

移动协助传感器网络中 Sink 的路径优化策略

张希伟¹, 沈琳², 蒋益峰²

(1. 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏理工学院 电气信息工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要: 在无线传感器网络中引入移动 Sink 来解决。静态无线传感器网络(所有节点均为静止)存在的能量空洞、冗余覆盖和热点等问题。传感器节点将数据发送给汇聚节点(CP, collection point), 移动 Sink 访问 CP 节点收集数据。提出了一种最短移动距离最小能耗的路径优化模型(MEMD)。证明了该模型是一个 NP-hard 问题, 给出了一种基于效用的贪心启发式方法用于确定最佳的 CP 节点队列。为了在规定的最大传输延时的范围内访问尽可能多的 CP 节点, 提出了一种基于 CP 节点访问概率的路径选择算法。通过模拟实验以及实验床的真实数据, 提出的算法能很好地在满足延时要求的同时节约网络的能量。

关键词: 无线传感器网络; 移动 Sink; 路径选择; 访问概率; 优化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)02-0085-09

Optimizing path selection of mobile Sink nodes in mobility-assistant WSN

ZHANG Xi-wei¹, SHEN Lin², JIANG Yi-feng²

(1. College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Electrical Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

Abstract: There inevitably exist some serious problems such as energy hole, overlapping and hot spots in static wireless sensor networks which are composed by all static sensors. The mobile Sink (MS) was used to reduce the energy consumption of static sensor nodes through a collection-based approach in which a subset of nodes served as the data collection points (CP) that buffer data originated from sensors and transferred these data to MS when it arrived. An optimization model named min-energy min-distance (MEMD) of MS' moving path was introduced and proved this model was NP-hard. A heuristic algorithm was developed combining MS and CPs selection to enable a flexible trade-off between energy consumption and data delivery latency. Furthermore, a probabilistic path selection (PPS) algorithm to make the MS visit as much as possible sensors was proposed. The experimental and simulating results show monotonic decrease of data delivery latency for greater limits on the energy consumption and vice versa.

Key words: wireless sensor network; mobile Sink; path selection; visit probability; optimization

1 引言

无线传感器网络(WSN, wireless sensor network)中存在能量空洞(energy hole)、冗余覆盖(overlap)和热点(hot spot)等问题^[1-3]。尽管可以在基站周围部署更多的节点轮流工作(即离基站

近的区域节点密度较大)^[3-6], 但无疑会增加网络的成本和计算代价。

在无线传感器网络中引入了移动性, 即在 Sink 节点上配备移动装置可以有效地解决上述问题。通过基站的移动, 使负责向 Sink 转发的节点经常变化, 将网络负载分担到不同的节点上。利用移动节

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2012-10-20

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012584); 常州市自然科学基金资助项目(CJ20110025); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2009B21514)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2012584); The Natural Science Foundation of Changzhou (CJ20110025); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2009B21514)

点进行数据收集的一个典型是 Shah 等提出的数据骡子 (data mule) 的模式^[3]。近年来在煤矿、森林等传感器网络应用中也出现了利用移动节点来进行数据收集的例子^[7,8]。

移动性带来的一个问题是增加了数据的延时。由于移动 Sink 的运行速度有限 (一般为 1~2m/s), 远远小于无线网络传输的速度, 因此, 在选择移动 Sink 传输和无线传输中存在一个折中^[9]。例如在图 1 中, 移动 Sink 综合考虑了能量和延时之间的关系, 并不是访问所有的静态节点, 而是只访问数据汇聚点 (CP, collection point)。静态节点事先将数据发送到汇聚点, 当移动 Sink 到来时再进行转发。文献[10]提出了一种基于旅行商问题的汇聚点选择算法, 总是选择那些能够节约最大能量的位置作为汇聚点。文献[11]在此基础上提出了基于虚拟点优先级的移动 Sink 路径优化方法。同样地, 当传感器通信范围内存在多个移动 Sink 时, 需选择一个合适的 Sink 进行数据传输^[12]。

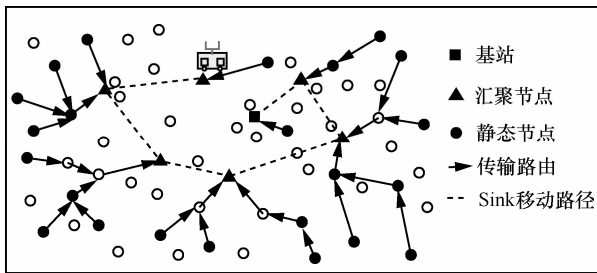


图 1 一个典型的利用移动 Sink 收集数据的 WSN 应用

本文主要研究移动 Sink 的路径优化策略。通过分析移动路径和网络能耗之间的制约关系, 建立优化模型。根据数据采集的不确定性, 提出了一种基于访问概率的汇聚节点选择算法。移动 Sink 按照一定的概率访问汇聚节点, 在满足数据收集效率的前提下, 该方法可以有效地缩短移动轨迹。

2 网络模型

本文的主要目标是: 针对 Sink 移动轨迹可控的无线传感器网络, 综合考虑数据延时和能耗两项技术指标, 提出了一种优化的 Sink 路径选择机制, 提高了系统能耗利用率, 具体包含以下 2 个优化目标:

