

粮堆中无线传感器网络覆盖保持路由算法的改进与性能比较

廉飞宇, 付麦霞

(河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:目前国有粮库均在储粮粮堆中架设了传感器网络用于粮情监测,基于分簇的无线传感器网络是其发展方向。在这种网络中,存在着簇首因转发数据量大而负担过重的问题,其直接后果是簇首因电能耗尽而失效,导致产生监测区域的覆盖盲区。本文提出一种新的覆盖保持路由算法,对于单跳通信,根据重新定义的覆盖冗余度选取簇首;对于多跳通信,则根据父节点中覆盖冗余度较高的簇首作为下一跳的路由。与 LEACH - Coverage - U 算法相比,仿真结果表明,本方法能够显著降低网络耗能,提高网络覆盖率。

关键词:储粮;无线传感器网络;簇首;网络覆盖率;覆盖冗余度

中图分类号:TP 18,S 379.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007 - 7561(2017)03 - 0096 - 06

Improvement and performance comparison of coverage preserving routing algorithms for wireless sensor network in grain pile

LIAN Fei - yu, FU Mai - xia

(College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001)

Abstract: There have been large amounts of sensor network in state - owned grain depots nowadays, and wireless sensor network based on clustering method is its direction of development. However, there has been a problem that cluster heads have a heavy burden due to transmitting mass data, which finally leads to failure of cluster heads because of energy depletion and generation of a coverage dead zone in the wireless sensor networks. We proposed an improved method for coverage conserving routing algorithms to try to solve the problem. For single hop communication, we selected cluster heads according to redefined coverage redundancy; and for multi - hop, we regarded a cluster head with higher coverage redundancy in father nodes as a route for the next hop. By comparing with LEACH - Coverage - U algorithm, simulation results show that, the method proposed in the paper can reduce energy consumption of the network effectively and improve network coverage markedly.

Key words: grain storage; wireless sensor networks; cluster head; network coverage rate; coverage redundancy

随着国家对粮食安全的日益重视,国家各级粮库储存的粮食越来越多,储量越来越大,粮食储藏安全问题日益突出。目前,在国有直属库和省市级代属库,大多在粮堆中埋设温度传感器,这些传感器通过电缆连接,形成一个有线网络,但有线网络造成了粮库进出粮的不便,因此目前研究的热点和方向很

自然地就集中到无线传感器网络上。如何在粮堆中布置无线传感器,既能节省布置成本和耗能,又能有效覆盖监测区域,就是无线传感器网络的络覆盖保持路由算法需要解决的问题。

在粮堆中埋设的无线传感器网络,其“簇首”的选取是以“能量”为指标的,而分簇算法的设计则遵循了陆地传感器网络的方法,未将“覆盖率”作为考虑因素,导致在网络运行期间,由于簇首能量耗尽导致覆盖率持续下降,从而产生对粮堆温度分布监测的漏洞。覆盖保持算法能够有效地减缓覆盖率下降

收稿日期:2016 - 09 - 15

基金项目:河南省基础与前沿科技计划项目(152300410079)

作者简介:廉飞宇,1970年出生,男,副教授。

通讯作者:付麦霞,1981年出生,女,博士。

的速度,但目前大多数算法都是基于陆地传感器网络^[1-3]的,对于粮堆这种含有较多水分的介质,常规的陆地覆盖保持路由算法未必适用。

传感器网络的覆盖保持路由算法前人已经做了研究,促进了传感器网络特别是水下传感器网络的应用^[4-8]。对这些研究成果加以讨论有助于对已有算法的改进。在该领域中,Tao Shu 等人首次提出了“覆盖时间”的概念^[9],采用 LEACH 算法用于延长网络对监测区域能够维持检测的时间^[10-12]。为了延长覆盖时间,一般采用“节点调度”方法^[12],即在网络中寻找一组节点,设置为活跃或休眠节点,以达到节约能量、消除冗余的目的,该方法没有考虑簇首节点因能量耗尽带来的覆盖率不足的问题。为了解决这一问题,Yun - Ren Tsai 等人提出了一种改进的 LEACH 算法^[13],即 LEACH - Coverage - U,该算法以有效覆盖度 C 为依据选择簇首,有效覆盖度定义如下:

