

基于移动 sink 的无线传感器网络海星路由协议^①

徐 墨

重庆水利电力职业技术学院 普天大数据产业学院, 重庆 永川 402160

摘要: 具有移动 sink 的无线传感器网络(WSN)比静态 sink 具有更长的网络寿命和更好的数据传输性能, 但是因为其移动性导致能耗开销巨大, 针对这个问题, 提出一种基于移动 sink 的无线传感器网络海星路由协议, 灵感来自海星的水脉系统. 该路由协议构建了一个带有中心环通道的路由骨干网, 并且网络上的径向通道很少. 给定网络能动态确定径向通道的数量和环通道的半径, 以便减少从源到 sink 的通信等待时间. 实验结果表明, 该文海星路由协议能够有效地均衡节点的能量消耗, 在数据传输延迟和网络生命周期方面, 性能评估的结果优于现有其他协议.

关 键 词: 移动 sink; 无线传感器网络; 海星路由协议; 路由骨干网

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)05-0121-06

静态 sink 无线传感器网络(WSN)中的路由协议^[1-2]已经在包括端到端和逐跳单路径路由中被广泛研究, 如跨层协议^[3]、多路径或地理路由协议^[4]等. 然而, 这些协议由于附近节点电池快速耗尽而遭受网络生命周期缩短影响到 sink, 导致源传感器节点和 sink 之间的通信中断^[5]. 针对这个问题, 移动 sink 传感器网络路由协议的出现缓解了静态 sink 无线传感器网络的问题^[6-7]. 移动 sink 传感器网络的路由协议可以实现整个网络的负载均衡和均匀的能量消耗^[8], 提高节点定位精度的同时延长网络的生存时间.

移动 sink 对于许多 WSN 应用研究也越来越多, 包括农业领域、环境监测、森林栖息地监测、战场监测和家庭自动化等. 然而, sink 移动性引发了许多研究挑战: 定位 sink 位置并建立 source-sink 路由路径等. 具有 sink 移动性的 WSN 现有路由协议可以在很大程度上分为两类: 存储转发和直接转发方法. 在存储转发方法中, 数据被发送到中间站, 被存储并在稍后转发到 sink^[9-10]; 直接转发方法中, 数据不经过中间站, 直接将数据转发到 sink^[11]. 文献[12]提出基于移动 sink 的自适应免疫节能聚类协议, 用来提高无线传感器网络的生命周期和稳定期, 该协议使用自适应免疫算法来引导基于移动 sink 的最小化通信和开销控制分组中的总耗散能量.

此外, 自适应免疫算法用于找到最佳簇头数, 以改善网络的寿命和稳定期. 文献[13]提出一种加权交会规划的启发式方法, 其中每个传感器节点被分配一个权重, 该权重对应于其与该巡回跳跃距离以及它转发到最近集合点数据分组的数量, 该协议使移动 sink 能够在给定期限内检索所有感测数据, 同时节省传感器节点的能量消耗. 文献[14]提出一种混合无线传感器网络中移动 sink 调度的能量均衡启发式算法, 首先将网络区域划分为具有相同地理大小的网格单元, 这些网格单元通过受 k 维树算法启发的算法分配给集群, 使得每个集群的能量消耗在收集数据时近似平衡. 文献[15]提出一种适用于延迟约束应用的、高效的、基于虚拟网格的分层路由方法, 该路由协议通过考虑传感器节点的跳数和数据生成速率来明智地选择移动 sink 的路径, 能够降低整体能量消耗.

① 收稿日期: 2018-11-07

基金项目: 重庆市高等职业教育教育研究会“十三五”高等职业教育科学研究规划重点课题(GY171002); 重庆市教育科学“十三五”规划重点课题(2017-GX-181).

作者简介: 徐 墨(1982—), 女, 讲师, 主要从事计算机应用技术研究.

在研究现有移动 sink 无线传感器网络的路由协议基础上, 针对现有方法的能耗问题, 结合海星水脉原理, 提出一种基于移动 sink 无线传感器网络的海星路由协议. 该协议具有中心环通道的路由骨干网, 动态设置环网和遵循网络大小和节点传输范围的径向数, 能够减少从源到 sink 的通信等待时间, 有效地均衡节点的能量消耗. 实验表明提出的协议在能耗、数据包传送延迟和网络生命周期方面优于其他方法.

