

混合型异构传感器网络中移动数据收集器的路径优化

侯贵升, 吴晓蓓, 黄成, 徐志良

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 针对周期工作-事件驱动混合型异构传感器网络, 设计一种基于静态 Sink 搭配移动数据收集器(MDC)的数据收集策略. 为了解决 MDC 访问规划问题, 提出一种最小能耗访问节点集搜索算法. 首先, 基于节点相对边缘度从整体层面去除适量边缘节点; 然后, 依据节点排除优先级, 迭代排除当前节点集中相对能效最低的节点, 从而逐步获得优化的访问节点集. 仿真实验结果表明, 所提出的新数据收集策略具有优异的能效性、负载均衡性和实时性.

关键词: 混合型异构传感器网络; 静态 Sink; 移动数据收集器; 最小能耗访问节点集; 存储空间溢出约束

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Optimizing path selection for mobile data collector in hybrid heterogeneous sensor networks

HOU Gui-sheng, WU Xiao-bei, HUANG Cheng, XU Zhi-liang

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: HOU Gui-sheng, E-mail: guisheng.hou@163.com)

Abstract: A data collection strategy based on a static sink going with a mobile data collector(MDC) is designed for the periodic-duty and event-driven hybrid heterogeneous sensor networks. In order to solve the visit-planning problem of MDC, a search algorithm of the minimum energy-consumption visit-nodes set is proposed. Firstly, the appropriate number of nodes are removed on the overall network level based on the node's relative fringe-degree. Then based on the node's removing priority degree, the node with the lowest relative energy-efficiency is iteratively excluded from the current visit-nodes set to gradually get the optimized visit-nodes set. Simulation results show that the proposed data collection strategy has excellent energy-efficiency, load-balance and real-time.

Keywords: hybrid heterogeneous sensor networks; static Sink; mobile data collector; minimum energy-consumption visit-nodes set; storage space overflow constraint

0 引言

当前, 自然保护区的有效管理是一大难题^[1], 无线传感器网络(WSNs)技术的不断成熟为其提供了一个可行的解决方案(如 GreenOrbs^[2]). 在大量廉价感知节点密布保护区内, 利用携带的各种传感器周期性地采集周围环境参数, 如温度、光照等. 同时, 密切关注区内珍稀物种的生长活动, 并对不法分子的破坏行为保持高度警戒. 部署在局部区域中心的处理节点(计算、存储和通信能力突出, 而感知能力较差)聚合周围成员感知节点的数据并进行适当处理, 随后将结果汇报给连接外部管理中心的 Sink 节点. 这样, 管理中心便可对保护区进行密切监视, 进而实施有效管理. 不难看出, 基于这种应用背景的 WSNs 兼具周期

工作型和事件驱动型传感网的特征, 其数据流具有明显分化特点, 大体上可分为两类: 用于描述常规环境参量的周期感知数据流或平常数据流和用于区域内警戒的突发紧急数据流. 前者对时延要求比较宽松, 但数据量大, 而后者则相反.

对于这种混合型异构 WSNs, 若仍沿用传统静态 Sink 方式(SSink)^[3]收集数据, 则不断汇集的平常数据流不仅容易导致网络拥塞, 影响紧急数据的传输(若此时突发事件出现), 而且随着网络持续运行还会造成“能量空洞”^[4]现象的发生. 为 Sink 引入移动性不仅能有效避免该问题, 还能综合多跳路由设计、移动路径规划等有目的地提升网络性能^[5-9]. 文献[5-6]在数据时延约束下, 通过规划 Sink 移动路径实现对

收稿日期: 2015-05-04; 修回日期: 2015-07-17.

基金项目: 教育部博士点基金项目(20113219110028); 江苏省自然科学基金项目(BK2012803).

作者简介: 侯贵升(1985-), 男, 博士生, 从事无线传感器网络的研究; 吴晓蓓(1958-), 女, 教授, 博士生导师, 从事无线传感器网络、智能控制等研究.

