

文章编号: 1001-0920(2012)02-0227-05

无线传感器网络中事件驱动的能量均衡多流聚合路由算法

薛亮¹, 关新平^{1,2}, 袁亚洲¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 如何在均衡地使用监测节点能量的同时降低监测数据的回传时延是无线传感器网络被动式路由研究中亟待解决的一个难点. 综合网络传输快速性与能量均衡性需求, 针对过程特征性事件, 提出一种能量均衡的多流聚合路由算法(EB-MPA). 该算法依据网络层次图选举区域中心节点, 降低了数据到达基站的延迟. 另外, EB-MPA 引入能量损耗代价作为节点单跳路由选择的指标, 在节点具备融合能力的情形下, 进一步均衡了能量开销, 延长了网络生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 路由算法; 能量均衡; 多流聚合

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Energy-balanced and multi-path aggregated routing for wireless sensor networks

XUE Liang¹, GUAN Xin-ping^{1,2}, YUAN Ya-zhou¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: XUE Liang, E-mail: lxue@ysu.edu.cn)

Abstract: It is a key problem to the passive routing that how to evenly use the energy of sensor nodes while decreasing time-delay of sensing data. The paper considers demands of both rapid data transmission and balanced energy consumption. Especially for the process characteristic event, an energy-balanced and multi-path aggregated routing algorithm(EB-MPA) is proposed. Based on the network layer graph, the algorithm can select regional center node, which decreases transmission delay when source node communicates with the base-station via multi-hops. In addition, EB-MPA introduces the metric of energy consumption cost as guide line for node determining each hop. Since nodes possess the capability of data aggregation, the energy level of network can be decreased.

Key words: wireless sensor networks; routing algorithm; energy balance; multi-path aggregation

1 引言

无线传感器网络由大量的具有感知、计算和通信能力的传感器节点组成, 通过节点的协同工作, 完成对目标区域信息的采集与处理^[1-2]. 传感器节点所携能量资源及其计算能力十分有限, 因此高效均衡地使用传感器节点的能量并尽量延长网络的生命周期是该类型网络协议设计的要点. 目前, 针对不同的传感器网络应用, 研究人员提出了众多类型的路由协议^[3-6]. 大体上, 根据网络拓扑类型的不同, 面向事件驱动的路由协议分为平面型路由与层次型路由协议.

平面型路由协议设计的出发点在于, 数据从源端到目的端的传输路径处于同一等级(节点等级区别于节点层次), 且相互独立, 数据包不经过高等级节点的融合处理转发. 具体体现在: 文献[7]提出了一种基于最短路径路由(SPR, 又作 Dijkstra's algorithm)机制的改进算法, 源端节点选择距离 sink 节点跳数少的路径进行数据传送, 降低数据包传输时延. 与平面型路由协议不同的是, 层次型路由协议能够克服数据转发冗余这一缺点, 由其所构成的源到目的端的传输路径跨越了网络的不同等级节点. [8]利用随机理论, 将网络划分

收稿日期: 2010-09-07; 修回日期: 2010-10-15.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB731800); 国家自然科学基金重点项目(60934003); 国家自然科学基金项目(60804030); 上海市科委科研计划项目(08511501600); 河北省教育厅科研计划重点项目(ZD200908).

作者简介: 薛亮(1982-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络路由算法、拓扑控制等研究; 关新平(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事工业无线网络、认知无线网络等研究.

为若干子集(簇). [9-10]分别研究了簇首的轮换方法,起到均衡网内局部信息热点耗能的作用.

综上所述,在平面型路由方式中,因其单一的等级划分,所以没有过多的网络维护开销,相比之下,层次型路由方式对于减少冗余数据的转发具有良好的作用.受此启发,研究一种综合上述优点的新的路由方式——能量均衡的多流聚合路由算法(EB-MPA)成为本文的要点.

2 模型与定义

本文假设 Z 个同构传感器节点随机均匀散布在面积为 $L \times L$ 的矩形区域内,初始能量为 E_{ini} . 节点间通信半径保持为 \mathcal{R} .

