

无线传感器网络单汇聚节点选址策略

陈凤超, 李融林

(华南理工大学电子与信息学院, 广东 广州 510641)

摘要: 无线传感器网络中,所有节点收集到的数据都通过多跳的方式转发到汇聚节点,因此汇聚节点的选址策略对网络寿命有很大的影响。首先在节点随机分布的无线传感器网络中简单分析了汇聚节点的面向能量选址策略,然后进一步探讨了面向寿命的选址策略,最后结合基于路由代价的蚁群路由算法在无线传感器网络中对两种选址策略进行仿真,仿真结果显示面向寿命选址策略的网络总能耗稍大于面向能量的选址策略,但前者能在较低网络能耗的基础上有效地延长网络寿命。

关键词: 无线传感器网络; 汇聚节点选址; 蚁群路由; 网络寿命

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2012.06.30

Single sink node placement strategies in wireless sensor networks

CHEN Feng-chao, LI Rong-lin

(School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In wireless sensor networks (WSN), all the data collected by sensors are forwarded to a sink node in a multi-hop way. The placement strategy of the sink node has a significant impact on the network lifetime. Firstly, the energy-oriented sink node placement strategy is introduced in randomly distributed WSN. Secondly, the lifetime-oriented sink node placement strategy is investigated. Finally, these two placement strategies are put in simulations in WSN with a routing-cost based ant routing algorithm. Simulation results show that the energy consumption of the networks with lifetime-oriented strategy is a little greater than that of the networks with energy-oriented strategy, but the lifetime of the former networks is prolonged effectively with a lower energy consumption.

Keywords: wireless sensor networks (WSN); sink node placement; ant routing; network lifetime

0 引言

无线传感器网络是由大量随机部署在监测区域内具有无线通信功能的传感器节点组成。每个节点收集所需信息,然后通过多跳的形式,把数据传送到汇聚节点。与传统的注重时延和数据包传输率的无线自组织网络不同,传感器网络中节点通常是由不可充电的微型电池进行供电,因此无线传感器网络的各种协议和网络设计过程更注重网络的能效性和能量平衡。

汇聚节点的选址直接影响到网络的能耗大小与分布。因此,选取合适的位置,可以有效延长网络寿命。其中一个最简单的情况是:当传感器节点均匀分布在一个规则区域时,汇聚节点通常部署在该区域的几何中心,这样就能实现网络总能耗最小。例如,文献[1]证明了如果传感器节点均匀分布在圆形区域中,那么汇聚节点的最佳位置就是圆心。事实上,大部分研究和仿真实例都把汇聚节点部署在中心

位置。当网络节点非均匀分布或者监测区域为非规则图形时,较为普遍的方法是计算所有节点到汇聚节点距离总和的最小值,以保证网络总能耗最小^[1-3]。文献[4]探讨了网格传感器网络中汇聚节点的选址策略,网络中所有节点都固定在网格上,并且通过固定路由进行通信,最后根据最小跳数或者最小曼哈顿距离计算出汇聚节点的最佳位置。文献[5]通过搜索汇聚节点最优位置,使其附近区域数据流最大化,但该方法容易忽略其他区域的能耗情况,而且不适用于动态路由情况。文献[6]利用平均码流率和节点到汇聚节点距离来评价网络寿命,但相关研究主要面向分层网络。文献[7]通过计算汇聚节点邻节点所转发的数据量进行选址,该选址方法适用于节点随机分布的传感器网络,但不适用于动态路由情况。文献[8]使用混合整数线性规划综合描述汇聚节点选址和路由问题,最后通过优化算法使网络能耗最小和数据流均衡化,但作者并没有考虑到节点的剩余能量,该方法同样不适用于动态路由情况。文献[9]使用

收稿日期:2011-05-20; 修回日期:2012-02-20。

作者简介:陈凤超(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。E-mail:fengchao_chen@163.com

数据流均衡条件进行建模,使用节点数据流描述节点寿命,然后通过优化使网络寿命最长,但文中同样使用固定路由算法,并且在系统仿真时节点通信能耗固定不变,因此该选址策略对网络能量或者节点非均匀分布的网络适应性并不好。文献[10]主要考虑网络的通信时延,算法首先求解监测区域边界到汇聚节点预定位置的最远距离,然后通过求解汇聚节点的位置,优化此最远距离值,从而尽量缩短网络中通信中最大时延,文中没有考虑传感器节点能耗问题。

