

基于能耗均衡性的无线传感器网络的路由算法研究

潘刚¹, 陈亚军², 范恩魁³, 王刚¹, 熊海东¹

(1. 西华师范大学 计算机学院, 四川 南充 637002;

2. 西华师范大学 实验中心, 四川 南充 637002;

3. 重庆信息技术职业学院 软件学院, 重庆 404000)

摘要: 采用统计学的方法, 建立了一个由节点距离、节点潜在能量和节点连通性按贡献率组成的路由选择优化模型, 该模型量化了各个因素在保持网络能耗均衡性方面的作用, 以此来均衡整个无线传感器网络的能耗。仿真结果表明, 该算法能够有效降低网络能耗并延长网络生存时间。

关键词: 无线传感器网络; 能量均衡性; 路由算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)07-0053-04

Study on routing algorithm for WSN based on the balance of energy consumption

Pan Gang¹, Chen Yajun², Fan Enkui³, Wang Gang¹, Xiong Haidong¹

(1. Department of Computer, China West Normal University, Nanchong 637002, China;

2. Experiment Center, China West Normal University, Nanchong 637002, China;

3. Department of Software, College of Chongqing Information Technology, Chongqing 404000, China)

Abstract: This paper uses statistics method to establish routing optimizer model which is consisted of the distance, a node potential energy and the node connectivity as their contribution rate. To balance the network load the model quantifies the function of every elements in balance the energy consumption of the WSN. The simulation results show that the new algorithm can reduce the energy consumption and prolong the network lifetime.

Key words: WSN; energy balance; routing algorithm

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Networks) 是新兴的下一代传感器网络。作为一种无基础设施的无线网络, 其在军事、医疗、环境检测和森林防火等方面有很好的应用前景。但由于传感器网络中的节点目前都是靠电池供电, 节点能量有限且不可再生, 因此, 提高能量在网络中的利用效率一直受到高度重视。由于传感器网络工作环境的特殊性, 不可能采用人工方式均匀布置传感器节点, 节点分布的不均匀引起节点能量消耗的分布不均, 导致一些节点过早死亡, 形成网络“空洞”, 从而加速了本区域节点的能量消耗, 进而影响网络的生命周期, 因此均衡能耗成了 WSN 中必须考虑的一个重要因素。既然网络中同时存在能量资源和能量消耗的分布不均, 研究能量分布与路由协议相结合, 设计一种能有效地提高网络能量利用效率且改善网络的连通性的路由

选择协议成为网络设计的重要目标。

目前大部分路由协议都是将到节点间的距离和节点的剩余能量作为路由选择时的度量标准, 没有考虑周围节点的影响。但是由于邻居节点之间具有高度的相关性, 路由不再是单个节点的事情, 而是要与周围所有节点联合考虑, 才能达到路由的最佳性能。本文在深入研究现有路由算法的基础上, 进一步研究节点潜在能量、节点间距离和节点周围的连通性对网络性能的影响, 针对由于路由协议采用的环境参数不准确而造成的能量浪费问题, 提出了相应改进方法, 从而有效提高了能量利用效率, 延长了网络的生命周期。

1 节点能耗均衡性的分析

1.1 节点能耗分析

节点能量主要消耗在无线传输/接收数据、处理查

网络与通信 Network and Communication

询请求、数据融合处理和感知环境参数等工作中。其中无线通信消耗的能量占绝大部分,根据通信模型^[1],发送节点的能耗表示为:

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 & d < d_{crossover} \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4 & d \geq d_{crossover} \end{cases} \quad (1)$$

其中, d 表示通信链路的两个节点的距离, $d_{crossover}$ 为距离阈值, lE_{elec} 表示用于数据编码、调制解调等的电量消耗, $l\epsilon_{fs}d^2$ 和 $l\epsilon_{mp}d^4$ 则是根据传输距离不同而选择不同发射方式的电量消耗。

节点接收 1 bit 数据所消耗的能量为:

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

式(2)仅用于信号接收、解码等过程,与距离 d 无关。由此可见,节点间距离对节点能量消耗有很大的影响。

1.2 节点的潜在能量

WSN 的工作特性要求一个节点应具备与周围节点交互的能力,包括与邻居节点之间分享能量信息,只有综合考虑各种环境因素的影响,才能更好地协调完成任务^[2]。为了更准确地反映局部区域节点能量的可用情况,利用潜在能量^[3]估计一个节点是否适合作为传输节点。潜在能量定义为:

$$PE(n) = CE(n) + \frac{CE(n)}{ME(n)} \times \sum_{k \in N(n)} \left(1 - \left(\frac{d_{nk}}{2r_n}\right)^2\right) \times CE(k) \quad (3)$$

其中, $PE(n)$ 为节点 n 的潜在能量, $CE(n)$ 为节点 n 的当前剩余能量, $ME(n)$ 为节点 n 的初始总能量, $\sum_{k \in N(n)} \left(1 - \left(\frac{d_{nk}}{2r_n}\right)^2\right)$ 为节点 n 周围所有节点的能量之和。修正后的潜在能量为^[4]:

$$PE(k) = (E_k - M) + \sum_{n \in R} (E_n - M); E_k > M \quad (4)$$

其中, $PE(k)$ 是节点 k 的潜在能量, E_k 为位于节点 k 的传感范围内的当前剩余能量, M 为节点用于监测和接收等工作的最小保留能量。

上述算法的不足之处是:节点分布不均匀的网络容易出现潜在能量很大、可利用的能量不多的情况,这样加速了网络“空洞”^[4-5]的出现,降低了能量消耗的利用效率,进而影响网络的寿命。为此本文重新定义潜在能量:设其是节点周围半径为 r 区域内所有节点的剩余能量之和,其中 r 是一个阈值。分析如下:假设有一个 k bit 的数据包需要从 B 点传输到 D 点,如图 1 所示。选择两

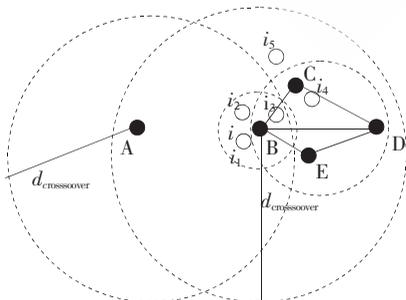


图1 节点数据传输模型

条有代表性的路径来分析: $B \rightarrow D$ 和 $B \rightarrow C \rightarrow D$ 。这里假设任意两节点都是在距离阈值 $d_{crossover}$ 内进行数据传输。

$B \rightarrow D$ 消耗的总能量为:

$$E_{BD} = kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d_{BD}^2 + kE_{elec} \quad (5)$$

$B \rightarrow C \rightarrow D$ 消耗的能量为:

$$E_{BCD} = kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d_{BC}^2 + kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d_{CD}^2 + kE_{elec} \quad (6)$$

$$\exists kE_{elec}, \text{ 满足 } \lim_{C \rightarrow B} (k\epsilon_{fs}d_{BD}^2 - k\epsilon_{fs}d_{BC}^2 - k\epsilon_{fs}d_{CD}^2 - kE_{elec}) = 0$$

则有:

$$r = d_{BC} = \sqrt{d_{BC}^2 - \frac{kE_{elec}}{k\epsilon_{fs}} - d_{CD}^2} \quad (7)$$

这时如果 r 减小,则有 $k\epsilon_{fs}d_{BD}^2 < k\epsilon_{fs}d_{BC}^2 + k\epsilon_{fs}d_{CD}^2 + kE_{elec}$, $E_{BC} < E_{BCD}$, 这说明节点 B 周围半径 r 范围内的其他节点不适合作为它的下一跳路由节点。由于这些节点与 B 节点的距离很近,覆盖区域几乎重合,所以在 B 节点工作时,这些节点可以进入睡眠状态,在 B 节点能量耗尽后,可以唤醒它们中任意一个节点来代替它。所以把节点 B 周围半径 r 的节点能量之和作为该节点的潜在能量。这样更准确地反映出周围节点能量的可用情况,为降低能耗和提高网络能耗均衡性提供了一个很好的参照。

