基于活动预测和能耗均衡的 WSN 路由算法

汪成亮 王 强

(重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

摘 要: 无线传感网络(WSN, Wireless Sensor Network)中节点触发与数据传输往往会呈现出某种活动模式,基于活动模式特性提出了基于活动的节点分簇算法(AACP, Activity-Aware Clustering Protocol),将网络中的传感器节点分成多个活动簇,并通过对节点的历史触发数据进行分析,结合分簇结果对当前发生的活动进行预测. 基于活动预测结果,综合能耗均衡、节点剩余能量、传输能耗等影响因素,提出了基于活动预测和能耗均衡的 WSN 路由算法(AEBRP, Activity-aware and Energy Balanced Routing Protocol). 仿真实验中与低功耗自适应集簇分层型协议(LEACH, Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)、基于跟踪的动态节点分簇算法(HCMTT, Hybrid Clustering for Multitarget Tracking in wireless sensor networks)和传感器信息系统中的高能效采集算法(PEGASIS, Power Efficient Gathering in Sensor Information System)进行比较,验证了 AEBRP 算法在维持网络能耗均衡、延长网络生命周期方面具有明显优势.

关 键 词: 活动模式; 分簇算法; 活动预测; 能耗均衡

中图分类号: TN 911.7

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)01-0010-08

Activity-aware & energy balance based routing protocol for wireless sensor networks

Wang Chengliang Wang Qiang

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The node triggering and data transmission in wireless sensor network(WSN) shows an activity pattern. A clustering algorithm activity-aware clustering protocol(AACP) was put forward based on this activity pattern. Sensor nodes were divided into a plurality of clusters by AACP, and then activities were predicted with clustering results and nodes' historical trigger data. Based on this predication and some other impacts, including energy balance, nodes' residual energy and transmission consumption, activity-aware and energy balanced routing protocol(AEBRP) was proposed. The real trigger data were used for simulation experiments to compare AEBRP with protocols low energy adaptive clustering hierarchy(LEACH), hybrid clustering for multitarget tracking in wireless sensor networks(HCMTT) and power efficient gathering in sensor information system(PEGASIS). The experimental results show that AEBRP has obvious advantages in maintaining the balance of energy consumption and prolong the network life cycle.

Key words: activity patterns; clustering algorithm; activity prediction; energy balance

收稿日期: 2013-03-20; **网络出版时间**: 2013-06-17 16:26

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130617.1626.001.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61004112); 中央高校基本科研基金资助项目(CDJZRI2180006)

作者简介: 汪成亮(1975-),男,四川资阳人,副教授,wangcl@cqu.edu.cn.

1　问题提出

无线传感网络(WSN, Wireless Sensor Network)是由部署在监测区域大量微型传感器节点,通过无线通讯方式组成的多跳自组织无线网络,它综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术[1],主要应用在环境的监测和保护、医疗护理、工业监测、安全系统和智能环境等领域. WSN 中节点数量较多,监测区域较大,依赖电池供电,而电池能量有限且更换困难[2];此外,WSN 常用于一些危险监测环境(如矿井),过大的能耗会带来安全隐患. 因此降低能耗技术[3]成为 WSN 领域研究的一个关键课题.

现有研究表明,WSN 节点能耗由通信和闲置能耗两部分构成. 通信能耗是接收和发送数据能耗,闲置能耗是节点数据采集、数据处理的能耗[4]. 闲置能耗主要取决于制作工艺和芯片等因素,本文重点研究通信能耗.

与传统的无线通信网络不同,WSN 节点是否工作依赖于是否被某种活动触发,即节点触发的数据反映了监测目标的活动. 在长期运行中,WSN 节点触发所产生的时空数据往往表现出具有一定规律的活动模式. 例如智能家庭环境中,同一活动所触发的时空数据具有时间和空间的相邻性(如图 1 所示). 并且频繁出现的日常活动很有可能会在每天相同的时间段、相同区域内重复触发相应的节点. 这些活动模式规律的学习可用来进行活动预测,从而改进 WSN 的路由算法,达到降低能耗、延长网络生命周期的目的. 针对 WSN 中节点触发的时空数据所表现出的这种活动模式,本文提出了一种面向活动模式的节点分簇算法,在该分簇的基础上实现活动预测,并结合能量均衡、传输能耗和剩余能量系数设计路由算法.