本文主要从面向能量的选址策略出发,探讨了同构传感器网络中单汇聚节点的面向寿命选址策略,并结合基于路由代价的蚁群路由算法对两种选址策略性能进行比较。通过仿真对比了汇聚节点部署在不同位置时对应的网络寿命,仿真数据与选址策略中的计算结果接近。

1 汇聚节点选址问题

在这部分,首先给出无线传感器网络的网络模型,能耗模型以及网络寿命的定义,然后讨论传感器网络中单汇聚节点的选址问题并分析其中优化问题的目标函数 $g(x, y)$ 。

1.1 网络模型、能耗模型和网络寿命

本文假设无线传感器网络是由分布在凸区域 S 中的一个静态汇聚节点以及 N 个传感器节点组成。所有传感器节点具有相同的数据产生率,并且都按概率密度函数 $f(u, v)$ 随机独立地部署在 S 中,其坐标为随机变量 (U_i, V_i) ($i = 1, 2, \dots, N$)。汇聚节点具有足够大的能量,而传感器节点初始能量有限。在网络覆盖和连通条件得到满足的条件下,设计合适的目标函数 $g(x, y)$,从而可以通过优化算法求解汇聚节点的最佳位置 (x, y) 。

对于网络的能耗模型,这里只考虑数据发送和接收过程的能耗。假设 $E_{TX}(d)$ 和 E_{RX} 分别表示传感器节点发送和接收 1 bit 数据的能耗。采用文献[11]中的 first order radio model,则有

$$E_{TX}(d) = E_{elec} + \epsilon_{amp} d^2 \quad (1)$$

$$E_{RX} = E_{elec} \quad (2)$$

式中, d 是发射距离; E_{elec} 是发射器和接收器能耗; ϵ_{amp} 是放大系数。

当前,学者根据不同的要求对传感器网络寿命提出不同的定义^[12-13],这里采用 n-of-n 准则^[13],即网络寿命定义为第一个失效节点的寿命。

1.2 汇聚节点选址问题

本节首先在文献[7]的部分研究的基础上简单地描述了节点随机分布的网络中面向能量的选址策略,然后根据无线传感器网络的特点提出改进的面向寿命的选址策略。

1.2.1 面向能量的选址策略

在面向能量的选址策略中,假设通信过程中某数据包选择一条 h 跳路由从源节点传送到汇聚节点,应用式(1)和式(2),可计算路由中第 m ($m = 0, 1, \dots, h-1$) 跳节点传送 1 bit 数据的能量消耗 δ_m 。

$$\delta_m = \begin{cases} E_{TX}(d_m) = E_{elec} + \epsilon_{amp} d_m^2, & m = 0 \\ E_{RX} + E_{TX}(d_m) = 2E_{elec} + \epsilon_{amp} d_m^2, & m = 1, 2, \dots, h-1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, d_m 是第 m 跳节点的发射距离。

路由中源节点 ($m=0$) 仅发送数据,其余节点 ($m=1, 2, \dots, h-1$) 接收到数据后,再进行转发,直到到达汇聚节点。本文中假设汇聚节点具有足够能量,因此这里不考虑其能耗情况。

由此可得,网络中任一源节点 i 传送 1 bit 数据到汇聚节点时,总共消耗的能量 Θ_i 为

$$\Theta_i = (2H_i - 1)E_{elec} + \epsilon_{amp} \sum_{m=0}^{H_i-1} D_{im}^2 \quad (4)$$

