

一种基于自适应加权的无线传感器网络 室内能量均衡路由

黄 河¹, 石为人¹, 许 磊², 王小刚¹, 钟文强¹

(1. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 2. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘 要: 针对无线传感器网络在结构复杂多变的室内环境应用时, 容易出现的传播损耗估计误差较大、难以结合环境变化实现自适应路由由优化等问题, 提出了一种基于自适应加权的室内能量均衡路由 (Weight coefficient Adaptive based Indoor Energy load-balanced Routing, WAIER) 算法. WAIER 将路由建立过程抽象为典型的多属性决策过程, 以主客观综合赋权法和熵权系数法实现权重系数的确定及自适应动态调整, 并结合传播损耗、节点能量等信息, 选取最优节点进行数据转发. 实验表明 WAIER 实现了权重的动态自适应, 使数据流量得到合理分配, 在室内环境应用时可有效平衡网络能量消耗, 延长网络生存时间.

关键词: 无线传感器网络; 自适应; 熵; 能量均衡; 多属性决策

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 11-2493-06

Weight Coefficient Adaptive Based Indoor Energy Load-Balanced Wireless Sensor Networks Routing

HUANG He¹, SHI Wei-ren¹, XU Lei², WANG Xiao-gang¹, ZHONG Wen-qiang¹

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: When wireless sensor network used in complex indoor environment, great propagation loss will be caused and difficult to optimize routing adaptively when environment changed. Based on these problems, we presented a protocol- Weight coefficient Adaptive based Indoor Energy load-balanced Routing (WAIER). WAIER formulate the routing setup process as the typical multiple attribute decision making process, use objective with subjective weight coefficient method and entropy weight coefficient method to adjust the weight coefficient. Nodes can choose an optimal node to relay the data by comprehensive consideration of the weight coefficient, the propagation loss and the energy of its neighbor nodes. Simulation results show that the WAIER make weight coefficient adaptive dynamically, lead to an appropriate allocation of the data. When used in indoor environment, sensor network could obtain a much more even energy distribution, accordingly the lifetime of the sensor network will be prolonged.

Key words: wireless sensor networks; adaptive; entropy; energy balance; multiple attribute decision making

1 引言

无线传感网络 (WSN, Wireless Sensor Networks) 是当前在国际上备受关注的、涉及多学科高度交叉、知识高度集成的前沿热点研究领域^[1,2]. 随着传感器、嵌入式计算、现代网络及无线通信、分布式信息处理等技术的快速发展, 智能建筑、建筑节能等领域应用需求的日益突出, 无线传感器网络的应用领域逐渐从传统的军事、危险环境监测等领域向民用领域转变, 应用环境由传统的野外/室外环境扩展到室内应用环境^[3].

这些应用环境的转变对无线传感器网络路由算法提出了更高的要求, 仅仅考虑降低本地节点能耗, 实现局部能耗降低而忽略全局能量消耗的算法^[4], 已经无法满足在实际应用中的需求. 近年来, 相关领域研究人员开始针对能量均衡消耗的问题进行优化, 在重点考虑能耗问题的同时降低“hotspot”的出现几率, 延长网络生存时间. 文献[5]参考多个能量属性进行决策, 并根据各决策方案属性值的标准差和平均差, 建立各属性的权重向量. 文献[6]在节点的多个邻居节点中选择几个优选节点, 作为数据转发的备选节点, 以避免固定节点转发导

致能量负载过高.文献[7]中提出了利用邻近的低负载节点来协助承担高负载节点的转发任务,在微观区域中均衡节点能耗.文献[8]以 SINK 为中心将监测区域划分为许多环形区域,分别进行同一环内部和不同环之间的能量均衡,最终实现全网能量均衡效果.但这些研究大都针对无障碍或者少障碍的实验环境而开展,难以适应结构复杂、环境多变的建筑室内环境,导致算法效果欠佳.本文提出了一种基于自适应加权的室内能量均衡路由(Weight Coefficient Adaptive based Indoor Energy load-balanced Routing, WAIER),算法对节点间通信的传播损耗、邻居节点能量状态等属性进行综合衡量,并结合属性实时变化采用主客观综合赋权法自适应的确定实时权重系数,动态选择综合评价属性最高的邻居节点进行数据转发,建立能量均衡路由.