定义 1(i 事件) 设某 i 事件待监测的 n 个特征阈值分别为 $[S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,k}, \dots, S_{i,n}]$, $S_{i,1}$ 可表示为 i 事件的温度阈值, $S_{i,2}$ 可表示为 i 事件的湿度阈值,等等. 如果存在节点 z 的监测值 $F_{i,k}(z) > S_{i,k}$ ($1 \leq k \leq n$), 则称事件 i 发生, 并称节点 z 为 i 事件的源节点, 记为 $z \in S_i$. 对于图 1 所示的 i 事件而言, 其覆盖面积定义为 ψ_i , $\psi_i = \psi_{i,1} + \psi_{i,2} + \dots + \psi_{i,d}$, d 为事件 i 发生子区域的个数.

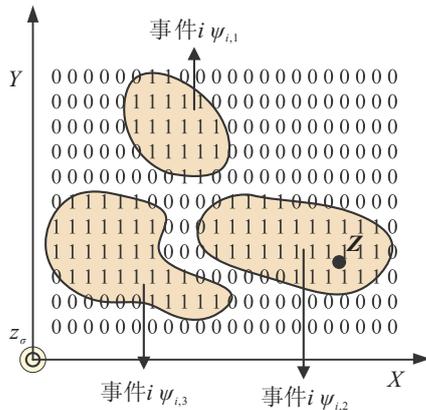


图 1 i 事件

定义 2(传感器网络拓扑图) 传感器节点集 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k, z_h, \dots, z_\sigma\}$, 其中 $\sigma = |Z|$, z_σ 表示网络的汇聚节点. 对于两个相异节点而言, 如果 $\|z_k - z_h\| \leq \mathcal{R}$, 则称节点 z_k 与节点 z_h 互为邻居节点, 记作 $\langle z_k, z_h \rangle \in U$ (U 为网络形成的全部邻接链路集). 这样, 由节点集 Z 与邻接链路集 U 便构成了网络的拓扑图 $G = (Z, U)$.

定义 3(近邻节点集) 由定义 2 可知, 某一节点 z_k 的近邻节点集可以表示为

$$\xi_{z_k} = \{z_k\} \cup \left(\bigcup_{\langle z_k, z_h \rangle \in U} \{z_h\} \right).$$

定义 4(传感器网络层次图) 在无层次传感器网络图 G 中, 标记汇聚节点 z_σ 的层次为零, 记作 $L(z_\sigma) = 0$. 由 z_σ 开始进行按层遍历, 节点 z_k ($z_k \in \xi_{z_\sigma}$) 收到

遍历消息后, 执行 $L(z_k) \leftarrow L(z_k) + 1$, 并继续向节点 z_h ($z_h \in \xi_{z_k}$) 扩散广播. 此过程持续进行, 直到每个节点获取自身的一个最小层次编号, 称具有最小层次编号的传感器网络拓扑图 G 为传感器网络层次图 G_L .

定义 5(直接转发节点) 根据定义 2 和定义 4, 在传感器网络层次图 G_L 中, 若两个节点 $\langle z_k, z_h \rangle \in U$ 且 $L(z_k) = L(z_h) - 1$, 则称节点 z_k 为节点 z_h 的直接转发节点, 记作 $z_k \in D(z_h)$, 其中 $D(z_h)$ 为 z_h 的所有直接转发节点构成的节点集.

定义 6(间接转发节点) 根据定义 2 和定义 4, 若 3 个节点 z_k, z_h, z_g 满足如下关系: $\langle z_k, z_h \rangle \in U$, $\langle z_h, z_g \rangle \in U$, $\langle z_k, z_g \rangle \notin U$ 且 $L(z_k) = L(z_h) - 1$; $L(z_h) = L(z_g)$. 则称节点 z_h 为节点 z_g 的间接转发节点, 记作 $z_h \in I(z_g)$, 其中 $I(z_g)$ 为 z_g 间接转发节点集.

