

# 基于移动 sink 的农田无线传感器网络数据收集策略

杨 莺<sup>1,2,3</sup> 杨武德<sup>1</sup> 吴华瑞<sup>2,3</sup> 缪祎晟<sup>2,3</sup>

(山西农业大学农学院 山西 太谷 030801)<sup>1</sup> (国家农业信息化工程技术研究中心 北京 100097)<sup>2</sup>  
(北京农业信息技术研究中心 北京 100097)<sup>3</sup>

**摘 要** 为解决农田无线传感器网络可扩展性较差及节点能量消耗不均匀的问题,针对农田传感器网络节点众多、网络面积大和移动 sink 网络对节点密度要求较低的特点,提出了适合农田应用的无线传感器网络的移动 sink 节点移动策略和抗干扰路由策略。算法通过划分可变量子网,并利用跳数限制的汇聚树集路由算法选择路由;同时,针对 sink 节点附近数据传输量大而容易发生碰撞的问题,对节点的稀疏化处理 and 区域分时的路由能有效减少数据传输中的相互干扰。仿真结果表明,算法在抗干扰传输的同时能够延长网络的生存期。

**关键词** 无线传感器网络,移动 sink,路径规划,抗干扰路由

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.04.017

## Mobile Sink Based Data Collection Strategy for Farmland WSN

YANG Ying<sup>1,2,3</sup> YANG Wu-de<sup>1</sup> WU Hua-rui<sup>2,3</sup> MIAO Yi-sheng<sup>2,3</sup>

(College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)<sup>1</sup>

(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)<sup>2</sup>

(Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)<sup>3</sup>

**Abstract** In order to solve the problem of poor scalability and uneven node energy consumption in farmland WSN, mobile sink path planning strategy and routing strategy were proposed according to the characteristics of large numbers of nodes, large monitoring area, and low node density. The proposed strategy divides the network into variable grids and introduces hop constrained routing tree to select route. In view of the large amount of data transmission and collision prone near the sink node, the sparse processing of nodes and the time-sharing routing of the region effectively reduce the mutual interference in data transmission. Simulation results show that the algorithm can reduce interference and prolong the network lifetime.

**Keywords** Wireless sensor networks, Mobile sink, Path planning, Anti-interference route

## 1 引言

在大数据时代,对信息收集的需求不断增长,无线传感器网络也被用于越来越多的领域。智慧农业、精准农业的发展,需要对农田参数进行定位、定时、定量的监测和管理。无线传感器网络作为精准实时的信息获取手段,具有自组织、低能耗、配置方便和成本低廉等特点,在农田气候参数的监测和控制以及作物的生长监测中具有广阔的应用前景。

传统无线传感器网络中,节点通过多跳向固定的基站发送信息,容易导致基站附近的节点大量死亡,从而形成能量空洞。近年,移动 sink 的引入可以降低网络节点密度、提高节点能量利用率,并延长网络的运行时间<sup>[1]</sup>。在农田应用的实际背景下,如何监测和收集大范围农田内各类环境参数和作物参数是一个关键问题。本文希望利用单个移动 sink 节点,在一定的合理交付时延下,结合适当的抗干扰路由算法,提高农

田无线传感器网络中节点能量的利用率和信息收集的有效性。

sink 节点的移动方式主要分为固定路径、随机移动、受控运动(HUMS<sup>[2]</sup>和 UPDA<sup>[3]</sup>)和基于群体智能算法或数学规划的移动路径算法(线性规划路径策略<sup>[4]</sup>、DCST<sup>[5]</sup>)。文献[6]将移动 sink 的移动建模为带有可重叠圆形邻域的 TSPN 问题<sup>[7]</sup>,并利用萤火虫算法求解其最优移动路径。文献[8]的启发式算法和文献[9]的 OPDG 算法以最小化交付时延为目标,通过求解 TSP 路径来提高网络的实时性。文献[10]提出了一种 MPSA 算法,利用虚拟力算法判断节点移动的目标位置。文献[11]结合节点休眠和唤醒策略,预测 sink 节点的移动趋势,以延长网络生命期。文献[12]提出了启发式算法 WRP,其通过赋予网络中繁忙节点更高的优先级来有效减少拥塞和时延;同时利用 SMT 引入虚拟访问点,优化 sink 节点访问路径。这些算法在不同的场景下能一定程度上地缩短交付时延,延长网络生命期,减少拥塞,但存在算