周期产生类数据的高效汇聚;文献[7]提出了一种支持 Sink 移动的可控洪泛实时路由,应用该路由可扩展上述两种算法对于突发类数据的收集;文献[8]针对节点数据采集率异构设计了一种优化的移动 Sink 访问调度策略,以避免节点缓存区溢出,并结合贪婪地理路由实现对突发消息的响应.上述几种算法可统归为移动 Sink 方式(MSink).该方式虽支持不同类数据的收集,但无法避免其间干扰,因而难以保障突发类数据的实时性.文献[9]结合 SSink 和 MSink 各自的优势,采用双 Sink 实现对事件驱动型网络中突发事件的有效响应.然而,由于其 MSink 的移动轨迹不定,难以有效支持平常数据的收集.

为此,本文基于 Sink 可控移动模式,并结合文献[9]的思想,设计了一种应用于混合型异构 WSNs 的数据收集策略,即 SSink 搭配专用移动数据收集器(MDC)^[10].SSink 固定部署在网络中心区域,接收并处理紧急数据;而 MDC 则沿着预设路径周期巡游以收集平常数据.这样,两种数据流得以分开,避免相互间干扰.该策略面临的一个主要挑战是 MDC 的移动速度限制与处理节点存储空间约束间的矛盾,即如何规划 MDC 的访问路径.为了解决该问题,本文先建立约束条件下混合型异构移动协助 WSNs 上层网数据汇聚模型,并根据最小能耗原则,为非访问节点或迁移节点设计数据迁移路径寻找方法;然后,基于此提出一种全局寻优和局部优化两阶段相结合的访问节点集搜索算法;最后,通过仿真实验验证了整个数据收集策略的有效性.

1 系统模型和问题描述

1.1 网络结构模型

考虑带有一个 MDC 的异构 WSN,如图 1 所示.适量处理节点随机均匀部署在监测区域,相互间可通过多跳方式彼此连通构成上层骨干网,大量的感知节点密布在处理节点周围.处理节点拥有较强计算、存储和通信能力,并知晓自身物理位置(通过 GPS 或定位算法^[11]),主要负责任务分发和数据聚合.感知节点装有丰富的传感器,按需采集环境数据并将其及时地传送给邻近处理节点.收到数据后,处理节点先判断其属性,若为紧急数据,则立即通过最短跳数路径上报给位于网络中心地带的 SSink;若是平常数据,则将其与本地相关数据聚合后存入缓存区以备 MDC 提取.

1.2 假设和能量模型

为了便于研究,本文作以下假设.

假设 1 处理节点能进行功率控制并知晓自身物理位置,转移平常数据时选择最小能耗路径.

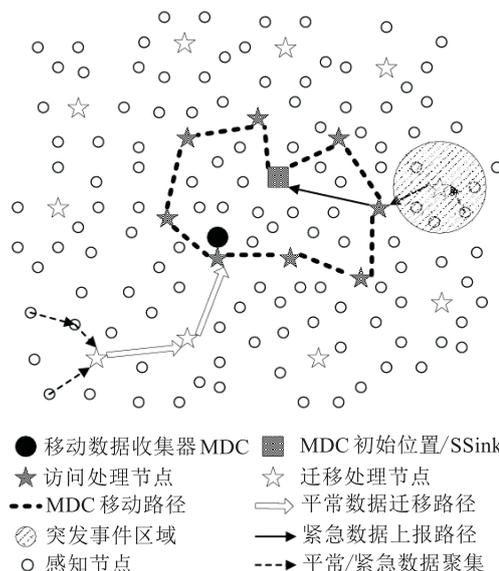


图 1 基于 SSink+MDC 的混合型异构 WSN 数据汇聚情形

假设 2 移动数据收集器 MDC 只在访问点(包括访问节点和 MDC 初始位置点)之间作匀速直线运动,且在访问点上转移数据与调整方向的时间忽略不计.

假设 3 平常数据在上层网中传输的速度远大于 MDC 的移动速度,其传输耗时可忽略.