- 1) 移动距离在满足系统要求的情况下最短化;
- 2) 在目标 1) 的基础上, 系统整体能耗最小化。

首先, 定义一个由 N 个传感器节点和一个 Sink 节点组成的无线传感器网络, 网络是全连通的。节

点间采用多跳方式通信; 节点具有相同的初始能量, 且能量有限, 但 Sink 的能量不受限制; 每个节点可以通过 GPS 或其他定位算法知道各自的位置信息; Sink 节点具有移动性, 并且移动方式可控, 其以恒定的速度 V_m 移动。

采用树形结构来表示网络的拓扑。设移动 Sink 从节点 B 出发, 并最终回到节点 B 。令 $T(V, E)$ 为以 B 为根节点的一颗树, 其中, V 为所有传感器节点, E 为这些节点间的连接线。所有源节点的集合 $S = \{S_i\} \subseteq V$; 所有 CP 节点的集合表示为 $C = \{p_0, \dots, p_{n_p-1}\}$, p_i 表示第 i 个 CP 节点。当然一个 CP 节点也是一个源传感器节点。此时, 将以每个 p_i 为根节点形成子树, 子树中的每个节点将数据传输给 p_i 并等待 Sink 节点来收集数据。用 n_p 和 n_{number} 来表示 CP 节点的数量和成员节点的数量。即

$$N = n_p + n_{number} \quad (1)$$

2.1 移动路径最短化

利用移动 Sink 进行数据收集时, 数据延时等于数据产生到移动 Sink 收集该数据的时间差。可以看出, 最大数据延时是移动 Sink 访问所有 CP 节点所需要的时间。数据延时要求越小, Sink 的移动路径越短。

假设在 Sink 的移动路径上共有 n_p 个 CP 节点, 每一对 CP 节点间的直线距离可以表示为 $[p_0, p_1], [p_1, p_2], \dots, [p_{n_p-2}, p_{n_p-1}]$, 这里可以用 $\{z_0, z_1, \dots, z_{n_p-2}\}$ 来表示。对于用户给定的最大数据延时 D_t , 应该满足

$$\sum_i z_i \leq D_t v_m \quad (2)$$

2.2 系统能耗最小化

本文采用文献[13]中的简化能耗模型, 节点总能耗 p 由接收和发送的数据总量 k_r 和 k_t 来决定。 e 为常数, 表示发送和接收单位比特数据的能耗。如式(3)所示。

$$p \approx e(k_r + k_t) \quad (3)$$

当 Sink 移动到终点并返回到起点时, 称其完成一“轮”移动。在每一轮中, 任意节点 i 接收数据量 k_r^i 和发送数据量 k_t^i 之间的关系为 $k_t^i = k_r^i + q$, q 表示节点 i 在单轮中所采集到的数据总量。故有下式

$$\sum_{i=1}^N k_r^i = \sum_{i=1}^N h_i q \quad (4)$$

其中, h_i 表示节点 i 到其所属 CP 节点的最短跳数。

如果节点 i 为 CP, 则 h_i 为 0。根据式 (4) 可以将单轮系统总能耗 p_{total} 表述为最小跳数和的形式。

$$\begin{aligned} p_{\text{total}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{total}}} p_i = \sum_{i=1}^{n_{\text{total}}} e(k_r^i + k_t^i) \\ &= \sum_{i=1}^{n_{\text{total}}} e(2k_r^i + q) \\ &= \sum_{i=1}^{n_{\text{total}}} e(2h_i + 1)q \end{aligned} \quad (5)$$

其中, p_i 为任意节点 i 的单轮总能耗。根据式 (5) 可知, 系统总能耗最小化问题等价于全网节点距离其所属 CP 节点跳数和的最小化问题。

2.3 最小能耗最短路径问题

根据上述分析, 可以发现当选择较长的 Sink 节点移动路径时, 移动 Sink 可以访问更多的 CP 点, 使每个以 CP 点为根节点的子树规模较小, 从而节约网络的能耗。但由于移动路径较长, 数据传输的延时会增加。相反, 要求较小的数据延时, 网络的能耗也会变大。因此, 在网络能耗与移动路径的长度上存在一个折中, 称为最小能耗最短路径问题 (MEMD, min-energy min-distance)。Sink 移动路径的优化问题可描述为

目标函数

$$\text{Minimize} \sum_{i \in C} h_i z_i \quad (6)$$

满足约束条件

$$\sum_i z_i \leq D_r v_m \quad (7)$$

3 汇聚节点的选择

3.1 问题定义

定义 1 (MEMD 问题) 给定树结构 $T(V, E)$, 由根节点 (B) 和一组传感器节点 $S = \{s_i\} \subseteq V$ 组成。寻找一条路径 U , 从 B 出发, 并访问所有 CP 节点后回到 B 。使得路径 U 的长度不超过规定延时内的移动距离, 即 $D_r v_m$, 同时满足

$$U = \arg \min \sum_{s_i \in S} N(p_i, s_i) \quad (8)$$

其中, $N(p_i, s_i)$ 表示源节点 s 到其所属的 CP 节点 p_i 的跳数。

定理 1 MEMD 是 NP-hard 问题。

证明 可以将 MEMD 问题规约为一个旅行商问题 (TSP, traveling salesman problem)。MEMD

问题的一个特例是寻找一条移动路径使得网络的传输能耗为 0。在这种情况下, 所有的源节点都必须为 CP 节点, 即移动 Sink 访问所有传感器节点。此时, 可以规约为一种旅行商问题, 在规定的时间内访问一组城市并使路径最短。

