

文章编号: 1001-0920(2012)08-1211-05

## 具有移动 sink 的无线传感器网络能量均衡分簇路由协议

钟 智<sup>1</sup>, 罗大庸<sup>1</sup>, 刘少强<sup>1</sup>, 樊晓平<sup>1</sup>, 瞿志华<sup>1,2</sup>, 李勇周<sup>1</sup>

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410075; 2. 中佛罗里达大学 电子工程和计算科学系, 奥兰多 162450)

**摘 要:** 提出了一种具有移动 sink 的无线传感器网络能量均衡分簇路由协议. 将整个网络划分为若干个网格, 每个网格采用簇头评判模型选出簇头, 簇头负责收集簇内兴趣事件, 进行数据融合后转发给移动 sink. 当 sink 在同一个网格内移动时, 只需要将新位置通知当前网格的簇头; 当 sink 移动到新的网格时, 先将位置报告给新网格的簇头, 然后由该簇头将位置信息分发给其他簇头. 该协议能够有效地均衡节点的能量消耗, 延长网络的生存时间.

**关键词:** 无线传感器网络; 路由协议; 网格; 簇头评判模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

## Energy-balanced clustering routing protocol in wireless sensor networks with a mobile sink

ZHONG Zhi<sup>1</sup>, LUO Da-yong<sup>1</sup>, LIU Shao-qiang<sup>1</sup>, FAN Xiao-ping<sup>1</sup>, QU Zhi-hua<sup>1,2</sup>, LI Yong-zhou<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Central Florida, Orlando 162450, USA. Correspondent: FAN Xiao-ping, E-mail: xpfan@mail.csu.edu.cn)

**Abstract:** An energy-balanced clustering routing protocol in wireless sensor networks with a mobile sink is proposed. The whole network is divided into some grids, which choose cluster heads using the cluster head evaluating model. After gathering and fusing the interesting event, cluster heads transmit to the mobile sink. When moving within a grid, the mobile sink only needs to transmit its location to the cluster head of this grid. When moving to a new grid, the mobile sink transmits its location to the cluster head of this grid firstly, and then transmits to other all cluster heads. This protocol can efficiently balance the whole network energy consumption and prolong to the network lifetime.

**Key words:** wireless sensor networks; routing protocol; grid; cluster head evaluating model

### 1 引 言

在静止的无线传感器网络中, 部署在 sink 周围的节点不仅要向 sink 发送自己感知到的数据, 而且要中转其他节点传递给 sink 的信息, 这样, sink 周围节点消耗的能量明显多于离 sink 较远的节点<sup>[1-2]</sup>. 不均衡的能量消耗将引起“能量空洞”<sup>[3]</sup>和网络不连通, 进而影响数据的传输. 因此, 如何均衡节点的能量消耗以延长网络的生存时间是无线传感器网络的研究重点.

移动节点的应用给无线传感器网络带来了新的机遇和挑战. 它不仅可以提高节点的定位精度<sup>[4-6]</sup>, 而且能有效延长网络的生存时间<sup>[7-11]</sup>. 文献[7]提出了分簇式无线传感器网络 sink 自主移动机制, 并证明了节点初始能量越高性能越好. [8]中 sink 沿六边形边缘运动, 并通过多跳传输收集其他节点的兴趣事

件. 与静止的 sink 相比, 此方法的网络生存时间是前者的 3.48 倍. [9]研究了 sink 的运动方式对网络生存时间的影响. [10]设计了一种路径选择概率模型, 并使用蚁群优化算法令移动代理找到一条从处理节点到目标节点间的能量有效路径, 但蚁群优化算法的复杂度较高. [11]提出了 ALURP 路由协议, 当 sink 在自适应区域内移动时, 其位置信息只需要在此区域内更新; 一旦 sink 移出了自适应区域, 其位置信息则需要在整个网络进行洪泛. 如果 sink 频繁地移出自适应区域, 则位置更新能耗将相当巨大. 鉴于上述缺点, 本文设计了一种具有移动 sink 的无线传感器网络能量均衡分簇路由协议 (EBRP). 在 EBRP 中, 整个网络划分为若干个网格, 每个网格采用簇头评判模型选出簇头, 簇头负责收集簇内兴趣事件, 进行数据融合后再转发

收稿日期: 2011-01-18; 修回日期: 2011-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60776834, 60870010).