紧急数据传输的相关问题比较简单,因此本文的研究主要集中在平常数据的汇聚上,若无特殊说明,则数据均指平常数据,而节点均指处理节点.根据典型无线通信能量消耗模型,节点发送和接收 l 比特(bits)数据的能耗 $E_t(l)$ 和 $E_r(l)$ 分别为

$$E_t(l) = l(E_{\text{elec}} + E^p) = \begin{cases} l(E_{\text{elec}} + E_{\text{fs}}d^2), & d \leq d_0; \\ l(E_{\text{elec}} + E_{\text{mp}}d^4), & d > d_0; \end{cases}$$

$$E_r(l) = lE_{\text{elec}}. \quad (1)$$

其中: E_{elec} 表示电路驱动能耗, E^p 表示路径损耗,与通信距离相关.当距离较近时,宜采用自由空间模型 $E^p = E_{\text{fs}}d^2$;超过某一门限距离 d_0 后,宜采用多径衰落模型 $E^p = E_{\text{mp}}d^4$.其中 E_{fs} 和 E_{mp} 分别为这两种模型中发送单位比特数据功率放大所需的能量.

1.3 路径优化问题描述

定义 1 (一轮工作循环) 从初始位置点出发, MDC 按预定移动路径从访问节点上提取数据后又回到初始位置点.

定义 2 (最小能耗移动路径) 在满足移动距离约束条件下使得上层网数据汇聚到 MDC 总能耗最小的 MDC 移动路径.

假设 MDC 初始位置点为 M_0 , 移动速度为 V_m , 处理节点缓存区溢出时限为 D , 那么, MDC 的移动距离上限 $L_m = V_m D$; 单轮工作循环中, 数据从上层网汇聚到 MDC 的总能耗 (MDC 能耗不计且忽略无线通信

之外的其他网络能耗)包括数据迁移能耗和数据提取能耗,前者发生在非访问节点或迁移节点向邻近访问节点转移数据时,且数值与访问节点的选取和数据迁移路径的选择相关,而后者发生在MDC从访问节点上提取数据时且其大小为定值.由于平常数据的采集比较稳定,而且在随机均匀分布下各处理节点拥有的感知节点数相差不大,再加上数据聚合的调节作用,可近似认为各处理节点单轮工作循环中向MDC转移的数据量相等(除首轮外).这样,访问节点的选取和数据迁移路径的选择直接决定了数据汇聚总能耗的大小,于是,MDC最小能耗移动路径问题或MDC移动路径优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^{|M|} 2E_{\text{elec}}h_i + E_i^p(1) + \dots + E_i^p(h_i); \\ \text{s.t.} \quad & \text{TSP}(V) \leq L_m. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: M 表示迁移节点集合, h_i 表示迁移节点 i 上的数据沿最小能耗路径迁移到邻近访问节点的总跳数, $E_i^p(k)$ 表示其中第 k ($1 \leq k \leq h_i$)跳的路径损耗, V 表示访问点集(访问节点集的位置点集合并上 M_0), $\text{TSP}(V)$ 表示MDC从 M_0 出发经过所有访问节点所在位置点后回到 M_0 的最小移动距离,即MDC环游点集 V 的旅行商问题^[12]求解.由式(2)不难看出,MDC移动路径优化的实质是:在其移动距离上限约束下,寻找优化的访问节点组合并为迁移节点设计最优的数据迁移路径.此问题属于典型的组合优化问题,难以直接求解.本文将在下面一节利用一种综合全局寻优和局部优化的启发式算法来解决该问题.