证毕。

3.2 基于效用的贪心算法

这里给出一种基于效用的贪心算法 (utility-based greedy heuristic) 来选择 CP 节点, 称为 CPUG 算法。该算法总是选择那些能够节约最大网络能量的节点作为 CP, 并且所有 CP 节点间的距离和不大于 $D_r v_m$ 。因此效用 (utility) 可定义为该 CP 节点节约的网络能量与增加的移动距离之间的比值。

需要注意的是, CP 节点的能效会随着移动路径长度的变化而变化。如在图 2 所示, 如果移动 Sink 的路径只能覆盖 B 和其余一个 CP 点, 即 p_1 、 p_2 或 p_3 , 那么应该选择 p_1 , 因为 5 个源节点在它的子树中, 其节约的能量最多。如果移动 Sink 的路径可以覆盖 B 、 p_2 和 p_3 , 所有的数据将在 p_2 和 p_3 点收集, p_1 的效用将为 0。因此, CPUG 算法必须在 Sink 的移动过程中动态地更新每一个节点的效用, 通过多次迭代执行获得最佳的 CP 集合。

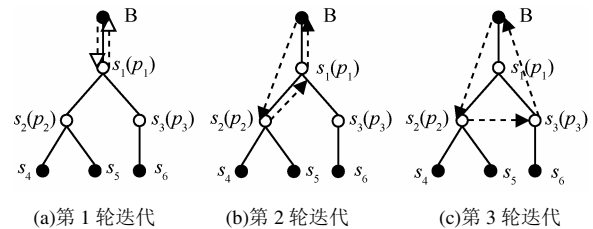


图 2 CPUG 算法执行示例

图 3 给出了 CPUG 算法的伪代码。初始情况下 CP 队列中只包含根节点 B , 通过计算节点的效用不断地加入 CP 节点。CPUG 算法利用 TSP(I) 过程来计算访问集合 I 中所有节点的最短路径。TSP(I) 可以采用基于几何结构的旅行商问题求解算法。每次迭代时, 首先确定所有的 CP 候选节点 (第 2 步)。如果一个节点的加入使得移动 Sink 以更短的路径访问所有的 CP, 同时这些 CP 节点的子树中源节点的跳数和减少, 那么该节点可以是一个候选节点。

候选节点 x 的效用定义为

$$u(x) = \frac{\sum_{s_i \in S} (N(Q, s_i) - N(Q \cup \{x\}, s_i))}{\text{TSP}(Q \cup \{x\}) - \text{TSP}(Q)} \quad (9)$$

$u(x)$ 等于源节点传输数据时跳数的减少和 Sink 移动距离的增加之间的比值。CPUG 算法选择具有最大效用值的 CP 候选节点加入到 CP 队列中 (3) 和 4))，同时将 CP 队列中效用值变为 0 的节点清除出去 (5))。如果所有的源节点都已在 Q 中，则结束，否则开始新一轮的迭代。

```

Input: routing tree  $T(V, E)$ , source set  $S = \{s_i\}$ ,  $D_r, v_m$ 
Output: CP list  $Q$ 
1)  $Q = \{B\}$ 
2)
 $W = \{v | v \in V \setminus Q, (\text{TSP}(Q \cup \{v\}) \leq D_r v_m) \wedge$ 
 $(N(Q, s_i) \cup \{v\} \leq N(Q, s_i))\}$ . IF  $W = \emptyset$ , exit
3) Find  $x \in W$  with maximum  $u(x)$  defined by formula (9). If
multiple nodes have the same  $u(\cdot)$  value, choose the one with maxi-
mum  $\text{TSP}(Q \cup \{x\}) - \text{TSP}(Q)$ 
4)  $Q = Q \cup \{x\}$ 
5) If  $u(z) = 0$ ,  $Q = Q \setminus \{z\}$ 
6) If  $S \subseteq Q$ , exit, else goto step 2)
    
```

图 3 CPUG——一种基于效用的 CP 节点选择算法

以图 2 中的例子来说明 CPUG 的执行过程。图 2 给出了 CP 队列，需要 3 次迭代完成。在第 1 次迭代过程中选择 s_1 作为 CP 节点。第 2 次迭代中，在所有节点中 s_2 具有最大的效用值。尽管 s_2 和 s_3 在路径的距离增加上是相同的，但 s_2 节约的能量比 s_3 多，因为 s_3 的子树中只有一个源节点，而 s_2 的子树中有 2 个。在第 3 次迭代中 s_3 也被选择 CP 节点，同时由于 s_1 的效用值变为 0，将 s_1 清除出 CP 节点队列。

4 概率路径选择算法

在 WSN 应用中，sensor 节点按照一定的 duty-cycle 进行工作。数据的产生具有时间性。当移动 Sink 对某个 CP 节点收集数据时，如果该 CP 节点没有数据上传，那将造成访问该节点的时间浪费。因此，移动 Sink 对 CP 节点可以按照某种概率进行访问，通过概率的变化和移动 Sink 的数量来保证数据收集的完整性。