式中, Θ_i , D_{im} 和 H_i 均为随机变量,其中 D_{im} 和 H_i 分别表示发射距离和路由跳数。

由于节点随机分布,并且在大多数情况下,网络采用动态路由协议,因此要得到以上各随机变量的分布情况并不容易。为了计算式,这里给出两个近似条件。

(1) 假设数据从源节点到汇聚节点的路由跳数期望值与这两个节点间距离的期望值成正比,即

$$EH_i = cED_i \quad (5)$$

式中, D_i 是源节点 i 到汇聚节点之间的距离; c ($c > 0$) 是常数。

(2) 假设网络中各节点的发射距离与跳数独立,并且其二阶矩是个常量,即

$$ED_{im}^2 = \sigma \quad (6)$$

式中, σ ($\sigma > 0$) 是常量。

在面向能量的选址策略中,要求网络的总能耗最小化,因此结合式(4)~式(6),目标函数 $g(x, y)$ 可表示为

$$\begin{aligned} g(x, y) &= E \left[\sum_{i=1}^N \Theta_i \right] = \\ &= E \left\{ \sum_{i=1}^N \left[(2H_i - 1)E_{elec} + \epsilon_{amp} \sum_{m=0}^{H_i-1} D_{im}^2 \right] \right\} = \\ &= E \left\{ \sum_{i=1}^N \left[(2H_i - 1)E_{elec} + \epsilon_{amp} H_i D_i^2 \right] \right\} = \\ &= \sum_{i=1}^N (2E_{elec} EH_i + \epsilon_{amp} ED_{im}^2 EH_i - E_{elec}) = \\ &= (2E_{elec} + \epsilon_{amp} \sigma) NcED_i - NE_{elec} \end{aligned} \quad (7)$$

注意到 $(2E_{elec} + \epsilon_{amp} \sigma) Nc > 0$, 求式(7)的最小值,也即是求下式的最小值

$$g(x, y) = ED_i = \iint_{(u,v) \in S} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv \quad (8)$$

通过对式(8)寻优,即可求得汇聚节点的最佳位置。

1.2.2 面向寿命的选址策略

面向能量的选址策略可以得到使网络总能耗最小的解,然而这个解往往不是使网络寿命最长的选址。当所得解的汇聚节点位置处于传感器节点分布密度较低的区域时,其附近就没有足够的传感器节点转发数据,导致网络寿命较短。因此,在很多应用中把汇聚节点部署在传感器节点分布密度较大的区域,即使该选址并非使网络能耗最小,但却可以使网络寿命较长。

设所有节点的最大通信距离为 R_c , 汇聚节点的通信区域为 S_i , 即

$$S_i = \{(u, v) \mid (u, v) \in S, \sqrt{(u-x)^2 + (v-y)^2} \leq R_c\} \quad (9)$$

区域 S_o 定义为 $S_o = S - S_i$ 。

根据文献[14]中关于传感器网络能量问题的讨论可以推断, 当 $q \geq 2$ 时, 要使网络达到“次优能耗均衡”, 区域 S_i 内的节点数量必须大于 S_o 中的节点数量, 但是在大部分应用中, 考虑到网络成本不可能大量增加 S_i 内节点数以实现能耗均衡, 因此该区域节点寿命都比较短。此时目标函数就需要同时考虑网络总能耗和汇聚节点附近的传感器节点分布密度。由面向能量的选址策略可以看到, 各传感器节点到汇聚节点的距离总和决定了网络的总能耗, 因此面向寿命的选址策略中目标函数可表示为该距离总和与 S_i 内节点数比值的期望值, 即

$$g(x, y) = E \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{M(x, y)} \right] \quad (10)$$

式中, $M(x, y)$ 是 S_i 中传感器节点的数量。

从以上分析可知, 优化算法需要求解式(10)的最小值。假设网络连通性得到满足, 那么 S_i 中至少有 1 个传感器节点, 即 $M(x, y) \geq 1$ 。

另一方面, 传感器节点分布在 S_i 中的概率 p 为

$$p = \iint_{(u,v) \in S_i} f(u, v) du dv \quad (11)$$

节点分布在 S_o 中的概率为 $q = 1 - p$ 。

分布在 S_i 中的节点的条件分布密度函数为

$$f_i(u, v) = f(u, v \mid (u, v) \in S_i) = \begin{cases} \frac{f(u, v)}{\iint_{(u,v) \in S_i} f(u, v) du dv} = \frac{f(u, v)}{p}, & (u, v) \in S_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

分布在 S_o 中的节点的条件分布密度函数为

$$f_o(u, v) = f(u, v \mid (u, v) \in S_o) = \begin{cases} \frac{f(u, v)}{\iint_{(u,v) \in S_o} f(u, v) du dv} = \frac{f(u, v)}{q}, & (u, v) \in S_o \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

不失一般性, 假设节点 1 总是分布在 S_i 中, 以确保该区域的连通性, 并且其条件分布函数服从 $f_i(u, v)$ 。因此, 有 $(i+1)$ ($i=0, 1, \dots, N-1$) 个节点分布在 S_i 中的概率 p_i 为

$$p_i = P(M(x, y) = i+1) = C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} \quad (14)$$