定义 7(能耗代价) 无线传感器节点的绝大部分能量消耗在无线通信模块^[11]. 其中, 发射单位长度数据包所需能量与接收该数据包耗能大致相当. 这里, 记 e_t 为节点 z_k 向 z_h ($z_h \in \xi_{z_k}$) 发射长度为 l bit 数据所需能量. e_r 为节点 z_h 的接收耗能. 如果标记节点 z_k, z_h 的剩余能量分别为 $E_{res}(z_k), E_{res}(z_h)$, 则 z_k 与 z_h 进行信息交互的能耗代价为

$$C_{z_k, z_h} = \frac{e_t}{E_{res}(z_k)} + \frac{e_r}{E_{res}(z_h)}. \quad (1)$$

定义 8(区域中心节点) 针对事件 i 而言, 在其若干子区域 $\psi_{i,1}, \psi_{i,2}, \dots, \psi_{i,d}$ 中, 存在 Z 的子集 $w_{i,1}, w_{i,2}, \dots, w_{i,d}$, 满足条件 $w_{i,1} = \{z_q \mid F_{i,k}(z_q) \geq S_{i,k}; 1 \leq q \leq \sigma - 1; 1 \leq k \leq n\}$; 同时, 节点 z_q 满足 $L(z_q) = \min L(w_{i,1})$ 且 $E_{res}(z_q) = \max E_{res}(w_{i,1})$, 则称 z_q 为子集 $w_{i,1}$ 的区域中心节点, 记为 $z_q = \Theta(w_{i,1})$.

注 1(节点层次与节点等级) 称传感器网络层次图中赋予每个节点唯一的层次编号为节点层次. 根据节点在网络中的功能差别, 节点可划分为不同等级. 需要注意的是, 不同等级的节点可能处于同一层次, 层次相同的节点其等级可能不同.

上述定义给出了 EB-MPA 算法所使用的相关定义, 下面将结合算法设计阐述上述定义.

3 EB-MPA 算法设计

3.1 局部数据汇聚

假设过程特征性事件 i 发生的某个子区域为 $w_{i,d}$, 当节点 z_q ($z_q \in \psi_{i,d}$) 独立建立面向汇聚节点的传输路径时, 如若采用 SPR(shortest-path routing) 方式且不记路径建立代价, 则整个网络的数据转发耗能将大于

$$E_{SPR} = \sum_{z_q \in S_i} (e_t L(z_q) + e_r (L(z_q) - 1)). \quad (2)$$

另外, 在 SPR 方式中, 若没有考虑节点能量的瓶

颈效应, 则部分节点将会过早死亡, 并导致局部监测信息缺失. 因此, 考虑在事件发生的各子区域, 设计一种能量均衡且具备数据融合能力的路由方式, 以弥补上述路由方式的不足.

在邻居发现阶段, 节点 $z_q (z_q \in \xi_{z_p}, z_q \in S_i)$ 广播同源认证信息, 包括 $E_{\text{res}}(z_q), L(z_q), \text{ID}$, 节点 $z_p (z_p \in \xi_{z_q}, z_p \in S_i)$ 收到此消息后, 记录并存储. 这样, 节点 z_p 能够获知自身近邻节点集的同源节点, 即建立链路 $\langle z_q, z_p \rangle$. 节点 z_p 通过比较, 如果下式:

$$\begin{aligned} E_{\text{res}}(z_q) &= \max E_{\text{res}}(\xi_{z_p}), \\ \text{s.t. } L(z_q) &< L(z_p) \end{aligned} \quad (3)$$

