doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.11.025

无线传感网的移动与静态 sink 相结合的节能策略

林德钰,王 泉,刘伎昭

(西安电子科技大学 计算机学院,西安 710071)

摘 要:针对无线传感器网络 WSNs(wireless sensor networks)存在的"sink 邻居问题",提出移动与静态 sink 相结合的节能策略(ESCMS).该策略使静态 sink 节点位于检测区域的中心,移动 sink 位于距离静态 sink 节点一定距离处做快速移动,到达固定站点后停留并采集数据. 区域外围节点将感知的数据发送给移动 sink,而区域中心处的节点将感知的数据发送给静态 sink,整个监控区域大部分数据由于采用单跳传输方式从而减小节点的能耗. 相比于其他的只使用移动 sink 策略,ESCMS 由于静态 sink 节点的存在可以减小传输距离,从而延长网络生命期并提高了数据吞吐量. 在理论分析的基础上证明了 ESCMS 可以有效地使得网络生命期延长至6倍多. 设计并实施了一系列仿真实验,结果表明:使用 ESCMS 策略与使用静态 sink 相比,可以将 网络生命期延长至6倍,与仅采用移动 sink 的 GMRE 策略相比,可以提升 50%.

关键词:无线传感器网络;sink 邻居问题;网络生命期;移动 sink;节能策略

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2016)11-0162-07

Energy-saving strategy by combining mobile and static sink schemes for wireless sensor networks

LIN Deyu, WANG Quan, LIU Jizhao

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An Energy-saving Strategy by Combining Mobile and Static (ESCMS) sink scheme is proposed focusing on the well-known issue "Sink's Neighbor Problem" existing in Wireless Sensor Networks. The static sink locates at the center of the monitor area, while the mobile sink does fast circle motion centering on the static one with a certain radius and sojourns in the fixed stations to receive packets from its adjacent sensor nodes. The nodes deployed at the edge of the monitor area transmit their sensed data to the mobile sink, while the ones lying in the center send their data to the static sink. Thus the energy consumption is cut down because the data is mostly transmitted via one-hop fashion. Meanwhile, with the help of the static sink, the transmission distance would be reduced compared with other strategies with only mobile sink adopted, thus the lifetime of network is extended and the throughput is increased. ESCMS is proved to be a higher energy-efficient scheme which increases the network lifetime more than sixfold based on theoretical analyses. Extensive simulation experiments are conducted and the comparisons are made. The results show that the lifetime of network is extended approximately to be 6 times as long as that of static sink strategy. Besides, it is prolonged by 50% when being compared with that of a mobile-sinkused-only scheme GMRE.

Keywords: wireless sensor networks; Sink' neighbor problem; network lifespan; mobile sink; energy-efficient strategy

无线传感器网络WSNs(wireless sensor networks)是由大量具有感知、处理以及路由功能的节点构成的网络系统^[1].尽管与传统网络节点相比

收稿日期: 2015-09-21

而言,传感器节点的处理能力、存储容量受到限制, 但是它所具有的小体积、低成本使其应用范围相当 广泛^[2].具体来说,传感器可以以密集铺设方式组 成网络系统用于环境监测、军事监测、医疗护理、濒 危物种的跟踪以及灾后安全救援等^[1-3].大多数的 传感器节点采用电池供能,并且在网络部署完毕之 后一般不可能或难以给节点再充电或者补充能 量^[4-6].而当网络中存在节点能量耗尽时,将会造成

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCXSF-01); 国家自然科学基金(6157238)
 作者简介:林德钰(1988—),男,博士研究生;

王 泉(1970—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 王 泉, qwang@ xidian.edu.cn

网络的分区或隔离,监测数据无法传输至 sink 节点,这对于以数据为中心的 WSNs 意味着网络生命的终结.因此,如何减少节点的能量消耗对于传感器网络而言至关重要.