4.1 数据延时限制

通常情况下，用户对数据采集的延时会提出要求，例如最大数据延时为 D_r ，而系统必须保证数据延时值不大于 D_r 。设移动 Sink 访问所有 CP 节点一次为一个周期，所需要的时间为 τ_{period} 。为了实现时间限制，首先给出访问率的定义。

定义 2 访问率：一个 CP 节点在一个周期内

被移动 Sink 至少访问一次的概率定义为该 CP 的访问率 γ_p 。

设某 CP 节点 p 的数据传输延时为 D_p ，则 D_p 和 γ_p 之间存在如下关系。

定理 2 D_p 的累积分布函数 (cdf) 如下

$$F_{D_p}(d) = 1 - (1 - \gamma_p)^k \left(1 - \frac{d - k\tau_{\text{period}}}{\tau_{\text{period}}} \gamma_p \right) \quad (10)$$

其中， $k = \lfloor d / \tau_{\text{period}} \rfloor$

证明 D_p 的 cdf 函数表示为

$$F_{D_p}(d) = \Pr(D_p \leq d) = 1 - \Pr(D_p > d)$$

这表示在时间长度为 d 的范围内，没有移动 Sink 访问该节点。共经历了 k 个 τ_{period} 周期以及剩余的 $d - k\tau_{\text{period}}$ 时间。 τ_{period} 内未访问该节点的概率为 $1 - \gamma_p$ ， $d - k\tau_{\text{period}}$ 时间未访问该节点的概率为 $1 - \gamma_p (d / \tau_{\text{period}} - k)$ 。

证毕。

根据这个性质，可以得到传输延时的上限。定义 CP 节点的最小访问率为 γ_0 ，其数据传输延时 D_0 应该满足

$$D_0 \leq D_r \quad (11)$$

显然，如果 CP 节点的访问率大于该最小访问率，那么数据传输延时应更小，即

$$D_p \leq D_0, \forall \gamma_p \geq \gamma_0 \quad (12)$$

结合式 (11) 和式 (12)，可以得到

$$D_p \leq D_r, \forall p \in S \quad (13)$$

因此，当确保对每一个 CP 节点的访问率均大于 γ_0 ，那么可以保证所有数据的传输延时都低于用户要求的最大延时 D_r 。由于对 D_r 要求的不同，因此 γ_0 也会随之变化。 γ_0 情况下 D_0 的期望如式(14)所示。

定理 3 当 CP 节点的访问率为 γ_0 时， D_0 的期望为

$$E(D_0) = (1 - 0.5\gamma_0) \tau_{\text{period}} / \gamma_0 \quad (14)$$

证明 在第 1 次对 CP 节点队列访问中，数据延时的期望为 $\tau_{\text{period}} / 2$ 。当数据在第 j 轮 ($j > 1$) 访问中被移动 Sink 收集时，数据延时将会增加 $(j - 1)\tau_{\text{period}}$ 。设 M 为数据收集共经过的轮数，那么 M 的概率分布函数(pdf)为

$$\Pr(M = k) = (1 - \gamma_0)^{k-1} \gamma_0, k \geq 0 \quad (15)$$

因此，可以得到 D_0 的期望为

$$\begin{aligned} E(D_0) &= \sum_{i=0}^{\infty} (\tau_{\text{period}} / 2 \Pr(M = i)) \\ &= (1 - 0.5\gamma_0) \tau_{\text{period}} / \gamma_0 \end{aligned} \quad (16)$$

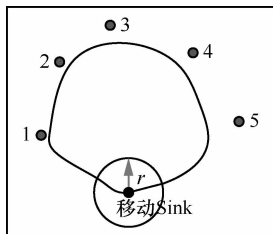
证毕。

上式中可以看出 D_0 的期望值是 γ_0 的单调递减函数。

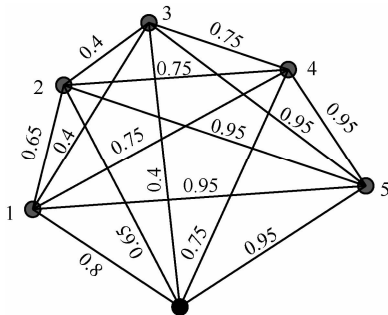
4.2 基于访问概率的最短路径选择

本文给出了一种基于 CP 节点访问概率的路径选择优化算法。每个 CP 节点在系统初始化时分配一个访问概率，该访问概率由最大数据延时、Sink 移动路径长度和移动 Sink 的数量等因素决定，以保证在最大数据延时而内获得最长的路径，相应地可以选择更多的 CP 节点来节约网络能量。

图 4 给出了一个基于概率访问的简单例子。图 4(a) 中，移动 Sink 需要访问 5 个 CP 节点。对于每个 CP 节点 $p_i (p_i \in C)$ ，其访问概率设为 β_i ，而忽略该节点的概率为 $1 - \beta_i$ 。在 Sink 的移动过程中，要实现平滑的移动路线是很困难的，采用图 4(b) 中的方法，用节点间的欧式距离作为移动长度。每个连线上的权值即为该节点的访问概率。



