

时延受限传感器网络移动 Sink 路径选择方法研究

郜 帅,张宏科

(北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室,北京 100044)

摘 要: 已有研究表明 sink 移动方案能有效提升无线传感器网络的能耗效率,但 sink 点移动速度的限制通常会带来较大的数据收集时延,与某些实时性要求较高的应用产生矛盾.为解决该问题,本文以满足时延要求和最小化网络整体能耗为优化目标,提出了一种基于虚拟点优先级的移动 sink 路径优化选择方法.仿真试验结果表明,与基准算法相比,该方法在牺牲少量能耗的前提下能显著降低算法时间复杂度,具有良好的规模可扩展性.

关键词: 时延受限;传感器网络;移动 sink;路径选择

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 04-0742-06

Optimal Path Selection for Mobile Sink in Delay-guaranteed Sensor Networks

GAO Shuai, ZHANG Hong-ke

(National Engineering Lab for NGI Interconnection Devices, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Recent work shows sink mobility can improve the energy efficiency in wireless sensor networks. However, the speed limit of the mobile sink often lead to increasing data gathering delay, which may be unacceptable in some real-time applications with strict delay requirement. To address this issue, this paper proposes a path selection scheme based on virtual nodes' priority to meet the delay requirement and minimize the energy consumption of entire network. Simulation experiments under MATLAB shows that computational complexity performance and scalability performance of the proposed scheme can be increased effectively at the cost of little more energy consumption in comparison with some baseline algorithms.

Key words: delay-guaranteed; sensor networks; mobile sink; path selection

1 引言

传统无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,简称 WSNs)中, sink 周围的节点由于需要转发更多的数据常常导致能量过早耗尽,形成 WSNs 能耗瓶颈.为解决该问题,人们提出一系列节能路由机制(如动态分簇算法等)^[1]试图均衡节点间能量消耗,延长网络生存时间.这些文献所提方案能在一定程度提高无线传感器网络的性能,缓解“能量黑洞”问题,但无法从根本上解决该问题.为此,近年来人们提出各种 sink 移动方案^[2~8]使得全网能量消耗在更多的节点之间均衡,从而缓解能耗瓶颈问题.实际应用中,由于网络规模较大和 sink 点移动速度的限制(约 0.1~2m/s,如 Packbot^[9]等), sink 点通常需要较长的时间才能完成一次完整的移动采集任务,造成较高的数据延迟.另一方面,某些实时应用对数据延

迟有非常严格的要求,如森林火灾监控、桥梁结构健康检测等.在这些应用中,通常要求数据在一定时间内能够传递到移动 sink 点.为解决 sink 点移动速度与数据采集延迟要求之间的矛盾,本文试图寻求最佳的 sink 点移动路径,在满足数据延迟要求的同时,使全网整体能耗最小化.

目前,已有部分文献对该问题进行了初步研究.文献[2]针对大规模无线传感器网络,研究了移动 sink 点访问各传感器节点的排序问题,通过设计优化的移动路径以确保避免各节点缓存区溢出.但文献[2]中, sink 路径优化选择的需求源于各节点不同的数据采集率和数据缓存区大小的限制,而不是对数据延迟的要求.文献[3]提出了一种基于多 sink 点多跳通信模式的 sink 移动策略,其中当 sink 点附近节点能耗即将耗尽、“能量黑洞”即将出现时, sink 点利用局部信息和分布式思想选

择节点剩余能耗较多的区域作为下一个移动目的地. 但该方案在 sink 移动路径选择过程中没有考虑延迟要求的影响. 文献[4]分析了全网能耗和采集延迟对 sink 移动路径选择的约束关系, 给出了基于跳数边界的数学模型用于权衡能耗性能和延迟性能, 并依此提出了一种基于多跳路由的分布式 sink 移动路径选择方法, 但文献[4]中并没有考虑定量的数据延迟约束.

文献[5,6]提出了一种基于汇集点 RP(Rendezvous Points)的 sink 移动采集机制以解决 sink 点移动速度限制与精确数据延迟之间的矛盾. 在该机制中, 传感器节点将采集的信息通过多跳方式发送给距离最近的 RP 点, 并由后者缓存信息. 移动 sink 依次访问各 RP 点以采集数据. 但是在文献[5,6]中, 全网的通信能力并没有得到充分利用, 因为在无线通信模型中, 移动 sink 可以远程采集来自汇集点的信息, 即移动 sink 只需要移动到汇集点附近采集数据即可, 没有必要移动到精确的汇集点位置. 此外, 计算得到的 RP 点位置可能没有实际的物理节点存在, 此时需要在周围随机选择节点代替汇集点, 从而影响算法性能. 文献[5]的方案仅适用于 N -to-1 数据聚合模型, 不适用于无数据聚合的网络场景. 文献[6]基于非数据融合模型, 但忽略了移动 sink 起始位置对算法性能的影响, 且文献[6]所提算法时间复杂度较高.