作者简介: 钟智(1982-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络的研究; 罗大庸(1944-), 男, 教授, 博士生导师, 从事无线传感器网络、智能控制等研究.

给移动 sink.

## 2 EBRP 协议设计与分析

### 2.1 假设条件

本文考虑一个正方形监测区域( $L \times L$ ), 其中随机分布  $N$  个传感器节点和 1 个移动 sink, 所有传感器节点和移动 sink 的通信半径相等, 传感器节点由电池供电, 移动 sink 没有能量限制. 本文使用与文献[12-13]相同的无线通信能量消耗模型.

### 2.2 EBRP 协议描述

在具有移动 sink 的监测场景中, 采用分簇结构可以避免大量冗余数据传递到 sink. 本文使用网格均匀分簇, 目的是均衡网络负载和能量消耗. 每个网格采用簇头评判模型选出簇头, 簇头负责收集簇内兴趣事件, 在进行数据融合后转发给移动 sink. 当 sink 在同一个网格内移动时, 只需要将新位置通知本网格的簇头; 当 sink 移动到新的网格时, 先将位置报告给新网格的簇头, 然后由该簇头将位置信息分发给其他簇头. sink 的位置更新避免了洪泛过程, EBRP 协议具体步骤如下:

#### Step 1 网格划分规则.

整个网络划分成如图 1 所示的有唯一编号的正方形网格( $l \times l$ ), 各节点根据下式计算出所属的网格:

$$N_x^i = \lfloor x_i/l \rfloor, N_y^i = \lfloor y_i/l \rfloor. \quad (1)$$

其中:  $N_x^i$  和  $N_y^i$  为节点所属的网格号;  $x_i$  和  $y_i$  为节点坐标;  $\lfloor x_i/l \rfloor$  为向下取整, 即小于  $x_i/l$  的最大整数.

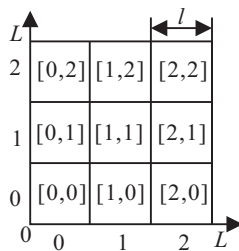


图 1 网格划分

#### Step 2 簇头评判模型.

在网格中, 使用 LEACH 协议<sup>[13]</sup>中簇头选举法产生的簇头有可能分布在网格的边沿地带, 造成了在同一个簇内过多的成员节点远离簇头, 导致节点的能量消耗不均衡.

图 2(a)和图 2(b)为网格中簇头位置对于网络节点能耗的影响, 黑色方块代表簇头, 圆圈代表簇内成员. 图 2(a)为簇头近似分布在网络中间区域, 簇头的 1 跳邻居数为 7 个, 2 跳节点数为 9 个, 3 跳节点数为 6 个. 图 2(b)为簇头分布在网格边沿地带, 簇头的 1 跳邻居数为 4 个, 2 跳节点数为 8 个, 3 跳节点数为 4 个, 4 跳节点数为 3 个, 5 跳节点数为 3 个. 假设每个节点

一轮要发射  $n$  个数据包给簇头, 节点接受 1 个数据包消耗的能量为  $E_r$ , 发送 1 个数据包消耗的能量为  $E_t$ , 则图 2(a)中 1 跳邻居点发送  $n$  个数据包到簇头消耗的能量为

$$E_{1\text{-hop}} = 7nE_t. \quad (2)$$

2 跳节点发送  $n$  个数据包到簇头消耗的能量为

$$E_{2\text{-hop}} = 9nE_t + K_1, \quad (3)$$

其中  $K_1$  为簇头 1 跳邻居点中转 2 跳节点传递过来的数据包消耗的能量, 有  $K_1 = 9nE_r + 9nE_t$ . 3 跳节点发送  $n$  个数据包到簇头消耗的能量为

$$E_{3\text{-hop}} = 6nE_t + K_2, \quad (4)$$

其中  $K_2$  为簇头 1 跳和 2 跳节点中转 3 跳节点传递过来的数据消耗的能量, 有  $K_2 = 2(6nE_r + 6nE_t)$ . 总能耗为

$$E_{\text{total}}^a = E_{1\text{-hop}} + E_{2\text{-hop}} + E_{3\text{-hop}} = 43nE_t + 21nE_r. \quad (5)$$