亦成立, 则节点 z_q 为 z_p 的区域中心节点, 记作 $z_q = \theta(z_p)$. z_p 记录当前区域中心节点的 ID, 并重复上述操作步骤. 否则, 节点 z_p 保持自身的源节点状态不变, 即 $z_p = \theta(z_p)$, 这样, 每个节点都可获知自身的区域中心节点. 区域中心节点负责信息的收集处理与转发, 并建立与 z_σ 的交互路径. 如果每个节点对于事件的侦测数据长度为 l_1 bit (不含包头、功能码、校验码...), 则节点 z_p 发送数据分组到 $\theta(z_p)$, 经 $\theta(z_p)$ 去冗余处理后再转发, $\theta(z_p)$ 的通信能耗将小于各个节点独立转发总能耗. 一般认为, 无线传感器节点的通信模块主要由两部分组成: 发射能耗 E_{tx} 与接收能耗 E_{rx} , 其中 l 为数据包长度, 单位为 bit; E_{elec} 为电路耗能, d 为传输距离, 参数 $\varepsilon_{\text{friss-amp}}$ 与 $\varepsilon_{\text{two-ray-amp}}$ 表征距离相关的放大系数. 上述参数的典型值参见文献 [12].

$$E_{\text{tx}} = \begin{cases} l \times E_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{friss-amp}}d^2, & d < d_{\text{threshold}}; \\ l \times E_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{two-ray-amp}}d^4, & d \geq d_{\text{threshold}}; \end{cases} \quad (4)$$

$$E_{\text{rx}} = l \times E_{\text{elec}}. \quad (5)$$

本文中, 为了简化问题的讨论, 考虑到区域中心节点 $\theta(z_p)$ 接收的包个数为 m , 在不考虑数据压缩的情况下, $\theta(z_p)$ 需处理的数据分组总长为 $l + ml_1$ bits, 通信能耗为

$$\begin{aligned} W_1 &= (m+1) \times l \times E_{\text{elec}} + \\ &\quad (l + ml_1)\varepsilon_{\text{friss-amp}}\mathcal{R}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

由上述公式可知, m 个源节点独立传输时, 总能耗为

$$W_2 = m(l \times E_{\text{elec}} + l\varepsilon_{\text{friss-amp}}\mathcal{R}^2 + mlE_{\text{elec}}), \quad (7)$$

则

$$\begin{aligned} W_2 - W_1 &= \\ &\quad (ml - l - ml_1)(E_{\text{elec}} + \varepsilon_{\text{friss-amp}}\mathcal{R}^2). \end{aligned} \quad (8)$$

若 $W_2 - W_1 > 0$, 则只需 $(ml - l - ml_1)(E_{\text{elec}} +$

$\varepsilon_{\text{friss-amp}}\mathcal{R}^2) \geq 0$, 即

$$(ml - l - ml_1) \geq 0. \quad (9)$$

因此需

$$\frac{l}{l_1} \geq \frac{m}{m-1}. \quad (10)$$

当 $m \geq 2 (m \in N^+)$ 时, 数据包长度与侦测数据长度 l/l_1 需要满足式 (10) 所示关系, 便于实现区域中心 $\theta(z_p)$ 的融合降耗作用. 需要指出的是, 仿真部分已按该比例设置. 考虑到近邻节点集 ξ_{z_p} 监测数据的相似性, 进一步可以施以适当压缩技术处理.

3.2 平面路由描述

前文已提出了区域中心节点的定义. 在此将节点划分为不同的类型, 即区域中心节点、源节点、非源转发节点, 阐述 EB-MPA 的算法流程及中继节点动态选取过程, 并辅以相关理论证明.

3.2.1 情况 1

对于节点 z_p 而言, 当节点满足 $z_p \in S_i$, 但不存在节点 z_q 使得 $z_p = \theta(z_q) (1 \leq q \leq \sigma, p \neq q)$ 时, 称该节点为源非中心状态. 根据 3.1 节所述, 在此状态下, 节点 z_p 建立数据链路时, 首先判断是否存在节点 z 满足 $z \in \xi_{z_p}$ 且 $z = \theta(z_p)$, 如果满足条件的节点 z 存在, 则 z_p 直接发送数据包到 z , z_p 认定自身为源状态, 即 $z_p = \theta(z_p)$. 在此状态, z_p 判断: 直接转发节点集 $D(z_p)$ 中是否存在节点的能耗代价最小, 并将这一最小代价与间接转发节点集 $I(z_p)$ 中能耗代价最大的节点进行比较. 考虑到降低网络延迟, z_p 优先选择直接转发节点集中能耗代价最小的节点 $z_{\min, D}$, 如果 $C_{\min, D} > C_{\max, I}$, 则次而选择节点 $z_{\min, I}$. 如果上述条件均不满足, 则节点 z_p 的数据丢失, 并认为自身处于孤立状态, 即 $\xi_{z_p} = \{z_p\}$.