2 WAIER 能量均衡模型

在室内环境中,由于人的频繁活动,使得环境参数动态变化.现有能量均衡算法中通常采用简单的主观权重法,使得权重的设定不能随环境参数变化而动态改变,难以满足室内环境状态多变的特点.针对这一问题 WAIER 采用了主客观综合赋权法,加强了主观权重法的自适应性,也避免了仅使用客观权重法不能突出不同属性重要性差异的问题,实现权重随属性的动态变化,增强算法在室内环境的能量均衡效果.并结合多种能量相关属性的选取,扩展属性集,将路由建立过程抽象为典型的多属性优化问题,建立了多属性能量均衡模型如式(1):

$$\begin{aligned} \max F &= \lambda \cdot \sum_{k=1}^l w_k \cdot u_{jk} + (1-\lambda) \cdot \sum_{k=1}^l w'_k \cdot u_{jk} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{k=1}^l w_k = 1, \sum_{k=1}^l w'_k = 1, \\ 0 \leq w_k \leq 1, 0 \leq w'_k \leq 1, \\ 0 \leq \lambda \leq 1, u_{jk} \geq 0, \\ l \geq 1, l \in N, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中 u_{jk} 表征各种评价属性, w_k 和 w'_k 分别为主观权重和客观权重, λ 为主、客观权重分配比, l 为评价属性的数量, 2.1-2.4 节将对这些参数的确定进行分析.

2.1 归一化属性 u_{jk}

节点 N_i ($i=1, 2, \dots, n$, n 为节点总数) 拥有一个自己的属性矩阵 \mathbf{A} (如式(2)), 其行向量代表邻居节点 N_j ($j=1, 2, \dots, m$, m 为节点 i 的邻居节点总数) 的不同评价属性值 $U_j = (U_{j1}, U_{j2}, \dots, U_{jl})$; 列向量代表同一评价属性在不同邻居节点中的取值 (如式(3)). 属性集可以包括邻居节点 N_j 的剩余能量, 能量势等效益型属性, 也可以包

括 N_i 到 N_j 的数据传输损耗等成本型属性. 由于这些评价属性之间存在不可公度性和矛盾性, 属性量纲与数量级互不相同^[10], 为了消除这种差异对决策结果的影响, 在建立能量均衡模型时, 需对属性矩阵进行规范化处理.

$$\mathbf{A} = \begin{matrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_m \end{matrix} \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1l} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & U_{2l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{m1} & U_{m2} & \cdots & U_{ml} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{21} \\ \vdots \\ U_{m1} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} U_{12} \\ U_{22} \\ \vdots \\ U_{m2} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{A}_l = \begin{bmatrix} U_{1l} \\ U_{2l} \\ \vdots \\ U_{ml} \end{bmatrix} \quad (3)$$

首先, 计算得到第 k 项 ($k=1, 2, \dots, l$) 属性的最优解 U_k^* 和负最优解 \bar{U}_k^*

$$\begin{aligned} U_k^* &= \begin{cases} \max A_k^T, & k \in K_1 \quad (\text{对于效益型属性}) \\ \min A_k^T, & k \in K_2 \quad (\text{对于成本型属性}) \end{cases} \\ \bar{U}_k^* &= \begin{cases} \max A_k^T, & k \in K_2 \quad (\text{对于成本型属性}) \\ \min A_k^T, & k \in K_1 \quad (\text{对于效益型属性}) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

然后, 将各种属性向量, 按照式(5)进行归一化处理, 从而得到归一化属性矩阵 \mathbf{B} :

$$u_{jk} = \frac{U_{jk} - \bar{U}_k^*}{U_k^* - \bar{U}_k^*} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1l} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \cdots & u_{ml} \end{bmatrix} \quad (6)$$

矩阵 \mathbf{B} 中的各项属性实现了无量纲化, 代入优化模型式(1)中参与运算, 极大的降低了不同属性间存在差异性带来的误差.

2.2 客观权重 w'_k

WAIER 采用了主客观综合赋权法, 综合计算各种属性的主观权重(静态权重) w_k 和客观权重(动态权重) w'_k . 在多属性决策中, 各属性向量的属性值会存在一定的属性值差异, 差异越小, 说明该属性数值越接近, 对决策所起的作用越小, 相应的赋予的权重也应该越小, 反之赋予的权重应该越大, 这部分仅受属性值影响的权重, 本文称为客观权重. 针对这种属性值差异, WAIER 算法采用熵权系数法衡量属性值的差异程度, 确定客观权重大小, 并结合属性值在系统运行过程中的变化, 实现客观权重的动态自适应.