本文重点研究了时延受限的无线传感器网络中 sink 点移动路径优化设计问题, 分析了 sink 移动轨迹对全网整体能耗的影响因素, 充分利用了节点的无线通信能力, 避免访问各传感器节点实际物理位置, 提出了一种基于虚拟点优先级的 sink 移动轨迹优化选择方法, 仿真试验结果表明, 本文所提方法整体能耗低于文献[5,6]的方案, 在算法时间复杂度性能方面也远优于基准算法, 且具有良好的规模可扩展性.

2 系统模型与问题描述

2.1 系统模型分析

本文考虑带移动 sink 点的密集型无线传感器网络, 如图 1 所示. 在图 1 中, 移动 sink 点 M 安装在机器人或汽车等运动载体上, 这些运动载体沿着路径 P 以恒定速度 V 移动并进行数据采集. 传感器节点随机散布在移动轨道 P 两侧, 记数量为 n . 假设在时间段 D 秒内, 每个节点都会产生 q 比特数据且这些数据必须最迟在 D 秒内传送给移动 sink 点. 此处的 D 秒即为本文对数据延迟的要求. 故 sink 点移动轨道 P 的总长度上限 $l_m = V \cdot D$, 表示 sink 点必须在 D 秒内完成一次移动周期, 称为“轮”, 本文以“轮”为单位来衡量网络性能. 上述时延 D 、移动速度 V 和轨道长度上限 l_m 的关系表示在特定的移动速度和时延要求下, sink 移动轨迹长

度的上限是确定的, 否则将无法在特定时延要求内完成数据收集. 为便于描述, 本文以轨道长度上限 l_m 来间接反映时延要求 D , 选择长度不大于 l_m 的 sink 移动轨迹即表示可以满足时延要求.

图 1 中, 当 sink 点 M 移动到节点附近时, 节点开始向 M 发送数据. 根据移动 sink 点的通信范围 R , 可以将全部节点划分为两类: sub-sink 节点(见图 1 白点)和成员节点(见图 1 黑点). 前者距离轨道 P 较近, 可与移动 sink 直接通信; 而后者则必须将数据通过多跳方式转发给特定的 sub-sink 点, sub-sink 点缓存数据并最终发送给移动 sink 点. 在本文模型中, 各成员节点必须且仅能选择一个 sub-sink 作为目的. 本文考虑密集型网络, 假设所有节点之间可以通过单跳或多跳方式互相连通, 无论 sink 移动轨迹如何选择, 不会存在孤立节点, 即任一节点总能找到一条通往移动 sink 点的传输路径. 由于数据在网内的传输速度远大于 sink 点的移动速度, 故可忽略数据在网内及 sub-sink 与移动 sink 间的传输时延. 依靠现有定位技术, 可假设移动 sink 能够获知全网内节点的物理位置信息.

在传感器网络研究中, first radio order 能耗模型^[10]经常被用于计算节点发送和接收能耗. 在 first radio order 能耗模型中, 节点发送能耗与传播距离的平方成正比. 本文不考虑功率控制问题, 假定所有节点采用固定的发射和接收功率, 能耗与节点之间的实际物理距离无关. 为此, 本文采用式(1)所示的简化能耗模型, 该模型已在相关文献^[7,8]被用于计算能耗.

$$p \approx e(k_r + k_t) \quad (1)$$

在能耗模型式(1)中, 单个节点总能耗 p 由接收和发送的数据总量 k_r 和 k_t 决定. c 为常数, 表示发送和接收单位比特数据的能耗. 假设移动 sink 单个运行周期内任意节点 i 接收数据量和发送数据量分别为 k_r^i 和 k_t^i , 则全网总体能耗 p_{total} 可表示为:

$$p_{total} = \sum_{i=1}^n p_i \approx \sum_{i=1}^n e(k_r^i + k_t^i) \quad (2)$$

2.2 最优化问题描述

图 1 模型中, 受数据延迟 D 的限制, 需要在监测区域内选择一条长度不大于 l_m 的线路作为 sink 点 M 的移动轨迹, 同时尽可能降低系统整体能耗. 这里的最优