(a) 访问路径的一个简单例子



(b) 为每个 CP 节点赋予一个访问概率，移动 Sink 按照此概率访问 CP
图 4 概率路径选择问题

结合 CP 节点的访问概率和欧式距离来处理最短路径选择算法。对于 CP 队列中每一个 CP 节点

p_i ，其访问概率为 β_i ，设前一个 CP 节点到 p_i 节点的欧式距离为 w_i ，当前系统中共使用了 m 个移动 Sink 来收集数据。那么，可以构造整型线性规划 (IPL) 模型为

$$\text{Minimize } \sum_{p_i \in C} (1 - \beta_i) w_i \quad (17)$$

满足约束条件

$$1 - (1 - p_i)^m \geq \gamma_0 \quad (18)$$

式 (18) 确保了 CP 节点的访问率不低于最大延时需求下的访问率。

本文采用了单一访问概率方法 (identical probability schema)，在多个移动 Sink 访问某 CP 时采用单一的概率，并且在系统的运行过程中不变。可以求出 CP 节点的传输延时期望与访问概率之间的关系。

定理 4 当对 CP 节点采用单一访问概率方法时，其数据传输延时的期望值为

$$E(D) = \frac{3(1 - \beta)^m - (1 - \beta)^{2m}}{2(1 - (1 - \beta)^m)} \tau_{\text{period}} \quad (19)$$

证明 设 M 为该 CP 节点的数据被移动 Sink 收集前经过的访问轮数，那么 M 的概率分布函数为

$$\Pr(M = i) = (1 - \theta)^{i-1} \theta \quad (20)$$

其中， θ 为单轮内 CP 节点的访问概率，则

$$\theta = 1 - (1 - \beta)^m \quad (21)$$

将 θ 代入式 (20) 中，得

$$\Pr(M = i) = (1 - \beta)^{m(i-1)} (1 - (1 - \beta)^m) \quad (22)$$

如果数据在第 i 轮被收集，那么将增加传输延时 $(i-1)\tau_{\text{period}}$ ，因此，计算条件 M 下的期望值为

$$\begin{aligned} E(D) &= \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\tau_{\text{period}}}{2} + (i-1)\tau_{\text{period}} \right) \times \Pr(N = i) \\ &= \frac{3(1 - \beta)^m - (1 - \beta)^{2m}}{2(1 - (1 - \beta)^m)} \tau_{\text{period}} \end{aligned}$$

证毕。

5 性能分析

5.1 实验设置

本节采用 NS2 模拟器和真实的移动传感器实验床来测试 CPUG 算法和基于路径选择算法在网络

能耗和数据传输延时方面的性能。

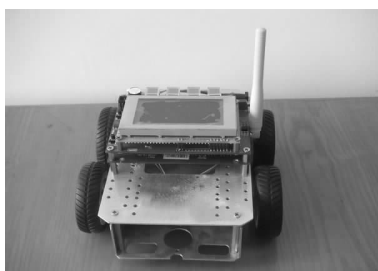
在 NS2 模拟器中主要测试网络的能耗。设在 300m × 300m 的区域内随机部署 400 个节点，并从中选取 100 个节点作为 CP 节点。假设移动 Sink 从区域的左上角出发。源节点以较低的 duty-cycle 进行数据采集，并传输给 CP 节点。最大数据延时为 5min，那么 duty-cycle 可在 5min 以内。

模拟实验采用 C++ 语言编写。通信规范符合 CC2420 协议 (Mica2 节点)^[14]。传输带宽为 40kbit/s，传输能耗为 4dBm。设数据分组的大小为 30byte。为了模拟网络链接的不可靠性，采用 USC 链接层模型^[15]。

笔者在室内进行真实的实验床性能测试。如图 5 所示，在 15m×15m 的房间内划分成 11×11 的网格，20 个 TelosB 传感器节点 (配置 CC2420 通信模块) 随机放置在这些网格中，每个网格最多放置一个节点。传感器节点使用 TinyOS 2.x 操作系统，编程语言为 nesC。移动 Sink 节点使用自主设计的 DataTruck 移动传感器节点^[16]。该节点具有强计算能力和大存储容量，采用了 32bit ARM 处理芯片，配置 4 个直流电机，最快速度接近 2m/s。移动 Sink 节点如图 5(b)所示。



(a) 实验环境设置



(b) 自行研制的移动 Sink 节点 DataTruck

图 5 实验环境及移动 Sink

5.2 网络能耗

为了便于观察网络的性能，将本文算法和其他 2 种方法进行比较。一种是未使用移动 Sink 的情况，即通过多跳协议进行数据传输，称之为 NET；另一种是文献[10]中使用的 RP-CP 算法，它也是一种利

用移动节点和汇聚点进行数据收集的方法。首先，测试网络能耗与移动节点速度的关系。从图 6 中可以看出，随着移动 Sink 速度的增加，网络能耗逐渐减少。这是因为移动 Sink 可以在规定的时间范围内收集更多的数据。图 6 中的 CPUG-PPS 方法是指利用 CPUG 并结合概率路径选择算法共同完成数据收集。可以看出 CPUG-PPS 方法收集相同数据量时所需的能量开销更小，是由于它可以减少更多的时间。如果按照特定的移动路径，CPUG-PPS 方法比 NET 方法节约 40%~70% 的能量。可以看出移动速度对网络能耗有较大的影响，在下面的实验中固定 Sink 的移动速度为 1.5m/s。