令分布在 S_i 和 S_o 中的传感器节点到汇聚节点的距离期望值分别为 $A(x, y)$ 和 $B(x, y)$, 即

$$A(x, y) = E[D_i \mid (U_i, V_i) \in S_i] = \iint_{(u,v) \in S_i} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f_i(u, v) du dv = \frac{1}{p} \iint_{(u,v) \in S_i} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv \quad (15)$$

$$B(x, y) = E[D_i \mid (U_i, V_i) \in S_o] =$$

$$\iint_{(u,v) \in S_o} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f_o(u, v) du dv = \frac{1}{q} \iint_{(u,v) \in S_o} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv \quad (16)$$

由式(15)和式(16)得, 当 $M(x, y) = m'$ 时, 式(10)的期望值可表示为

$$E \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{M} \mid M = m' \right] = E \left[\frac{\sum_{(U_i, V_i) \in S_i} D_i + \sum_{(U_i, V_i) \in S_o} D_i}{M} \mid M = m' \right] = \frac{m' E[D_i \mid (U_i, V_i) \in S_i] + (N - m') E[D_i \mid (U_i, V_i) \in S_o]}{m'} = \frac{A + \frac{N - m'}{m'} B}{m'} \quad (17)$$

式中, M, A 和 B 分别是 $M(x, y), A(x, y)$ 和 $B(x, y)$ 的简写。于是由式(10)和式(17)可得

$$g(x, y) = p_0 E \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{1} \mid M = 1 \right] + p_1 E \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{2} \mid M = 2 \right] + \dots + p_{N-1} E \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \mid M = N \right] = \sum_{i=0}^{N-1} p_i E \left[\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{M} \mid M = i+1 \right] = \sum_{i=0}^{N-1} p_i \left[A + \frac{N - (i+1)}{i+1} B \right] \quad (18)$$

将式(14)代入式(18), 并注意到 $p+q=1$, 于是有

$$g(x, y) = A \sum_{i=0}^{N-1} C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} + B \sum_{i=0}^{N-1} \frac{N-i-1}{i+1} C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} = A + \frac{qB}{p} \sum_{i=1}^{N-1} C_{N-1}^i p^i q^{N-1-i} = \frac{Ap + Bq}{p} - B \frac{q^N}{p} \quad (19)$$

式(15)和式(16)代入式(19), 得

$$g(x, y) = p^{-1} \left[\iint_{(u,v) \in S_i} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv + \iint_{(u,v) \in S_o} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv \right] - p^{-1} q^{N-1} \iint_{(u,v) \in S_o} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv = p^{-1} \iint_{(u,v) \in S} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv - p^{-1} q^{N-1} \iint_{(u,v) \in S_o} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} f(u, v) du dv = p^{-1} E D_i - p^{-1} q^N E[D_i \mid (U_i, V_i) \in S_o] \quad (20)$$

最后, 利用式(11), 式(16)和式(20)计算 $g(x, y)$, 通过求解其最小值得到汇聚节点的最优位置。

2 仿真实验

这部分主要通过仿真结果从网络能耗和网络寿命两

方面对各汇聚节点选址策略性能进行比较评估。由于网络节点能耗与路由选择关系较大,根据以上汇聚节点选址策略中能耗与距离关系的特点,本文主要采用平面路由算法对网络特性进行分析,因为蚁群算法具有较强的动态适应性,与选址策略中的能耗特点比较接近,所以这里采用蚁群路由算法对网络进行仿真^[15]。本文在文献[15]中蚁群路由算法的路径选择和信息素更新过程的基础上,根据无线传感器网络特点对启发式因子的构建过程作出修改。

假设汇聚节点的能耗可以忽略,消息从源节点经过一条跳路由发送到汇聚节点,路由代价由该路由中的个节点能耗信息决定,下面是几个相关的定义,其中节点 $m(m=0,1,\dots,h-1)$ 为路由中的第 m 跳节点。

节点 m 的价值 V_m 为

$$V_m = \frac{1}{E_m} \quad (21)$$

式中, E_m 是节点 m 的剩余能量。剩余能量越少,节点价值越大;节点的价值随时间增大。

节点 1 bit 转发代价 ω_m 为

$$\omega_m = \frac{1}{E_m - \delta_m} - \frac{1}{E_m} = \frac{\delta_m}{E_m(E_m - \delta_m)} \quad (22)$$