投稿日期:2018-02-09 返修日期:2018-05-19 本文受国家自然科学基金(61571051)资助。

杨 莺(1989—),女,博士生,主要研究方向为农田无线传感器网络,E-mail:yangying@nercita.org.cn;杨武德(1960—),男,博士,教授,主要研究方向为 3S 技术与作物生产,E-mail:sxauiwd@126.com(通信作者);吴华瑞(1975—),男,博士,研究员,主要研究方向为计算机应用基础和技术产品开发;缪祎晟(1984—),男,博士生,副研究员,主要研究方向为农业无线传感器网络与智能系统。

法复杂和扩展性差等问题。

WSN 的农田应用是一种时延容忍网络<sup>[13]</sup>,具有范围大、节点数量和类型多等特点。在农田场景中,CATS 算法<sup>[14-15]</sup>逐个选择覆盖节点最多的停留点,直至所有节点全部覆盖,然后在选定的停留点中规划一条最短路径。文献<sup>[16]</sup>提出的 GRDG 算法通过在网络中划分虚拟网格,建立两级路由,配合随机移动的移动 sink 节点实现农田数据的有效收集,提高了网络的可扩展性和节点的能量利用率。

## 2 问题描述及场景假设

在农田物联网中,需要大量的传感器节点组成传感网络,并与农田气象站相结合,以实现农田生态环境和苗情、墒情、病虫害及灾情的动态高精度监测。本文就如何利用移动 sink 来实时有效地将大规模农田中的数据 and 多媒体信息传送到控制中心的问题进行研究,并给出解决方案。

### 2.1 网络模型

根据农田环境下传感器网络的特征,做如下假设:

- 1) 网络节点随机部署完毕后,节点的位置固定且已知,不存在网络孤岛和能量空洞;
- 2) 节点在整个网络平面内均匀分布,且每个节点产生的数据量与时间成正比;
- 3) sink 节点可以在整个网络区域的任意地点移动,其移动速率为  $v$ ;
- 4) 传感器节点的通信范围是以节点为圆心、 $r$  为半径的圆, sink 节点的通信范围是以节点为圆心、 $R$  为半径的圆,且  $R > r$ ;
- 5) 传感器网络监测区域的尺度远大于 sink 节点的通信范围,且节点个数有限;
- 6) 每个节点都有足够的存储空间和一定的处理能力;
- 7) sink 节点的能量可再生,初始化之后 sink 节点可以获得网络内所有节点的位置和状态;
- 8) sink 节点接收网络中所有节点的信息一次称为一轮,每轮的时间不超过给定的最大交付时延。
- 9) 网络节点中一半以上的节点死亡时,网络失效。

### 2.2 能耗模型

本文中规定,节点一跳传输耗能为:

$$E = l(E_{\text{clc}} + \epsilon d^k) \quad (1)$$

其中,  $l$  为节点传输的比特数;  $E_{\text{clc}}$  为无线通信模块发送或接收单位比特数据的电路能耗;  $\epsilon$  是发射放大器将每比特传送单位平方米所消耗的能量;  $d$  为收发节点间的距离;  $k$  为由传输环境决定的路径损耗系数。不考虑作物对信道的影响,认为节点间的信道是自由空间信道,取对应路径损耗系数  $k=2$ 。

多跳传输耗能为:

$$E = E_1 + E_2 = 2MI E_{\text{clc}} + l \sum_{Q=1}^M \epsilon d_Q^k \quad (2)$$

其中,  $M$  为跳数;  $d_Q$  为第  $Q$  跳收发节点之间的距离;  $E_1$  为数据源节点的能耗;  $E_2$  为中继节点转发的总能耗。

$$E_1 = lE_{\text{clc}} + l\epsilon d_1^k \quad (3)$$

$$E_2 = (2M-1)lE_{\text{clc}} + l \sum_{Q=2}^M \epsilon d_Q^k \quad (4)$$

## 3 农田无线传感器网络数据收集策略

好的无线传感器网络移动 sink 路径规划算法应该满足

时延可控、算法简单、有助于节点负载均衡等要求。本文的算法通过在整个网络范围内划分子网, sink 节点逐个遍历各子网的策略完成对无线传感器网络的信息收集,并以一定的概率改变子网大小,再结合路由算法实现节点能耗的负载均衡。

### 3.1 路径规划算法

不同于突发事件监测类的无线传感器网络,农田无线传感器网络是一种时延容忍的大规模无线网络。根据农田传感器节点分布均匀、数据产生速率恒定的特点, sink 节点需要尽可能公平地访问每一个网络区域。