2 问题求解

2.1 数据迁移

MDC移动轨迹将上层网节点划分为访问节点和迁移节点,后者需将数据迁移到邻近的访问节点,路径为最小能耗路径,由SSink根据上层网节点位置信息计算得出.计算方法采用Dijkstra算法^[13],不过在使用该算法之前需要做一些预备工作:1)将节点间的欧氏距离根据1.2节中给出的无线通信能耗模型转化为单位比特数据的一跳能耗也即链路权值;2)设置一个虚拟源点,该点与访问节点之间的链路权值为0;3)禁止访问节点之间的链路(将其权值设为无穷大).采用Dijkstra算法计算出源点到其他所有点(上层网所有节点)的最短路径后,根据无向链路的对称性,迁移节点迁移数据的路径也就得到了.这样,在该路径上转移数据的能耗便能轻易获得,即路径权值乘以数据量.该路径寻找方法的复杂度为 $O(n^2)$ (经典Dijkstra算法),其中 n 为上层网节点数.

2.2 基于节点相对边缘度的可行解空间收缩

任一满足式(2)中约束不等式的访问点集均可称为问题的可行解,所有可行解组成的集合构成可行解空间.合理收缩该空间有利于更好地搜索满意解.由式(1)中能耗与通信距离间的关系可知:欲使数据迁移总能耗最小,MDC环游路径应尽量居中,故在MDC可移动距离有限的情况下,位于边缘的节点应首先被排除在访问节点集之外.

定义3 节点相对边缘度为

$$\text{rfd}(v) = d_{vC}/\overline{d_C}. \quad (3)$$

其中: d_{vC} 表示节点 v 到上层网节点集中心 C 的距离; $\overline{d_C}$ 表示上层网所有节点到 C 的平均距离; $\text{rfd}(v)$ 表征节点 v 在点集中的相对边缘程度,值越大,节点越靠近点集边缘,被排除的可能性越大.需要排除的节点数为

$$\begin{aligned} n_r &= \lfloor (1 - \theta/\theta_0)n \rfloor, \\ 1 &\leq \theta \leq \theta_0, \theta_0 = L_0/L_m. \end{aligned} \quad (4)$$

其中: n 表示上层网节点总数; L_0 表示全访问(MDC遍访上层网所有节点)最短环游路径的路长,通常情况下其值大于 L_m (若 $L_0 < L_m$,则 θ_0 置为1); θ 为收缩控制因子,用于控制解空间收缩规模,数值越接近1,排除的节点越多,收缩后的可行解空间越小,满意解的搜索效率越高.不过,寻优空间的过度缩小会导致目标优化的效果降低.为此,需要根据实际需要在优化效率与效果间寻找一个平衡,即寻找合适的控制参数 θ .

2.3 满意解搜索算法

设经收缩后可行解空间中用于备选的访问节点数为 n_x ,组成的节点集为 X ,其对应的最短环游路径路长为 L_x (计算时需先加入 M_0 ,下同),数据迁移总能耗为 E_x .

定义4 节点排除优先度为

$$\text{rpd}(v) = \frac{L_x - L_v}{E_v - E_x}. \quad (5)$$

其中: L_v 和 E_v 分别表示排除节点 v 后的节点集 X_v 对应的最短环游路径长度和数据迁移总能耗; $\text{rpd}(v)$ 表征排除 v 后获得的最短环游路径路长下降与增加的数据迁移能耗间的比率,数值越大,越应该被优先排除.基于节点排除优先度的满意解搜索算法描述如下.

Step 1: 初始化各相关参数,主要包括:上层网节点总数 n ,各节点和 M_0 的位置坐标,以及可行解空间收缩控制因子 θ 等参数.

Step 2: 先计算各节点的相对边缘度以及需要排除的节点数,然后按相对边缘度从大到小去除相应数

目的边缘节点, 排除后所得节点集记为 X .

Step 3: 先计算 X 对应的最短环游路径长度和数据迁移总能耗, 然后计算各节点的排除优先度并选择数值最大者予以排除, 记此步操作后所得节点集为 X_1 .

Step 4: 重复 Step 3, m 次后所得节点集为 X_m .

Step 5: 终止条件判断: 在计算节点集 X_m 中各节点的排除优先度时, 若存在节点对应的最短环游路径长度小于或等于 L_m , 则排除该节点后的节点集即为所求访问节点集; 若存在多个满足终止条件的节点, 则选择排除后对应的数据迁移总能耗最小者.