$$C = \frac{f_r}{C_d \cdot f_{r_{\max}}} \quad (1)$$

式中, f_r - 节点的有效感知范围; C_d - 节点对检测区域的覆盖贡献; $f_{r_{\max}}$ - 节点的最大感知范围。

与 LEACH 算法相比,该算法提高了网络覆盖率。但该算法以节点对监测区域的覆盖贡献为依据确定簇首节点,使得簇首的选取仍具有一定的随机性,仍导致了网络覆盖率的不足。针对以上问题,提出了一种多跳覆盖保持的无线传感器路由算法,该算法可以通过降低首簇的能耗延长网络使用寿命。并且还能保持令人满意的网络覆盖率。结合本文的单跳覆盖保持路由算法,通过将网络覆盖贡献不大的节点选为簇首,改善了 LEACH - Coverage - U 算法对簇首选取的随机性。此外,鉴于粮堆介质含水量较大,为减少传输延迟,提出的这两种覆盖保持路由算法均采用了 TDMA 协议。

1 传感器网络的能耗模型

假设粮堆中的无线传感器网络采用均匀布置方式。传感器由扦样器送入粮堆不同深度处。在粮堆中呈 1.5 m 间隔纵向排列,横向间隔为 2 m 左右,传感器网络布局模型如图 1 所示。在该布局中,定义 Sink 节点位于监测区域表面的中心,每一节点的感知区域为以半径 $R_s \geq 1.5$ m 的球形,所有节点都具有唯一的标示 ID 并且同构。

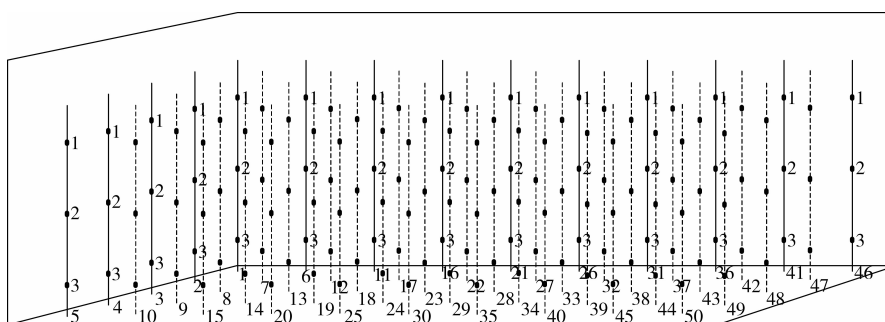


图1 传感器网络的布局模型

上述传感器网络布局中,其能耗模型采用了文献^[2,4]中的数据传能模型:

$$E_{tx}(d) = P_r \cdot T_p \cdot A(d) \quad (2)$$

式中, $E_{tx}(d)$ - 节点发送信号所需的能量; P_r - 信号的最低功率; T_p - 信号发送持续时间; d - 信号传输的距离;

$A(d)$ - 信号传输距离 d 时的能量衰减,可由下式表示:

$$A(d) = d^\lambda \alpha^d \quad (3)$$

其中, λ 为能量扩散因子,其值为 $1 \leq \lambda \leq 2$,参数 $\alpha = 10^{\alpha(f)/10}$,其中 $\alpha(f)$ 为吸收系数,按照文献^[13]定义为:

$$\alpha(f) = 0.11 \frac{10^{-3} f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{10^{-3} f^2}{4 \cdot 100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-7}$$

$$f^2 + 3 \times 10^{-6} d^\lambda \alpha^d \quad (4)$$

式中, f 为载波频率, kHz; $\alpha(f)$ 的单位为 dB/m。

2 问题描述与分析

在对基于分簇的传感器网络进行描述之前,需要阐明几个相关概念:

(1) 邻居节点集 $N(i)$

某一节点的邻居节点集是指由距离该节点 $\leq 2R_s$ 的所有节点组成的集合。即:

$$N(i) = \{j \in V \mid d(i, j) \leq 2R_s\} \quad (5)$$

其中 V 是监测区域的所有节点集合, $d(i, j)$ 为节点 i 和 j 之间的距离。

(2) 覆盖冗余度 (CR)

表示监测区域节点的邻居节点集对本节点的感

知区域的覆盖程度,可由邻居节点集的感知区与节点感知区的重合部分比上节点感知区定义,如式(6)所示:

$$\gamma(i) = \frac{\text{volume}((\bigcup_{j \in N(i)} \alpha_j) \cap \alpha_i)}{\text{volume}(\alpha_i)} \quad (6)$$

式中, α_i 为节点 i 的感知区。

(3) 覆盖贡献 $Ncc(i)$

节点 i 的覆盖贡献定义为:

$$NCC(i) = \text{volume}(\alpha_i) - \text{volume}((\bigcup_{j \in N(i)} \alpha_j) \cap \alpha_i) \quad (7)$$