假设网络监测区域为  $L \times W$  的矩形,网络初始化后,将整个网络按照地理位置划分为  $m$  个边长为  $a$  的正方形区域(网络边缘除外),将其依次编号为 1 到  $m$ ,每个区域内的节点作为一个子网,并保证相邻编号子网的地理位置也相邻。因此,  $L$  和  $W$  可表示为:

$$\begin{aligned} L &= l \times a + l' \\ W &= w \times a + w' \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $l$  和  $w$  为整数,且  $0 \leq l' < a, 0 \leq w' < a$ 。当  $l' \leq \frac{a}{2}, w' \leq \frac{a}{2}$  时,剩余的部分合并入前一个区域,否则重新划分一个新的区域,则有:

$$m = \left[ l + \frac{l'}{a} \right] \cdot \left[ w + \frac{w'}{a} \right] \quad (6)$$

划分完成后,在子网  $i$  内选取  $P_i$  作为经由点, sink 节点按照逐个访问  $P_1, P_2, \dots, P_m$  的方式收集各子网节点的信息。多跳网络中,基站附近的节点会由于承担过多的转发任务而消耗更多能量,因此 sink 节点在选择停留位置时,要尽量避免开能量较少的节点,以防止网络出现能量空洞。为了使得所有节点能高效地访问到 sink 节点,经由点  $P_i$  的选择还需要考虑网络节点的剩余能量。sink 节点在拓扑密度高的位置时拥有更高的通信能耗效率<sup>[19]</sup>。我们希望 sink 节点经由节点密度较大、节点剩余能量较高的位置。因此,选择子网内节点的能量加权平均位置作为 sink 节点的经由点。

假设子网  $i$  内节点位置及剩余能量分别为:

$$(x_{i1}, y_{i1}), E_{i1}; (x_{i2}, y_{i2}), E_{i2}; \dots; (x_{im}, y_{im}), E_{im} \quad (7)$$

则  $P_i$  的坐标选为:

$$\left( \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} E_{ij}}{\sum E_i}, \frac{\sum_{j=1}^n y_{ij} E_{ij}}{\sum E_i} \right) \quad (8)$$

在每一轮中,子网内节点仅在 sink 节点移动至当前子网时发送消息。当子网划分固定时, sink 节点路径确定且速度已知,即可算出通过网络各个区域的时间,并通知附近的节点下次唤醒的时间,有助于减少碰撞和节点间的干扰。

当 sink 节点遍历完全部  $m$  个网格之后,有概率  $p$  改变下一轮子网的边长  $a$ ,并在下一轮通知所有节点新的子网划分方案。若 sink 节点决定改变子网边长,则生成一个随机数  $q \in [\min, \max]$ ,使得新子网边长  $a = q$ 。通过改变子网划分,使得每个节点与经由点的相对位置随机变化,防止部分节点由于承担过多的转发任务而提前死亡。

sink 节点移动的路径是连接  $P_1, P_2, \dots, P_m$  的一条折线,且网络范围已知,可以估计 sink 节点完成一轮收集所需的时间。节点在农田平面内均匀分布,因此点  $P$  的期望是各子网的几何中心, sink 节点完成一轮收集所需时间(网格按照梭行

法顺序标号)的估计为:

$$\hat{T} = \frac{L[\frac{W}{a}] + W}{v} \approx \frac{ma}{v} \quad (9)$$

考虑到当  $a$  变小时子网数量增加, sink 节点经由点增多、路径变长, 交付时延随之增大。令  $\hat{T}$  等于最大允许交付时延  $T$ , 计算出  $a$  的最小值  $min$ 。当子网边长满足  $a > min$  时, 即可保证满足交付时延的要求。当  $a$  变大时, 子网内节点到 sink 节点的平均距离变长, 更多节点需要通过多跳方式向 sink 节点传送数据。为防止远离 sink 的节点进行多跳传输时超出网络的最大条数限制, 子网边长  $a$  不应超过网络给定的最大跳数与节点可靠通信距离乘积的  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  倍。即:

$$max = \frac{rJ}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

其中,  $J$  为多跳传输的最大允许跳数。

由于单位时间内节点数据产生的速率相同, 一旦子网划分完毕, 即可利用交付时延估计各子网节点待传输的数据量。网络初始化后, sink 节点根据数据量预测值, 选择合适的移动速度。在特定时间段内, 只需要唤醒相关节点发送和接收数据, 其他节点保持休眠状态, 以节约能量并减少干扰。