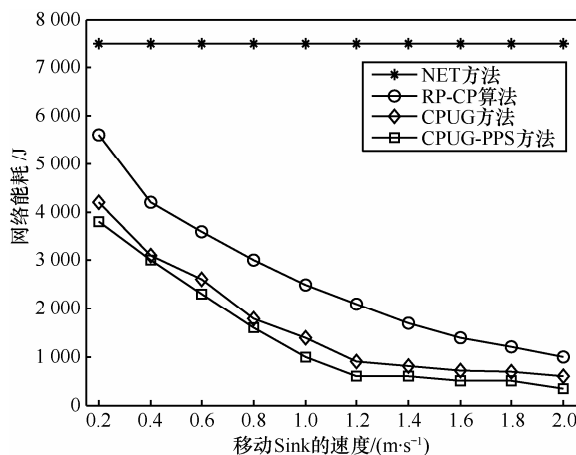


图 6 网络能耗与移动 Sink 的速度关系

图 7 给出不同节点密度下性能的比较。当节点密度高时，网络的链接性能将会更佳，所以在能耗方面 3 个算法的性能都优于密度低的情况。同样地，因为 CPUG-PPS 方法忽略了一些没有数据传输的 CP 节点，节约了更多的网络能量。

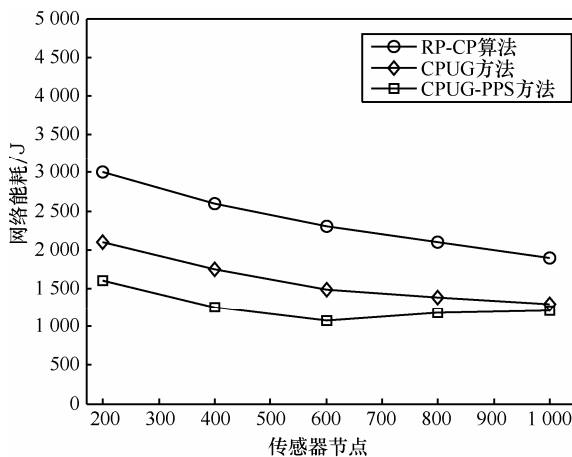


图 7 网络能耗与传感器节点的关系

接下来，关注在不同的传输延时要求下算法的性能变化。设有 8 个不同的时延上限，从 5min 到 40min，每个时延间隔 5min。从最低的 5min 开始，每个条件下的源节点数目相同。从图 8 中可以看出，随着时延上限的增加，网络的能耗却相应地减少。这是因为在较长的时延上限情况下，算法可以访问更多的 CP 节点，减少了源节点到 CP 节点的跳数，从而节约了能量。

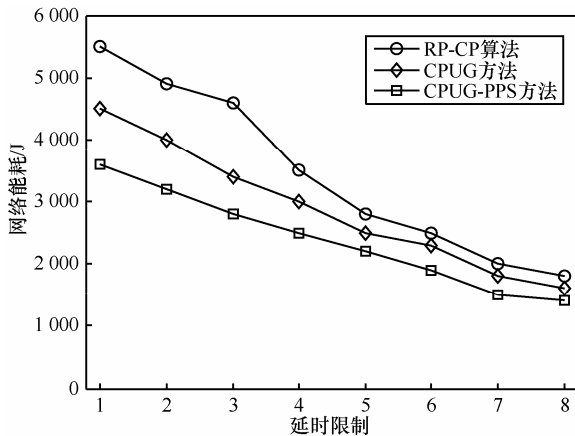


图 8 网络能耗与延时限制的关系

网络能耗的一个指标是以 CP 节点为根节点的子树中数据传输的跳数之和。为了方便起见，通过统计所有子树的路由长度来表示。路由长度越长，相应地，数据传输的跳数也越多。图 9 给出了不同算法下网络中所有子树的路由长度。可以看出，当规定的时延上限增加时，由于可以选择更多的 CP 节点，因此路由的长度减少了。图 10 说明了当网络中传感器节点增加时，由于每个 CP 节点的子树规模也会增加，因此网络能耗也增加了。

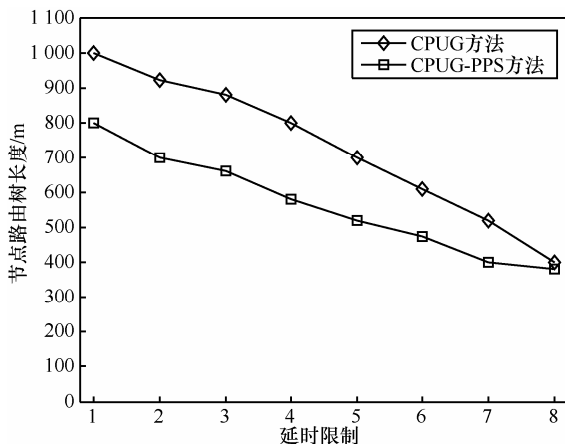


图 9 节点路由树长度与延时限制的关系

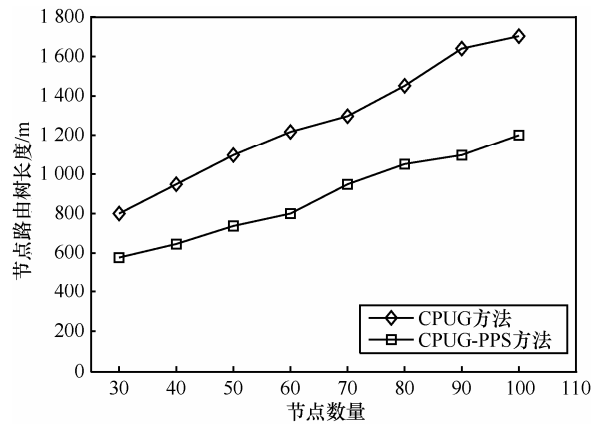


图 10 节点路由树长度与节点数量的关系

另一组实验用来测试移动 Sink 数目变化时网络的性能。每个移动 Sink 轮流访问 CP 队列中的节点，其间隔可根据移动 Sink 数据的增加相应减少。从图 11 可以看出，当移动 Sink 的数目增加时，由于在相同的规定时间内可以访问更多的 CP 节点，所以网络能耗逐渐减少。