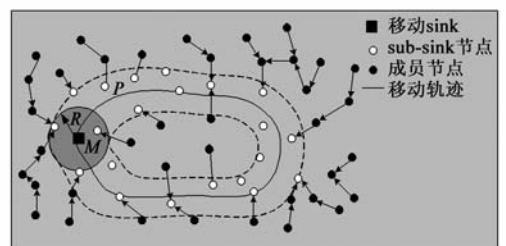


图1 基于移动sink的无线传感器网络应用场景模型

化问题可以描述为:

给定固定的传感器节点集合,选择一条长度不大于 l_m 的闭合轨道 P ,由轨道 P 将全网节点分为 sub-sink 节点集合和成员节点集合,根据能耗模型式(2)使得全网总体能耗 p_{total} 最小化.

上述问题试图在监测区域内寻找最优闭合路径,该路径仅受长度限制,并无地理位置限制.在上述优化问题中,路径 P 的选择将直接影响网络中 sub-sink 节点集合和成员节点集合的构成,而后者则会直接影响到各节点的能耗.本文根据能耗模型式(2)和最优化问题描述,分析了本模型中全网能耗的影响因素,包括跳数和路径位置等,提出了一种基于虚拟点优先级的路径选择方法.

3 能耗影响因素分析

3.1 基于跳数的能耗描述

2.1 节能模型以各节点实际接收和发送的数据量来衡量全网能耗,不利于从图论的角度寻找最优路径.本节将 2.1 节能模型转化为以跳数表示的形式.根据能耗模型式(1),采用最短路径树的方式选择 sub-sink 及转发数据将有助于最小化全网能耗,即所有成员选择距离其跳数最近的节点 i 作为其目的 sub-sink 点.在时间段 D 内,任意节点接收数据量 k_r^i 和发送数据量 k_s^i 之间的关系为: $k_i^i = k_r^i + q$. 根据最短路径树路由方式,全网节点接收数据总量可表示为:

$$\sum_{i=1}^n k_r^i = \sum_{i=1}^n h_i \cdot q \quad (3)$$

式(3)中 h_i 表示节点 i 到其目的 sub-sink 点的最短跳数.如果节点 i 本身为 sub-sink,则 h_i 为 0. 根据式(2)和式(3),可以将单轮系统总能耗 p_{total} 表述为最小跳数之和的形式,如,

$$\begin{aligned} p_{total} &\approx \sum_{i=1}^n e(2 \cdot k_r^i + q) \\ &= \sum_{i=1}^n e(2 \cdot h_i + 1) \cdot q = e \cdot q (n + 2 \sum_{i=1}^n h_i) \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,图 1 所示的 sink 移动传感器网络模型中全网总体能耗最小化等价于任一点到目的 sink 点最小跳数之和的最小化.

3.2 路径地理位置对能耗的影响

3.1 节中基于跳数的能耗描述表示 sink 点移动轨迹应该尽可能覆盖节点密度较高的区域,另一方面,在节点密度相同的前提下,路径所处的地理位置将对全网整体能耗造成一定的影响,图 2 以轨迹固定的传感器网络为例进行了定性分析.图 2(a)和图 2(b)中分别部署了 15 个间距相同的节点, P 为固定的 sink 点移动轨迹, T_1 和 T_2 分别表示两段被选择的长度受限的 sink 点

移动轨迹,白点表示 sub-sink 节点,黑点表示成员节点. $hop_sum(T_i)$ 表示当前的节点到目的 sub-sink 点的最短跳数和,根据能耗模型式(4), $hop_sum(T_i)$ 可间接描述全网能耗.可以看出,在节点绝对均匀分布的前提下,选择地理位置居中的路径将能获得更小的跳数和,即更小的全网能耗.