1 现有 WSN 路由协议主干结构

具有移动 sink 的 WSN 路由协议试图通过在网络中建立主干来减少将 sink 位置转发给传感器节点的负载, 主干结构包括线协议、Railroad 协议、环路协议, 六边形蜂窝数据传输(hexagonal cell-based data dissemination, HexDD)协议等(图 1).

基于行的数据传播(Line Based Data Dissemination , LBDD)协议, 形成网络中间区域的垂直节点线, 作为数据存储和查找的交会区域, 如图 1(a)所示. 传感器节点将感测到的数据包转发到最近的内联节点, 该内联节点临时存储数据. 为了检索特定数据, 汇聚节点向第一内联节点发送查询, 然后将数据转发到 sink.

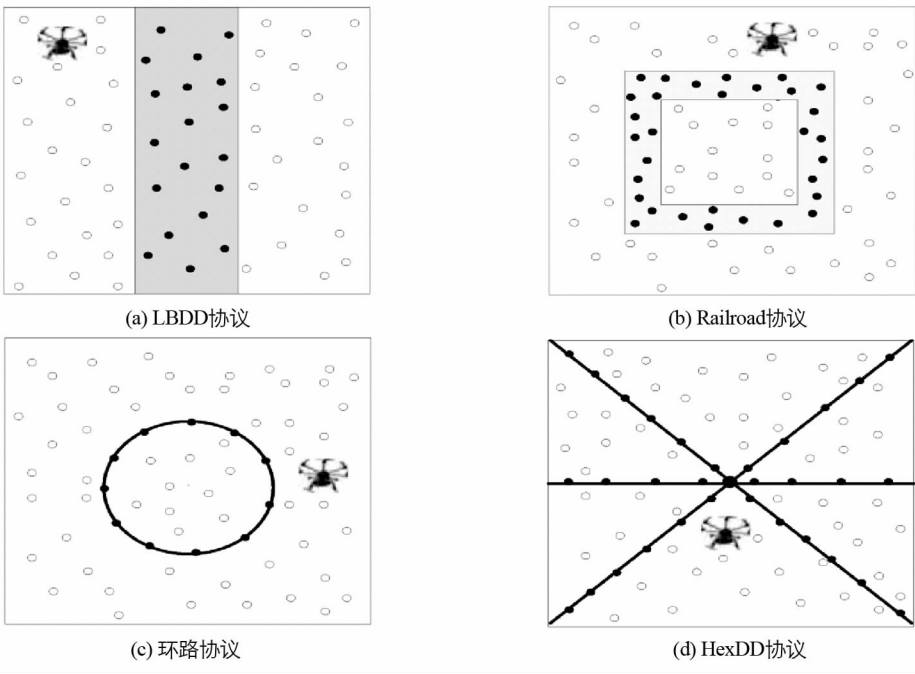


图 1 基于移动 sink 路由协议的主干结构

Railroad 协议将虚拟轨道放置在部署区域的中间, 如图 1(b)所示. sink 可以通过 Railroad 向源发送查询来检索数据, 在接收到查询之后, 源将数据直接发送到 sink. Railroad 协议与 LBDD 协议的一个关键区别是, sink 发出的查询通过单播在轨道上行进.

在环路协议中形成单节点宽度和闭环结构, 如图 1(c)所示. 环节点保持移动 sink 的更新位置, 并且可用数据的源节点在将数据直接发送到 sink 之前可以从它们获得 sink 的位置. 相反, 在 HexDD 协议中, 网络由穿过中心单元的 3 个主要对角线划分, 如图 1(d)所示. 对角线上的传感器充当会合节点, 用于数据存储和查找, 为了检索数据, sink 向中心单元发送查询, 然后转发到集合点节点. 如果请求的数据存在于集合点节点中, 会通过 sink 查询转发的反向路径将数据发送回 sink.

但是, 上述协议存在数据传输延迟增加和网络寿命减少的问题, 特别是当网络非常大或稀疏时尤其明显. 本文提出的海星路由中的环通道尺寸和径向通道的动态确定有助于减少数据传输延迟并显着延长网络寿命.

2 海星路由协议

本文基于移动 sink 无线传感器网络的海星路由灵感来自于海星水脉系统, 如图 2 所示.