上述路径规划算法使得每个节点有均等的机会与 sink 节点通信, 并确保在最大交付时延内数据总能顺利地传递出去。整个路径规划算法的流程图如图 1 所示。

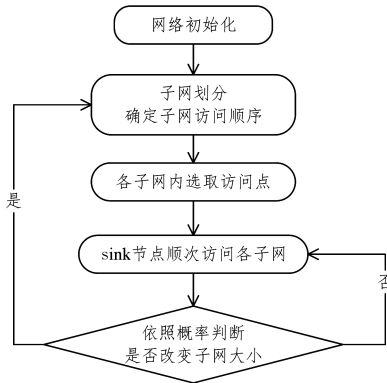


图 1 路径规划算法的流程图

Fig. 1 Flowchart of path planning algorithm

### 3.2 节点稀疏化

农田无线传感器网络区域较大, sink 节点路过时周围节点都需要传输消息, 容易引发网络干扰和拥塞; 同时, 节点密度较大的区域发生碰撞和干扰的概率都大幅增加。为解决该问题, 将一部分距离很近的节点组成节点组, 节点组内节点间的距离  $d$  远小于节点的传播半径  $r$ , 组内节点间的传输代价很小, 同时认为组内节点可以相互代替, 在路由中视为一个等效节点, 并从中选择一个节点参与实际路由, 称其为代表节点, 代表节点死亡时由组内其他节点接替。

无线传感器网络的拓扑结构表示为  $G=(V, E)$ , 其中  $V$  为节点的集合,  $E$  为节点间链路的集合。

**定义 1** 网络稀疏指数为等效节点数与原有节点数的比值, 即:

$$\eta = \frac{\tilde{N}}{N_0} \quad (11)$$

**定义 2** 节点  $v$  的  $r$ -邻域  $B_r(v)$  中, 距离节点  $v$  最远的邻

节点到节点  $v$  的距离为节点  $v$  的最大度, 距离节点  $v$  最近的节点到节点  $v$  的距离为节点  $v$  的最小度, 即:

$$d_{v \max} = \max(\text{distance}(v, q), v \in V, q \in B_r(v)) \quad (12)$$

$$d_{v \min} = \min(\text{distance}(v, q), v \in V, q \in B_r(v)) \quad (13)$$

**定义 3** 节点  $v$  的  $r$ -邻域  $B_r(v)$  中, 距离  $v$  最远的节点和最近的节点的距离差值为节点  $v$  的度极差, 即:

$$Rd_v = d_{v \max} - d_{v \min}, v \in V \quad (14)$$

**定义 4** 定义网络节点分布均一度  $\phi$  为网络中  $E$  长度的标准差、节点度极差的均值和节点度数标准差乘积的倒数, 反映网络节点分布的均一性。均一度值越大, 网络节点的分布越均匀。即:

$$\phi = \frac{1}{\text{mean}(Rd_v) \times \text{std}(\text{len}(E)) \times \text{std}(\text{deg}(v))}, v \in V, e \in E \quad (15)$$

图 2 是组内节点间的传输距离代价和能量代价的变化示意图, 随着稀疏系数的减小, 组内节点间的最长距离和传输消耗增大。当稀疏系数接近或低于 0.4 时, 不再满足聚合条件  $d \ll r$ , 因此不予考虑。实际应用中, 可以根据需求灵活地选择合适的稀疏系数。

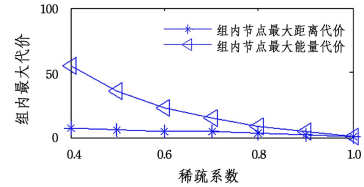
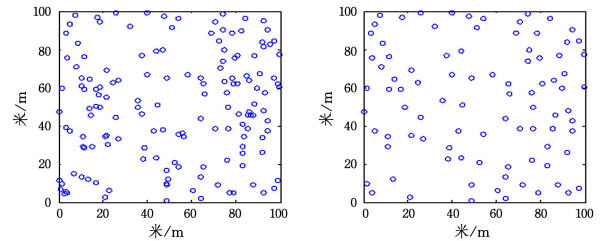


图 2 组内节点代价随稀疏系数变化示意图

Fig. 2 Change of node cost with sparsity coefficient

图 3 是一个稀疏指数为 0.6 的网络节点稀疏化效果示意图。图 3(a) 是一个在  $100\text{m} \times 100\text{m}$  区域内随机部署 150 个节点的网络示意图。经过稀疏化处理后, 网络节点的疏密在很大程度上趋于一致。同时, 等效节点的等效能量比其他节点更大, 在路由中优先承担转发任务。



(a) 网络节点示意图

(b) 稀疏化后的网络节点

图 3 节点稀疏化示意图

Fig. 3 Nodes rarefaction

### 3.3 路由策略

无线传感器网络分簇路由协议中, 不论是固定簇头还是簇头轮换, 在同一分簇中只有一个簇头节点, 该簇头节点承担簇内全部的转发任务。本文将采用一种基于地理位置的路由策略, 灵活地分配转发任务。