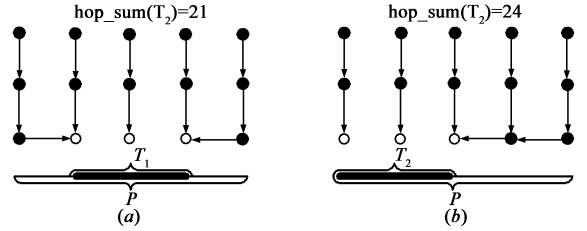


图2 路径地理位置对能耗的影响

4 基于虚拟点优先级的路径选择算法

4.1 虚拟点选择算法

文献[6]给出了一种 sink 移动轨迹的选择算法 RP-UG,该算法首先随机确定一个节点作为起始位置,然后依次遍历全网所有节点,根据路径长度和能耗指标之间的关系来确定路径,故算法时间复杂度受监测区域节点总量影响严重,算法的规模可扩展性较差.考虑到节点总量及部分区域节点的高密度分布对 sink 移动轨迹计算的严重影响,本文提出了一种路径优化选择算法,其基本思想是避免访问各传感器节点实际物理位置,而是在监测区域内选择若干虚拟节点作为访问对象(见算法 1),通过遍历虚拟点确定最优路径,借助于节点间无线远程通信传输的能力来收集传感数据,从而有效降低算法时间复杂度,减小节点总量对算法运行时间的影响,提高算法规模可扩展性.

算法 1 以矩形监测区域为例给出了虚拟点选择算法,其他不规则区域可根据类似原理添加虚拟点.在算法 1 中,首先根据监测区域的长度、宽度及参考步长 Δl ,计算得到需要添加的虚拟点数量 $x_n \cdot y_n$,然后根据 X 轴和 Y 轴方向虚拟点间隔 x_s 和 y_s ,计算得到在全部监测区域内均匀分布的虚拟点 $V_i (i = 1, \dots, x_n \cdot y_n)$ 的物理坐标.图 3 给出了算法 1 的一个具体实例,其中,监测区

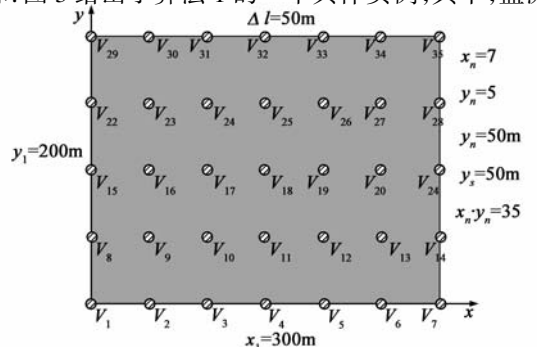


图3 虚拟点选择算法示例

域 X 轴长度为 300 米, Y 轴长度为 200 米, R 为 50 米, 图 3 中 $V_1 - V_{35}$ 即为添加的 35 个虚拟节点.

算法 1 虚拟点选择算法

输入: 矩形监测区域: 长度为 x_l (X 轴方向), 宽度为 y_l (Y 轴方向);
参考步长 Δl

Main:

① 计算 X 轴和 Y 轴方向虚拟点个数: $x_n = \lceil x_l / \Delta l \rceil + 1, y_n = \lceil y_l / \Delta l \rceil + 1$

② 计算虚拟点总个数为 $x_n \cdot y_n$

③ 计算 X 轴和 Y 轴方向虚拟点间隔距离: $x_s = x_l / (x_n - 1),$
 $y_s = y_l / (y_n - 1)$

④ 根据 x_n, x_s, y_n, y_s , 计算各虚拟点 $V_i (i = 1, \dots, x_n \cdot y_n)$ 的坐标:

X 轴坐标 $V_i(x) = [(i-1) \bmod x_n] \cdot x_s; Y$ 轴坐标 $V_i(y) = \lfloor (i-1) / x_n \rfloor \cdot y_s$

输出: $x_n \cdot y_n$ 个虚拟点 $V_i (i = 1, \dots, x_n \cdot y_n)$

4.2 优化路径选择算法

根据 3.2 节中路径地理位置对全网能耗的影响分析, sink 路径选择应该从监测区域几何中心虚拟点开始进行, 从而确保 sink 路径从监测区域中心向四周延伸. 算法 2 给出了基于虚拟点优先级的 sink 点移动轨迹优化选择算法 (Virtual Nodes' Priority, VNP), 其基本思想从虚拟点集合中选择满足轨迹长度上限 l_m 的最佳 sink 访问点集合 U , 而对访问点集合 U 进行 TSP 问题求解得到的闭合轨迹即为 sink 点移动轨迹.