本文假设有一个无线传感器网络，节点随机分布在 $A=2a \times 2b$ 的区域内，如图 3 所示。WSN 有一个移动 sink 节点，从源节点收集数据。假设传感器是均匀的，传输范围为 T ，海星路由的主干由径向通道节点和环向通道节点组成。骨干节点的主要职责是以最小的延迟将数据从源节点路由到移动 sink 节点。

设定径向通道构造的关键原理，使得网络外围节点可以访问径向通道上至少一个骨干节点。这可以通过在径向通道之间保持一定的角距离来确保。为了确保通道间传感器节点径向通道的可用性， θ_o 和 θ_a 分别是 2 个连续径向通道之间的角度距离，用于长度 $(2a)$ 和宽度 $(2b)$ 的网络，其由公式(1)和公式(2)表示为

$$\theta_o = \left\lfloor \left(\tan^{-1} \left(\frac{2T}{b} \right) \right) \right\rfloor \quad (1)$$

$$\theta_a = \left\lfloor \left(\tan^{-1} \left(\frac{2T}{a} \right) \right) \right\rfloor \quad (2)$$

其中， $2T$ 是周边两条径向通道之间允许的最大距离，如图 3 和图 4 所示。整个网络区域需要径向通道的数量取决于钝角 (Ψ_o) 和锐角 (Ψ_a) ， Ψ_o 和 Ψ_a 的计算方式如公式(3)和公式(4)所示。

$$\Psi_o = \left\lfloor \left(\cos^{-1} \left(1 - \frac{a^2}{d^2} \right) \right) \right\rfloor \quad (3)$$

$$\Psi_a = \left\lfloor \left(\cos^{-1} \left(1 - \frac{b^2}{d^2} \right) \right) \right\rfloor \quad (4)$$

其中， $d = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。最后，网络内所有侧面的径向通道总数为

$$n = 2 \times \left(\frac{\Psi_o}{\theta_o} + \frac{\Psi_a}{\theta_a} \right) \quad (5)$$

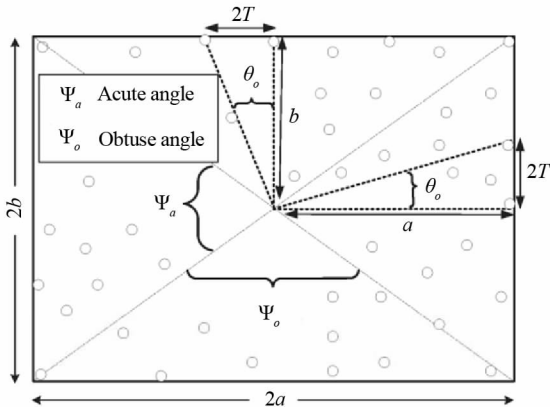


图 3 径向通道之间的角距离

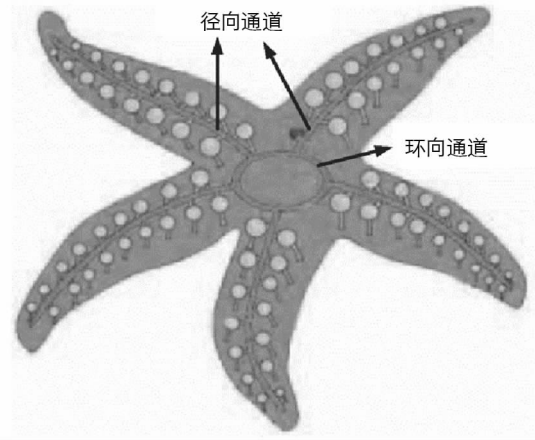


图 2 海星水脉系统

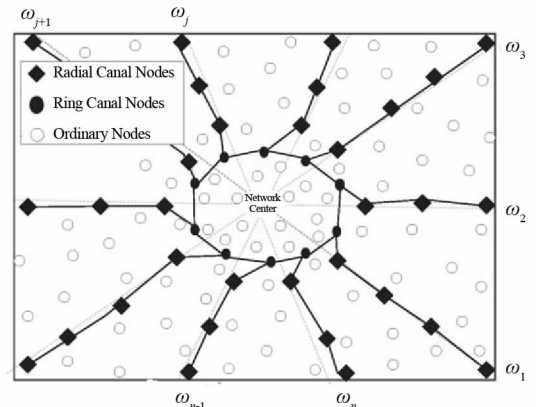


图 4 海星路由的主干结构

$W = \{\omega^1, \omega^2, \omega^3, \dots, \omega^n\}$ 是所有径向通道的集合，从主对角线的右下半部分排序。对于每个指定的径向通道，选择从网络中心向周边开始的主干径向节点，距离间隔小于或等于 T 。因此，两个连续的径向通道，例如网络中的 ω^j 和 ω^{j+1} 之间形成扇区。

对于环形通道的构建,目的是构建一个像海星环形通道一样的中心环通道,以便最大限度地减少数据传输延迟并避免中心的热点.首先,在每个扇区 i 中找到环形通道节点 x ,使得从 x 到所有其他扇区内节点 S_i 的总距离最低,这样的节点 x 可以通过式(6)表示为

$$\arg \min_{x \in S_i} \left\{ \sum_{y \in S_i, y \neq x} dist(x, y) \right\}$$

(6)

其中, $dist(x, y)$ 是节点 x 和 y 之间的欧几里德距离.然后,连接所有扇区中所选环通道节点(即,一对相邻节点彼此选择作为下一跳)以在网络中形成闭环骨干环形通道.