节点 1 bit 转发代价定义为节点转发 1 bit 数据后与转发前的价值之差,其中 δ_m 的定义如式(3)。节点剩余能量越少,转发数据的代价越高。

路由代价 γ 为

$$\gamma = \sum_{m=0}^{h-1} \omega_m = \sum_{m=0}^{h-1} \frac{\delta_m}{E_m(E_m - \delta_m)} \approx \sum_{m=0}^{h-1} \frac{\delta_m}{E_m^2} \quad (23)$$

路由代价是路由中所有节点转发代价之和。由于大多数情况下数据转发能量远小于节点剩余能量,即 $\delta_m \ll E_m$, 因此路由代价可简化为式(23)所示。

最后,启发式因子 η_{ij} 就可以用 γ^{-1} 进行构建。

$$\eta_{ij} = \frac{\gamma_j^{-1}}{\sum_{i \in N_i^*} \gamma_i^{-1}} = \frac{\left[\sum_{m=0}^{h_j-1} \frac{\delta_m^{R_j}}{(E_m^{R_j})^2} \right]^{-1}}{\sum_{i \in N_i^*} \left[\sum_{m=0}^{h_i-1} \frac{\delta_m^{R_i}}{(E_m^{R_i})^2} \right]^{-1}} \quad (24)$$

式中, R_i 是一条以邻节点 i 为下一跳节点的路由; γ_i 是 R_i 的路由代价; $\delta_m^{R_i}$ 和 $E_m^{R_i}$ 分别是 R_i 上第 m 跳节点的 1 bit 数据能耗和剩余能量。从式(24)注意到,路由代价越小,启发式因子越大。最后,该路由被选中的概率就越大。

仿真过程中,假设每个节点初始能量为 1 J,能耗模型中 E_{elec} 和 ϵ_{amp} 分别取为 50 nJ 和 100 pJ/m²。首先分别通过式(8)和式(20)计算两种选址策略对应的目标函数,然后使用粒子群优化算法^[16]求得最优解。

仿真 1 370 个传感器节点分布在 600 m×600 m 的方形区域, u 方向上的概率密度函数如图 1 所示, v 方向上均匀分布,即是一个单值函数。使用基于路由代价的蚁群路由算法进行仿真并对评估上述两种选址策略(面向能量的选址策略和面向寿命的选址策略)的性能,该仿真可以明显

对比汇聚节点附近传感器密度对网络寿命的影响。

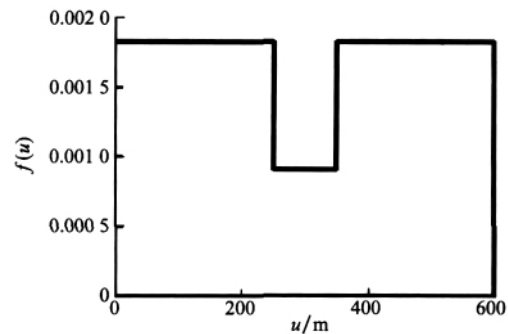


图 1 u 方向上的概率密度函数(仿真 1)

利用式(8)求解面向能量的汇聚节点最佳位置为(300, 300),利用式(20)求解面向网络寿命的汇聚节点最佳位置为(421, 300)。从图 1 可以看到在(300, 300)处的节点分布密度小于(421, 300)。仿真结果如图 2 所示,其中图 2(a)是两种选址策略下网络归一化平均剩余能量随时间变化的结果,图 2(b)是设置 5 种不同的随机种子,即设置 5 种不同的随机分布,然后每种分布下分别对两种选址策略进行仿真得到的网络寿命对比图。从图 2 可以看到,面向能量策略的网络总能耗较少,但其网络寿命反而比面向寿命策略的网络短。正如前面所分析,若汇聚节点选址在(300, 300),它附近就没有足够的传感器节点转发数据,造成网络过早失效。