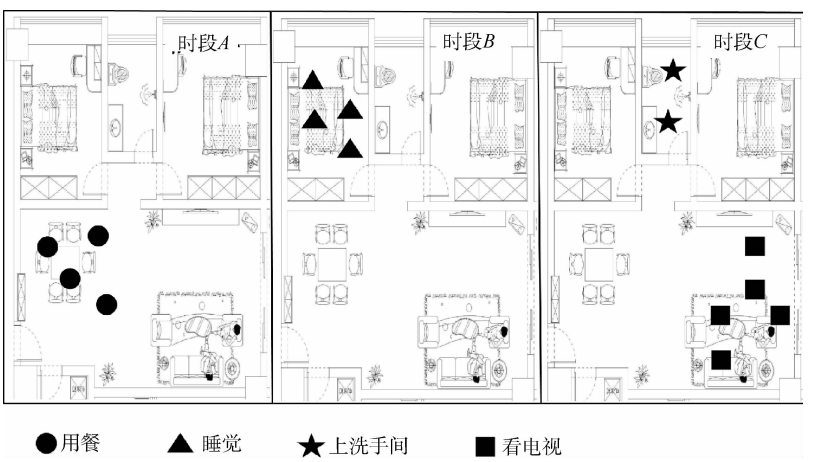


图 1　智能家庭中不同时间、地点的活动的触发情况

2　基本框架和相关研究

实际应用中,活动的这种在时空上重复性规律会导致某些节点能量“过渡消耗”,而其他节点则通常被闲置. 图 2 示意了节点触发频率的不均衡性. 节点的触发次数越多,则能耗越大,故 WSN 中节点能耗有明显不均衡性.

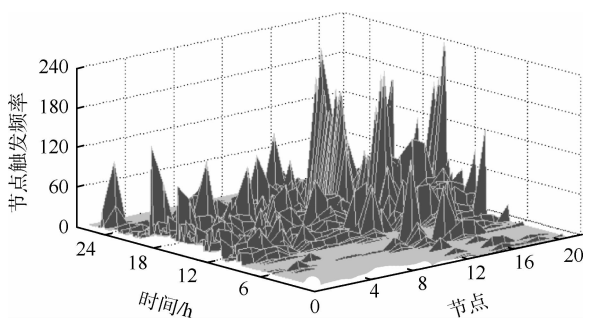


图 2　WSN 节点触发时空数据示意图

WSN 需要大量的节点协同工作,部分节点能量过早耗尽可能会导致整个网络的瘫痪,网络的生命周期往往取决于能量消耗最快的节点. 而 WSN 节点触发频率的不均衡终会导致节点能耗的不均衡. 避免节点能耗不均衡成为降低网络能耗、延长网络生命周期的关键问题.

本文在 WSN 路由算法设计中,设置网络能量均衡指标,结合活动预测、传输能耗、剩余能量指标来选择合适的下一跳节点传输数据,做到网络能量的均衡消耗,避免部分节点能量过早耗尽. 路由算法结构如图 3 所示.

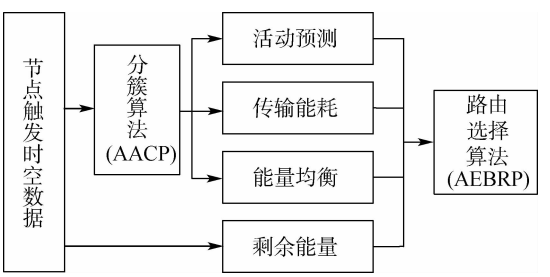


图 3　路由算法结构图

目前已有多种基于降低节点能耗的WSN路由算法和节点分簇算法,但都有各自的不足.如基于跟踪的动态节点分簇算法HCMTT[5],根据监测目标的动向动态地生成和解散簇,让不需要的节点进入休眠从而降低能耗,但没有解决网络节点能耗不均衡的问题,难以避免网络因部分节点的死亡而受到影响.又如基于能量均衡的无线传感网络路由算法EBUC[6],该算法用节点剩余能量、节点能耗速度、与Sink节点的距离作为选择簇首的参数,并通过回退机制实现节点回退等待时间的自适应调整,使得剩余能量更多的节点具有较高的机率成为簇首.该算法能够保证簇首节点不会过早死亡,因此只能做到部分节点的能耗均衡,没有从全局上考虑节点能耗的均衡.基于能耗均衡和延长网络生命周期的分簇算法EBLEC[7]在维持簇内节点能耗速率均衡的情况下选择合适的簇首,避免簇首能量过早耗竭.该算法能在簇内维持一定的能耗均衡,但无法保证整个网络的能耗均衡.

3 分簇算法

节点触发的活动特性表现为一个区域内相邻节点在较短的时间内被同一个活动触发,用这些节点触发的顺序、时间以及节点坐标就可以描述该活动.若将这些由同一活动触发的节点划分为一个簇,这样的簇就包含活动的某种特性.利用带有活动特性的簇可以有效地对活动进行预测.路由算法中也要用到这种簇来计算传输能耗和能量均衡指标作为选择下一跳节点的依据.

相关定义:设节点唯一标识为I_i,在WSN的运行中记录第i个触发节点T_i的标识T_i^{I}、触发时间t_i及其二维坐标(x_i,y_i),与节点标识共同组成节点触发的时空数据.算法中设定时间阈值σ和距离阈值δ,用来控制分簇精细程度.触发时间间隔小于σ且距离小于δ的节点被分成一个簇.σ和δ的值越小,则分簇后的簇内节点越少,簇数量越多,分簇越趋于精细.根据具体WSN应用环境和活动特性学习得到合适的阈值σ和δ.

基于活动的节点分簇算法(AACP,Activity-Aware Clustering Protocol)如下:

算法1 算法AACP.