定理 1 在 EB-MPA 路由方式下, 某节点 z_p 处于源非中心状态时, z_p 的局部网络寿命至少为最短路径路由 (SPR) 方式寿命的 $\text{card}(D(z_p))$ 倍, 其中 $\text{card}(D(A))$ 表示集合 A 的势.

证明 由 3.2.1 节可知, 源非中心状态包含 3 种子情况: 1) 存在 z_p 的区域中心节点; 2) 不存在 z_p 的区域中心节点, 但 z_p 本身是源节点, 且 z_p 的近邻节点集非空; 3) 上述两种情况均不满足. 在不考虑 z_p 自身能耗情况下, 即节点 z_p 的采样周期以及数据速率恒定, 则情况 1) 中 z_p 的局部网络寿命 (从 z_p 开始建立起可用路径至近邻节点集中最后一个可用转发节点能量耗尽的持续时间) 等价于 $D(z_p)$ 中所有节点能量耗尽的时间. 由于 SPR 采用固定最短路径, EB-MPA 中 z_p 的局部网络寿命是 SPR 的 $\text{card}(D(z_p))$ 倍. 对于第 2 种情况, z_p 优先选取 $D(z_p)$ 中能耗代价小的节点, 当直接转发节点剩余能量达到平衡时, 次而

选取间接转发节点, 容易得出, 情况 2) 下 z_p 的局部网络寿命是 SPR 的 $\text{card}(D(z_p)) + \text{card}(I(z_p))$ 倍. 当 $I(z_p)$ 非空时, 定理 1 得证. 情况 2) 的推导过程如下 (如图 2 所示):

$$T_1 = E_{\text{ini}} / \alpha(e_{tx} + e_{rx}), \quad (11)$$

$$T_2 = \{[\text{card}(D(z_p)) + \text{card}(I(z_p))]E_{\text{ini}}\} / [\alpha(e_{tx} + e_{rx})], \quad (12)$$

$$T_2/T_1 = [\text{card}(D(z_p)) + \text{card}(I(z_p))]. \quad (13)$$

第 3 种情况, 当 $\xi_{z_p} = \{z_p\}$ 时, z_p 处于孤立状态, 理论上该节点寿命无穷大, 对于此情况不予分析.

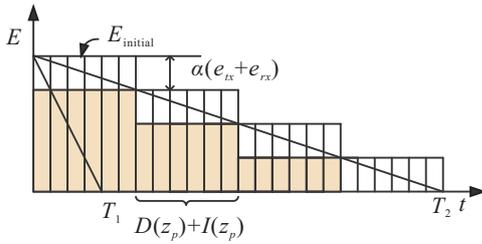


图 2 局部网络寿命

3.2.2 情况 2

当节点 $z_p \in S_i$ 同时存在节点 z_q 满足 $z_p = \theta(z_q)$ ($1 \leq q \leq \sigma$) 时, 称节点 z_p 处于源中心状态. 节点 z_p 融合处理已收集信息, 并建立适当路径, 转发数据. $\theta(z_p)$ 获得 z_p 的数据后, 解包提取, 并融合自身数据, 发射 $(l + l_1)$ bits 的新包到 $D(\theta(z_p))$ 或 $I(\theta(z_p))$. 路由建立过程如情况 1, 此处不再赘述.

