路由算法开始时,每个簇首周期性的计算簇内成员节点的平均剩余能量并以相同的功率向全网广播一条消息 HEAD_NOW_MSG,包含其 ID、当前剩余能量、簇内节点剩余能量均值和它到汇聚节点的距离。簇首 s_i 收到簇首 s_j 广播的消息后,可以计算出它们的近似距离。当 $d(s_i, DS) \geq d_{max}$ 时,需要选择中继节点 s_l , $H_j = \{s_l | d(s_l, DS) \leq d(s_j, DS)\}$,据文献[6]所给出定义:若簇首 s_i 选取 s_j 为其中继节点,带来的网络能量开销指标为^[6]

$$E_{relay} = d^2(s_i, s_j) + d^2(s_j, DS) \quad (6)$$

可以看出 E_{relay} 越小能量开销越小,综合考虑能量,策略是 s_i 从 $s_l \in H_j$ 中选择 E_{relay} 最小的两个节点,选择剩余能量高的为中继节点,同时其选择的中继节点 s_j 剩余能量大于 s_i 簇内剩余能量均值 \bar{E}_i ,否则簇首 s_i 放弃选择中继节点转为单跳直接和基站通信。这样避免了距离基站近的簇首由于转发其他簇首数据消耗能量过多导致剩余能量很小时仍然作为中继节点转发数据能量过早耗尽而死亡。通过能量阈值的设定均衡了簇首间的能量消耗。

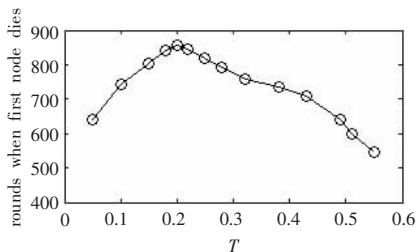


图1 T 对网络寿命的影响

5 仿真实验结果

仿真实验使用 MATLAB 对 OEBR 协议算法进行性能分析与评估,并与经典分簇协议 LEACH 算法进行比较。不考虑无线通信链路的信号冲突和噪声等因素,实验参数选择见表 1,无线通信模型的参数与文献[2]中 LEACH 的参数一致。无特别说明情况下,以下每个实验独立运行 100 次,每次随机生成拓扑,取数据的平均值作为实验结果。

表 1 实验参数

参数	取值
覆盖区域	150 m×150 m
基站位置	(75, 200)m
节点数	300
节点初始能量	0.5 J
E_{dec}	50 nJ/bit
ϵ_{fc}	10 pJ/bit/m ²
ϵ_{mp}	0.001 3 pJ/bit/m ⁴
d_0	87 m
E_{pt}	5 nJ/bit/signal
数据包大小	4 000 bit

实验采用的评价指标为网络的存活时间和能量有效利用率。网络的存活时间,定义为第一个节点的死亡时间,用轮数来表示;能量有效利用率,定义为网络中第一个节点死亡的时间与最后一个节点死亡时间的比率。能量有效利用率高低反应能量消耗均衡程度,较高说明所有节点的能耗都比较均匀,没有节点因为能量过早耗尽而死亡,因此网络寿命接近最优。

OEBR 和 LEACH 协议进行比较。

首先,测试 T 的取值对网络寿命的影响,确定 T 的取值。根据文献[5]进行对 R 的最优值计算,取 $R=36$ 。 T 的大小影响参加竞选的候选节点的数量,而候选节点的数量直接影响竞选消息带来的能量消耗开销,候选节点的数量应该在一个合理的范围内。让 T 在 0.05 到 0.55 之间变化,图 1 可以看出 T 的取值有一个优化范围,大约在 0.15~0.25 之间。当 T 取值超出这个范围后,选举消息的开销急剧上升,造成网络寿命小。因此取 $T=0.2$ 。

接下来测试 d_{max} 对网络生命周期的影响, d_{max} 决定了节点是否应该与基站直接通信,由于这些节点要担负转发其他簇首节点的数据而消耗比较高的能量,设定比较合适的 d_{max} 值,可以节省和均衡能量消耗,图 2 显示出了随着 d_{max} 的变化网络生命周期的变化,通过对设定的网络规模进行模拟, $d_{max}=120$ m 近似最优值。如果 d_{max} 值过大,过多的节点直接与基站通信,导致能量浪费,如果 d_{max} 值过小,则作为中继节点的簇首能量消耗过快,导致小于需要转发簇的平均剩余能量值而不能进行转发,这样也会导致很多节点很快就转为单跳直接与基站通信,也浪费了能量。