对于子网内的节点, 发送数据时有两种选择, 一是直接发送给 sink 节点, 二是发送给下一跳节点。规定当节点距离 sink 大于某个门限值时, 通过多跳发送消息, 否则直接发送给 sink 节点或者其他可达邻节点。这也就是说, 节点落在 sink 节点路径的一定距离范围内时, 直接将数据发送给 sink 节

点,这些节点分担了子网内所有节点的转发任务,都可能成为路由汇聚树的根节点,由这些根节点组成的集合称为根节点集。根节点承担整个子网内部的转发任务,相比单簇头的固定分簇结构,其余节点在路由时有更大的选择余地,同时多个潜在的根节点随着子网划分的变动而变化,可以有效分担网络的负载。具体的转发策略要联系实际的节点位置拓扑关系和各根节点的剩余能量来确定。

sink 节点在访问每个子网的时间段内唤醒处于移动路径  $d_0$  以内的节点发送和接收数据,其他节点保持休眠状态,以节约能量并减少节点间的干扰。由于 sink 节点的移动趋势可预知,基于地理位置的子网划分方法可以使得 sink 节点准确计算各子网节点的唤醒时间,避免节点间的干扰。同时, sink 节点可以根据传感器节点的数据量计算在每个子网内用于信息收发的时间,并通知节点下次子网的划分情况。

子网  $i$  内的节点按照如下方式进行路由。

1) 距离 sink 节点移动路径  $d_0$  范围内的节点,根据 sink 节点移动的情况,将数据直接发送给 sink 节点;并且在 sink 节点运行到  $i-1$  子网时侦听信道,同步时钟,并准备接收同一子网内节点的发送请求。在 sink 节点运行到  $i+1$  子网时,向上游节点发送 sink 节点的分组和控制指令。

为了降低节点间的干扰,当且仅当节点感知到 sink 节点靠近时,可以向 sink 节点发送消息。为防止数据发送时 sink 节点离开传送半径,我们规定节点感知到 sink 节点远离自己时不再向 sink 发出发送请求(正在发送的信息不受影响),如果此时消息还未发出,就发送给 sink 节点移动方向前方的节点。收到消息的节点会将该信息与自身产生的消息一同发出。根节点传输示意图如图 4 所示。

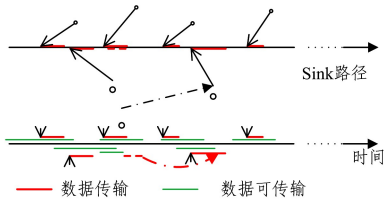


图 4 根节点路由示意图

Fig. 4 Root node routing

2) 距离 sink 节点移动路径  $d_0$  范围以外的节点,在自 sink 节点运行到  $i-1$  子网时,利用多跳发送给距离 sink 节点移动路径  $d_0$  范围内的节点。建立路由时,从子网内距离 sink 节点经由点最远的节点开始建立路由,保证节点在自己的时隙结束后可以直接进入休眠状态而不会影响到其他节点数据的转发。

具体方法是:当 sink 节点运动到  $i-1$  子网时,所有  $i$  子网中距离 sink 节点路径  $d_0$  以外的节点启动自己的计时器,计时器的时间与该节点到 sink 节点路径的距离成反比,在计时器计时结束时,发动下一跳节点搜寻算法并发送消息,同时在自己的计时器结束计时之前侦听是否有其他节点的消息转发请求并接收转发信息。另外, sink 节点运行到  $i+1$  子网时从自己的下游节点接收来自 sink 节点的控制信息。

在选择下一跳节点时遵循如下策略:当前节点在与自己距离小于  $r$  且该节点和当前节点的连线与当前节点到 sink 节点路径的垂线夹角小于固定值  $\theta$  的节点中选择自己的下一跳节点,选择的优先顺序如下:同组节点数较多的代表节点 >

同组节点数较少的代表节点 > 剩余能量较多的普通节点 > 剩余能量较少的普通节点。选定后,随即向该节点发出转发请求,得到回应后发送当前轮的消息。下一跳节点收到消息后,如果自己在  $d_0$  范围内则直接等待 sink 节点的到来并将消息发送给 sink 节点,否则继续按照上述方法等待自己的计时器结束,选择下一跳节点,直到下一跳节点到 sink 节点的移动路径的距离小于  $d_0$ 。图 5 为下一跳选择的示意图。