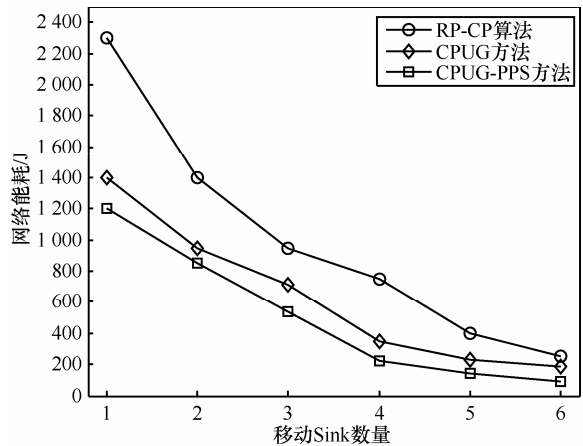


图 11 网络能耗与移动 Sink 数量的关系

5.3 概率路径选择算法性能

利用移动传感器实验床单独测试概率路径选择算法的性能。主要包括 2 个性能参数，一个是传输的时延，一个是路由树的长度。

为了标识网络中的每个节点，节点必须具有唯一的地址以及特定的数据传输格式。节点地址可以用数字来表示，传输格式如图 12 所示。

#	SurNo	DesNo	Length	data ₁	...	data _n	CRC	#
---	-------	-------	--------	-------------------	-----	-------------------	-----	---

图 12 数据传输格式

字段的含义如下：

— 数据分组的起始与结束标志

- SurNo — 源节点的地址
- DesNo — 目标节点的地址
- Length — 数据分组长度
- data_n — 传感数据
- CRC — 循环冗余校验码

实验中选择 5 个节点作为 CP 节点，其他作为源节点。移动 Sink 按照一定的概率访问这 5 个 CP 节点。通常情况下移动 Sink 以闭环的方式循环访问这些 CP 节点，通过测量可知这 5 个节点间的最短距离为 50m，那么平均延时为 25s 左右。图 13 给出了 CP 节点的访问概率与平均传输延时之间的关系。从图 13 中可以看出，移动 Sink 根据访问概率会避免访问一些 CP 节点，减少了移动路径，因此缩短了传输延时。图 14 中的曲线说明了当一些 CP 节点没有访问但其有数据需要传输时，在最大延时之前通过多跳的方式发送到基站，这样增加了网络能量的开销，所以随着访问概率的降低能耗会增大。

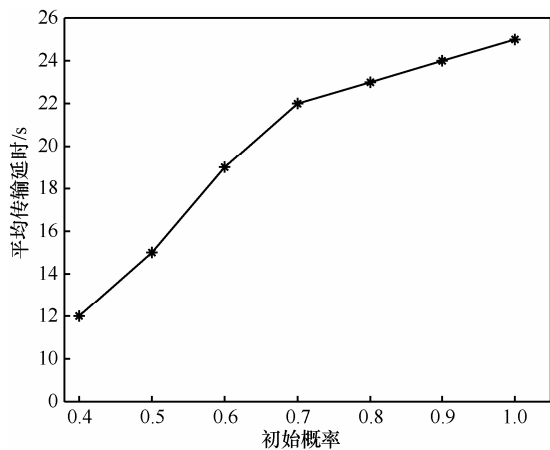


图 13 平均传输延时与初始概率的关系

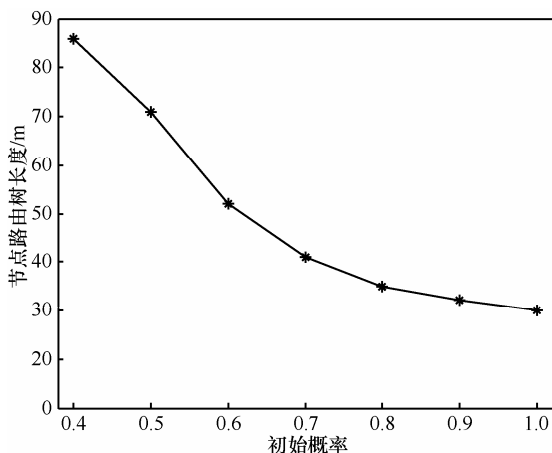


图 14 节点路由树长度与初始概率的关系

在第 2 组实验中，假设 20 个传感器节点均为 CP 节点，当一个移动 Sink 访问这些节点的概率均为 80%，那么它在 2 轮中对这些节点的访问情况如图 15 所示。可以看出在这两轮中，移动 Sink 访问 90% 以上的节点。因此，可以说当对 CP 节点确保相对较高的访问概率时，绝大部分的节点可以在较少的时间内访问到。