整个算法在后台服务器上完成, 复杂度与 MDC 移动距离上限 L_m 紧密相关: 当 L_m 足够大时, 全访问可行, 此时算法复杂度为 $O(\text{TSP})$, 即求解 TSP 问题的复杂度, 典型值为 $O(n^2)$; 当 L_m 较小时, MDC 被限定在初始位置周围很小的范围内, 算法复杂度与 SSink 方式下数据汇聚最小能耗路径的计算复杂度相当, 也可表示为 $O(n^2)$, 即经典 Dijkstra 算法的复杂度; 当 L_m 的数值介于上述两种情况之间时, 此时算法复杂度主要由满意解搜索算法中计算节点的排除优先度决定, 算法的复杂度可表示为 $O(mn_x^2)$, 其中: m 表示排除操作的次数, 也即搜索算法中 Step 3 的循环次数, n_x 表示节点集 X 中的节点数, 也即可行解空间收缩后用于备选的访问节点数. 算法执行后需将数据迁移路径通知给相关节点, 消息复杂度为 $O(n)$.

3 实验与分析

下面利用标准 C++ 和 Matlab 构建仿真平台, 对所提出算法进行仿真测试与比较分析. 仿真实验中, 49 个上层网节点按网格均匀随机方式分布在一块 $700\text{ m} \times 700\text{ m}$ 的方形区域中, 网格边长为 100 m ; SSink 和 M_0 都位于方形区域中心; 网络运行过程中, 每个处理节点在单轮工作循环中需要向 MDC 发送的平常数据总量为 10 kbits ; 同时, 随机选择 10 个处理节点分别产生总量为 500 bits 的紧急数据发往 SSink (与网络中的平常数据并发); MDC 移动速度固定为 2 m/s . 无线通信模型相关参数设定如下: $E_{\text{fs}} = 10\text{ pJ/bit/m}^2$, $E_{\text{mp}} = 0.0013\text{ pJ/bit/m}^4$, $E_{\text{elec}} = 50\text{ nJ/bit}$, $d_0 = 85\text{ m}$. 仿真实验中所有结果均为 20 次随机实验的平均值, 该平均值也可等效地看作多轮工作循环下某项统计数据的期望值.

3.1 可行解空间收缩控制因子 θ 值的选取

定义 5 步长为

$$\text{step}(\theta_0) = (\theta_0 - 1)/10. \quad (6)$$

注 1 定义 5 用以探索优化的 θ 值与 θ_0 间的相对关系.

θ 值的选取对于所提出算法的优化效果有着直接影响 (因为算法离线执行, 故优化效率不是第 1 考虑因素). 图 2 显示了不同 θ 和 θ_0 对单轮工作循环数据迁移总能耗的影响. 随着 θ_0 的增大, 总能耗不断增加, 这是因为 θ_0 增大, L_m 相应减小 (全访问最短路径长度不变), 从而使 MDC 能访问的最大节点数减少, 也即需要迁移数据的节点增多, 总能耗自然增加. 同时, 随着所选 θ 值增大 (步长数增加), 不同 θ_0 值对应的总能耗曲线呈现从平直斜线向勺形曲线过渡的整体趋势, 也即相对较优的 θ 值, $\text{OPT}(\theta)$ 随着 θ_0 的增加而不断向 1 方向靠近 (相对于 θ_0 而言).