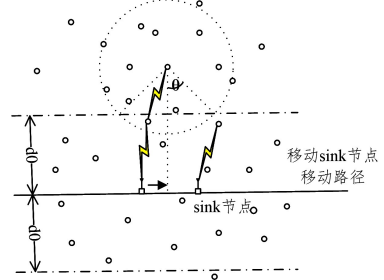


图 5 下一跳节点的路由选择示意图

Fig. 5 Schematic diagram of route selection for next hop node

综上所述,图 6 给出移动 sink 运行过程中节点的传输示意图。sink 节点正移动到子网  $i$ ,子网  $i$  中的根节点向 sink 节点传送消息,此时子网  $i-1$  中 sink 节点刚离开,根节点将必要的控制消息发送给子网内的其他节点,在子网  $i+1$  中节点将消息传送给根节点,以便 sink 节点移动至子网  $i+1$  时向 sink 节点发送。节点只需要在 sink 节点运行到  $i-1, i, i+1$  子网时开启发射天线,其余时间只需要维持传感器的正常工作,以达到节约节点能量和减少传输干扰的目的。

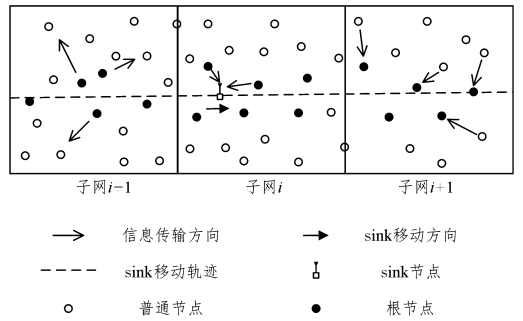


图 6 网络路由示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Network routing

## 4 仿真结果与分析

基于上述描述,用 MATLAB R2014a 对上述方法进行仿真。在  $1000\text{m} \times 1000\text{m}$  的矩形区域内,均匀、随机部署 3000 个传感器节点。仿真参数如表 1 所列。

表 1 仿真实验参数的设置

Table 1 Simulation Parameters setting

参数	值
仿真区域	$1000\text{m} \times 1000\text{m}$
节点初始能量/J	$E_0 = 0.5$
默认门限	$i = 0.3$
最大允许时延/min	$T = 100$
sink 节点移动速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v = 10$
最大路由跳数	6
$\epsilon / (\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4))$	0.0013
$E_{\text{elec}} / (\text{nJ}/\text{bit})$	50
$r/\text{m}$	50
$R/\text{m}$	100

首先, sink 节点的每一轮移动路径会随着划分子网的边长而变化。图 7 是 sink 节点的移动距离随子网边长变化的仿真示意图。经 3.1 节可知,子网边长越短, sink 节点需要走的路程就越远,耗时也越多。从式(9)也可以推知两者的变化关系符合图 7 所示关系,其趋势中的明显“断层”是由式中取整函数的不连续性所致。

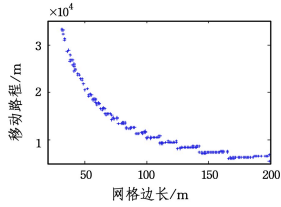


图 7 sink 节点移动距离随网格边长的变化示意图

Fig. 7 Change of moving distance of sink nodes with the length of grid

根据式(9)、式(10)可知,网格划分的边长受到最大路由跳数和可允许最大交付时延的限制。图 8 为网格边长可行域的示意图,图中左侧坐标轴对应的深色曲线是最大允许跳数对网格最大边长的约束,其左侧是可取值范围;右侧坐标轴对应的浅色曲线是最大允许交付时延对网格边长最小值的约束,其右侧是可取值范围。图 8 中上部中心的区域为可变边长的可行域取值。

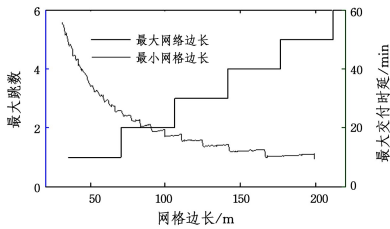


图 8 最大跳数和最大时延对网格边长变化的约束

Fig. 8 Length of grid influenced by maximum hops and maximum allowable delivery

图 9 是网络重配置概率对网络生存期的影响示意图。可以看出,  $p$  取 0.5 时网络运行的生命期最长,平均运行轮数达到 5655;取 0.7 时次之,达到 5598;然后是取 0.3, 0.9 和 0.1, 分别运行 5524, 5431 和 5411 轮。每轮结束后产生的随机数  $p$  决定了网络子网划分和路由重新配置的频繁程度。当  $p=0.9$  时,过于频繁的配置路径增加了路由建立和路径规划的负担,产生不必要的消耗;而  $p=0.1$  时重新划分子网的频率低,不利于节点能量的高效利用。因此,合适的概率  $p$  可以更好地发挥算法的优势,达到节约节点能量的目的。考虑到重配置概率的增大会增加网络的分组开销,实际应用中可以从 0.3~0.5 选择。