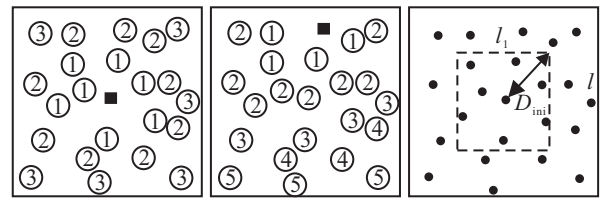


图 2 簇头位置及簇头候选区域

图 2 簇头位置及簇头候选区域

同样, 可以得到图 2(b)中成员节点传递数据到簇头的总能耗为

$$E_{\text{total}}^b = 59nE_t + 37nE_r. \quad (6)$$

很明显,  $E_{\text{total}}^a < E_{\text{total}}^b$ . 为了减少簇内需要中转的数据量, 均衡簇内节点的能量消耗, 提出了利用簇头评判模型来选举簇头.

**定义 1**(簇头候选区域) 以网格的中心点为基准, 建立边长为  $l_1$  的正方形区域, 该区域即为簇头候选区域. 如图 2(c)所示, 虚线内为簇头候选区域( $l_1 \times l_1$ ), 其中

$$l_1 = l/\omega, \omega > 1. \quad (7)$$

**定义 2**(候选节点) 处于簇头候选区域的节点可以竞选本簇的簇头, 称该节点为候选节点. 节点根据下式判断自己是否是候选节点:

$$\begin{cases} lN_x^i + \frac{l-l_1}{2} \leq x \leq lN_x^i + \frac{l+l_1}{2}, \\ lN_y^i + \frac{l-l_1}{2} \leq y \leq lN_y^i + \frac{l+l_1}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

**定义 3**(簇头评判模型) 簇头评判模型定义为

$$f = \begin{cases} \beta f_d + \gamma f_n, & \text{first round;} \\ \alpha f_e + \beta f_d + \gamma f_n, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $f_e = E_i/E_{ini}$ ,  $E_{ini}$  为候选节点的初始能量,  $E_i$  为候选节点  $i$  的剩余能量,  $f_e$  可以根据节点的剩余能量来判断它担任簇头的重要程度;  $f_d = (D_{ini} - D_i)/D_{ini}$ ,  $D_{ini}$  为簇头候选区域的顶点与中心点的距离,  $D_i$  为候选节点  $i$  与中心点的距离,  $f_d$  可以根据节点与网格中心点的距离远近来判断它担任簇头的重要程度;  $f_n = h_i/h_{neighbor}$ ,  $h_{neighbor}$  为候选节点中具有的最高邻居节点数,  $h_i$  为候选节点  $i$  的邻居数,  $f_n$  可以根据节点的邻居数来判断它担任簇头的重要程度;  $\alpha, \beta, \gamma$  为平衡调节因子. 可以推知,  $f_d \leq 1$ ,  $f_n \leq 1$ ,  $f_e \leq 1$ . 节点根据下式计算自己所属的网格中心点坐标:

$$\begin{cases} x_{center} = (2N_x^i + 1)l/2, \\ y_{center} = (2N_y^i + 1)l/2. \end{cases} \quad (10)$$

簇头评判模型分别从节点剩余能量、与网格中心点的距离和邻居节点数3个方面综合考虑节点担任簇头的重要程度. 尽可能选择剩余能量高、离网格中心点距离较近和邻居节点数多的候选节点担任簇头, 其具体步骤如下:

1) 网络初始化. 节点根据式(1), (7)和(8)计算所属网格并判断自己是否为候选节点.

2) 第1轮时, 候选节点根据簇头评判模型计算其  $f$  值, 并与其他候选节点比较, 选出  $f$  值最大的节点担任簇头. 减少候选节点数能够减少节点间  $f$  值的比较次数, 通过缩小候选区域来调节候选节点数. 因此, 第1轮时,  $\omega = 9$ ; 其他轮时,  $\omega = 2$ .

3) 每轮结束时, 候选节点将其  $E_i$  和  $h_i$  附带在消息中上报给簇头, 簇头根据簇头评判模型计算候选节点的  $f$  值, 并选取  $f$  值最大的节点担任下一轮的簇头.

### Step 3 移动 sink 位置更新策略.

移动 sink 在网络中随机运动, 当 sink 的新位置与上一次停留的位置属于同一个网格时, 只需要通知该网格的簇头更新其位置. 当 sink 移动到另一个新网格时, 先将其位置报告给新网格的簇头, 然后由该簇头分发给其他簇头. sink 的位置更新避免了洪泛过程, 有效地均衡了节点的能耗.