一般而言,传感器节点的能耗主要在于数据感 知、数据处理以及数据通信等方面,其中通信模块所 消耗的能量是最主要的[4]. 此外,由于传感器网络 数据多采用多跳传输,因而会使得 sink 周围节点能 量负载明显大于其他节点,这就造成了能量不均衡 问题,即"热点问题"^[2,7-8]或"sink 邻居问题"^[5-7]. 因此,节约通信能耗以及尽可能使各个节点能耗均 匀是延长网络生命期的主要方法.近年来,围绕着 节约能耗以及能量均衡问题出现了一系列研究成 果^[2-15].为缓解"sink 邻居问题",可以利用 WSN 中 的节点的移动性[2-10].利用移动代理[12-14]]或令移 动 sink 节点^[3-10]周期性地沿着某一确定的或随机 轨迹运动.这样,利用移动代理或 sink 节点位置的 变换来实现能量均衡. 文献 [13] 首次提出采用移动 代理将多跳传输变为单跳传输.这种方法虽然可以 有效地减少能量的消耗,但这是以增加时延为代价 的,显然对于实时性应用不太合适. 文献 [5-6.8. 11]将移动 sink 问题抽象成线性规划问题,以每个 节点的初始能量以及流量保护作为限制条件,谋求 网络生命期最大化. 文献 [12] 则是以最小化网络的 最大能量消耗,并且也假设 sink 在固定的站点停 留,然后以节点初始能量以及逗留时间等作为限制 条件. 这种思路有个不足, 在 sink 到达每一站停留 时间的长短要考虑整个网络拓扑,因而计算较为复 杂:同时 sink 节点每次逗留都以泛洪的方式将自身 的位置信息通知各个节点,无形之中也增加了节点 的能量消耗.

本文提出静态 sink 与移动 sink 相结合的策略 ESCMS,即静态 sink 位于网络中心,收集监控中心 位置的数据,移动 sink 围绕静态 sink 节点一定半径 做快速运动,并且在固定位置停留,收集一定范围内 节点的数据.由于移动 sink 运动速度快,以及静态 sink 节点的存在,可减少单纯采用动态 sink 所带来 的网络时延,从而增加了 sink 节点的吞吐量.同时, 也能避免单纯使用静态 sink 所带来的"热点问题". 相比于文献[4,10,12]采用的多移动 sink 节能策 略,本文所采用的静态与移动 sink 相结合的策略 (ESCMS)可以减少 sink 移动控制的复杂性.

1 能耗模型及相关假设

1.1 能耗模型

本文采用文献[2,4-5,14]所采用的一阶无线

电模型来描述传感器节点的传输功耗:

$$\begin{split} e_{\rm rx} &= E_{\rm elec} \;, \\ e_{\rm tx} &= E_{\rm elec} \; + \; \varepsilon_{\rm amp} d^{\alpha}. \end{split}$$

式中: e_{xx} 和 e_{tx} 分别表示节点接收、发送单位 bit 数据所消耗的能量, E_{elec} 表示发送与接收电路发送或接收单位 bit 数据所消耗的能量, e_{amp} 表示放大电路能耗, d 表示传输距离, α 代表衰减系数. 一般而言, α 取值可在 2~4 之间,本文控制节点传输半径不大于 87 m^[9], 使其为 2.

1.2 相关假设

1)所有传感器节点均静止,并且具有相同的初 始能量,并将初始能量记为 *E*_{initial}.

2) 传感器节点采用固定的传输半径 *R*,且所有
 传感器节点均匀独立地分布在半径为 *l* = 3*R*(0 <
 R ≤ 87) 的圆形区域. 假设节点密度为ρ,网络拓扑
 如图 1 所示.

3)每个节点以相同的速率产生数据,并且每个 节点既能作为数据的源节点又能作为数据的中继 节点.

4) sink 节点与普通节点相比具有无限数据处理 能力、存储容量,以及具有无限制的能量.

5) sink 节点的移动速度 v_{M-sink} ,并且节点数据 产生速度 μ 与发送速度 R_{t} 满足一定条件时, sink 节 点的移动给数据收集带来的影响可以忽略不计.

6) sink 节点移动带来的路由重建的能耗忽略 不计.

7)所有传感器节点的结合记为 N, 对于任意的 节点 $i,j \in N$, 节点之间的距离记为 d(i,j).

2 静态与动态 sink 相结合的节能策略

2.1 数学模型

引理 采用静态与动态 sink 相结合策略,与只 采用静态 sink 相比,网络生命期将延长至6倍.