熵值^[11] E 是系统不确定性的一种量度, 其定义为

$$E = - \sum_{j=1}^m p_j \log p_j \quad (7)$$

由于熵值 E 具有极值性,当系统处于各种状态概率为等概率 $p_j = \frac{1}{m}$ 时,熵值 E 得到最大值,即

$$E(p_1, p_2, \dots, p_m) \leq E\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{m}, \dots, \frac{1}{m}\right) = \log(m) = E^{\max} \quad (8)$$

由熵的极值性可知,当一个属性值在不同方案上的取值越接近,其熵值越大.反之,属性 k 的熵 E_k 越大,说明该属性在各方案上的取值越接近,这些属性值与该属性的最优值间的差异程度也就越小,即越接近最优值.利用熵的这一特性,将矩阵 \mathbf{B} 中的属性值经过式(9)计算,得到邻居节点 N_j 中属性 k 的概率 p_j^k

$$p_j^k = \frac{u_{jk}}{\sum_{j=1}^m u_{jk}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7),可得到属性 k 的熵值 E_k

$$E_k = - \sum_{j=1}^m \left(\frac{u_{jk}}{\sum_{j=1}^m u_{jk}} \right) \log \left(\frac{u_{jk}}{\sum_{j=1}^m u_{jk}} \right) \quad (10)$$

当 $u_{jk} = 0$ 时,则

$$\left(\frac{u_{jk}}{\sum_{j=1}^m u_{jk}} \right) \log \left(\frac{u_{jk}}{\sum_{j=1}^m u_{jk}} \right) = 0 \quad (11)$$

然后对 E_k 进行归一化处理,得到相对熵 e_k :

$$e_k = \frac{E_k}{E_k^{\max}} \quad (12)$$

将式(8)代入式(12)

$$e_k = \frac{E_k}{\log(m)} \quad (13)$$

再通过式(14)将各属性的相对熵进行处理,即可得到客观权重 w_k'

$$w_k' = \frac{1 - e_k}{l - \sum_{k=1}^l e_k} \quad (14)$$

式(14)满足 $0 \leq w_k' \leq 1$, $\sum_{k=1}^l w_k' = 1$

2.3 主观权重 w_k

在进行多属性决策时,决策者通常对不同的属性有着不同的重视程度,将这些不同的重视程度用数学方式表示出来可以形成一个集合 $w = (w_1, w_2, \dots, w_l)$, $\sum_{k=1}^l w_k = 1$. 这个集合本文称其为主观权重集,各属性对应的权重称为对应属性的主观权重.当出现 $w = (0, 0, \dots, w_k = 1, \dots, 0)$ 时,主观权重部分变为针对属性 k 的单属性决策.

2.4 主、客观权重分配比 λ

式(1)中的分配比 λ 可以看做是针对主观权重和客观权重之间的权重系数,他反映的是决策者在主观

权重与客观权重之间的偏好程度. $\lambda = 1$ 时,式(1)将完全以决策者偏好为基础,成为主观权重路由,称该路由算法为 WAIER-1; $\lambda = 0$ 时,式(1)将仅以各属性的熵作为基础,优化权重系数,实现自适应的选取转发节点,成为客观权重路由.

3 WAIER 评价属性的选择

在大多数节能路由由算法研究中,都以传输能量消耗作为制定策略的评价属性,部分算法也引入了节点当前能量状态使得评价属性更加全面^[12,13],但这两种属性都只能反映一跳范围内的节点状态. WAIER 在此基础上引入了邻居节点能量信号衰减势和邻居节点能量势以扩展属性集,实现对两跳范围节点状态的预测,通过两跳邻居信息和多种属性参与路由建立,增强路由算法的性能^[14].

WAIER 选择了节点信号衰减度 R 、邻居节点信号衰减势 \bar{R} 、节点当前能量 E 和邻居节点能量势 \bar{E} , 作为评价属性,参与多属性决策. 在研究过程中,本文假设:(1)4种属性是相互效用独立的;(2)4种属性的边际效用都是线性的,并且边际效用随 R 、 \bar{R} 增加而减少,随 E 、 \bar{E} 的增加而增加.