输入:t_i,(x_i,y_i),I_i,σ

输出:$Q=\{\mathrm{cluster}(i)\}$

初始化:distance = 0;vector⟨int⟩cluster(i);j = 1; cluster(1).push_back(T_1^{I});

```
1: for i = 2 to n do
2:   {if(t_i − t_{i−1}) < σ
3:    {distance = Euclidean distance between T_i
       and T_{i−1}
4:       if distance < δ & A_r(T_i, T_{i−1})
5:         cluster(j).push_back(T_i^I);
6:       else cluster(++j).push_back(T_i^I);
     }
7:    else cluster(++j).push_back(T_i^I);
   }
```

可以看出算法为单次循环,因此该算法的时间复杂度是$O(n)$级.其中$A_{\mathrm{r}}(T_i,T_{i-1})$为节点之间的活动可访问参数,取值1表示可访问,取值0则为不可访问.不可访问的原因有:节点间距离过大,节点间有障碍物等.

AACP生成的多个集合$Q=\{\mathrm{cluster}(i)\}$即为所求的簇,未触发节点可看成独立的一个簇.算法学习阶段(如前5天)重复运行分簇算法,并对分簇结果进行分析和处理:出现次数较多的活动对应的簇保存为最终分簇结果;出现频率较少(如小于5%)的簇予以忽略.而发生在相同节点的多个活动,若只是偶然发生,则最终将会因发生频率小而被忽略.若是频繁发生,可将这多个活动看成一个活动来处理,因为利用分簇进行活动预测的最终目的是获知将要被触发的节点簇,故不影响算法性能.

$A_{\mathrm{r}}(T_i,T_{i-1})$对分簇有重要影响.若$a_{T_i}$表示$T_i$节点活动可访问的节点数,$A$表示网络所有节点的平均可访问参数,则计算公式如下:

$$A=\frac{\sum_{i=1}^{n}a_{T_i}}{n} \tag{1}$$

A越小,分簇结果就越精细,生成的簇就越多,而簇内所包含的节点也就越少.图4反映的是智能家庭的节点和空旷位置对应节点的分簇情况,由图可知活动不可达参数避免了多活动同时发生在相邻的节点时错误地将这相邻的节点分成一个簇.A越小的网络,生成簇较多,路由可选择的簇就越多,故路由协议的性能越好分.此外由图可知网络拓扑结构对活动簇的生成没有影响,而节点活动可访问参数对活动簇的生成有较大影响.因此拓扑结构不影响路由性能.

路由用分簇进行活动预测,获知活动将触发哪些簇及触发概率.路由的选择应避免即将被触发概率较大的簇.簇结果和活动预测的关系如图5所示.

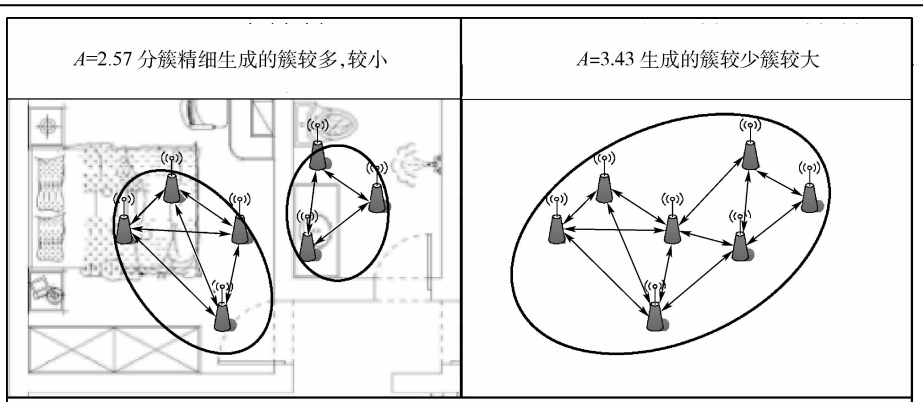


图 4　平均可访问参数对分簇结果的影响

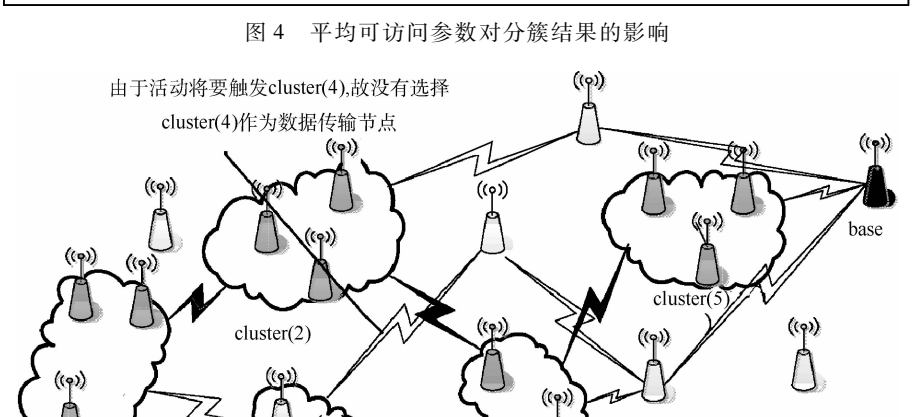


图 5　分簇与活动预测示意图

4　路由算法

4.1　相关变量和系数定义

路由算法中的相关变量定义如表 1 所示.