如图 5 所示,中心环形通道是围绕无线传感器网络中心环形节点组成的闭环,主要目标是缓解热点问题,特别是网络中心的热点问题,这是由于骨干节点在中心的会聚造成的.如果环形通道的规模相对于网络规模变得非常大,则环形通道内的源节点不能直接访问其主干节点;如果环道尺寸相对于传输范围来说很小,则在从多个节点到网络中心的传输过程中,会增加更多的干扰和碰撞.这是由于更多的放射状通道的存在和收敛到海星路线主干的环形通道.为了构造海星路由由主干的环道,对于网络中心 (u, v) ,根据式(7)确定环道半径 R ,

$$R = \varphi \times T$$

(7)

其中, $0 < \varphi \leq 1$ 是一个环形通道半径控制变量,从传感器的传输范围确定环道半径的扩张量,环形通道的中心固定在网络中心 (u, v) ,因此一组节点 $(c_1, c_2, \dots, c_6)$ 位于任意 (x, y) 位置(或其附近)围绕网络中心形成环形通道,通过式(8)来绘制环形通道.

$$R^2 = (x - u)^2 + (y - v)^2$$

(8)

控制器在参考圆内随机选择传感器节点作为环道的起始节点,在等于传输范围 T (或略小于 T) 的距离之后,每次选择下一个节点,这些节点位于保持式(8)和最小能量阈值 (E_{th}) 所述特性的参考圆上或圆内,其中节点剩余能量 $E_{res} \geq E_{th}$,环形骨干节点的选择过程一直持续到起始节点为止.如图 5 中 $c_1 - c_6$,这些骨干节点形成了一个连接节点的完整环,环状不一定是一个规则的圆,但必须是一个连通的节点闭环系统.

在构建完骨干通道以后,需要连接环形和径向通道节点,以形成网络的数据传输主干.首先,放下落入环通道内的所有径向通道节点以最小化冗余;其次,每个环通道节点与位于其传输范围内最远的径向节点之一连接.因此,整个网络中的环形和径向通道节点相互连接,构成了本文提出的海星路由协议的主干.

3 实验结果与分析

使用 NS-3 网络模拟器评估所提出的海星路由协议的性能,并与文献[7]中环形路由协议和 HexDD 路由协议进行比较.200 个传感器节点随机部署在 $600 \times 600 \text{ m}^2$ 的范围内,每个传感器的传输距离为 80 m,移动式接收器在部署区域内随机移动,速度范围为 $0 \sim 15 \text{ km/h}$,其他参数见表 1.

表 1 实验参数

参数	值	参数	值
部署领域/ m^2	600×600	能源:接收/ mA	19.7
节点数	200	能量:闲置/ μA	20
传输距离/ m	80	能量:睡眠/ μA	1
数据包大小/ bytes	40	电池容量/ mJ	5 000
报告频率/ $(\text{s} \cdot \text{node}^{-1})$	1/60	数据速率/ kbps	250
缓冲区大小/ packets	20	接收速度/ $(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$0 \sim 15$
能源:传输/ mA	17.4	重复次数	20

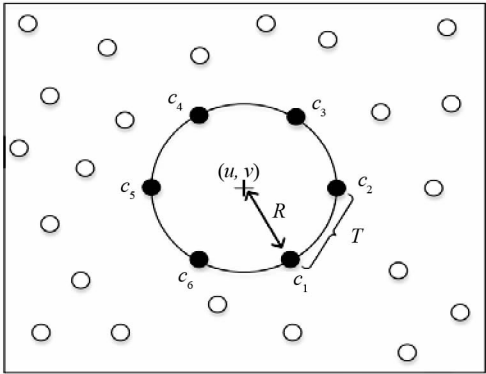


图 5 环形通道构造

能耗是无线传感器网络中最重要的资源，因为传感器节点的能力一直持续到电池耗尽为止。WSN 的性能与其生命周期直接相关。本文将寿命定义为直到网络中传感器节点因电池耗尽而死亡的时间。在实验中测量每个节点的能量消耗，传感器节点在传输、接收、空闲等待和休眠期间以不同的速率消耗能量，这些能量在实验中分别计算和总结。图 6 给出不同路由协议时不同 sink 速度下的平均能耗。