定义 1 节点信号衰减度 R , R 代表的是当节点 N_i 向邻居节点 N_j 发送数据时,发送信号的输出功率 P_{int} 与信号接收功率 P_r 之间的差值,表示为 $R = P_{int} - P_r$. 其中 P_r 可由接收信号强度 RSSI 计算得到^[15], R 为成本型属性. 在建筑室内环境当中,由于存在大量软、硬分隔以及环境状态变化,室内传播损耗模型难以搭建,导致常规实验环境中用于衡量节点间数据传播损耗的节点距离参数^[16]难以实现准确衡量. 因此,本文以信号衰减度 R 替代传统算法中的节点距离参数. R 无需以室内传播损耗模型为基础,避开了室内复杂环境中路径损耗指数多变、难以准确估计等问题,以信号衰减度直接对应能量消耗,更适用于室内应用. 但同时 R 的获取也受到 RSSI 在室内环境不稳定的影响,会出现较为明显的抖动现象. 针对这一问题本文使用笔者前期研究中提出的 AIRE 算法^[17]进行滤波以及结合环境变动的自适应处理.

AIRE 算法对每次通信时获取的 RSSI 值进行处理后,可以获得一个准确的 RSSI 估计值,并且在环境变化(门窗开关、家具位移等)造成 RSSI 跃变后也能够实现快速收敛、准确估计. 使得 R 具备了数据稳定可靠与自适应室内环境变化的能力,可以准确反映室内数据传输的能量消耗.

定义 2 邻居节点信号衰减势 \bar{R} , \bar{R} 代表邻居节点 N_j 与其所有邻居(不包括节点 N_i)节点通信的信号衰减

度均值。 \bar{R} 为成本型属性。邻居节点信号衰减势 \bar{R} 反映该邻居节点所在区域进行数据通信的平均能耗状况。 \bar{R} 越高反映该邻居节点进行数据传输时能量消耗越大,反之则进行数据传输时能量消耗越小。因此节点在选择转发节点时应更趋向于选择 \bar{R} 更低的节点。

定义 3 节点当前能量 E , E 代表节点的剩余能量。 E 为效益型属性。 E 越大代表节点剩余能量越多,反之则能量越少。基于能量均衡的策略,节点在选择转发节点时应更趋向于选择 E 更高的节点。

定义 4 邻居节点能量势 \bar{E} , \bar{E} 代表邻居节点 N_j 的所有邻居节点的当前能量平均值。 \bar{E} 为效益型属性。

邻居节点能量势 \bar{E} 反映该节点所在区域能量的平均分布状况。 \bar{E} 越高反映该邻居节点所在区域剩余能量较大,反之则剩余能量较小。因此节点在选择转发节点时应更趋向于选择 \bar{E} 更高的节点。在本文的研究中将以 R 、 \bar{R} 、 E 、 \bar{E} 这 4 种属性作为路由选择的依据。其中, R 和 E 为节点的一跳环境属性, \bar{R} 和 \bar{E} 为节点的两跳环境属性。针对不同应用环境、使用者偏好可以对以上属性进行增减,搭建更加有针对性的属性集。

4 算法实现

结合前面提出的能量均衡模型和属性选择策略,即可实现 WAIER,具体步骤如下:

步骤 1 由 SINK 节点发起一次全网初始化广播,节点 N_i 收到 SINK 的信号后获取 $RSSI_i^{init}$,以判断其与 SINK 间的通信损耗。广播信号中还将附加根据使用者偏好确定的主观权重 $w = (w_R, w_{\bar{R}}, w_E, w_{\bar{E}})$ 和权重分配比 λ 。当邻居节点 $RSSI_j^{init} \geq RSSI_i^{init}$ 时称为节点 N_i 的“前向邻居节点”。

步骤 2 所有节点在自己通信范围内广播本节点 $RSSI_i^{init}$,并接收其他节点信息,判断自己的前向邻居节点。将前向节点加入自己的前向邻居节点集合。

步骤 3 完成全网初始化后,节点如需发送数据,则利用式(1)进行多属性决策,在前向邻居节点集合中选取最优的转发节点。数据包发送前先发送一个控制包,包中携带该节点的 P_{ini} 、 \bar{R} 、 E 、 \bar{E} (\bar{R} 、 \bar{E} 初始值为 0) 以及转发节点 ID,在通知转发节点准备接收数据的同时使其他邻居节点实现参数更新。

步骤 4 当节点侦听到控制包后,记录下 P_{ini} 、 \bar{R} 、 E 、 \bar{E} 数值,并计算出对应的 R 。实现归一化属性矩阵 B 的属性数据和本节点参数的更新。