1.3 节点的连通性

对于连通性^[6]问题,定义为:如果至少去掉 k 个传感器邻居节点才能使该节点所在区域的网络不连通,则称该节点周围的网络是 k 连通的。一个节点周围的网络连通性越好,就意味着路由选择时可以综合考虑本区域节点的剩余能量和本区域能耗的均衡性,选出一个既能降低能耗又能平衡本区域能耗负载的下一跳节点。以图 1 为例, C 节点的连通度大于 E 节点的连通度, C 节点可以根据周围环境的变化选择最佳下一跳节点,这样能很好地平衡本区域网络的能量消耗;但 E 节点周围连通性差,很容易因能量耗尽而死亡,导致本区域出现网络“空洞”,加速了本区域能量的消耗,加剧了能耗的不均衡。因此,节点周围网络的连通性也是均衡网络能耗的一个重要因素。

2 能耗均衡路由算法

传感器网络的路由算法直接关系到传感器网络中能量消耗的速率,从而决定网络的生命周期,所以设计一个好的路由模型对延长网络的生命周期至关重要。为了延长网络的生命周期必须首先考虑两个方面的问题:降低节点能耗和均衡网络的能耗^[7-9]。影响节点能耗和网络能耗均衡性的因素很多,考虑到各种因素在其中贡献率的大小、算法的复杂度以及在现有模拟仿真环境中的可操作性,本算法主要考虑节点间的距离 d 、节点的潜在能量 PE_r 和节点的连通性 $UC_{neighbour}$ 三方面的因素,表示为:

$$PE_r(k) = CE_k + \sum_{i=1}^n CE_i \quad (8)$$

$$UC_{neighbour}(k) = C_{neighbour}(k) - C_p(k) \quad (9)$$

2.1 变量贡献率

d 、 PE_r 及 $UC_{neighbour}$ 是 3 个不同量纲的变量, 目前没有现成的数学模型作为参考, 有一些学者采用假设一个数值或取随机数的解决方式, 这种方式得到的数据在现实应用中的参考价值有限, 也没有很强的说服力。为了得到一组在实际应用中更有参考价值的数据, 本文引用统计学中主成分分析的方法来解决这一问题。

为了更好地反映出各个变量在路由选择时的贡献, 构建 3 个优化函数对这 3 个变量进行优化处理, 使处理后的值有相同的期望变化趋势, 这样便于最优值的选择。这 3 个变量的优化函数分别为

$$D(d) = \frac{1}{d} \tag{10}$$

$$PE(k) = \frac{PE_r(k)}{\sum_{i=1}^n ME_i} \tag{11}$$

$$UC = \frac{UC_{neighbour}}{C} \tag{12}$$

对处理后的样本表进行主成分分析后, 可以得到一个系数矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{pmatrix}$$

以及该矩阵的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 。设第 i 个特征值的贡献率为 ω_i , 则有:

$$\omega_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad \omega_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad \omega_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$$

2.2 能耗均衡的路由选择模型

由以上的讨论, 根据统计学原理, 可以计算出这 3 个变量的得分为:

$$\begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{pmatrix} \tag{13}$$

其中, Y_i 表示第 i 个主成分的得分, $x_1 = D(d)$, $x_2 = PE(k)$, $x_3 = UC$ 。所以主成分的综合得分为:

$$S = \sum_{i=1}^3 \omega_i \times Y_i \tag{14}$$

S 越大表示该节点越适合作为下一跳节点, 根据这一准则, 文中将最优路由节点集的路由模型定义为:

$$S = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1) \tag{15}$$

该路由模型综合考虑了节点间的距离、节点的潜在能量和节点的连通性 3 个因素, 追求三者路由选择中的联合优化。

3 实验与仿真

为了验证本文提出算法的性能, 采用网络仿真工具 NS-2 进行了仿真实验, 并与目前路由效果比较好的基于

密度的路由算法进行性能的比较。实验参数配置如表 1。

表 1 实验参数

参数	值	参数	值
网络范围	(0,0)~(200,200)m	ϵ_{fs}	10 pl(bin m)
基站	(100,250)m	ϵ_{op}	0.0013 pJ(bit m)
传感器数	200	Data packer	4000 bits
潜在能量	0.5J	Control pacioel	100 bits
E_{elec}	50 mJ bin	$d_{crossover}$	87 m