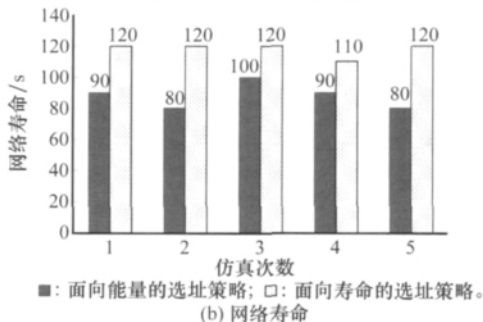
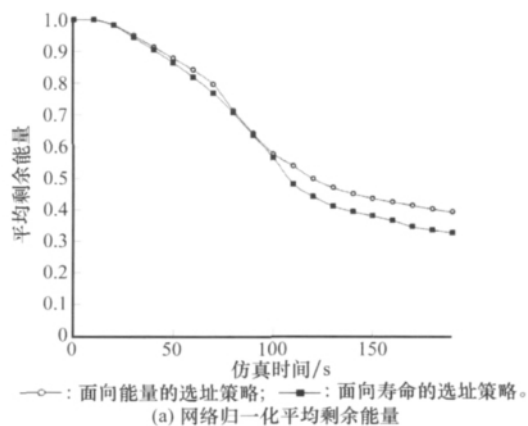


图 2 两种汇聚节点选址策略性能对比(仿真 1)

仿真 2 300 个传感器节点分布在 600 m×600 m 的方形区域, u 方向上的概率密度函数从左到右线性增长,如

图 3 所示, v 方向上是一个单值函数。使用基于路由代价的蚁群路由算法进行仿真并对评估选址策略的性能。

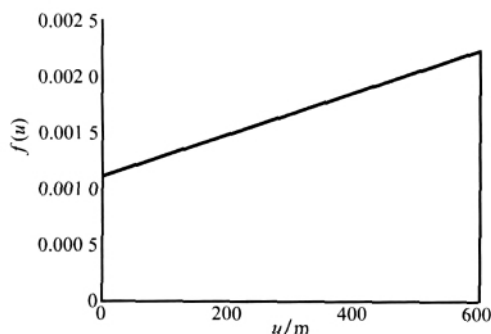


图 3 u 方向上的概率密度函数(仿真 2)

图 4 对比了汇聚节点的 3 种选址对网络性能的影响。这 3 种选址分别是区域中心位置(300,300), 面向能量的选址策略得到的位置(343,300)和面向寿命的选址策略得到的位置(417,300)。图 4(a)是 3 种选址策略下网络归一化平均剩余能量随时间变化的结果, 可以看到面向能量的选址策略下网络能耗稍微少于其他方式, 但差别并不大。图 4(b)是设置 5 种不同的随机分布, 然后每种分布下分别对 3 种选址策略进行仿真得到的网络寿命对比图。从图中可以看到, 面向寿命的选址策略下网络寿命最长, 汇聚节点位于中心时, S_i 内节点密度与其他两种情况相比最小, 而其网络寿命最短。

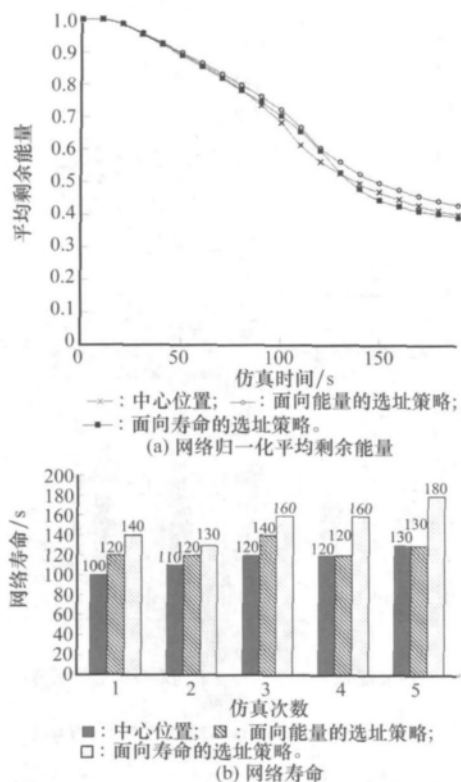


图 4 3 种汇聚节点选址策略性能对比(仿真 2)

图 5 是仿真 2 的网络模型中逐渐改变汇聚节点的选址后得到的网络寿命。仿真中汇聚节点的 y 坐标设置为恒定值 300 m, x 坐标在 0 m 到 600 m 之间递增, 每隔 50 m 进行一次仿真, 最后得到每次仿真对应的网络寿命数据。可以看到 x 坐标从 0 m 到 450 m 递增时, 汇聚节点附近的传感器节点分布密度增加, 网络寿命也随着增加; 而当 x 坐标从 450 m 到 600 m 递增时, 即使传感器节点分布密度不断增加, 网络寿命却逐渐变短。这是因为随着 x 坐标偏离 343 m, 即偏离面向能量策略的计算结果时, 网络总能耗不断增大, 同样会使网络寿命缩短。因此, 汇聚节点的选址不能仅考虑 S_i 内节点密度, 而需要同时权衡网络总能耗和汇聚节点附近的传感器分布密度。从图 5 网络寿命最高处对应的 x 坐标, 与之前利用面向寿命的选址策略得到的 x 坐标 417 m 是一致的。