证明 先讨论静态 sink 策略时, sink 节点周围 的节点的平均能耗. 考虑图 2 所示的情形, 根据 1.1 节的假设, 在以 sink 为圆心, R 为半径的圆内所有 节点均可以经过一跳将数据发送至 sink. 将这些节 点的集合记为 N_{sink} , $N_{\text{sink}} = \{i \mid d(i, \sin k) \leq R, i \in N\}$. 任意节点 $i \in N_{\text{sink}}$ 在发送自己产生的数据的同 时也将接受并转发来自于外层区域的节点产生的数据 据. 并且由于节点均以 R 为传输距离, 所以只接收 距自身距离为 R 的区域的节点发送的数据. 如图 1 所示, 任选一小区域 A_1 距离 sink 的距离为 r(0 < r < R), 且区域 A_2 和 A_3 以及 A_2 到 A_1 的距离均为 R. 显然 A_1 属于"热点区域", 所以区域 A_1 中的节点记 必须转发来自区域 A_2 , A_3 的数据. 由于在静态 sink 且采用多跳路由的情况下, N_{sink} 中的节点承受的能量压力最大,其中的节点能量最先消耗殆尽.为此可以 N_{sink} 中节点的生命期来表示网络生命期.为了简化处理,假设节点单位时间内的数据为1,并且数据发送能耗为 d²,以下分析区域 A₁ 中节点的接收以及发送总能耗 E_{r-A1}、E_{t-A1}.

$$\begin{split} E_{r-A_1} &= E_{\text{elec}} \left[(r+R) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r + (r+2R) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r \right], \\ E_{t-A_1} &= (E_{\text{elec}} + d^2) \left[r \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r + (r+R) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r + (r+2R) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r \right]. \end{split}$$

故集合 $N_{\text{Sink}} = \{i \mid d(i, \text{Sink}) \leq R, i \in N\}$ 的平均能 耗 $\overline{E}_{N_{\text{Sink}}}$ 为

$$\begin{split} \bar{E}_{N_{\text{Sink}}} &= \frac{\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{R} (E_{r-A_{1}} + E_{t-A_{1}}) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r}{\rho \iint r \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r} = \\ \frac{\rho \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{R} E_{\text{elec}}(5r + 6R) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r + r^{2}(3r + 3R) \, \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r}{\rho \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{R} r \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r} = \\ 17E_{\text{elec}} + \frac{7}{2}R^{2}. \end{split}$$

因此,网络生命期为

$$T_{\text{network}} = \frac{E_{\text{initial}}}{\bar{E}_{N_{\text{Sink}}}} = \frac{E_{\text{initial}}}{17E_{\text{elec}} + \frac{7}{2}R^2}.$$
 (1)



图 1 只采用静态 sink 的网络拓扑图

Fig.1 The network topology with only static sink included

在采用静态 sink(S-sink)与动态 sink(M-sink) 结合的策略 ESCMS 如图 3 所示,S-sink 位于网络拓 扑的中心处,M-sink 位于距离圆心 2R 处. 在第 1.1 节的假设前提下,由于 M-sink 节点以一定速度移动 并且传感器节点采集数据速率与传输速率满足一定 条件时,sink 节点移动给数据传输的影响可以忽略, 所以每当 sink 节点到达停靠点时,只有周围的节点 向其发送数据.具体来说,图 2 中灰色圆代表距离 sink 节点的距离为 R,所以其中的节点可以经过一 跳将数据转发至 sink, 而斜线部分节点的数据则须 经过两跳转发.其中灰色密斜线部分的节点将数据 发至移动 sink, 而黑色稀疏斜线部分的感知数据发 往静态 sink. 因斜线区域部分相对来说小得多, 所以 大部分节点的数据传输都是单跳方式, 从而节省了 能量.为了方便起见, 将灰色密斜线部分的面积记 为 S_{M-sink}, 黑色稀疏斜线部分记为 S_{S-sink}. 由图 2 可知

$$S_{\text{S-sink}} = 6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} (2R)^2 - \pi R^2 - 6 \cdot \frac{1}{3} \pi R^2 = 0.972R^2,$$

$$S_{\text{M-sink}} = \frac{1}{6} [\pi (3R)^2 - R^2] - \pi R^2 - \frac{1}{6} S_{\text{S-sink}} = 0.885R^2.$$



图 2 采用动态 sink 的网络拓扑图

Fig.2 The network topology with mobile sink

由于节点均匀分布,静态 sink 的能耗负载比动态 sink 高,所以这里用其周围节点生命期来衡量网络生命期.此时静态 sink 通信半径为R以内的节点集合记为 $N_{\text{M-sink}}$,且 $N_{\text{M-sink}} = \{i \mid d(i, \text{M} - \text{Sink}) \leq R, i \in N\}$.所以 $N_{\text{M-sink}}$ 接收能耗 $E_{r-M-\text{sink}}$ 为

$$E_{\rm r-M-sink} = \rho E_{\rm elec} \left[6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} ({}^{2}R) 2 - \pi R^{2} - 6 \cdot \frac{\pi R^{2}}{3} \right] = 0.972 \rho R^{2} E_{\rm elec} ,$$