其中 $((\bigcup_{j \in N(i)} \alpha_j) \cap \alpha_i)$ 为节点 i 与其邻居节点集 $N(i)$ 感知区域的重合部分。

(4) 网络覆盖率 σ

网络覆盖率 σ 定义为工作节点的感知区域与整个监测区域体积的比值。

(5) 网络生命周期

网络生命周期定义为网络在满足覆盖率 σ ($\sigma \geq \sigma_{\text{expect}}$) 的条件下能够运行的次数。其中 σ_{expect} 是所期望的网络覆盖率。这一参数是衡量网络覆盖保持算法的重要指标。

对于分簇的传感器网络,当簇首以单跳或多跳方式将信号传输给 Sink 节点时,可能因为负载过重而提前耗尽能量,导致网络覆盖盲区的提前出现,这是粮情监测所不希望出现的。为了解决这一问题,文献[13]采用节点对监测区域的有效贡献(即有效覆盖度)作为其成为簇首的概率,即节点的有效覆盖度越小,则成为簇首的概率越高,这就使得节点即便因能量消耗过多而死亡,也不会对监测区域的覆盖效果有多大影响。节点 i 的有效覆盖度 $\eta(m)$ 定义如下:

$$\eta(m) = \eta_0 + \sum_{i=1}^m \frac{\eta_i}{i+1} \quad (8)$$

其中 η_0 - 节点 i 覆盖其感知区域的百分比; η_i - 节点 i 覆盖其感知区域和其邻居节点感知区域和的百分比。

虽然采用文献[13]的有效覆盖度的概念可以提高网络覆盖率,但仍存在以下问题:(1)有效覆盖度的计算需要节点的位置信息^[11-13],对于粮堆中埋设的无线传感器,其位置的精确计算较为困难;(2)有效覆盖度的计算复杂性较高,特别是在节点存在着很多邻居节点时。

为了解决以上问题,提出了覆盖冗余度的概念,并利用该指标避开对节点位置的直接计算。在本文中,覆盖冗余度是指节点的感知区域与其邻居节

点感知区域的重合程度,它可通过节点间的距离根据概率论的相关理论计算出来,下面介绍覆盖冗余度的估算方法:

设节点 i 与其邻居节点 j 的距离为 d_{ij} ($R_s < d_{ij} \leq 2R_s$),如图2所示。节点 i 的位置为 D_1 ,其感知区域为 B_i ,节点 j 的位置为 D_2 ,其感知区域为 B_j ,则节点 i 被节点 j 所覆盖的题解为:

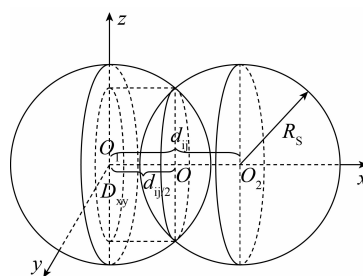


图2 传感器节点相交区域示意图

$$V_{ij} = 2 \iint_{D_{xy}} (\sqrt{R_s^2 - x^2 - y^2} - \frac{d_{ij}}{2}) dx dy \quad (9)$$

上式积分后可得:

$$V_{ij} = 2 \left[\frac{2}{3} \pi (R_s^3 - \frac{d_{ij}^3}{8}) - \frac{\pi d_{ij}}{2} (R_s^2 - \frac{d_{ij}^2}{4}) \right] \quad (10)$$

对于节点 i 感知区域中的任意点被节点 j 覆盖的概率为:

$$P_j = \frac{V_{ij}}{V_i} = \frac{2 \left[\frac{2}{3} \pi (R_s^3 - \frac{d_{ij}^3}{8}) - \frac{\pi d_{ij}}{2} (R_s^2 - \frac{d_{ij}^2}{4}) \right]}{\frac{4}{3} \pi R_s^3} \quad (11)$$

上式中 $\frac{4}{3} \pi R_s^3$ 为节点 i 的感知区域。

那么,节点 i 感知区域中的任意点不被节点 j 覆盖的概率为 $P'_j = 1 - P_j$ 。

设节点 i 有 n 个邻居节点, j 是 i 的感知区域的任意点, k 是 n 中任意节点,即 $k \in n$,且 j 未被 k 覆盖的概率为 P ,则根据节点位置的独立性,应有:

$$P = \prod_{k=1}^n P_k \quad (12)$$

则 j 至少被 n 中的一个节点覆盖的概率 P' 为:

$$P' = 1 - P = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_k) \quad (13)$$