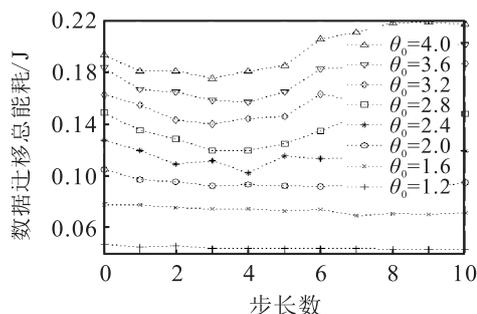


图 2 不同 θ 和 θ_0 对数据迁移总能耗的影响

图 3 更直观地反映了这一趋势 (图 3 中 $\text{OPT}(\theta)$ 的选择原则为: 所选 θ 对应的数据迁移总能耗值落在“步长数-数据迁移总能耗”曲线低值段的中间区域). 造成这种趋势的原因在于可行解空间收缩算法和满意解搜索算法在操作方式和预期效果两个方面的差异. 从调整步幅或精度上区分, 前者为粗调, 着眼全局, 采用一步到位的方式, 后者为微调, 从局部入手, 采用逐步逼近的方式; 从操作效果上看, 前者容易趋向全局最优, 而后者虽步步最优, 但最终结果却极易陷入局部最优. 随着 θ_0 增大, MDC 可移动范围收缩, 能访问的节点数减少, 而需要排除访问节点集的节点数增加, 若过早使用微调即所选 θ 值过大, 则满意解搜索过程很容易掉入局部极值陷阱, 导致优化效果不理想. 当然, 若过晚采用微调即所选 θ 值过小, 则迭代优化的次数太少, 同样达不到优化的效果.

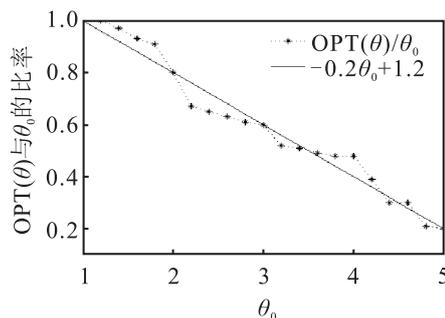


图 3 不同 θ_0 下 $\text{OPT}(\theta)$ 和 θ_0 的比率

观察图 3, 不难发现 $\text{OPT}(\theta)$ 同 θ_0 的比值随着 θ_0 的增加近似呈现阶梯状下降趋势, 且大致围绕

连接两端点的直线 $y = -0.2\theta_0 + 1.2$ 上下波动. 阶梯状下降趋势主要由两个因素造成: 微调(满意解搜索算法)使用的最佳时机(对应于 $OPT(\theta)$ 的选取)和问题本身的离散特性. 而端点连接线则是对阶梯本身的最佳近似, 通过该连接线可以得到 $OPT(\theta)$ 参考值计算方法为

$$OPT(\theta) = \begin{cases} (-0.2\theta_0 + 1.2)\theta_0, & 1 \leq \theta_0 \leq 5; \\ 1, & \theta_0 > 5. \end{cases} \quad (7)$$

当 θ_0 的值超过某一门限值后, 可行访问节点基本上集中在 M_0 周围, 而且数量相对较少, 此时可直接采用可行解空间收缩算法得到访问节点集, 即选择 θ 值为 1.

在得到 $OPT(\theta)$ 的参考值后, 再根据需要在该值周围选择合适数目的实验值, 同其一起作为候选值, 然后分别执行算法, 从中选择最优者. 虽然此处 $OPT(\theta)$ 的选择方法是在特定仿真设定 (M_0 位于区域中心, 上层网节点呈网格均匀随机分布等) 下得出, 但其思路同样适用于其他情况, 比如节点随机分布, M_0 不在区域中心等.

3.2 与其他方案比较

用于比较的指标包括能效性、负载均衡性和实时性, 前两个指标针对平常数据, 后一个指标针对紧急数据. 3 个指标的具体定义如下.

定义 6 (能效性) 单轮工作循环中平常数据通过上层网汇聚到 Sink 的总能耗的倒数.

定义 7 (负载均衡性) 单轮工作循环中上层网节点所转发平常数据量的标准差的倒数.

定义 8 (实时性) 单轮工作循环中紧急数据从最近处理节点到达 SSink 的平均端到端延迟的倒数.