## 2.3 EBRP 协议性能分析

本节对 EBRP 协议进行性能分析, 并与 ALURP 协议进行比较. 假设两个协议中节点密度相等, 且 EBRP 中每个网格的面积与 ALURP 中自适应目标区域的面积相等. 设网络大小为  $(L \times L)/m^2$ , 每个网格为  $(l \times l)/m^2$ , 每一轮时间为  $T/s$ . 在  $T$  时间内, sink 移动  $m$  次. 其中在同一个网格内(自适应目标区域内)移动  $m_1$  次 ( $m_1 \geq 1$ ), 移动到新网格(移出自适应目标区域)  $m_2$  次 ( $m_2 \geq 1$ ).

**定理 1** 在 EBRP 和 ALURP 协议中, 若节点密度相等, 则 sink 位置更新一次的能耗值与参与位置更新的区域面积成正比关系.

**证明** 节点密度为  $\rho$ , 节点收发一个 sink 位置更新包的能量消耗为  $e$ , 则 sink 的新位置在整个网格内更新一次时, 参与更新的节点数为  $l^2\rho$ , 其能量消耗为

$$E = l^2\rho e. \quad (11)$$

由式(11)可知, 能耗  $E$  与参与更新的区域面积  $l^2$  成正比.  $\square$

根据定理 1, ALURP 协议中 sink 位置更新能耗为

$$E_{ALURP} = L^2\rho e + l^2\rho e m_1 + L^2\rho e m_2. \quad (12)$$

其中:  $L^2\rho e$  为网络初始化时 sink 广播其位置消耗的能量;  $l^2\rho e m_1$  为 sink 在自适应区域移动时更新位置消耗的能量;  $L^2\rho e m_2$  为 sink 移出自适应区域更新位置消耗的能量.

EBRP 协议中, 成簇能耗为  $L^2\rho e$ . 图 3 为位置更新包转发区域, 三角形表示移动 sink, 圆环为其通信范围. sink 移动到新的位置后发送位置更新包, 并接收到更新包节点向簇头发送 sink 的新位置信息. 如果节点收到已经转发过的位置消息, 则丢弃该数据包, 转发区域如图 3(a) 虚线框内所示, 其位置更新包传递到簇头的最大区域如图 3(b) 中阴影部分所示.  $AB$  为网格的对角线,  $a_1b_1, a_2b_2$  平行于  $AB$ , 且与  $AB$  的距离为  $d$ , 图 3(b) 中阴影部分面积为  $2\sqrt{2}ld - 2d^2$ ,  $r_0 \leq d \leq \sqrt{2}l/2$ . 因此, EBRP 协议中, sink 在同一个网格内移动的位置更新能耗为

$$E'_{EBRP} = (2\sqrt{2}ld - 2d^2)\rho e m_1, \quad r_0 \leq d \leq \frac{\sqrt{2}}{2}l. \quad (13)$$

当 sink 移动到新的网格后的位置更新能耗为

$$E''_{EBRP} = \frac{L^2}{l^2}(2\sqrt{2}ld - 2d^2)\rho e m_2, \quad r_0 \leq d \leq \frac{\sqrt{2}}{2}l. \quad (14)$$

第 1 次成簇时, sink 广播其位置消耗的能量为

$$\frac{L^2}{l^2}(2\sqrt{2}ld - 2d^2)\rho e, \quad r_0 \leq d \leq \frac{\sqrt{2}}{2}l.$$

EBRP 协议中, sink 位置更新能耗为

$$E_{EBRP} = L^2\rho e + (2\sqrt{2}ld - 2d^2)\rho e m_1 + \frac{L^2}{l^2}(2\sqrt{2}ld - 2d^2)\rho e(m_2 + 1). \quad (15)$$

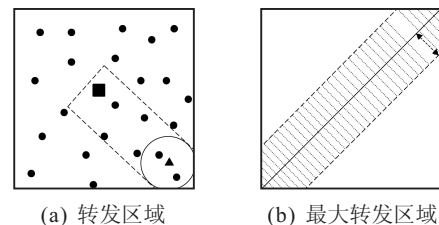


图 3 位置更新包转发区域

**定理 2** 在 EBRP 和 ALURP 协议中, 若节点密度

相等, 则 sink 位置更新能耗比值等价于参与位置更新的区域面积比值.