表 1　路由算法相关变量定义

变量	含义
E_i	节点的初始能量
$E_i(k)$	节点 i 发送数据 k 前的剩余能量
$p(x,y)$	活动从 x 节点转移到 y 节点的概率
$C(i)$	i 节点所在的簇
S_k	数据 k 的源节点
$S_{ij}(k)$	节点 i 发送数据 k 至节点 j 的发送能耗
$R_{ij}(k)$	节点 j 从节点 i 接收数据 k 的接收能耗
$B_j(k)$	发送数据 k 前的节点 j 所在局部网络均衡指标
$B_{ij}(k)$	i 传送数据 k 至 j 后 j 所在局部网络能量均衡指标

本文路由的设计主要依据以下 4 个指标:网络节点能量均衡系数 W_b、活动预测概率 W_f、传输能耗系数 W_t 以及节点的剩余能量系数 W_r. 下面对 4 个指标逐一说明.

4.1.1　能量均衡系数

为反映节点能耗情况,维护能耗的均衡,本文引入公共经济学中阿特金森指数法[8]来衡量网络能耗均衡.

阿特金森指数 A_ξ 是测度收入分配不公平指数中明显带有社会福利规范看法的一个指数. 该指数首先计算出一个等价敏感平均收入 R_ξ,表示如果每个人享受到了这样一个等价敏感收入时的社会总福利,相当于收入实际分布时具有的社会总福利值. 定义 R_i 为第 i 组的实际总收入,$f(R_i)$ 为第 i 组占总人口比例的密度函数,ξ 为不平等厌恶参数,该参数反映社会对于不平等的厌恶程度,取值范围是 $0<\xi<\infty$. 随着 ξ 的增加,社会给予收入相对较低的人群更大的权重. R_ξ 计算如下:

$$R_\xi = \left[\sum_{i=1}^{n} f(R_i)\cdot R_i^{1-\xi}\right]^{\frac{1}{1-\xi}} \tag{2}$$

即

$$R_\xi = \left[\int_{y_i}^{1-\xi} \mathrm{d}F(x)\right]^{\frac{1}{1-\xi}} = \left[\int f(x)\cdot R_i^{1-\xi}\mathrm{d}x\right]^{\frac{1}{1-\xi}} \tag{3}$$

若 μ 为平均收入,R_i 为第 i 人的收入,人口总数为 n,则 A_ξ 可表示为

$$A_\xi = 1 - \frac{1}{\mu}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i^{1-\xi}\right]^{\frac{1}{1-\xi}} \tag{4}$$

从式(4)可以看出,社会收入分配越公平,A_ξ 就越小,R_i 与 μ 也就越接近.

本文将网络节点剩余能耗作为 R_i 收入,引入阿特金森指数,用 $B(k)$ 表示网络剩余能量的均衡指标. $e_i(k) = \dfrac{E_i(k)}{E_i}$ 表示节点 i 标准化的剩余能量,$N(i)$ 为节点 i 的相邻节点集合,则 $\theta = \{i \cup N(i)\}$ 为含 i 节点的局部网络节点集合. 发送数据 k 前 $B_j(k)$ 计算如下:

$$B_j(k) = 1 - \frac{|\theta|}{\sum_{i\in\theta} e_i(k)}\left[\frac{1}{|\theta|}\sum_{i\in\theta} e_i^{1-\xi}\right]^{\frac{1}{1-\xi}} \quad (5)$$

其中 $\dfrac{\sum_{i\in\theta} e_i(k)}{|\theta|}$ 为 θ 集合中节点剩余能量的均值. 则数据 k 从节点 i 发送至 j 之后的 $B_{ij}(k)$ 为

$$B_{ij}(k) = 1 - \frac{|\theta|}{\sum_{i\in N(i)} e_i(k) - R_{ij}(k)} \cdot \left[\frac{1}{|\theta|}\left(\sum_{i\in N(i)} e_i^{1-\xi} + (e_j - E_{ij}(k))^{1-\xi}\right)\right]^{\frac{1}{1-\xi}} \quad (6)$$

指标的计算中包含较多的指数运算,出于节省节点计算开销以及部分节点可能不能胜任的考虑,本文可采用一种基于迭代原理的复杂度均衡算法[9],将指数运算近似为乘累加运算,从而大大降低运算复杂度.

由式(5)、式(6)得出节点能量均衡指标的系数为: $W_b = 1 + \beta(B_{ij}(k) - B_j(k))$. 其中 β 为放大参数,对能耗均衡的微小变化进行适当的放大,其值由网络环境而定,网络对部分节点的死亡越敏感,β 的值就越大. 从系数公式可以看出,若发送数据 k 后,j 节点所在的局部网络剩余能量更加趋于均衡,即 $B_{ij}(k) < B_j(k)$,则 $W_b < 1$,反之,$B_{ij}(k) > B_j(k)$,则 $W_b > 1$.