步骤 5 结合归一化属性矩阵 B 的更新数据,利用式(10)、(13)、(14),实现客观权重 $w' = (w'_R, w'_{\bar{R}}, w'_E, w'_{\bar{E}})$ 的更新。如果控制包的转发节点为本节点,则等待接收数据包,然后转到步骤 6;否则返回步骤 3。

步骤 6 节点融合所有需要转发的数据,并在自己的前向邻居节点集合中排除已经转发过该数据的所有节点,然后利用式(1)进行多属性决策,选取最优的转发节点,转发数据。并将本节点 ID 加入该数据的已转发节点集合。返回步骤 3。

5 实验分析

本节将对 WAIER 算法进行实验分析,并与选择最小传播损耗邻居为转发节点的 MTE 算法(传播损耗的计算同样是以 AIRE 算法为基础)、以及 $\lambda = 1$ 时的主观权重算法(WAIER-1)进行效果对比。实验利用硬件节点(射频芯片为 CC1100)在实验室所在楼层中进行,节点分布情况和硬件节点如图 1:

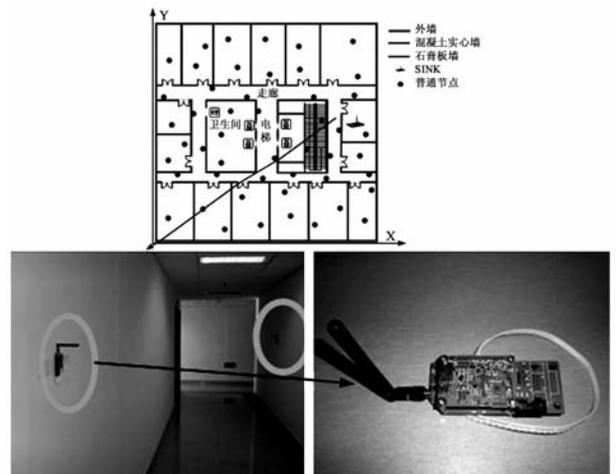


图1 实验环境与硬件节点示意图
根据经验设置实验参数如表 1

表 1 实验相关参数表

实验参数	参数取值
节点数	50 个
数据包长度	150bytes
控制包长度	50bytes
区域面积	约 1056 平米 ($X * Y = 32 * 33$)
节点最大传输距离	约 19 米 (LOS)
数据传输频率	每隔 1s 节点以 20% 概率向 SINK 节点发送数据
实验次数	各算法分别测试 10 次
λ	0.4
$W_1(R)$	0.35
$W_2(\bar{R})$	0.15
$W_3(E)$	0.35
$W_4(\bar{E})$	0.15
α (AIRE)	10
β (AIRE)	50
θ (AIRE)	0.5

图 2~4 分别为 WAIER、MTE、WAIER-1 算法某次实验经过 1 小时运行后的能量分布状态,表 2 为实验数据。由于 WAIER 改进了节点选择转发节点的机制,通过动态的评价前向邻居节点通信损耗、能量状况等因素,

使数据转发过程可自适应选择最优的转发节点,让数据流由更多的节点共同分担,降低网络能耗的同时使能耗得以均衡消耗.使得算法剩余能量分布更为均匀,且总的剩余能量也较多.而 MTE 仅以能耗作为评判指标,降低本节点能耗,导致过多使用楼道中的节点作为转发节点,无法顾及全网能耗均衡.使得 MTE 虽然剩余能量略多于 WAIER,但是能量分布很不均衡. WAIER-1 采用主观权重,使得网络参数变化时,权重却是固定不变,不能实现权重的自适应优化,导致剩余能量的均衡性有所下降.使得 WAIER-1 剩余能量与 WAIER 较为接近,但能量分布的均衡程度低于 WAIER.