**证明** 节点密度为  $\rho$ , 节点收发一个 sink 位置更新包的能量消耗为  $e$ , EBRP 和 ALURP 协议中参与更新的面积分别为  $S_{\text{EBRP}}^0$  和  $S_{\text{ALURP}}^0$ . 根据定理 1, 两个协议中 sink 位置更新一次的能量消耗分别为

$$E_{\text{EBRP}}^0 = \rho e S_{\text{EBRP}}^0, E_{\text{ALURP}}^0 = \rho e S_{\text{ALURP}}^0,$$

则有

$$\frac{E_{\text{EBRP}}^0}{E_{\text{ALURP}}^0} = \frac{\rho e S_{\text{EBRP}}^0}{\rho e S_{\text{ALURP}}^0} = \frac{S_{\text{EBRP}}^0}{S_{\text{ALURP}}^0}. \quad \square$$

### 2.3.1 sink 在网格内 (自适应区域内) 移动时位置更新能耗比较

根据定理 2, 两个协议中对应的能耗比值为

$$\frac{E_{\text{EBRP}}^1}{E_{\text{ALURP}}^1} = \frac{2\sqrt{2}ld - 2d^2}{l^2}, r_0 \leq d \leq \frac{\sqrt{2}}{2}l. \quad (16)$$

令  $d/l = x$ , 式 (16) 改写为

$$\frac{E_{\text{EBRP}}^1}{E_{\text{ALURP}}^1} = 2\sqrt{2}x - 2x^2, 0 \leq x \leq \frac{\sqrt{2}}{2}. \quad (17)$$

通过分析, 可以得到  $E_{\text{EBRP}}^1/E_{\text{ALURP}}^1 \leq 1$ .

### 2.3.2 其他部分能耗比较

根据定理 2, 两个协议中对应的能耗比值为

$$\frac{E_{\text{EBRP}}^2}{E_{\text{ALURP}}^2} = \frac{L^2 + \frac{L^2}{l^2}(2\sqrt{2}ld - 2d^2)(m_2 + 1)}{L^2(m_2 + 1)},$$

$$r_0 \leq d \leq \frac{\sqrt{2}}{2}l. \quad (18)$$

化简式 (18), 得到

$$\frac{E_{\text{EBRP}}^2}{E_{\text{ALURP}}^2} = \frac{1}{m_2 + 1} + \frac{2\sqrt{2}ld - 2d^2}{l^2},$$

$$r_0 \leq d \leq \frac{\sqrt{2}}{2}l. \quad (19)$$

令  $d/l = x$ ,  $1/(m_2 + 1) = k$ , 式 (19) 改写为

$$\frac{E_{\text{EBRP}}^2}{E_{\text{ALURP}}^2} = k + 2\sqrt{2}x - 2x^2, \\ 0 < x \leq \sqrt{2}/2, 0 < k < 1. \quad (20)$$

通过分析可以得到, 当  $0 < x \leq \sqrt{2}(1 - \sqrt{k})/2$  时,  $E_{\text{EBRP}}^2/E_{\text{ALURP}}^2 \leq 1$ , 即当  $r_0 \leq d \leq \sqrt{2}(1 - \sqrt{k})l/2$  时,  $E_{\text{EBRP}}^2/E_{\text{ALURP}}^2 \leq 1$ .

令

$$E_{\text{EBRP}}^1 = \mu_1 E_{\text{ALURP}}^1, 0 < \mu_1 \leq 1;$$

$$E_{\text{EBRP}}^2 = \mu_2 E_{\text{ALURP}}^2, 0 < \mu_2 \leq 1.$$

则有

$$\frac{E_{\text{EBRP}}}{E_{\text{ALURP}}} = \frac{E_{\text{EBRP}}^1 + E_{\text{EBRP}}^2}{E_{\text{ALURP}}^1 + E_{\text{ALURP}}^2} =$$

$$\frac{\mu_1 E_{\text{ALURP}}^1 + \mu_2 E_{\text{ALURP}}^2}{E_{\text{ALURP}}^1 + E_{\text{ALURP}}^2} \leq 1,$$

$$r_0 \leq d \leq \sqrt{2}(1 - \sqrt{k})l/2.$$

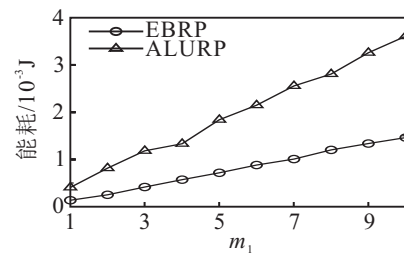
可以判断  $k$  的最大取值为 0.5, 即在 EBRP 协议

中, 当节点通信半径  $r_0 < (\sqrt{2} - 1)l/2$  时, 移动 sink 的位置更新能耗小于 ALURP 协议.