4.1.2 活动预测概率

智能环境中,活动可看成是由多个不同事件构成,事件由一个或几个节点簇触发形成. 而活动预测即是根据已发生的事件预测将要发生的事件. 如吃饭活动当中包含做饭、炒菜、用餐、洗碗等事件按时间和空间顺序触发形成. 若监测到做饭事件,则可以预测炒菜事件所对应的节点簇将可能会被触发.

为进行活动预测,需建立事件触发转移概率表. 这个表记录了节点 x 触发之后,将可能会触发的节点 y 以及可能触发的概率 $p_{x\to y}$. 触发概率计算公式如下:

$$p_{x\to y} = \frac{C_{x\to y}}{C_x} \quad (7)$$

其中, $C_{x\to y}$ 表示 x 触发后接着触发 y 的次数; C_x 表示 x 节点总的触发次数. 设定一个触发阈值 λ (如 $\lambda = 10\%$),若 $p_{x\to y} > \lambda$ 则规定节点 y 为 x 的活动可达节点,反之 $p_{x\to y} < \lambda$,则 x 节点不可达 y 节点,即没有先后触发节点 x 和 y 的事件. 阈值 λ 排除了因偶然事件导致的算法误差且降低了路由协议的复杂性.

路由算法选择下一跳节点时,应选择因活动转移将被触发的概率较小的簇的节点. 原因如下: ①若选将被触发节点,经长时间累积,可能导致这些节点处于长期工作状态,终因能耗过多而过早死亡;②选择工作状态下的节点作为数据传输节点,若数据量过大,或者请求传输的节点过多,很可能导致网络拥塞,增大网络延时,严重影响网络性能,同时增加了能耗.

若数据 k 传到节点 i,现要选择下一跳节点 j,其所在簇 $C(j)$ 可能被活动触发的概率可计算如下:

$$p_{C(s_k)\to C(j)} = \sum_{p_i\in C(s_k)\to C(j)} \prod_{(x,y)\in p_i} p_{x\to y} \quad (8)$$

其中 $p_i \in C(S_k) \to C(j)$ 为数据 k 源节点所在簇到 j 节点所在簇的所有活动可达路径. 由式(8)得出路由算法的活动预测指标系数为 $W_f = p_{C(S_k)\to C(j)}$.

4.1.3 传输能耗系数

在维持网络能耗均衡的同时,减少网络总能耗也是必要的. 故路由算法需要考虑到传送数据 k 所需要消耗的能量,用尽量少的能量传输数据 k. 用 $C_{ij}(k)$ 表示数据 k 从节点 i 传输到节点 j 所需消耗的能量. 则

$$C_{ij}(k) = S_{ij}(k) + R_{ij}(k) \quad (9)$$

然而若只是简单地计算当前节点的传输能耗,不考虑后继节点的情况,可能会造成后继节点能量的过多消耗. 设节点间传输数据的能耗用数字表示,如图 6 所示, i 节点传输数据 k 的下一跳节点有 j 和 h 两种选择,若仅考虑当前节点的传输能耗,则应选择能耗较小的 j 节点. 然而,从整条传输路径来看,路径 $i\to h\to n\to$ base(基站)和 $i\to h\to m\to$base 的传输能耗分别是 10 和 12,都小于路径 $i\to j\to l\to$ base 的 19,所以 i 节点的下一跳传输节点应该选择 h 而不是 j.

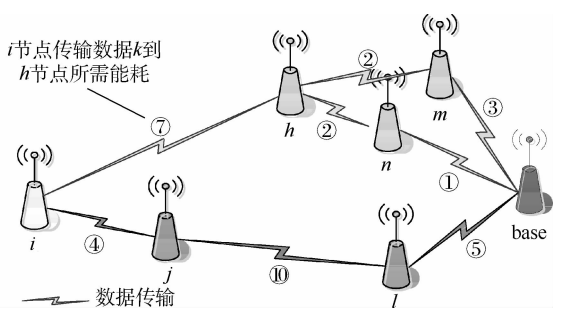


图 6 不同传输路径的传输能耗

为了尽可能避免上述因路由选择不当而造成多余的能量损耗,本算法考虑当前数据传输能耗的同时,还计算了下一跳节点可能后继的传输能耗均值 P_{nc} 共同组成传输能耗的系数 W_t,来引导正确的路由选择. P_{nc} 计算公式如下:

$$P_{nc} = \sum_{C(l) \in \{N_{C(j)}\}} p_{C(s_k)\to C(l)} \cdot \frac{\sum_{m \in C(l)} c_{jm}(k)}{|C(l)|} = \sum_{C(l) \in \{N_{C(j)}\}} \sum_{p_i \in C(s_k)\to C(l)} \prod_{(x,y) \in p_i} p_{x\to y} \cdot \frac{\sum_{m \in C(l)} [S_{jm}(k) + R_{jm}(k)]}{|C(l)|} \quad (10)$$