本文海星路由协议在所有 sink 速度下都有最低的能量损耗，速度在 0~6 km/h 之间能耗随着速度增加而降低，当速度大于 6 km/h 以后，随着速度增加，能耗随着增大但是增加幅度较小。

图 7 给出不同路由协议时不同 sink 速度下的延迟。

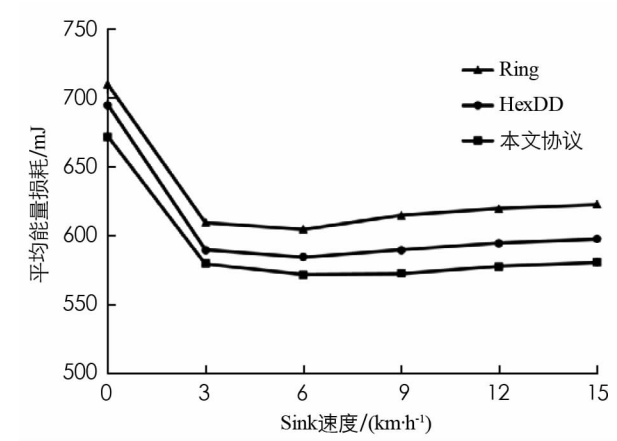


图 6 不同协议的平均能量损耗

本文路由协议中的数据传输延迟降低，当 sink 速度达到 6 km/h 时，数据传输延迟又随着 sink 速度的增加而增加。这是因为 sink 的移动性显著地减少了拥塞以及所传输数据分组的平均跳距。此外，由于整个网络中陈旧的 sink 位置信息，非常快的 sink 速度导致数据分组路由经过更多跳到达 sink。

与 HexDD 和 Ring 路由相比，本文路由协议显示出最高的网络寿命，因为其使用径向通道和环路通道在网络中的所有节点上分配能量负担。静态接收器(0 km/h)的性能表明了无线传感器网络中使用移动 sink 的优势。

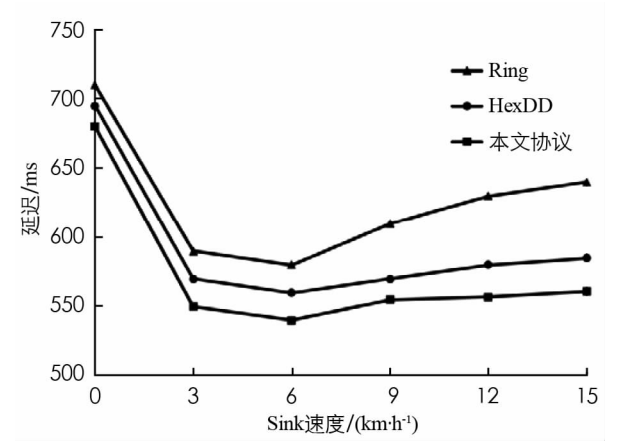


图 7 不同协议的延迟与 sink 速度的关系

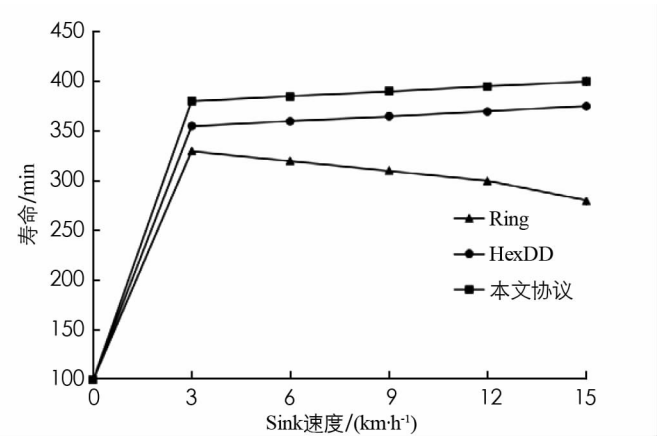


图 8 不同协议的寿命性能

4 结 语

在基于 sink 的无线传感器网络中，sink 在移动速度或方向发生改变时两移动信息进行传播，传感器节点可以预测 sink 的当前和未来位置，这需要较大的能耗。为了减少能耗，进一步提高数据传输延迟和网络寿命，本文提出一种新的移动 sink 无线传感器网络的路由协议，即海星路由协议。该协议根据给定的网络大小和节点传输范围动态构建路由骨干结果，针对给定网络联合确定径向通道数量和环通道半径，以便减少从源到 sink 的通信等待时间。实验结果表明，与现有 Ring 协议和 HexDD 协议相比，本文协议在能耗、数据传输延迟和网络寿命方面的性能都优于其他两种协议，说明本文协议具有可行性和有效性。