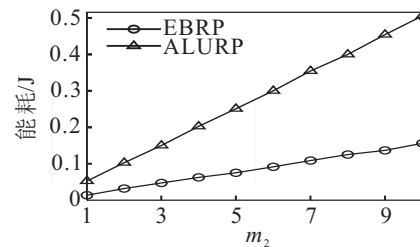
## 3 仿真实验

本节通过仿真实验来比较 EBRP 和 ALURP 协议的能耗情况, 实验参数设置参照文献 [11]. 将 ALURP 协议中最佳的自适应区域换算成网格, 边长为 180 m, 整个网络边长为 900 m ~ 5 400 m, 通信半径为 30 m, 节点密度为  $0.003 \text{ m}^2$ ,  $e_{\text{elec}} = 50 \text{ nJ/bit}$ ,  $\varepsilon_{\text{fs}} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ ,  $E_{\text{da}} = 5 \text{ nJ/(bit-signal)}^{[13]}$ ,  $\alpha : \beta : \gamma = 1 : 1 : 1$ ,  $m_1 \geq 1$ ,  $m_2 \geq 1$ .

图 4(a) 为移动 sink 在网格内 (目标区域内) 移动的次数 ( $m_1$ ) 对位置更新能耗的影响. 当  $m_1$  增加时, ALURP 和 EBRP 协议的位置更新能耗都呈上升趋势, ALURP 协议的能耗高于 EBRP 协议. 这是因为每更新一次 sink 的位置, ALURP 协议都需要在自适应区域里进行洪泛, 而 EBRP 协议只需要通知簇头更新 sink 的位置. 因为两个协议中参与位置更新的节点数比较少, 所以总能耗也比较低. 图 4(b) 为 sink 移动到新网格的次数 ( $m_2$ ) 对位置更新能耗的影响. ALURP 协议的能耗明显高于 EBRP 协议, 这是因为 sink 移动到新网格后, ALURP 协议需要在整个网格内进行洪泛, 通知所有节点更新其位置, 而 EBRP 协议只需要通知所有簇头更新 sink 的位置.



(a)  $m_1$  对能耗的影响



(b)  $m_2$  对能耗的影响

图 4  $m_1, m_2$  对 sink 位置更新能耗的影响

图 5(a) 和图 5(b) 分别为考虑网络初始化和成簇能耗的情况下, 网络大小和  $m_1$  对移动 sink 位置更新总能耗的影响. 随着网络规模的增大, 两个协议中位置更新总能耗增多, 且 ALURP 协议能耗高于 EBRP 协议. 因为移动 sink 在网格内移动时, 位置更新限制在局部范围内, 能耗较低, 所以在图 5(a) 和图 5(b) 中显示得不明显. 由式 (12) 和 (15) 可以得到



证明. 图 5(c) 和图 5(d) 为考虑网络初始化和成簇能耗的情况下, 网络大小和  $m_2$  对于移动 sink 位置更新总能耗的影响. 同样, 随着网络规模和  $m_2$  的增大, 移动 sink 的位置更新总能耗增多, 且 ALURP 协议能耗高于 EBRP 协议. 当网络增大到 5 400 m,  $m_2 = 10$  时, ALURP 协议中 sink 位置更新总能耗为 5 J 左右, 而 EBRP 协议中 sink 位置更新总能耗为 2 J 左右. 很明显, EBRP 协议要优于 ALURP 协议.