其中 $N_{C(j)}$ 表示 j 节点传送数据 k 至基站可能选择的下一跳节点所在的簇. 则根据式(9)和式(10)可计算传输能耗指标的系数为

$$W_t = C_{ij}(k) + P_{nc}$$

4.1.4　剩余能量

部分节点能量过早耗竭会影响网络性能甚至瘫痪网络,因此路由算法的设计需要重点考虑节点的剩余能量情况,使得在部分节点濒临死亡的关键时刻,尽最大的可能让其尽量少地工作,从而减少能量的消耗. 本文用 $e_i(k)$ 表示发送数据 k 前节点 i 标准化的剩余能量. 其计算方法如下:

$$e_i(k) = \frac{E_i(k)}{E_i} \quad (11)$$

由式(11)可得出剩余能量指标的系数公式: $W_r = e_i^{-n}(k)$. 其中 n 为放大参数,如 $n=3$,具体值取决于网络对部分节点过早死亡的敏感程度. n 越大,则 W_r 越大,剩余能量系数对路由算法的影响就越大,表示网络对部分节点的死亡越敏感.

4.2　路由算法

综上所述,路由算法的设计要综合考虑到节点能量均衡、活动预测、传输能耗和剩余能量 4 个因素. 本文结合每个因素系数的特点,设计一个综合系数 W_{ij},作为路由算法的最终系数. W_{ij} 计算公式如下:

$$W_{ij} = W_b \cdot W_f \cdot W_t \cdot W_r = [1 + \beta(B_{ij}(k) - B_j(k))] \cdot P_{C(s_k)\to C(j)} \cdot (C_{ij}(k) + P_{nc}) \cdot e_i^{-n}(k) \quad (12)$$

假设网络允许数据包传送的跳数上限是 Hop,且当前数据 k 已经过 h 跳传到节点 i(Node_i),则基于活动预测和能耗均衡的 WSN 路由算法(AEBRP, Activity-aware and Energy Balanced Routing Protocol)描述如下:

算法 2　AEBRP 路由算法.

输入:Node_i, $\{N(i)\}$, $W_{ij}(j \in N(i))$, Hop, $\text{distance}_{n\to base}(n \in \{i \cup N(i)\})$

输出:Next_hop

```
1:  if h < Hop
2:      { if Node_base ∈ N(i)
3:          Next_hop = Node_base;
4:        else if N(i) ≠ Null
5:          while(N(i) ≠ Null)
6:          { W_ij = min(W_ij, j ∈ N(i));
7:            if(distance_{j→base} < distance_{i→base});
8:              hop + = 1;
9:              Next_hop = Node_j;
10:             break;
11:           else N(i) - Node_j;
            }
12:     else if N(i) = Null
13:     reject k;
        }
14: else reject k;
```

算法需遍历当前节点的所有相邻节点以选择最佳下一跳节点,因此该算法的时间复杂度为 $O(n)$ 级.

5　实验仿真

本文对算法 LEACH[9-10], HCMTT, PEGASIS[11-12] 以及本文算法 AEBRP 进行仿真实验,分别对算法的能耗均衡、网络总能耗和网络生命周期 3 个方面在不同 A 的网络中进行比较,从而验证了本文算法在降低能耗和维持网络能量均衡方面的性能,以及 A 值对算法性能的影响.

5.1　实验设置

仿真实验在 NS2(Network Simulator version 2)[13] 中进行,实验的主要参数如表 2 所示.

表 2　仿真参数

参数名称	参数值
网络面积	(100 m,100 m)
网络节点数目	100
基站(base)位置(由网络环境而定)	(90,95)
节点初始能量	3 J
接收、传输单位比特能耗 E_{elec}	50 nJ/bit
能量参数 E_{mv}	0.001 3 pJ/(bit · m^{-2})
能量参数 E_{fs}	100 pJ/(bit · m^{-2})
数据包长度	500 bit
节点数据传输最大时间间隔 Δt	15 s
节点通信半径	10 m
冗余数据范围 δ	1.3

实验预先设定日常活动和少量异常活动. 网络运行前 4 天数据用于分簇算法的学习,并生成活动簇. 因活动模式与房间功能和智能环境用户

使用习惯有关,活动模式较稳定,故更新周期可设为1周,且活动的变更仅改变活动簇的生成及其触发时空顺序,并不影响算法的性能.此外活动模式识别精度与 A 对路由算法性能的影响类似.活动模式识别越精细,则活动由更多细小的事件构成,生成更多的簇,为路由提供更多的选择,故算法性能更好.后5天的数据用来进行本文算法和LEACH等算法的能耗和网络生命周期方面的对比分析.

5.2 数据产生和能耗模型

实验中节点都有相同的初始能量 $E_i = 3$ J,并且随着时间的推移不断的减少,直到节点死亡.节点的能量以2种方式进行消耗,即监测活动和数据传输.本文路由算法的目标是在减少2种方式的能量消耗外,尽量保持各节点能耗的均衡,以获得延长网络生命周期的效果.