发送能耗 E_{t-M-sink} 为

$$E_{t-M-sink} = \rho \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{R} r^{2} r dr d\theta + \left(\frac{R}{2}\right)^{2} \left[6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} (2R)^{2} - 6 \cdot \frac{\pi}{3} R^{2} - \pi R^{2}\right] \rho.$$

集合
$$N_{\text{M-sink}}$$
 的平均能耗 $E_{\text{N-M-sink}}$ 为
 $\overline{E}_{\text{N-M-sink}} = \frac{E_{\text{r-M-sink}} + E_{\text{t-M-sink}}}{\rho \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{R} r dr d\theta} = 0.077 E_{\text{elec}} + 0.58 R^{2},$

此时网络生命期为

$$T_{\rm M-Network} = \frac{E_{\rm initial}}{\bar{E}_{\rm N-M-sink}} = \frac{E_{\rm initial}}{0.077E_{\rm elec}} + 0.58R^2.$$
(2)

显然,由式(1)和式(2)可得 T_{M-Network} = 6.03T_{Network},证毕.

2.2 移动与静态 sink 相结合的节能策略 ESCMS

移动与静态 sink 相结合的策略如下:使用静态 sink(记为 S-sink)与移动 sink(记为 M-sink),其中 S-sink 位于监测区域中心处并且保持静止.距离 Ssink 节点距离小于 R 以及处于第二个圆环内到 Msink 节点距离小于 R 将数据发往 S-sink.同时 Msink 位于距离 S-sink 节点 2R 处,如图 3 所示.此 后,M-sink 节点按顺时针方向沿着图 3 示的六边形 运动,并每次到达一个顶点处则停留一段时间,这段 时间内,距离 M-sink 节点小于 R 或该距离大于 R 且处于第三个圆环内的节点均与 M-sink 进行通信. M-sink 的逗留时间确定方法如下:

假设 M-sink 节点的移动速度为 v_{M-sink},则 Msink 节点运动的周期 T_{M-Sink} 表示为

$$T_{\rm M-sink} = \frac{6 \cdot 2R}{v_{\rm M-sink}}.$$

假设传感器节点的数据产生数率为 μ ,则这段 时间内传感器节点收集的数据 D_{M-sink} 为

$$D_{\mathrm{M-sink}} = \frac{\mu \cdot 6 \cdot 2R}{v_{\mathrm{M-sink}}}.$$

假设 M-sink 在每个站点停留的时间为 T,并且 假设节点用于缓存数据的内存容量为 S,则应该满 足下列关系:

$$6 \cdot T \cdot \mu + \frac{\mu \cdot 6 \cdot 2R}{v_{\text{M-sink}}} \le S.$$
(3)

另外,假设节点以速率 R_i 发送数据至 M-sink, 根据数据量守恒可知

$$\frac{12 \cdot R \cdot \mu}{v_{\mathrm{M-sink}}} + 6 \cdot T \cdot \mu = \frac{T \cdot R_{\mathrm{t}}}{0.885 R^2 \rho},$$

由此可得

$$T = \frac{12 \cdot R \cdot \mu}{v_{\text{M-sink}} (\frac{R_{\text{t}}}{0.885 R^2 \rho} - 6 \cdot \mu)}.$$
 (4)

由式(3)和式(4)可得

$$v_{\text{M-sink}} \ge \frac{12 \cdot \mu \cdot R}{S} + \frac{72 \cdot \mu^2 \cdot R}{\left(\frac{R_{\text{t}}}{0.885R^2\rho} - 6 \cdot \mu\right) \cdot S}.$$
(5)

由(5)可以获得 M-sink 的最小移动速度.

若 M-sink 节点停留时间达到 T 之后,它将广播 一条问询消息,接收到问询消息的节点若有数据尚 未发送,则作出答复. 否则,简单将问询消息丢弃. M-sink在没收到答复消息时则准备移动到下一站 点. 图 3 显示M-sink的位置及其通信范围,黑色虚 线圆表示 M-sink 移动过程中的几个不同位置处的 通信范围. M-sink 的移动轨迹为灰色虚线六边形, 并且停靠站点为六边形的顶点. 此外, M-sink 节点 移动过程中不接收数据.