算法 2 从中心虚拟点开始循环遍历所有虚拟点来选择 sink 访问点, 每次循环总是选择当前最佳的一个虚拟点 (优先级最高) 作为 sink 访问点, 直到 sink 轨迹长度超出上限 l_m . 算法 2 中 sink 访问点集合 U 最初仅由中心虚拟点 V_c 构成, 在每次循环中, 首先分别计算当前访问点集合 U 构成的移动轨迹周围的 sub-sink 集合 $S(U)$ 和成员节点集合 $M(U)$; 然后统计出剩余虚拟点中可能成为访问点的节点集合 Z , 如果集合 Z 为空集, 表示已无合适的访问点, 算法退出; 然后根据式 (5) 计算集合 Z 中各虚拟点的优先级, 优先级最高的点将被选择为当前循环的最佳虚拟点, 挪动到访问点集合 U 中.

$$P_r(x) = \frac{\sum_{m_i \in M(U)} h(m_i, S(U)) - \sum_{m_i \in M(U \cup \{x\})} h(m_i, S(U \cup \{x\}))}{TSP(U \cup \{x\}) - TSP(U)} \quad (5)$$

式 (5) 中, $\sum_{m_i \in M(U)} h(m_i, S(U))$ 表示集合 $M(U)$ 中各成员节点到 sub-sink 集合中任一点的最短跳数和, 间接反映了全网能耗 (见 4.1 节), 可借助 Dijkstra 等算法进行求解, 在此不再赘述. $TSP(U)$ 表示对访问点集合 U 中所有节点进行 TSP 问题求解的结果, 即访问点集合 U 中所有节点的闭合路径的最短长度. 由此, 式

(5) 的分子表示在集合 U 中增加节点 x 在能耗方面带来的“收益”, 而分母表示在集合 U 中增加节点 x 在路径长度方面需要的“成本”.

算法 2 基于虚拟点优先级的优化路径选择算法

输入: 传感器节点集合 $S = \{s_i, i = 1, \dots, n\}$, 轨道长度上限 l_m , 虚拟点集合 $V = \{V_i, i = 1, \dots, x_n \cdot y_n\}$, 中心虚拟点 V_c

初始化: $U = \{V_c\}$

Main:

① 计算访问点集合 U 的 sub-sink 集合 $S(U)$ 和成员节点集合 $M(U)$

② $Z = \{v \in V \setminus U, TSP(U \cup v) \leq l_m\}$. If $Z = \Phi$, 算法结束.

③ 选择集合 Z 中优先级最高的虚拟点 x , 即 $x = \arg \max Pr(x), x \in Z$.

④ 将 x 添加到集合 U 中, $U = \{U \cup x\}$

⑤ 执行冗余节点检测, $\forall u \in U$, If $r(u) = 0, U = U \setminus \{u\}$

⑥ If $U = V$, 算法结束; else 循环执行第 1 步.

输出: sink 访问点集合 U

算法 2 第 5 步的冗余节点检测是用于检测当前访问点中可能存在的分布较为密集的点, 避免密集节点冗余造成的路径长度浪费, 从而利用有限的路径长度获得更小的能量开销, 其中节点冗余度的计算方法由式 (6) 给出, 其基本原理与式 (5) 分子的计算方法类似. 最后, 若所有虚拟点都已经被挪动到访问点 U 中, 则算法退出.

$$r(x) = \sum_{m_i \in M(U \setminus \{x\})} h(m_i, S(U \setminus \{x\})) - \sum_{m_i \in M(U)} \cdot h(m_i, S(U)) \quad (6)$$

算法 2 结束后, 可以得到最佳的 sink 访问点集合 U , 然后对访问点集合 U 进行 TSP 问题求解, 得到满足时延要求同时最小化全网能耗的 sink 点优化移动轨迹. 在实际系统中, sink 点沿着根据集中优化的移动轨迹进行数据收集, 具体通信协议流程可参考文献 [7], 在此不在赘述.

算法 2 中需要多次求解 TSP 问题, TSP 不同的求解方法具有不同的时间复杂度, 这里忽略 TSP 的具体求解方法, 将其算法时间复杂度记为 $C(TSP)$. 故本文所提 VNP 方法 (含算法 1 和算法 2) 时间复杂度为 $O(|V|^2 \cdot C(TSP))$, 其中 $|V_c|$ 表示算法 2 中虚拟点集合的大小. 根据算法 1 (以监测区域为矩形为例), $|V| = x_n \cdot y_n = (\lceil x_l / \Delta l \rceil + 1) \cdot (\lceil y_l / \Delta l \rceil + 1)$, 表示 VNP 算法复杂度与步长选择直接相关, 第 5 节将通过仿真试验分析步长选择对算法复杂度的影响.