参考文献：

[1] RAZZAQUE M A, AHMED M H U, HONG C S, et al. QoS-aware Distributed Adaptive Cooperative Routing in Wireless Sensor Networks [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 19: 28-42.

[2] 林德钰, 王 泉, 刘伎昭. 无线传感网的移动与静态 sink 相结合的节能策略 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(11): 162-168.

- [3] HASSAN M M, KAMRUZZAMAN S M, ALAMRI A, et al. Design of an Energy-efficient and Reliable Data Delivery Mechanism for Mobilead Hocnetworks: a Cross-layer Approach [J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2015, 27(10): 2637-2655.
- [4] CAN T C, ISIK S, DONMEZ M Y, et al. Distributed Mobile Sink Routing for Wireless Sensor Networks: a Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(2): 877-897.
- [5] MUTHU KRISHNAN A, GANESH KUMAR P. An Effective Clustering Approach with Data Aggregation Using Multiple Mobile Sinks for Heterogeneous WSN [J]. Wireless Personal Communications, 2016, 90(2): 423-434.
- [6] PADMAVATI, ASERI T C. Comparison of Routing Protocols in Wireless Sensor Network Using Mobile Sink- A Survey [C]//2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS). Chandigarh:IEEE, 2014.
- [7] CAN T C, ISIK S, DONMEZ M Y, et al. Ring Routing: an Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(9): 1947-1960.
- [8] DÍAZ-SÁNCHEZ D, SHERRATT R S, ALMENAREZ F, et al. Secure Store and Forward Proxy for Dynamic IoT Applications over M2M Networks [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2016, 62(4): 389-397.
- [9] CHEN F, ZHANG J, TANG J, et al. Energy-efficient Data-gathering Rendezvous Algorithms with Mobile Sinks for Wireless Sensor Networks [J]. International Journal of Sensor Networks, 2017, 23(4): 248.
- [10] Sharma S, Sharma K. Improved Lifetime by Mobile Sink Based Energy Efficient Adaptive Threshold Clustering Hierarchy Algorithm for WSN [J]. Network, 2016, 3(10): 72-75.
- [11] KHALILY-DERMANY M, NADJAFI-ARANI M J. Itinerary Planning for Mobile Sinks in Network-coding-based Wireless Sensor Networks [J]. Computer Communications, 2017, 111: 1-13.
- [12] ABO-ZAHHAD M, AHMED S M, SABOR N, et al. Mobile Sink-Based Adaptive Immune Energy-Efficient Clustering Protocol for Improving the Lifetime and Stability Period of Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(8): 4576-4586.
- [13] SALARIAN H, CHIN K W, NAGHDY F. An Energy-Efficient Mobile-Sink Path Selection Strategy for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2407-2419.
- [14] ZHOU Z B, DU C, SHU L, et al. An Energy-Balanced Heuristic for Mobile Sink Scheduling in Hybrid WSNs [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 28-40.
- [15] MITRA R, SHARMA S. Proactive Data Routing Using Controlled Mobility of a Mobile Sink in Wireless Sensor Networks [J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 70: 21-36.

Starfish Routing Protocol in Wireless Sensor Network with a Mobile Sink

XU Zhao

Putian Big Data Industrial College, Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Yongchuan Chongqing 402160, China

Abstract: Wireless sensor networks with mobile sink have longer network life and better data transmission performance than static sink, but their mobility leads to huge energy consumption. In order to solve this problem, a starfish routing protocol based on mobile sink has been proposed in this paper, which is inspired by starfish water pulse system. The routing protocol constructs a routing backbone network with a central ring channel, and there are few radial channels on the network. The number of radial channels and the radius of the ring channel can be dynamically determined for a given network to reduce the communication waiting time from the source to the sink. The experimental results show that the starfish protocol can effectively balance the energy consumption of nodes, and the performance evaluation results are better than other existing protocols in terms of data transmission delay and network life cycle.

Key words: mobile sink; wireless sensor network; starfish routing protocol; routing backbone network