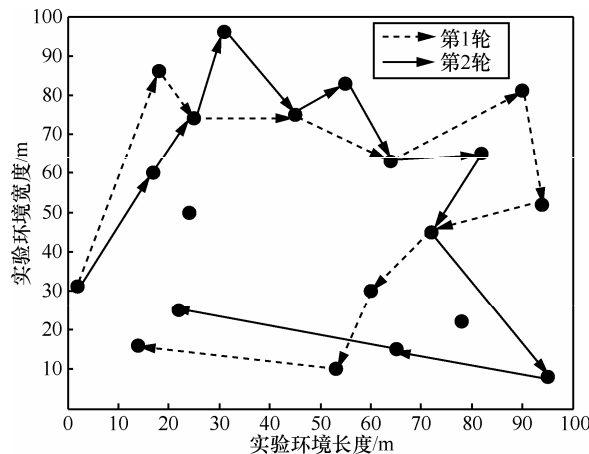


图 15 单个 Sink 在 2 轮移动过程中的路径选择情况

6 结束语

本文利用移动 Sink 来解决 WSN 中能量空洞等问题。提出了一种最短移动距离最小能耗的路径优化算法，并证明了该模型是一个 NP-hard 问题。为了在规定的最大传输延时范围内访问尽可能多的 CP 节点，提出了一种基于 CP 节点访问概率的路径选择算法。通过模拟实验以及实验床的真实数据，验证了本文提出的算法能够很好地在满足延时要求的同时节约网络的能量。

参考文献:

- [1] TOLLE G, POLASTRE J, SZEWCZYK R, *et al.* Amacroscope in the redwoods[A]. ACM SenSys[C]. San Diego, USA, 2005. 51-63.
- [2] MAYER K, ELLIS K, TAYLOR K. Cattle health monitoring using wireless sensor networks[A]. Proc of the ACM IASTED[C]. Cambridge, Massachusetts, USA, 2004. 375-380.
- [3] XUE W, LUO Q, CHEN L, *et al.* Contour mapmatching for event detection in sensor networks[A]. Proc of the ACM SIGMOD[C]. Chicago, USA, 2006. 375-380.
- [4] DU W, FANG L, NING P. Lad: localization anomaly detection for wireless sensor networks[A]. Proc of the IEEE IPDPS[C]. Denver, Colorado, 2005. 121- 127.
- [5] ASLAM J, BUTLER Z, CONSTANTIN F, *et al.* Tracking a moving object with a binary sensor network[A]. Proc of the ACM SenSys[C]. San Diego, USA, 2005.150-161.

- [6] SRINIVASAN W W V, CHUA K C. Trade-offs between mobility and density for coverage in wireless sensor networks[A]. Proc of the ACM MobiCom[C]. Montreal, Quebec, Canada, 2007. 39-50.
- [7] LI Z J, LI M, WANG J L, *et al.* Ubiquitous data collection for mobile users in wireless sensor networks[A]. Proc of the IEEE INFOCOM[C]. Shanghai, China, 2011.2246-2254.
- [8] LUO J, ZHANG Q, WANG D. Delay tolerant event collection for underground coal mine using mobile sinks[A]. Proc of the IEEE IWQoS[C]. Charleston, USA, 2009.1-9.
- [9] SUGIHARA R, GUPTA R K. Optimizing energy-latency trade-off in sensor networks with controlled mobility[A]. Proc of the IEEE INFOCOM[C]. Rio, Brazil, 2009. 1398-1408.
- [10] XING G L, WANG T, JIA W J, *et al.* Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station[A]. Proc of the ACM MobiHoc[C]. Hongkong, China, 2008.231-240.
- [11] 郜帅, 张宏科. 时延受限传感器网络移动 Sink 路径选择方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(4):742-747.
GAO S, ZHANG H K. Optimal path selection for mobile Sink in delay-guaranteed sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4):742-747.
- [12] 程龙, 陈灿峰, 马建. 无线传感器网络中多移动 Sink 的选择策略[J]. 通信学报, 2008, 29(11):12-18.
CHENG L, CHEN C F, MA J. Selection schema of mobile Sinks in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11):12-18.
- [13] KIM H S, ABDELZAHER T F, KWON W H. Dynamic delay- constrained minimum-energy dissemination in wireless sensor networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing System, 2005, 4(3):679-706.
- [14] CROSSBOW. Mica and mica2 wireless measurement system data-sheets[EB/OL]. 2004.
- [15] ZHAO J, GOVINDAN R. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[A]. Proc of the ACM SenSys[C]. Los Angeles, USA, 2003. 311-320.
- [16] 张希伟, 陈贵海. 基于 SDMA 应用的移动 Sink 节点的设计与实现[J]. 计算机研究与发展, 2012, 49(3):541-549.
ZHANG X W, CHEN G H. Design of mobile Sink node for SDMA applications in WSN[J]. Journal of Computer Research and Development, 2012, 49(3):541-549.

作者简介:



张希伟(1977-), 男, 江苏无锡人, 博士, 河海大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、移动机器人技术、网络中间件。



沈琳(1965-), 男, 江苏常州人, 博士, 江苏理工学院教授, 主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式系统等。



蒋益峰(1981-), 男, 江苏常州人, 硕士, 江苏理工学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络。