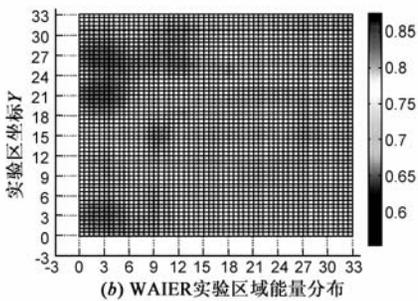
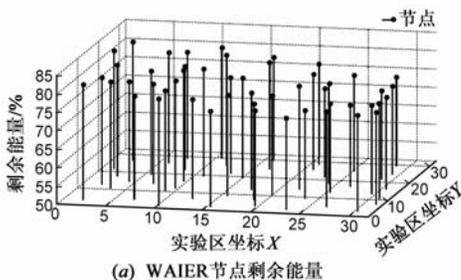


图2

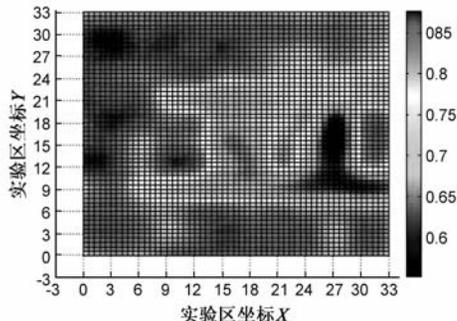
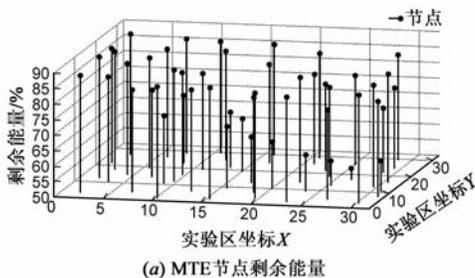


图3

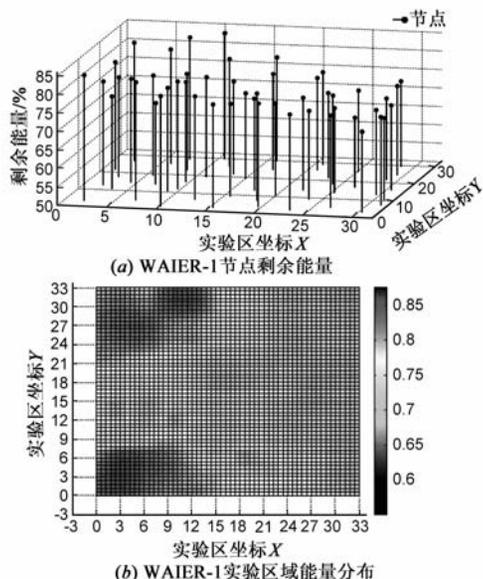


图4

表 2 实验数据结果

实验算法	剩余能量相对熵	剩余能量均值(%)
WAIER	0.9984	77.12
MTE	0.9723	79.26
WAIER-1	0.9965	76.24

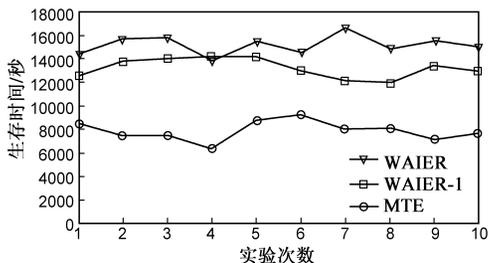


图5 算法生存时间对比

图 5 所示为实验的生存时间(第一个节点死亡时间)对比,MTE 虽然每次都选择能耗最小的节点转发数据,但忽略被转发节点当前能量等状态,形成热点区域,使得部分节点转发数据过多,快速死亡. WAIER-1 由于均衡性稍差,使其生存时间也略低于 WAIER. WAIER 生存时间更长,是 MTE 的 1.93 倍,是 WAIER-1 的 1.15 倍.

通过对实验数据的分析可发现 WAIER 以 RSSI 数值代替实际距离,避开了室内环境难以建立能耗模型的问题,更为直观准确的评估室内节点间的通信消耗,确保选择转发节点时能够提供可靠的数据支撑,保证算法效果;WAIER 以多种属性评估最优转发节点,使降低能耗和能耗均衡得以同时保障;以熵为基础调整各属性的客观权重,使权重可根据环境、网络参数的变化实现自适应,适用于环境参数变化相对频繁的室内应用.

6 结论

本文主要研究了无线传感器网络在室内环境中的

能量均衡及算法自适应问题,提出了一种基于自适应加权的室内能量均衡路由——WAIER.算法将路由建立过程抽象为多属性决策过程,以熵为基础构建出自适应的权重优化算法,然后结合4种本地评价属性,实现综合评价,选出最优转发节点.WAIER可根据参数的实时变化,搭建合理的数据转发通道,通过实验发现WAIER能够比MTE和WAIER-1更好的实现能耗均衡,延长网络生存时间.