最后,给出 M-sink 移动时间对网络性能的影响.显然,当满足传感器节点在 M-sink 节点移动期间采集的数据量远小于逗留期间收集的数据量时, M-sink 移动的时间带来的影响可以忽略不计,则

$$6T\mu \gg \frac{12\mu R}{v_{\rm M-sink}}.$$
 (6)

根据式(4)和式(6)可得

$$12\mu \gg \frac{R_{\rm t}}{0.885R^2\rho}.$$
 (7)

同时

 $R_{\rm t} > 6 \cdot \mu \cdot 0.885 R^2 \cdot \rho. \tag{8}$

即当节点获取速率和发送速率满足式(7)和式(8) 所示条件时, M-sink 节点移动带来的影响可以 忽略.



图 3 移动与动态 sink 相结合的节能策略(ESCMS)

Fig.3 Energy-saving strategy by combining mobile and static sink scheme

3 实验及分析

3.1 性能参数

采用 NS2 进行仿真实验,100 个传感器节点独立 均匀地分布在为半径 l = 100 m 的区域内. 节点的初始 能量 $E_{initial}$ 为 2 J,接收或者发送 1 bit 数据节点电路所 消耗的能量为 50 nJ, ε_{amp} 取值为 13 pJ/bit/m². v_{M-sink} 取值为 40 m/s,传感器节点的数据采集速率 μ 以及 发送速率 R_{t} 取值分别为 80 和1400 packet/s.

为了评价 ESCMS 的节能效率,这里定义如下几 组性能参数.

网络生命期:传感器网络是以数据为中心的,因此网络生命期对于传感器网络至关重要.对于不同应用场景,网络生命期也不一样.为了使本算法具有普适价值,本文提供如下几个参数作为网络生命

期的标准.

首节点能量耗尽时间:表示网络中第一个节点 能量耗尽的时间,记为 the time when First Node Dies (FND).

半数节点能量耗尽时间:指网络中有一半节点 能量耗尽的时间,记为 the time when Half of the Nodes Die (HND).

所有节点能量耗尽时间:监测区域中的所有传 感器节点能量耗尽的时间,记为 the time when the Last Node Dies (LND).显然,当所有节点能量耗尽, WSNs 的数据采集功能随之丧失,这必然意味网络 生命期的终结.

存活节点数量曲线:WSN 中存活节点数量随时间的变化情况,这能直观的反映网络的生命期.比较节点数量曲线可以直观地比较在实验过程中传感器节点的能量消耗情况.

此外,因为 WSNs 的中心任务就是进行数据采 集,定义了如下指标来反映 ESCMS 的性能.

sink 节点吞吐量:sink 从监测区域接收的数据 量,记为 the Throughput of the Sink (TS). WSNs 的应 用主要建立在 sink 接收的数据之上,因而比较吞吐 量具有实际意义.另外,为了较好地反映能量效率, 提出一个相对于能量耗散的吞吐量的概念,即 the Throughput of the sink Against Energy consumed (TAE). TAE 反映了在相同的能耗下,sink 节点获 得的数据,显然该指标可以很好地评价能量效率.

最后将仿真结果与静态 sink 策略(记为S-sink)、 移动 sink 策略进相比较. 文献[5]显示该策略可以 将网络生命期延长至4倍. 所以这里的移动 sink 策 略采用文献[5]中的 GMRE 策略(记为 GMRE).

3.2 实验结果分析

图 4 给出了分别在静态 sink、动态 sink 以及 ESCMS 策略下的存活节点数量随时间的变化趋势.其 中静态采用多跳传输,而移动 sink 场景采用文献[5]中 所采用的 GMRE 策略. 三种策略相应的曲线分别如 图 4 所示.为了简单起见,三种策略在图中分别记 为 S-sink、GMRE 以及 ESCMS. 从图 4 可以看出,三 者的 FND 分别为 385、1530 以及 2250. ESCMS 的 FND 分别是 S-sink 的 5.84 倍,是 GMRE 的 1.47 倍. ESCMS 的 HND 是 S-sink、GMRE 的5.66、2.08 倍, LND 比关系分别是 5.74 以及 1.39. 即使用 ESCMS 与 S-sink 相比可将网络生命期延长约 6 倍,以及比 移动 sink 提升约 50%. 这与第 2 节的讨论基本吻 合,同时注意到由于移动 sink 所带来的路由重建开 销,而这部分开销理论证明中并未予以考虑,所以实 验结果值比理论值偏低.图 5 更为直观地体现了三 种策略下,在使用 3.1 节所定义的生命期定义的对 比图.显然,ESCMS 的能量效率很显著.