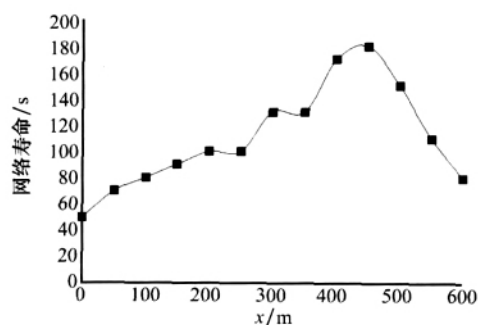


图 5 汇聚节点在不同位置上得到的网络寿命($y=300$ m)(仿真 2)

3 结 论

由于无线传感器网络多对一的通信模式, 汇聚节点选址时需要考虑其附近的节点分布密度。本文根据随机分布的无线传感器网络中面向能量的选址策略的分析结果, 进一步提出了面向网络寿命的选址策略, 并配合基于路由代价的蚁群路由算法对网络进行仿真。仿真结果显示, 与面向能量的选址策略比较, 面向寿命的选址策略可以有效延长网络寿命。

在本文研究的基础上, 还有两个关键问题需要进一步的研究。①对于多汇聚节点网络, 面向能量选址策略的数学模型可以很容易地从单汇聚节点策略扩展得到, 但面向寿命选址策略的模型构造仍然是个比较复杂的问题; ②对于两种选址策略, 当网络部署区域是非凸集时, 使用欧氏距离对网络路由能耗进行估计明显不合适, 因此这种情况下的选址策略依然有待探讨。

参考文献:

- [1] Luo J, Hubaux J P. Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks[C]// Proc. of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies,

- 2005; 1735-1746.
- [2] Efrat A, Har-Peled S, Mitchell J S B. Approximation algorithms for two optimal location problems in sensor networks[C]// *Proc. of the 2nd International Conference on Broadband Networks*, 2005: 714-723.
- [3] 罗玎玎, 赵海, 尹震宇, 等. WSNs 中基于 PMP 的多 SINK 节点布局研究与实现[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(6): 979-982. (Luo D D, Zhao H, Yin Z Y, et al. Research and realization of multiple sink nodes' deployment based on PMP in WSNs[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2007, 28(6): 979-982.)
- [4] Dai S, Tang C, Qiao S, et al. Optimal multiple sink nodes deployment in wireless sensor networks based on gene expression programming[C]// *Proc. of the 2nd International Conference on Communication Software and Networks*, 2010: 355-359.
- [5] Bogdanov A, Maneva E, Riesenfeld S. Power-aware base station positioning for sensor networks[C]// *Proc. of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, 2004.
- [6] Pan J, Cai L, Hou Y T, et al. Optimal base-station locations in two-tiered wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2005, 4(5): 458-473.
- [7] Vincze Z, Vida R, Vidacs A. Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Pervasive Services*, 2007: 55-63.
- [8] Güney E, Aras N, Altinel I K, et al. Efficient integer programming formulations for optimum sink location and routing in heterogeneous wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 54(11): 1805-1822.
- [9] Gu Y, Ji Y, Cher H, et al. Towards an optimal sink placement in wireless sensor networks[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, 2010.
- [10] Kim D, Wang W, Sohaee N, et al. Minimum data-latency-bound k-sink placement problem in wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2011, 19(5): 1-10.
- [11] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless micro-sensor networks[C]// *Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000: 4-7.
- [12] Champ J, Saad C, Baert A E. Lifetime in wireless sensor networks[C]// *Proc. of the International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, 2009.
- [13] Dietrich I, Dressler F. On the lifetime of wireless sensor networks[J]. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2009, 5(1): 1-38.
- [14] Wu X, Chen G, Das S K. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution[J]. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2008, 19(5): 710-720.
- [15] Zhang Y, Kuhn L D, Fromherz M P J. Improvements on ant routing for sensor networks[C]// *Proc. of the 4th International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*, 2004: 154-165.
- [16] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// *Proc. of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995: 39-43.