本文应用LEACH中提出的,应用较广的经典能耗模型.此模型中,发送数据的能耗由2部分产生:发送电子和发送放大器,而接收数据的能耗仅由发送电子产生.若节点 i 和 j 之间的距离是 d,则发送能耗为

$$S_{ij}(k) = E_{\text{elec}}k + E_{\text{fs}}kd^2 \tag{13}$$

而接收能耗为

$$R_{ij}(k) = E_{\text{elec}}k \tag{14}$$

5.3 实验结果

5.3.1 能耗均衡对比

统计4种算法下所有节点1天内各自消耗的能量来反映网络能量消耗的均衡性,对比结果如图7所示.从图中可以看到LEACH算法的网络中节点的能耗参差不齐,差距较大,HCMTT算法和PEGASIS算法较之有部分改进,但仍不能达到本文算法控制节点能耗均衡的效果.而且节点的平均活动可访问参数 A 对LEACH,HCMTT和PEGASIS算法都没有明显的影响,但是图7b中AEBRP的能耗明显比图7a的更加均衡,说明 A 越小,AEBRP算法下的节点能耗越趋于均衡.

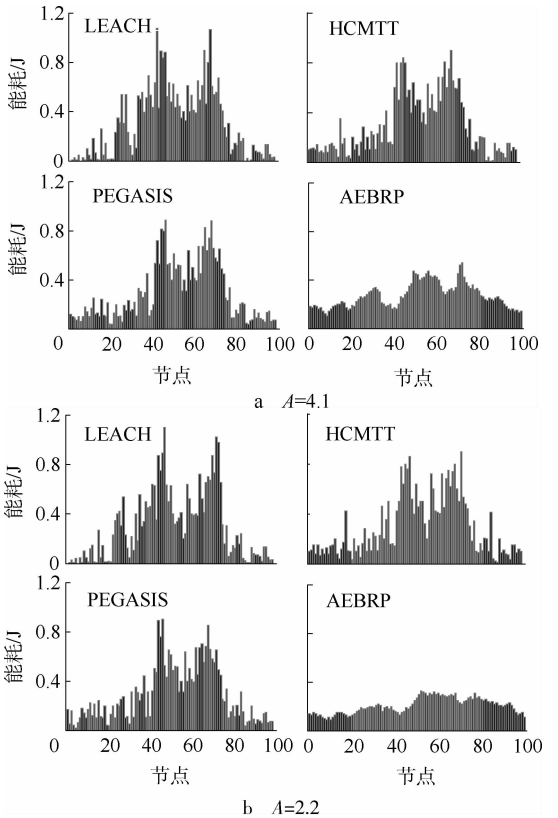


图7 LEACH,HCMTT,PEGASIS和AEBRP算法节点能耗对比

5.3.2 网络总能耗对比

图8是4种算法下网络总能耗对比.由图可知LEACH算法下的网络能耗最大,HCMTT下的能耗较之少40%左右,PEGASIS较HCMTT算法又有一些改进.本文算法与前3种算法相比,网络总能耗有显著降低,且随网络运行轮数增多,差距也越来越大.可见本文算法对降低网络总能耗有显著效果.通过图8b可以看出更小的参数 A 对AEBRP算法下网络总能耗略微有所减少.

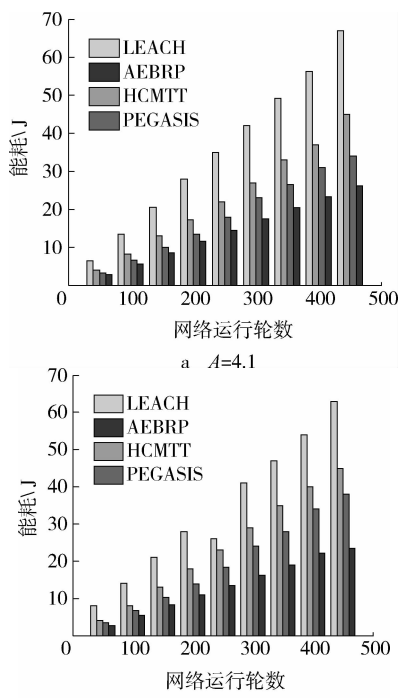
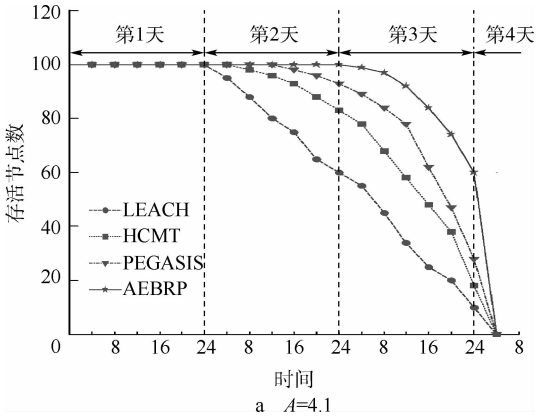