表 1 SSink 相对于 SSink+MDC 的能效性

θ_0	节点数					
	25	36	49	64	81	100
4	0.22	0.16	0.11	0.09	0.07	0.06
2	0.13	0.09	0.06	0.04	0.03	0.03

表 2 SSink 相对于 SSink+MDC 的负载均衡性

θ_0	节点数					
	25	36	49	64	81	100
4	0.48	0.40	0.33	0.27	0.23	0.20
2	0.38	0.31	0.25	0.20	0.17	0.14

表 1 和表 2 分别反映了 SSink 方式^[3]相对于本文所提出方案 SSink+MDC 的能效性和负载均衡性. 由表 1 和表 2 不难看出, SSink 方式在这两个方面的性能均远低于本文所提出方案(因为 MSink 与 MDC 的移动路径相同, 故两者的能效性和负载均衡性相当), 而且节点数越多、 θ_0 越小, 即 MDC 的可移动距离越大,

这种差异越悬殊. 其原因在于移动性的引入不仅能有效减少数据汇聚的平均通信跳数, 降低汇聚总能耗, 还能在一定程度上通过网络“热点”位置的不断轮换, 从整体层面均衡节点负载, 因此获得了较好的能效性和负载均衡性, 而且这两方面的性能还随着 MDC 可移动距离的增加而不断提升. 另外, 由于移动距离限制和移动轨迹居中, SSink+MDC 在负载均衡方面相对于 SSink 的优越性对比其在能效方面的优越性幅度有所降低.

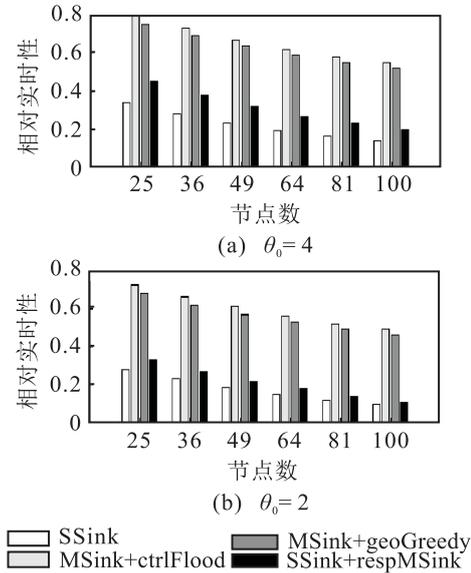


图 4 相对实时性对比

在紧急数据实时性对比方面, 用于比较的方案包括传统静态 Sink 方式^[3], 即 SSink; 辅以可控洪泛实时路由的 MSink 方式^[5-7], 即 MSink + ctrlFlood; 辅以贪婪地理路由的 MSink 方式^[8], 即 MSink + geoGreedy, 以及专门用于响应事件驱动型网络中突发事件的双 Sink 联合方式^[9], 即 SSink + respMSink. 由图 4 可知: 4 种比较方案的紧急数据实时性均不及 SSink + MDC; 而且节点数越多、 θ_0 越小, 即 MDC 的可移动距离越大, 这种差异越悬殊; 在这些方案中, MSink 方式最好, 尤其是 MSink + ctrlFlood, 双 Sink 联合方式次之, SSink 方式最差. 究其原因: SSink 方式下全网平常数据同时向一处汇聚, 极易造成 SSink 周围区域拥塞, 从而严重影响紧急数据的传输; SSink + respMSink 方式虽和本文所提出方案均采用一静一动两个 Sink (MDC 可看作一个特殊 MSink), 但前者将 MSink 用于配合 SSink 响应突发事件, 由于 MSink 的移动速度限制加上复杂的响应过程, 造成该方式的实时性仅比 SSink 好一点; 而在 MSink 方式中, 虽然全网平常数据就近汇集到各访问节点减轻了网络拥塞, 特别是 MSink 周围区域, 但平常数据的汇集仍然对紧急数据的传输有干扰, 尤其是在节点数较多或 MSink 可移动距离不大时, 不过这种干扰可通过

多路径传输加以部分抵消,这正是MSink+ctrlFlood好于MSink+geoGreedy的原因.同时,在MSink方式下,紧急数据到达MSink的平均路径长度也大于SSink+MDC中紧急数据到达SSink的平均路径长度,而且节点数越多,MSink可移动距离越大,这种差别越大.