Fig. 4 The variation of the number of nodes alive with simulation time



Fig.5 The comparison of network lifetime

图 6 显示了三种情形网络能耗随时间的变化曲线. 网络初始总能量为 100 * 2 J,初始状态下,三者的能耗均为 0. 随着时间推移,S-sink 的网络能量耗散速率最快,这从其曲线斜率最大可以看出. 同时GMRE 居中,而 ESCMS 最低. 这是因为,S-sink 策略下"sink 邻居问题"无法解决,从而导致能耗最快,同时,GMRE 虽然在移动 sink 的过程中使"sink 邻居问题"得以缓解,但因为多跳传输,因而能耗较快. 而本文的 ESCMS 策略采用静态 sink 与移动 sink 相结合,有效地缓解了"sink 邻居问题",同时,由于多采用单跳通信,所以其能量消耗速率最低,从而延长了网络生命期.

图 7 显示三种策略下 sink 节点接受的数据总 量变化曲线. 从图 7 可以看出:尽管 S-sink 的曲线 较短(由于其网络生命期最短),然而相同时间内其 数据量高于 GMRE 以及 ESCMS 策略,这是由于后 两者移动 sink,使得路由重建,同时数据暂缓发送所 导致. 相对来说,ESCMS 所带来的影响最大,因为传 感节点均等 sink 移动到距离在一定区域才将缓存 的数据发送. 但是,由于其生命期的有效延长,最终 所能接受的数据总量是最高的. 实验数据显示, ESCMS 的数据总量是 S-sink 的 4.63 倍,并且是 GMRE 的 1.33 倍. 即 ESCMS 相对于前两者可以分 别使数据收集量提高 363%以及 33%. 图 8 显示了 三者的 sink 节点相对于能量耗散百分比的吞吐量 (TAE). 这个指标可以很好地反映出三种策略的能 量效能,显然,和另外两者相比,ESCMS 在消耗相同 能量时,吞吐量远大得多,这说明 ESCMS 具有较高 的能量效率.



Fig.6 The energy consumption of the network



图 7 sink 节点的数据接收量

Fig.7 The amount of data received by the sink

图 9 显示了在网络半径时, 三者的 FND 对比 图.显然, S-sink 的 FND 值随着网络半径的增大而 减小, 这是由于随着网络半径增大, 跳数增多而加剧 了"sink 邻居问题".而 GMRE 较为稳定, 同时 ESCMS 在半径小于 250 之前, 一直比较稳定, 但在 250 之后 FND 下降, 但一直高于前两者.这是由于 随着半径的增大, 有些节点必须采用多跳传输, 从而 能耗较快.这表明; ESCMS 适用于半径小于 250 的 网络拓扑,同时整体上,采用 ESCMS 的能效高于仅 仅采用静态 sink 或动态 sink 的策略.





图 9 网络生命期与网络半径的关系

Fig.9 The relationship between the network lifetime and the network radius

4 结 论

静态和移动 sink 相结合的节能策略 ESCMS,可 以有效节约能量并将 WSN 的生命期延长至6倍.仿 真证实,ESCMS 与静态 sink 相比,可将生命期延长 至 5.84倍;同时,与移动 sink 策略 GMRE 相比,生命 期可以提升 50%.另外,sink 接收的数据总量方面, ESCMS 是静态 sink 的 4.63 倍以及 GMRE 的1.33 倍.

本文给出的 ESCMS 策略是在给定网络拓扑下, M-sink 节点按照固定的移动路径的一种减少能量 消耗不均从而达到延长网络生命期目的的策略. 这 种方法可以进一步推广到一般拓扑或者更大的检测 环境中,只要控制 M-sink 的移动速率,或者增设 M-sink节点个数,同时,使得控制内层和外围 Msink 节点的移动速度即可保持本策略的高能效 特性.