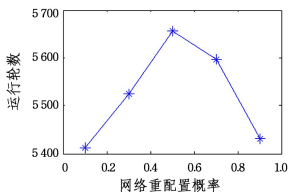


图 9 重配置概率对网络生存期的影响示意图

Fig. 9 Effect of reconfiguration probability on network lifetime

网络节点均一度可以一定程度地反映节点的分布情况,

数值越低,节点分布越均匀,抗干扰传输效果越好,但过于稀疏的节点也会导致网络信息量的丢失,因此可以根据实际需求调整稀疏参数,以达到理想的抗干扰效果和覆盖效果。图 10 给出经过 100 次随机部署试验得出的不同稀疏指数下节点均一度平均值的变化情况。随着稀疏指数的降低,节点均一度显著上升。从图 10 中可以看出,当稀疏指数降低到 0.6 以下时,节点均一度上升变慢,稀疏化效果不明显;同时,为了保证一定的覆盖率,后续仿真稀疏指数选取为 0.6。

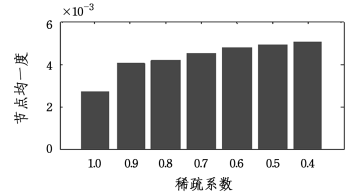


图 10 不同稀疏系数下的节点均一度

Fig. 10 Homogeneity of nodes with different sparsity coefficients

假设死亡节点超过节点总数 1/2 时,网络失效。将本文算法与同等条件下的 LEACH 分簇条件下的最短路径方法(以下简称最短路径算法)和 RDDM (Rendezvous-based Data Dissemination protocol based on Multi-hop clustering)算法<sup>[19]</sup>进行比较,结果如图 11 所示。本文算法在运行约 2900 轮时开始出现死亡节点,与两种对比算法相比推后了约 800 轮。这是由于本文的算法节约了成簇代价和簇内节点间的传输能耗;同时,在节点开始死亡的前期节点保持一个较慢的死亡速度,并在 3000~4000 轮中保持较多的节点数量和覆盖率,随后节点开始较快地死亡,说明本文的算法在能量平衡性和节点覆盖性方面优于两种对比算法。最终,网络生存周期比最短路径算法延长了近 300 轮,比 RDDM 算法也有所延长。

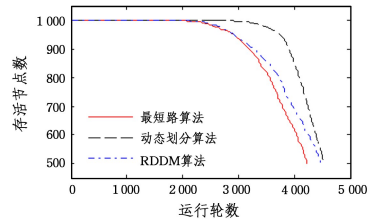


图 11 存活节点数随轮数变化的示意图

Fig. 11 Change of number of surviving nodes with number of rounds

在不同节点密度的场景下,对算法的抗干扰性能进行仿真。从图 12 中可以看出,随着节点密度的增大,节点间距离缩短,导致节点间的碰撞次数大幅上升。当网络分布着 500 个节点时,节点分布稀疏,各算法的碰撞次数基本相同;随着节点密度的增加,动态划分算法的碰撞次数明显少于两种对比算法,且节点数量越多,动态划分算法的碰撞次数优势就越明显。

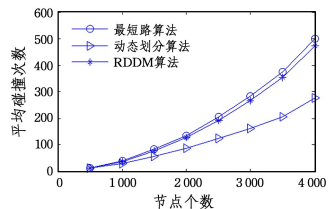


图 12 不同网络密度的碰撞次数

Fig. 12 Number of collisions with different network density

**结束语** 本文提出的针对农田应用的无线传感器网络移动 sink 节点的移动策略和路由策略,将大型网络的路由问题转化成了多个小规模子网,每个子网节点的数量少,路由建立简单。利用交付时延和跳数限制控制子网规模,节点的稀疏化和路由控制有效减少了节点间可能的干扰,汇聚路由算法合理地平衡了网络节点的负载。子网变化的随机性使得 sink 节点的运动在可控范围内有一定的变化,进一步平衡了节点的能耗。最后,通过仿真实验,验证了算法的有效性。下一步将考虑采取分布式的路由,以进一步减少节点的信息交换和能量消耗。