5 性能仿真

本节采用 MATLAB 构建仿真平台, 对所提 sink 优化路径选择算法进行性能分析. 仿真环境主要参数设定

为:传感器节点均匀随机分在 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的矩形监测区域内,各节点在 sink 点运行周期内以 20b/s 的速度进行连续数据采集;考虑同构网络,所有节点具有相同的初始能量 20J 和相同的最大通信范围 $R = 50\text{m}$;能耗模型(1)式中的常量 e 设为 $0.5\mu\text{J/bit}$;时延要求 D 设为 10 分钟,即所有数据在产生后必须在 10 分钟内传送到移动 sink 点.为减小误差,仿真试验中所有数据均为 50 次随机试验的均值.

首先仿真虚拟点选择算法中步长 Δl 对路径选择的影响(见图 4),其中“全网能耗”为监测区域内所有节点单轮能耗总和,“计算时间”为 MATLAB 仿真工具给出的计算时间,这里不关注其绝对时间,而关注不同条件下计算时间之间的比较,因为相对时间在一定程度上反映了步长对算法时间复杂度的影响.图 4(a)和图 4(b)分别比较了 sink 移动速度为 0.3 米/秒时三种节点规模(50 点、75 点、100 点)情况下步长选择对全网能耗和计算时间的影响.可以看出,随着步长的增加,虚拟点个数将会减少,从而 VNP 算法的计算时间将会缩短.而计算时间的缩短是以牺牲整体能耗为代价的,步长的增加带来了更多的能耗.另一方面,在图 4(a)和图 4(b)中,相同步长条件下节点总量的增加会直接带来更高的总体能耗和更长的计算时间.

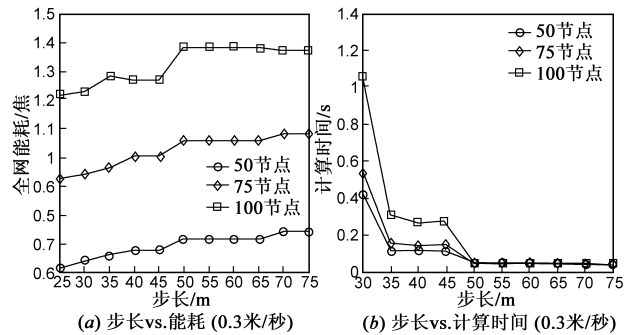


图4 步长对优化路径选择算法性能的影响

从图 4(b)中可以看出,当步长大于节点通信范围 $R(50$ 米)时,计算时间性能的改善将不太明显,故在之后与其他算法比较的仿真试验中,采取节点通信范围作为步长.需要注意的是,50 米的步长是在能耗与计算时间两个指标间平衡之后的结果,并不能带来最优的能耗性能和计算时间性能.

下面对 VNP 方法和两个基准算法进行性能比较,这里步长参数设为 50 米, sink 移动速度设为 0.3 米/秒.根据第 2 节对相关工作的分析,这里采用文献[6]提出的 sink 路径选择算法 RP-UG 作

为基准算法进行比较.图 5(a)从全网能耗角度对本文所提的 VNP 方法和 RP-UG 算法进行了比较,其中 RP-UG-C 是 RP-UG 的一个变体,表示选择监测区域中心点作为初始起点进行路径选择.从图 5(a)可以看出,随着监测区域内节点规模的增大,三种算法带来的能耗会随之增大,而其中 RP-UG 没有考虑路径地理位置对全网能耗的影响随机选择初始点,其全网整体能耗明显高于另外两种算法.VNP 方法的能耗略高于 RP-UG-C,在能耗指标方面二者相当.

图 5(b)比较了三种算法在计算时间方面的性能.这里采用归一化计算时间作为评价指标,即图 5(b)的纵轴表示 RP-UG 和 RP-UG-C 两种算法计算时间与 VNP 计算时间的比值.可以看出,RP-UG 和 RP-UG-C 在算法时间复杂度方面处于同一数量级,且远高于 VNP 算法的计算时间(数百至数千倍).综合图 5(a)和图 5(b),VNP 算法虽然在能耗性能方面略逊于 RP-UG-C 算法,但在计算时间方面要远远胜出,VNP 以较小的能耗代价获得较大的计算时间“收益”.此外,根据 4.2 节的分析,VNP 算法时间复杂度由虚拟点数量直接影响,而节点规模对计算时间的影响较小(见图 5(c)),而图 5(b)中 RP-UG 和 RP-UG-C 两种算法的计算时间受节点规模的增大的影响很大.可以得出,与 RP-UG 和 RP-UG-C 相比,VNP 算法具有良好的规模可扩展性.