仿真策略是将本文中的算法与基于密度的路由算法在同样的网络环境下进行比较测评, 两种路由算法采用同样的异常恢复策略。评价指标包括网络的剩余总能量和节点死亡数目两个方面。设 EBR 为基于能耗均衡性的路由算法, DBR 为基于密度的路由算法, 仿真结果分别如图 2、图 3 所示。

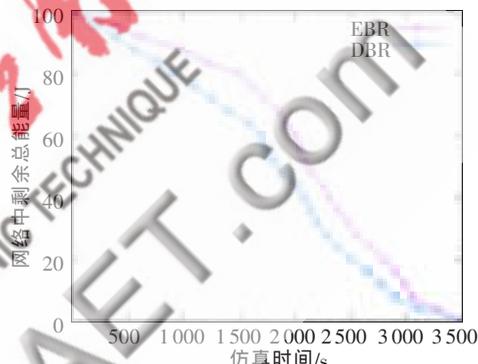


图 2 能量消耗与仿真时间之间的关系

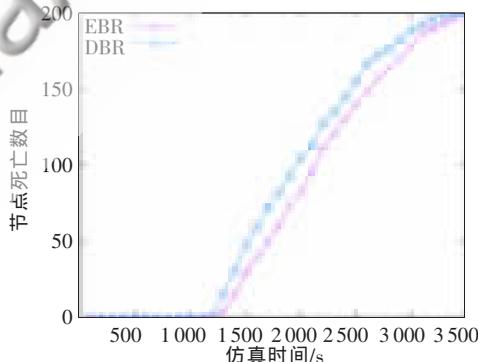


图 3 节点死亡数目与仿真时间之间的关系

由图 2 的仿真结果可以看出, 在整个仿真过程中, EBR 的剩余总能量一直高于 DBR, 这说明 EBR 的能耗低于 DBR。从图 3 的仿真结果可以看出, 在仿真的中后期, EBR 节点的死亡数目少于 DBR。综合图 2 和图 3 的仿真结果可以看到, 在仿真的后期, 剩余的总能量和死亡节点的数目近似沿直线变化, 这说明这段时间网络能耗比较均衡, 整个网络的连通性很好, 没有因网络“空洞”的出现而引起网络能耗加速。

本文对 WSN 节点的潜在能量和节点的连通性进行了探讨, 提出一种在节点分布不均匀的条件下, 实现能量消耗均衡的路由算法, 更好地延长了网络生命周期。

该算法兼顾了网络中节点能耗的高效性和网络能耗的均衡性,实现了网络中节点间能耗的平衡。仿真结果表明,与基于密度的路由算法相比,该算法在节点平均生命周期、网络生命期方面具有更好的性能。下一步的主要工作是在保证能耗的高效率和高均衡度的基础上,进一步提高网络的可扩展性,缩短数据传输的时延。

参考文献

- [1] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [2] 张曦煌,高翠芳.无线传感器网络中密度路由算法的改进研究[J].计算机应用,2007,27(10).
- [3] Ko Rensong, Lai Chihchung. Density-based routing mechanism for sensor networks [C]. Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005:341-346.
- [4] CHEN B, JAMIESON K, BALAKRISHNAN H, et al. Span: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks [J]. ACM Wireless Networks Journal, 2002:8(5).
- [5] MANJESHWAR A, AGRAWAL D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks [C]. 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2001: 2009-2015.
- [6] 余荣.保证服务质量的最小能量无线传感器网络路由算法[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(10):1634-1637.
- [7] 刘韬,谢储晖.无线传感器网络能量均衡路由算法[J].微电子学与计算机,2009,26(10):5-7.
- [8] 孙国栋,廖明宏.能量均衡的无线传感器网络短路径路由算法[J].自动化学报,2008,34(12):1540-1544.
- [9] 米志超,周建江.一种能量均衡的无线传感器网络生命周期优化算法 [J]. 系统工程与电子技术,2008,30(12): 2477-2480.

(收稿日期:2010-12-06)

作者简介:

潘刚,男,1978年生,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统开发。

陈亚军,男,1965年生,教授,硕士生导师,主要研究方向:嵌入式应用,AT神经网络。

范恩魁,男,1983年生,教师,主要研究方向:嵌入式系统开发。