设 V'_i 是 i 的感知区域被 k 覆盖的体积,则

$$E(V'_i) = P \cdot V \quad (14)$$

根据覆盖冗余度 CR 的定义, i 的 CR 期望值为:

$$E(\gamma(i)) = \frac{E(V'_i)}{V_i} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (15)$$

将(11)式代入(15)式,得:

$$E(\gamma(i)) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - 2[\frac{2}{3}\pi(R_s^3 - \frac{d_{ij}^3}{8}) - \frac{\pi d_{ij}}{2}(R_s^2 - \frac{d_{ij}^2}{4})] \frac{4}{3}\pi R_s^3)$$

(16)

由(16)式可知 $\gamma(i) \approx E(\gamma(i))$,表明节点 i 的覆盖冗余度与其邻居节点位置无关,而只与其邻居节点的距离有关,这样就可以通过距离确定节点的 CR,解决了粮堆中传感器定位困难的问题。

3 覆盖路由保持算法的研究

3.1 单跳覆盖保持路由算法

单跳覆盖保持路由算法是一种竞争型分布式算法。在该算法中,每个传感器首先根据自身 CR 设置等待时间,等待时间较少的节点可率先发送成为簇首的广播消息。一旦有节点发送了成为簇首的广播消息,则意味着算法由初始化阶段进入稳定阶段。在稳定阶段,各传感器节点在各自分配的时隙内将数据发送至簇首,再由簇首对接收的数据进行处理、装配并传送至 Sink 节点。经过一次数据采集、传输,系统进入下一次采集、传输。

(1)初始化

初始化算法流程如下:

1. 每个节点发送信标给邻居节点(发射功率:默认;传输协议:Nonpersistent CSMA)

2. 邻居节点根据接收信号强度 RSSI 或到达时间 TOA 估计节点之间的距离

3. 每个节点保存 1 份邻居表 Neighbor_Table(邻居表保存邻居节点的距离、识别号等信息)

4. 每个节点根据与邻居节点的距离计算 CR

5. 每个节点根据计算的 CR 设置自身的等待时间

$T_i = (1 - \gamma(i)) + rand(0, \alpha)$

$(1 - \gamma(i))$ —1 个与 CR 成反比的数值

$rand(0, \alpha)$ —1 个 $[0, \alpha]$ 的随机数

6. CR 大的节点声明簇首,并利用 CSMA 协议发送 CH-ADV 消息

7. 节点 i 在等待时间结束前收到 CH-ADV 消息,退出簇首竞争,并将其保存至集和 $Sch(i)$ 中

8. 节点 i 根据 Neighbor_Table 和 $Sch(i)$ 确定距离自己最近的簇首

9. 节点 i 向距离自己最近的簇首发送应答信息 Join_REQ

10. 节点 i 与距离自己最近的簇首通信以减少能耗

11. 边缘节点直接发送数据至 Sink 节点

说明:① CH-ADV 消息包含了节点的 ID 信息;② Neighbor_Table 存储了节点的 ID 信息,节点间的距离信息;③ 每个节点可以收到多个 CH-ADV 消息;④ 对于边缘节点,其通信范围内没有簇首节点。

(2)稳定阶段

单跳覆盖保持路由算法稳定工作阶段的流程如下:

1. 系统为每个簇分配一个扩频码(基于码片分配方法)

2. 簇首为簇内成员分配 TDMA 时隙

3. 簇首将时序分配表广播发送至簇内成员

4. 簇内成员将采集的数据在分配的 TDMA 时隙内发送至簇首

5. 簇首对各成员发送的数据进行融合处理

6. 簇首将融合处理后的数据发送至 Sink 节点

7. 数据传输完成后,返回初始化阶段

说明:① 簇首采用文献[12]提出的 TDMA 协议为簇内成员分配时隙(即 TDMA 时隙);② 网络中的每个簇采用直接序列扩频(DSSS)减少干扰;③ 成员向簇首传输数据时采用相同的扩频码。

上述算法在经过一轮数据传输后,若网络的拓扑结构和每个节点的 CR 都没有发生变化,则簇首的选取也不发生变化。设置能量阈值为 E_{th} ,则对于节点 i ,若 $E(i) \leq E_{th}$,则该节点可被标记为已死亡,否则为存活节点。当节点死亡时,则会发送消息给邻居节点,更新邻居节点的 Neighbor_Table。当新一轮的采集工作开始时,每个传感器节点都会扫描它的 Neighbor_Table,判断表中是否存在死亡节点,若无死亡节点,则簇首的选取仍沿用上一轮的结果。