图8 LEACH,HCMTT,PEGASIS和AEBRP算法网络总能耗对比

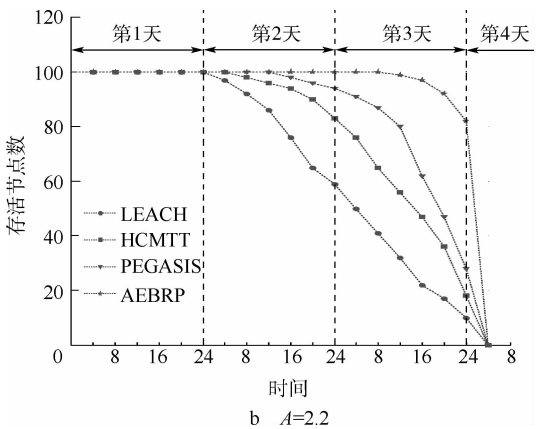
5.3.3 网络生命周期对比

WSN网络的生命周期表现在部分网络节点的死亡.实验中计算4个算法下网络节点的存活数目来比较算法对网络生命周期的影响.比较结果如图9所示:LEACH下的网络从运行第1天的20时就

已经开始有节点死亡,且死亡速度相对稳定;HCMTT 和 PEGASIS 较 LEACH 算法有所改进,到第 2 天的 12 时左右才有节点死亡;而 AEBRP 算法在图 9a 中直到第 2 天的 24 时才有节点死亡,在图 9b 中到第 3 天的 8 时才有节点死亡,且节点死亡时间集中. 可见本文 AEBRP 算法在维持的网络能耗均衡并延长网络生命周期方面有显著效果. 且 A 越小,算法性能越好,网络生命周期越长.



a　A=4.1



b　A=2.2

图 9　LEACH,HCMTT,PEGASIS 和 AEBRP 算法网络生命周期对比

6　结 束 语

本文提出一种基于活动模式的分簇算法,利用分簇算法进行活动预测,并综合考虑能量均衡、预测概率、传输能耗和剩余能量 4 个路由参数设计出 WSN 路由算法,同时在 NS2 环境下进行模拟仿真实验,与 LEACH 算法、HCMTT 算法和 PEGASIS 算法进行对比,验证了本文算法在降低网络能耗、维持网络能量均衡和延长网络生命周期方面的良好性能. 在进一步的工作中,将研究 WSN 对于活动模式的精度问题,研究 WSN 中如何有效地学习和识别更加精细的活动模式,从而进行更加精准的活动预测,在更大程度上减少网络不必要能耗.

参考文献(References)

[1] Aziz A A, Sekercioglu Y A, Fitzpatrick P, et al. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime of battery powered wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(1): 121 – 144

[2] Hwang Shiowfen, Lin Hsinhui, Dow Chyiren. An energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks with holes[C]// ICUFN 2012: 4th International Conference on Ubiquitous and Future Networks, Final Program. Washington DC: IEEE Computer Society, 2012: 17 – 22

[3] El-Aaasser M, Ashour M. Energy aware classification for wireless sensor networks routing[C]//International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT. New York: IEEE, 2013: 66 – 71

[4] Akyildiz I F, Su Weilian, Samkarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2002, 40(8): 102 – 105

[5] Hajiaghajani F, Naderan M, Pedram H, et al. HCMTT: hybrid clustering for multitarget tracking in wireless sensor networks [C]//Pervasive Computing and Communications Workshops, 2012 IEEE International Conference on. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 889 – 894

[6] 李运涛,朱敏,刘昊霖,等. 基于能量均衡的无线传感器网络路由算法[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2012, 49(1): 69 – 74
Li Yuntao, Zhu Min, Liu Haolin, et al. Energy balance routing algorithm for wireless sensor network[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2012, 49(1): 69 – 74 (in Chinese)

[7] Chaurasiya S K, Sen J, Chaterjee S, et al. An energy balanced lifetime enhancing clustering for WSN (EBLEC) [C]//International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT. New York: IEEE, 2012: 189 – 194

[8] Nao Mimoto, Ricardas Zitikis. The Atkinson indes, the Moran statistic, and testing exponentiality[J]. Journal of the Japan Statistical Society, 2008, 38(2): 187 – 205

[9] 李庆坤,全厚德,李庆会,等. 基于迭代原理的低复杂度均衡算法[J]. 信号处理, 2012, 28(10): 1427 – 1430
Li Qingkun, Quan Houde, Li Qinghui, et al. A low complexity equalization algorithm based on iteration[J]. IEEE Signal Processing, 2012, 28(10): 1427 – 1430 (in Chinese)

[10] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Hari B. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 – 670

[11] Sharma M, Sharma K. An energy efficient extended LEACH (EEE LEACH)[C]//Communication Systems and Network Technologies, 2012 International Conference on. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 377 – 382

[12] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: power-efficient gatheringin sensor information systems[J]. Aerospace Conference Proceedings, 2002, 3: 9 – 16

[13] Shin Jisoo, Suh Changjin. CREEC: chain routing with even energy consu mption[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(1): 17 – 25

[14] Zhang Yanjun, Wang Siye, Liu Zhenyu, et al. Performance analysis of wireless sensor network based on NS-2[C]//2012 International Conference on Systems and Informatics. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2012: 1445 – 1448