6 结论

针对移动无线传感器网络中 sink 移动速度与时延要求之间的矛盾,本文提出了一种移动 sink 路径优化选择方法 VNP 以满足时延要求同时最小化网络整体能耗.VNP 通过避免访问各传感器节点实际物理位置及遍历虚拟节点来降低算法时间复杂度,基于节点的无线通信能力来计算各虚拟点优先级,且兼顾考虑了路径地理位置对能耗的影响.仿真实验表明,与基准算法 RP-UG 相比,VNP 在能耗性能方面有明显提升,与 RP-UG-C 相比,VNP 以较少的能耗为代价获得算法计算时间的显著“收益”,且 VNP 受节点规模增大的影响很小,具有良好的规模可扩展性.

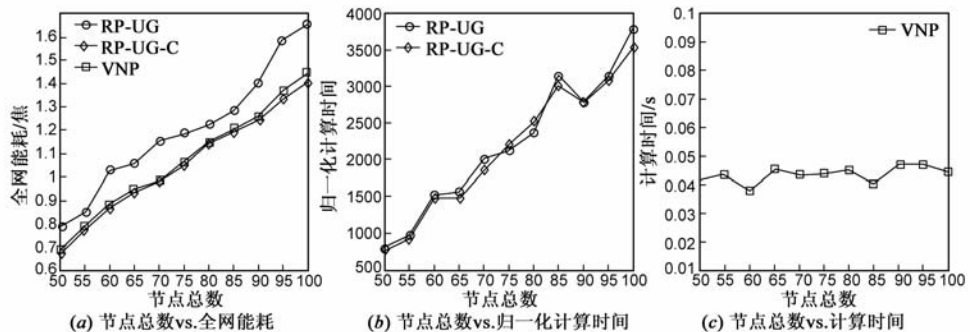


图5 VNP算法与基准算法性能比较

参考文献

- [1] 韩志杰,王汝传,等.一种基于 ARMA 的 WSN 非均衡分簇路由算法[J].电子学报,2010,38(4):865-869.
Han Zhi-jie, Wang Ru-chuan, et al. An unequal clustering algorithm in wireless sensor networks based on ARMA[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 865-869. (in Chinese)
- [2] A Somasundara, A Ramamoorthy, et al. Mobile element scheduling with dynamic deadlines[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2007, 6(4): 395-410.
- [3] M Marta, M Cardei. Improved sensor network lifetime with multiple mobile sinks[J]. Pervasive and Mobile Computing, 2009, 5(5): 542-555.
- [4] J Rao, S Biswas. Network-assisted sink navigation for distributed data gathering: Stability and delay-energy trade-offs [J]. Computer Communications, 2010, 33(2): 160-175.
- [5] G Xing, T. Wang, et al. Rendezvous design algorithms for wireless sensor networks with a mobile base station[A]. Proc of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc) [C]. New York: ACM Press, 2008. 231-240.
- [6] G Xing, T Wang, et al. Rendezvous planning in wireless sensor networks with mobile elements [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2008, 7(11): 1-14.
- [7] S Gao, H Zhang, et al. Efficient data collection in wireless sensor networks with path-constrained mobile sinks[A]. Proc of the 10th IEEE Int'l Symp. on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM) [C]. Kos Greece: IEEE Computer Society, 2009. 1-9.
- [8] M Wang M, S Basagni, et al. Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetime[A]. Proc of the 38th Annual Hawaii Int'l Conf[C]. Hawaii: IEEE Computer Society, 2005. 287a-287a.
- [9] Packbot. The next step in unmanned tactical mobile robots [OL]. <http://www.packbot.com>, 2007.
- [10] R Heinzelman, A Chandrakasan, et al. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.

作者简介



鄱 帅 男, 1980 年生于河南济源, 北京交通大学电子信息工程学院讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、移动互联网等。
E-mail: shgao@bjtu.edu.cn



张宏科 男, 1957 年生于山西大同, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代信息网络体系结构、移动互联网、无线传感器网络等。