4 结 论

本文以自然保护区的监测和管理为应用研究背景,设计了一种能满足相关应用需求的混合型异构WSNs数据收集方式,即SSink+MDC.针对其中的关键问题——MDC访问节点集选取,提出了一种基于节点相对边缘度和排除优先度的满意解启发式搜索算法.该算法有机地将整体寻优和局部优化两种手段相结合,并采用相关控制因子 θ 来平衡优化效率和效果以满足不同应用要求,随后又借助仿真实验进一步探索了基于优化效果的 θ 值选取方法.最后,通过与SSink、MSink等现有方案在能效性、负载均衡性以及实时性3个方面的对比,验证了SSink+MDC的有效性和优异性.未来可能的研究主要包括两个方向:实验平台或实际系统上的进一步测试以及更多、更严格约束条件下的MDC移动路径设计.

参考文献(References)

- [1] 呼延俊奇,肖静,于博威,等.我国自然保护区功能分区研究进展[J].生态学报,2014,34(22):6391-6396.
(Huyan J Q, Xiao J, Yu B W, et al. Research progress in function zoning of nature reserves in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6391-6396.)
- [2] Liu Y H. GreenOrbs: A long-term kilo-scale wireless sensor network system in the forest[EB/OL]. [2015-4-12]. <http://www.greenorbs.org/all/greenorbs.htm>.
- [3] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [4] 刘安丰,任炬,徐娟,等.异构传感器网络能量空洞分析与避免研究[J].软件学报,2012,23(9):2438-2448.
(Liu A F, Ren J, Xu J, et al. Analysis and avoidance of energy hole problem in heterogeneous wireless sensor networks[J]. J of Software, 2012, 23(9): 2438-2448.)
- [5] 卢先领,王莹莹.时延受限的移动Sink数据收集算法[J].通信学报,2014,35(10):107-116.
(Lu X L, Wang Y Y. Data collection algorithm for mobile sink in delay-constrained network[J]. J on Communications, 2014, 35(10): 107-116.)
- [6] Salarian H, Chin K W, Naghdy F. An energy-efficient mobile-sink path selection strategy for wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2407-2419.
- [7] Li Z J, Li M, Wang J L, et al. Ubiquitous data collection for mobile users in wireless sensor networks[C]. Proc of the 30th IEEE Int Conf on Computer Communications. Shanghai, 2011: 2246-2254.
- [8] Gu Y Y, Bozdog D, Ekici E. Mobile element based differentiated message delivery in wireless sensor networks[C]. Proc of the 7th IEEE Int Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Buffalo, 2006: 83-92.
- [9] Chen J H, Salim M B, Matsumoto M. Modeling the energy performance of event-driven wireless sensor network by using static sink and mobile sink[J]. Sensors, 2010, 10(12): 10876-10895.
- [10] 张希伟,戴海鹏,徐力杰,等.无线传感器网络中移动协助的数据收集策略[J].软件学报,2013,24(2):198-214.
(Zhang X W, Dai H P, Xu L J, et al. Mobility-assisted data gathering strategies in WSNs[J]. J of Software, 2013, 24(2): 198-214.)
- [11] 冯秀芳,吕淑芳.基于RSSI和分步粒子群算法的无线传感器网络定位算法[J].控制与决策,2014,29(11):1966-1972.
(Feng X F, Lü S F. Wireless sensor networks locating algorithm based on RSSI and split-step particle swarm optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 1966-1972.)
- [12] 饶卫振,金淳,陆林涛.考虑边位置信息的求解ETSP问题改进贪婪算法[J].计算机学报,2013,36(4):836-850.
(Rao W Z, Jin C, Lu L T. An improved greedy algorithm with information of edges' location for solving the euclidean traveling salesman problem[J]. Chinese J of Computers, 2013, 36(4): 836-850.)
- [13] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numberische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.

(责任编辑:滕蓉)