### 参 考 文 献

- [1] CHATZIGIANNAKIS I, KINALIS A, NIKOLETSEAS S. Efficient data propagation strategies in wireless sensor networks using a single mobile sink [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(5): 896-914.
- [2] BI Y, SUN L, MA J, et al. Hums: an autonomous moving strategy for mobile sinks in data-gathering sensor networks [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2007, 2007(1): 1-15.
- [3] AKKAYA K, YOUNIS M, BANGAD M. Sink repositioning for enhanced performance in wireless sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2005, 49(4): 512-534.
- [4] GANDHAM S R, DAWANDE M, PRAKASH R, et al. Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations [C] // *IEEE Global Communications Conference*. Honolulu, China, 2009: 377-381.
- [5] LIU L, GUO P, ZHAO J, et al. Optimal track of mobile sink-based data collection strategy in wireless sensor networks [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(1): 118-121. (in Chinese)  
刘林锋, 郭平, 赵娟, 等. 无线传感器网络中基于移动 sink 最优路径的数据收集策略 [J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(1): 118-121.
- [6] FENG H, LUO L, WANG Y, et al. Path planning in wireless sensor networks for mobile sink based on glowworm swarm optimization algorithm [J]. *Microelectronics & Computer*, 2016, 33(5): 47-51. (in Chinese)  
俸皓, 罗蕾, 王勇, 等. 基于萤火虫算法的无线传感器网络移动 sink 节点路径规划方法 [J]. *微电子学与计算机*, 2016, 33(5): 47-51.
- [7] YUAN Y, PENG Y H, LI S S, et al. Efficient heuristic algorithm for the mobile sink routing problem [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(10): 107-117. (in Chinese)  
袁远, 彭宇行, 李姗姗, 等. 高效的移动 sink 路由问题的启发式算法 [J]. *通信学报*, 2011, 32(10): 107-117.
- [8] TANG J, GUO S, YANG Y. Delivery latency minimization in wireless sensor networks with mobile sink [C] // *IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2015: 6481-6486.
- [9] CHANG J, ZHANG L, ZENG B. Data gathering algorithm for mobile sink based on the global delivery latency minimization [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(2): 264-270. (in Chinese)  
常捷, 张灵, 曾碧. 基于全局时延最小化的移动 Sink 数据收集算法 [J]. *传感技术学报*, 2016, 29(2): 264-270.
- [10] WANG Z Q, CHEN Y R, REN T J, et al. Sink node moving path selection algorithm limited by data transmission delay and hops [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(4): 583-592. (in Chinese)  
王章权, 陈友荣, 任条娟, 等. 数据传输时延和跳数受限的 Sink 节点移动路径选择算法 [J]. *传感技术学报*, 2016, 29(4): 583-592.
- [11] PREETHA S, NAGARATHINAM S. Weighted Rendezvous Planning for Energy Efficient Mobile-sink Path in Wireless Sensor Networks [C] // *International Conference on Electronics and Communication Systems*. Miami, 2015: 695-698.
- [12] SALARIAN H, CHIN K W, NAGHDY F, et al. An energy-efficient mobile-sink path selection strategy for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(5): 2407-2419.
- [13] DING J, LIU D P. Energy saving algorithm for data collection of wireless sensor networks in mobile sink environments [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2013, 36(5): 51-55. (in Chinese)  
丁杰, 刘丹谱. 移动 Sink 环境下的无线传感器网络数据收集节能算法 [J]. *北京邮电大学学报*, 2013, 36(5): 51-55.
- [14] HUANG S C, CHANG H Y. A farmland multimedia data collection method using mobile sink for wireless sensor networks [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2016, 76(19): 1-16.
- [15] HUANG S C. A virtual-grid farmland data-gathering locations decision algorithm for the mobile sink in wireless sensor network [C] // *Proceedings of the Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. Sapporo, 2015: 667-671.
- [16] LIU W, FAN J, ZHANG S, et al. Grid-based real-time data gathering protocol in wireless sensor network with mobile sink [C] // *IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications*. Paris, 2014: 857-864.
- [17] SUN X, WU B G, WU H R, et al. Topology based energy efficient routing algorithm in farmland wireless sensor network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 232-238. (in Chinese)  
孙想, 吴保国, 吴华瑞, 等. 能量高效的农田无线传感器网络拓扑关联路由算法 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 232-238.
- [18] MEHRABI A, KIM K. Maximizing data collection throughput on a path in energy harvesting sensor networks using a mobile sink [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(3): 690-704.
- [19] LEE E, PARK S, OH S, et al. Rendezvous-based data dissemination for supporting mobile sinks in multi-hop clustered wireless sensor networks [J]. *Wireless Networks*, 2016, 22(4): 1425-1425.