3.2.3 情况 3

当节点 $z_p \notin S_i$ 且不存在节点 $z_p = \theta(z_q)$ ($1 \leq q \leq \sigma$) 时, 称节点处于非源非中心状态. 节点在此状态下, 如若收到相异区域中心节点的数据, 则执行数据提取、融合、转发任务; 否则, 节点对数据仅仅执行转发操作, 路径选取策略不变. 与此类似, 如果节点处于非源中心状态, 即节点不属于事件 i 的源节点, 但却是事件 i 的区域中心. 由于此类节点其物理位置的的特殊性, 其收到的数据既有多重融合数据, 又有单源节点数据, 执行前述转发策略依然能够保证在网络整体能耗均衡的前提下降低网络传输时延.

定义 9 (路径长度) 在传感器网络拓扑图 G 中, 数据包从某个产生该包的源节点到汇聚节点所经历的邻接链路集中边的数量称为路径长度.

定理 2 EB-MPA 路由所产生的路径长度不超过 SPR 的 2 倍.

证明 由情况 1~情况 3 可知, 整个网络节点的状态有 4 种: 源非中心状态, 源中心状态, 非源非中心状态和非源中心状态. 假设 SPR 方式下, 某一节点到

基站的路径长度为 H . 在 EB-MPA 算法下, 统观 4 种节点的路径选择只有 3 种可能: 1) 直接转发; 2) 间接转发; 3) 路径中断. 不妨假设, 该节点在一次成功路由中直接转发次数为 n_1 , 间接转发次数为 n_2 . 每次选择直接转发后, 路径长度增加 1, 选择间接转发, 路径长度增加 2. 值得注意的是, 每次直接转发的失败伴随间接转发的产生, 因此记:

H_1 事件: 直接转发成功, 其发生概率记作 $p(H_1) = p_1$;

H_2 事件: 间接转发成功, $p(H_2) = p_2$;

\bar{H} 事件: 直接转发失败, $p(\bar{H}) = 1 - p_1$.

SPR 的路径长度 H 满足

$$n_1 p(H_1) + n_1 p(H_2 | \bar{H}_1) + n_2 p(H_2) = H, \quad (14)$$

EB-MPA 的路径长度

$$H' = n_1 p(H_1) + 2n_1 p(H_2 | \bar{H}_1) + 2n_2 p(H_2), \quad (15)$$

则容易得到

$$H' = H + n_1 p(H_2 | \bar{H}_1) + n_2 p(H_2). \quad (16)$$

由式 (14) 易得

$$n_1 p(H_2 | \bar{H}_1) + n_2 p(H_2) \leq 2H,$$

因此

$$H \leq H' \leq 2H. \quad (17)$$

由此定理得证. \square

4 分析与评价

仿真环境中, 100 个节点随机均匀地分布在 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的矩形区域, 节点的通信半径 $\mathcal{R} = 250 \text{ m}$, 传播模型采用 two-ray-ground 模型, MAC 层采用 IEEE 802.11 的 DCF 方式, 并且在 ACK 中捎带发送节点的能量信息. 数据分组大小为 128 bytes, 速率为 2 packet/round. 各个节点初始能量为 $[19(\text{J}), 21(\text{J})]$ 内的随机值. 式 (4) 中距离相关的放大系数 $\varepsilon_{\text{two-ray-amp}}$ 为 10 pJ/bit/m^2 .

4.1 平均路径长度对比

对适用于无线传感器网络的路由算法而言, 路径长度小的算法其网络数据传输延迟也较小. 根据定理 2 的相关结论, EB-MPA 的路径长度能够始终保持在 SPR 的 2 倍幅度以内. 进一步观察图 3(a), 当 d 较小时, EAR 算法与 EB-MPA 算法性能相近. 但是, 由于节点初始能量水平的随机性, EAR 算法需要在多个备选节点之间依据概率建立若干最优路径, 这种策略考虑了节点的剩余能量, 但忽视了节点的层次结构对传输延迟的影响, 某些条件下甚至出现路径的偏转. 由此, 随着事件发生区域的扩大, EAR 的路径长度较其他两算法增幅显著.