参考文献:

- [1] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络[J].软件学报,2003,14(07):1282-1291.
Ren Feng-yuang, Huang Hai-ning, Lin Chuang. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14 (07): 1282 - 1291. (in Chinese)
- [2] 孙利民,李健中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [3] Ladha C, Sharif B S, Tsimenidis C C. Mitigating propagation errors for indoor positioning in wireless sensor networks[A]. Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007[C]. Pisa: Institute of Electrical and Electronic Engineers Computer Society, 2007. 1-6.
- [4] Zhou G, He T, Krishnamurthy S, et al. Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2006, 2(2): 221-262.
- [5] 曾加,慕春棣,李戌.基于多属性决策的无线传感器网络路由算法[J].系统仿真学报,2009,21(03):878-881.
Zeng Jia, Mu Chun-di, Li Shu. Multiple attribute decision making routing in wireless sensor networks[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(03): 878 - 881. (in Chinese)
- [6] DE S, QIAO C, WU H. Meshed multipath routing: an efficient strategy in sensor networks[A]. Wireless Communications and Networking, 2003[C]. New Orleans: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2003. 1912-1917.
- [7] Ding W, Iyengar S S, Kannan R, et al. Energy equivalence routing in wireless sensor networks[J]. Microprocessors and Microsystems, 2004, 28(8): 467-475.
- [8] Haibo Z, Hong S. Balancing energy consumption to maximize network lifetime in data-gathering sensor networks[J]. IEEE Transactions on, Parallel and Distributed Systems, 2009, 20(10): 1526-1539.
- [9] SHEPARD T J. Decentralized channel management in scalable multihop spread-spectrum packet radio networks[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Laboratory for Computer Science, 1995.
- [10] 米志超,鲍民权,周建江.传感器网络中基于模糊决策的多目标路由优化算法[J].西安电子科技大学学报,2008,35(04):721-725.
Mi Zhi-chao, Bao Min-quan, Zhou Jian-jiang. Multi-object optimization routing algorithm based on fuzzy decision making

for wireless sensor networks[J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(04): 721 - 725. (in Chinese)

- [11] 周荣喜,刘善存,邱莞华.熵在决策分析中的应用综述[J].控制与决策,2008,23(04):361-366.
Zhou Rong-xi, Liu Shan-cun, Qiu Wan-hua. Survey of applications of entropy in decision analysis[J]. Control and Decision, 2008, 23(04): 361 - 366. (in Chinese)
- [12] 文浩,林闯,任丰原,等.无线传感器网络的QoS体系结构[J].计算机学报,2009,32(03):432-440.
Wen Hao, Lin Chuang, Ren Feng-yuan, et al. QoS architecture in wireless sensor network[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(03): 432 - 440. (in Chinese)
- [13] Changsoo O, Mitra P, Seokcheon L, et al. Distributed energy-adaptive routing for wireless sensor networks[A]. Automation Science and Engineering, 2007[C]. Scottsdale: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2007. 905-910.
- [14] 李燕君,王智,孙伏贤.传感器网络基于两跳邻居信息的实时路由设计[J].软件学报,2009,20(07):1931-1942.
Li Yan-jun, Wang Zhi, Sun You-xian. Two-hop neighborhood information-based real-time routing design for sensor networks[J]. Journal of Software, 2009, 20(07): 1931 - 1942. (in Chinese)
- [15] CHIPCON. CC1100: low-power sub-1ghz rf transceiver[DB/OL]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1100.pdf>, 2009.
- [16] 朱艺华,沈丹丹,吴万登,等.无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法[J].电子学报,2009,37(05):1041-1045.
Zhu Yi-hua, Shen Dan-dan, Wu Wan-deng, et al. Dynamic routing algorithms optimizing lifetime of wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37 (05): 1041 - 1045. (in Chinese)
- [17] 黄河,石为人,许磊,等.自适应无线传感器网络室内RSSI估计[J].华中科技大学学报,2010,38(8):25-29.
Huang He, Shi Wei-ren, Xu Lei, et al. Estimation of indoor RSSI in adaptive wireless sensor networks [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 38(8): 25 - 29. (in Chinese)

作者简介:



石为人 男,1948年出生于重庆市,现为重庆大学自动化学院教授,博士生导师,主要研究方向为信息控制与智能系统、无线传感器网络及其应用、嵌入式系统等。

黄河 男,1982年生于重庆市,现为重庆大学自动化学院博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络及其应用、建筑节能等。

E-mail: dick_hh@yahoo.cn