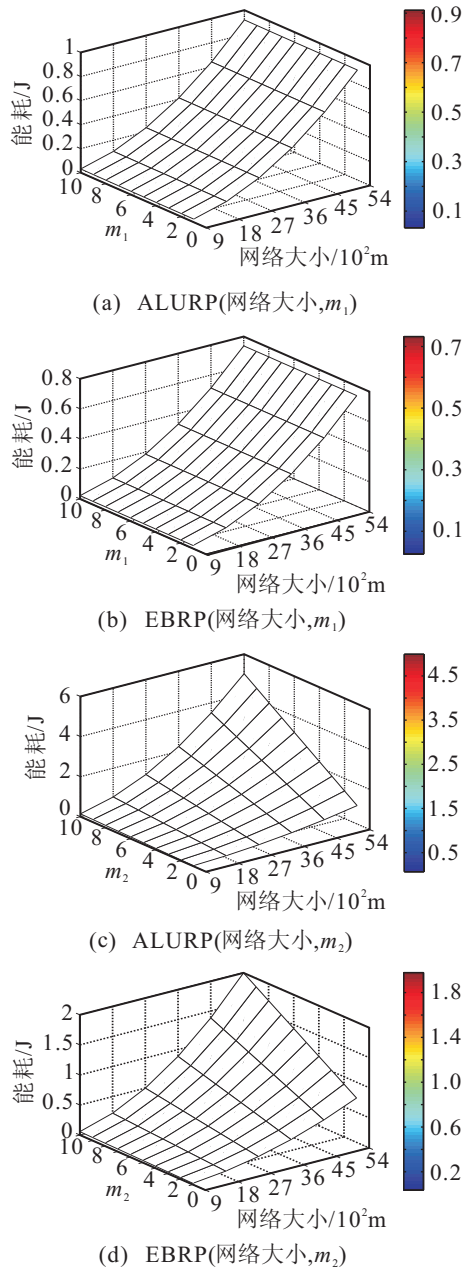


图 5  $m_1, m_2$  和网络大小对 sink 位置更新总能耗的影响

表 1 为网格大小对 sink 位置更新能耗的影响. 网格大小从 60 m 增加到 330 m 时, 移动 sink 位置更新能耗先呈下降趋势, 当网格约等于 160 m 时, 位置更新能耗达到最低; 网格继续增大, 位置更新能耗逐渐增加. 这是因为网格太小时, sink 很容易移动到新的网格中, 这时必须频繁地通知所有簇头更新 sink 的位置, 所以能耗较大; 当网格过大时, sink 的位置信息包传递到

簇头的路径增加, 即参与位置更新的节点数增多, 其能耗略有增加.

表 1 网格大小对 sink 位置更新能耗的影响

网格大小/m	60	90	120	150	160	170
能耗/J	0.414 3	0.312 0	0.234 7	0.192 4	0.182 1	0.190 3
网格大小/m	180	210	240	270	300	330
能耗/J	0.199 2	0.223 5	0.233 6	0.241 0	0.248 2	0.252 6

### 4 结 论

移动 sink 的应用有效地延长了整个网络的生存时间, 为了进一步均衡网络的能量消耗, 本文提出了一种具有移动 sink 的无线传感器网络能量均衡分簇路由协议 EBRP. EBRP 协议采用分簇结构收集兴趣事件, 不仅减少了需要中转的数据包, 而且降低了移动 sink 位置更新能耗. 仿真实验和理论分析表明 EBRP 协议能够有效地均衡节点的能量消耗, 延长网络的生存时间. 下一步将深入研究移动 sink 如何主动地收集兴趣事件; 当网络中同时存在多个兴趣事件时, 如何建立有效的兴趣事件报告路径和 sink 的移动轨迹.

### 参考文献(References)

- [1] Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2007, 3(3): 233-254.
- [2] Olariu S, Stojmenovic I. Design guidelines for maximizing lifetime and avoiding energy holes in sensor networks with uniform distribution and uniform reporting[C]. Proc of IEEE Int Conf on Computer Communications. Catalunya: IEEE Press, 2006: 2505-2516.
- [3] 曾志文, 陈志刚, 刘安丰. 无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免[J]. 计算机学报, 2010, 33(1): 12-22. (Zeng Z W, Chen Z G, Liu A F. Energy-hole avoidance for WSN based on adjust transmission power[J]. Chinese J of Computers, 2010,33(1): 12-22.)
- [4] Chen H Y, Shi Q J, Tan R, et al. Mobile element assisted cooperative localization for wireless sensor networks with obstacles[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2010, 9(3): 956-963.
- [5] 钟智, 罗大庸, 刘少强, 等. 无线传感器网络中一种基于高斯马尔科夫移动模型的自适应定位方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(11): 1557-1568. (Zhong Z, Luo D Y, Liu S Q, et al. An adaptive localization approach for wireless sensor networks based on Gauss-Markov mobility model[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(11): 1557-1568.)