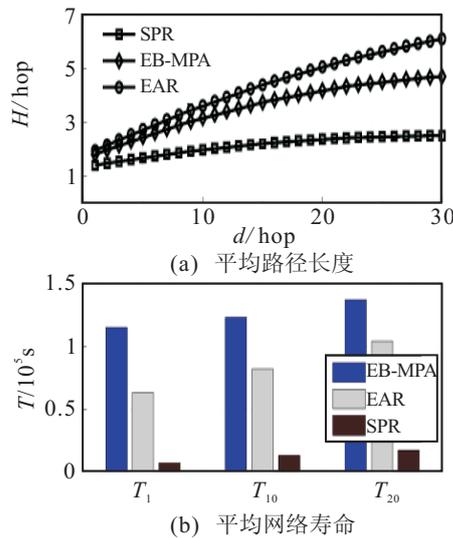


图3 算法性能比较

4.2 平均网络寿命对比

本文定义网络的寿命 T_n 为 $n\%$ 的节点能量耗尽时传感器网络持续运行的时间. 在保持事件发生区域个数 ($d = 5$) 及地域恒定的条件下, 网络正常运行的时间越长, 说明路由算法平衡网络能耗的能力越强, 路由的鲁棒性能越好. 从图 3(b) 中可以看到, SPR 在 3 种网络寿命定义下存活时间最短. 这是由于 SPR 算法的路径一旦建立, 便不能根据节点的能量状态动态调整. EAR 机制在源节点和目的节点之间建立多条路径, 根据路径上节点的通信能量消耗以及节点的剩余能量信息, 给每条路径赋予一定的选择概率, 使得数据传输均衡消耗整个网络的能量. 尽管 EAR 较之 SPR 而言, 增加了节点剩余能量对路径选择的导向作用, 但其采用绝对的能量与通信能耗数值, 而非本文中的能耗代价指标, 因此在数据量大致相当的情况下, EAR 的平均网络寿命低于本文算法.

5 结 论

本文针对传感器网络路由设计中节点的能量失衡以及数据传输延迟问题, 提出了基于局部数据汇聚和采用能耗代价策略的能量均衡多流聚合路由算法 EB-MPA. 通过区域中心节点选取, 能够将层次型路由与平面型路由相结合, EB-MPA 有效减少了控制开销并降低了网络延迟. 理论证明, EB-MPA 的路径长度至多为 SPR 方式的 2 倍. 同时, 模拟实验结果表明, EB-MPA 进一步提高了网络生命周期, 源节点剩余能量水平波动幅度也较小.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] Tubaihat M, Madria S. Sensor networks: An overview[J]. IEEE Potentials, 2003, 22(2): 20-23.
- [3] Law L K, Krishnamurthy P V, Faloutsos M. A novel adaptive protocol for lightweight efficient multicasting in ad hoc networks[J]. Computer Network, 2007, 51(3): 823-834.
- [4] Viswanath K, Obraczka K, Tsudik G. Exploring mesh and tree based multicast routing protocols for MANETs[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(1): 28-42.
- [5] Hwang K S, Ko Y C, Alouini M S. Performance analysis of incremental opportunistic relaying over identically and non-identically distributed cooperative paths[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(4): 1953-1961.
- [6] 王雪, 王晟, 姜爱国. 无线传感器网络中的分簇融合决策方法[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1208-1212. (Wang X, Wang C, Jiang A G. Cluster-based data fusion decision method in wireless sensor networks[J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1208-1212.)
- [7] Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on-demand distance vector routing[C]. Proc of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. New Orleans, 1999: 90-100.
- [8] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [9] Stanislava S, Heinzelman W B. Cluster head election techniques for coverage preservation in wireless sensor networks[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(5): 955-972.
- [10] Xue L, Guan X P, Liu Z X, et al. A power- and coverage-aware clustering scheme for wireless sensor networks[J]. Int J of Automation and Computing, 2010, 7(4): 500-508.
- [11] Staehle B, Staehle D. Impact of energy models on energy efficient sensor network routing[C]. Proc of IEEE Int Conf on Mobile Adhoc and Sensor Systems. Pisa, 2007: 1-9.
- [12] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.