为了验证簇间采用单跳和多跳混合通信对簇首负载均衡

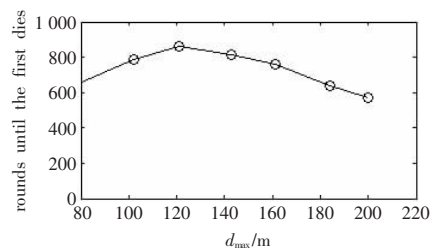


图2 d_{max} 对网络寿命的影响

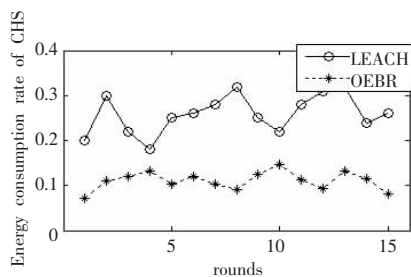


图3 簇首随时间的能量消耗率

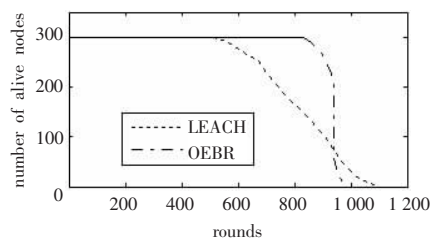


图4 网络存活时间

的有效性,与 LEACH 协议进行比较,LEACH 协议簇间通信直接采用单跳。从实验随机选取 15 轮,统计各轮中簇首消耗的能量,通过图 3,可以看出 OEBR 协议簇首每轮消耗的能量低于 LEACH 协议,并且簇首的消耗是均衡的。

最后,验证网络生命周期和能量有效利用率,图 4 显示了网络中存活的节点数目随时间变化的情况以及能量有效利用率,相比 LEACH 协议,OEBR 协议延长了网络生存时间高达 57% 左右,能量利用率高达 89%。主要原因在于 OEBR 考虑了节点剩余能量、平衡簇内节点以及簇首各节点的能量消耗,达到了延长网络生存周期的目的。

6 总结与展望

基于 LEACH 协议的思想,提出了一种新的全局能量均衡的路由协议,其核心思想是在选择簇首时考虑了节点剩余能量以及距簇内各个成员节点的距离,利用 K -means clustering 中计算聚类相似度思想均衡了簇内节点能量消耗。并在簇间通信中提出一种单跳和多跳相结合的通信方式,根据能量和距离阈值使节点在单跳、多跳模式转换,达到均衡簇首间能量消耗的目的。仿真结果表明该 OEBR 协议从网络全局均衡了节点的能量消耗,与 LEACH 协议相比显著延长了网络生命周期。

致力于设计全局能量均衡的路由协议,其算法参数是通过模拟实验得出的最优值,未能对参数优化值进行详细地分析,下一步研究算法参数的最优取值。

(上接 70 页)

和引导。在利用 MATLAB 时,同时也暴露出学生操作软件不熟练,对软件计算过程的理解上也有一个渐进过程等一些问题,在较短时间内掌握 MATLAB 计算语言对同学来讲并不是一件轻易的事情,因此,在 GIS 建模实验前,需要向学生介绍该软件在地学模型构建过程中应用的先导知识,一方面向学生介绍 GIS 建模的基本知识,另一方面也向学生传达了要先通过课前自学预习来熟练掌握 MATLAB 软件的重要性。

4 结束语

利用 MATLAB 软件进行 GIS 空间分析建模实验设计与应用,对于学生理解和掌握 GIS 空间分析的基本原理内容是非常有帮助的,同时随着该软件计算功能的进一步增强和空间分析建模实验设计的深入开展,越来越觉得充分利用以 MATLAB 为代表的常规广谱计算软件包来进行专业课程的辅助实验设计与开发,不但提高了学生的学习积极性,加深了学生对实验原理

参考文献:

- [1] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, 2000: 1-10.
- [2] Heinzelman W B, Chandrakasan A P. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660-670.
- [3] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [4] Chang R S, Kuo C J. An energy efficient routing mechanism for wireless sensor network[C]// Proceedings of 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2006, 2: 18-22.
- [5] Chen Gui-hai, Li Cheng-fa, Ye Mao. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2007, 1(2): 170-179.
- [6] 李成法, 陈贵海. 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.
- [7] Zhang Wen-ya, Liang Zi-ze, Hou Zeng-guang, et al. A power efficient routing protocol for wireless sensor network[C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, London, UK, 15-17 April 2007: 20-25.
- [8] 郝晓晨, 郭力培, 刘彬. 无线传感器网络中能量平衡的混合路由模型的研究[J]. 传感器技术学报, 2008, 21(1): 113-117.

的认识,而且十分有助于对专业课程教学内容的理解和掌握。而且对学生熟悉和应用 GIS 专业软件也起到一定积极促进作用。

参考文献:

- [1] 龚健雅. 地理信息系统基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 37-41.
- [2] 郑阿奇. MATLAB 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [3] 刘昌明, 岳天祥, 周成虎. 地理学的数学模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 30-35.
- [4] 吴玉鸣, 徐建华. 中国区域经济增长集聚的空间统计分析[J]. 地理科学, 2004, 24(6): 654-659.
- [5] 柏延臣, 李新, 冯学智. 空间数据分析与空间模型[J]. 地理研究, 1999(2): 185-190.
- [6] 王济川, 郭志刚. Logistic 回归模型—方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 11-17.
- [7] 张超, 杨秉赓. 计量地理学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 30-35.