参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, SU Weilin, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. A survey on sensor networks [J]. Communications Magazine, IEEE, 2002, 40(8): 102-114. DOI: 10.1109/mcom.2002.1024422.
- [2] RAHEINZALMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]// Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. Los Alamitos: IEEE Press, 2000: 8020-8030.
- BASAGNI S, CAROSI A, MELACHRIOUDIS E, et al. Controlled sink mobility for prolonging wireless sensor networks lifetime [J].
 Wireless Networks, 2007, 14 (6): 831-858. DOI: 10.1007/ s11276-007-0017-x.
- [4] ZOLTAN V, ROLLAND V, ATTILA V. Deploying multiple sinks in multi-hop wireless sensor networks [C]// IEEE International Conference on Pervasive Services. Piscataway: IEEE Press, 2007: 55-63.
- [5] BASAGNI S, CAROSI S, MELACHRINOUDIS E, et al. A new MILP formulation and distributed protocols for wireless sensor networks lifetime maximization [C]// IEEE International Conference on Communications. Istanbul; IEEE Press, 2006; 3517–3524.
- [6] LIANG Weifa, LUO Jun, XU Xu. Prolonging network lifetime via a controlled mobile sink in wireless sensor networks [C]// GLOBE-COM-IEEE Global Telecommunications Conference. Miami: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [7] WANG Wei, VIKRAM S, CHUA K C. Extending the lifetime of wireless sensor networks through mobile relays [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(5): 1108-1120. DOI: 10.

1109/tnet.2007.906663.

- [8] YUN Yongsang, XIA Ye. Maximizing the lifetime of wireless sensor networks with mobile sink in delay-tolerant applications [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(9): 1308-1318. DOI: 10.1109/tmc.2010.76.
- [9] RAHIM S, RAHIM H, KHAN R D, et al. Circular joint sink mobility scheme for wireless sensor networks [C]// 2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA). Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2015: 311-319.
- [10] CHENG Long, CHEN Canfeng, MA Jian. Selection scheme of mobile sinks in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 12-18.
- [11] SHI Yi, HOU Yongtian. Theoretical results on base station movement problem for sensor network [C]// The IEEE INFOCOM 2008 Proceedings. Piscataway,: IEEE Press, 2008: 376-384.
- [12] GANDHAM S R, DAWANDE M, PRAHASH R, et al. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations [C]//Global Telecommunications Conferences, 2003. Globecom' 03. IEEE. Piscataway: IEEE Computer Society, 2003: 377-381.
- [13] SHAH R C, ROY S, JAIN S, et al. Data mules: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks [C]// Ad Hoc Networks. Holland: Elsevier 2003: 215-233.
- [14] MAMALIS B G. Prolonging network lifetime in wireless sensor networks with path-constrained mobile sink[J]. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 2014, 5 (10): 82-91.

(编辑 王小唯 苗秀芝)

(上接第161页)

- [12] AGUIRRE J. Nonlinearity, liquefaction and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken-Nanbu earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(5): 1244-1258.
- [13]孙 锐,袁晓铭,刘晓健.动剪切模量比与剪切波速对地震动 影响及等量关系研究[J].岩土工程学报,2009,31(8): 1267-1274.

SUN Rui, YUAN Xiaoming, LIU Xiaojian. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1267–1274.

- [14] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses [J]. American Society of Civil Engineering, 1982, 108(7): 935-954.
- [15]GB/SL237—1999 土工实验规程[S].北京:中华水利水电出版 社, 1999.

GB/SL237-1999. Specification of soiltest[S]. Beijing: China Wa-

ter & Power Press, 1999.

[16]梁冯珍,关 静,等.统计学[M].北京:机械工业出版社, 2014.

LIANG Fengzhen, GUAN Jing, et al. Statistics for Engineers and the Sciences[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.

[17]刘晓健. 土动力性能对地震动影响研究及测试标准初探[D].
 哈尔滨,中国地震局工程力学研究所,2007.
 LIU Xiaojian. Effect of soil dynamic feature on ground motion and

LIU Alaojian. Effect of soil dynamic feature on ground motion and its testing standard [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2007.

[18]孙 静,袁晓铭,陶夏新.共振柱试验机试验误差分析[J].哈 尔滨工业大学学报,2007,39(4):510-513.
SUN Jing, YUAN Xiaoming, TAO Xiaxin. Error analysis of resonant column device tests[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007,39(4):510-513.

```
(编辑 王小唯 苗秀芝)
```