3.2 多跳覆盖保持路由算法

为了进一步提高网络覆盖率,解决单跳覆盖保持路由算法簇首能量不均衡的问题,本文在单跳算法的基础上又提出了一种多跳算法。该算法与单跳算法的不同之处在于:经簇首融合处理后的信息不再以单跳方式直接发送至 Sink 节点,而是多跳路由至 Sink 节点。算法其他过程同单跳算法。

4 仿真与分析

为了验证算法的有效性,以国内常见的高大平房仓为仿真场景,对无线传感器网络的几个重要指标进行了仿真。仿真模型设计如下:仓容:60 m×21 m×9 m;装粮高度:6 m。温度传感器布置为 4 层,层间隔为 1.5m。每层布置传感器 13 行×9 列,共布置传感器 13×9×4=468(个)。Sink 节点坐标为(7,5,2),即 Sink 节点位于粮堆第 2 层的中间位置。将整个粮堆划分为 468 个大小相等的网格,每个传感器位于网格的中间位置。仿真实验中其他参数的设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名称	符号	设置值
节点感知半径	R_s	5 m
节点初始能量	E_{init}	5 J
数据传输速率	R_b	10 kbps
数据接收功率门限	P_t	3 mW
数据包长度	B_L	512 bit
载波频率	f	25 kHz
节点能量阈值	E_{th}	10^{-3} J
能量传输因子	λ	1.5

4.1 网络剩余平均能量的对比分析

网络剩余平均能量定义为网络剩余总能量与网络节点数之比。图3是3种算法的网络剩余平均能量对比图。可以看出,多跳算法的网络剩余平均能量较高,这是因为簇首间谍多跳通信降低了信息传输能耗。另外,本文的单跳算法也比传统的 LEACH - Coverage - U 算法有较高的平均剩余能量,表明单跳算法有较低的能耗,这是因为单跳算法簇首间距避开了 R_{default} 限制,能够使簇首更均匀地分布在检测区,而传统算法可能会使簇首集中分布,不仅产生较多边缘节点,而且会使边缘节点与 Sink 节点通信距离增加,从而使能耗增加。

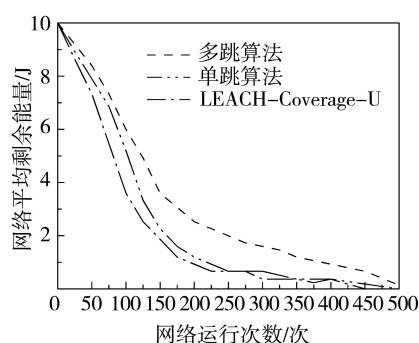


图3 3种算法的网络平均剩余能量

4.2 网络存活节点数的对比分析

图4是3种算法的网络存活节点数仿真结果对比图。由仿真结果可以看出,在网络运行50次前, LEACH - Coverage - U 算法的网络节点存活数对于本文的2种算法,而网络运行50~80次之间, LEACH - Coverage - U 算法的存活节点数多于本文的单跳算法而大大少于本文的多跳算法。这是因为 LEACH - Coverage - U 算法的簇首选择具有随机性,使网络能耗分配较为均匀。但在网络运行50次后,多跳算法的能耗大大低于 LEACH - Coverage - U 算法,表明本文的多跳算法可以降低簇首能耗,

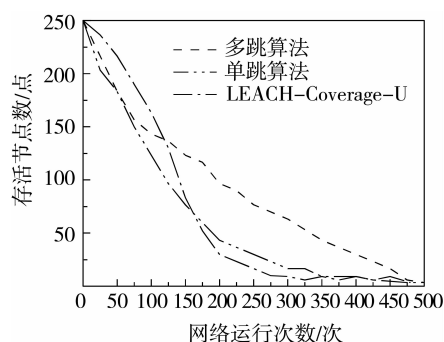


图4 30种算法的网络存活节点数

增加网络的存活节点数。网络运行80次后, LEACH - Coverage - U 算法的网络存活节点数与本文的单跳算法基本持平。需要注意的是,尽管在网络运行初期 LEACH - Coverage - U 算法保持的存活节点数较多,但这并不表明该算法就有较高的网络覆盖率。

4.3 3种算法的网络簇首数目对比分析

如图5所示为3种算法的网络簇首数目变化仿真趋势图。由图5可以看出,本文的算法簇首数目的变化比较平缓,而 LEACH - Coverage - U 则变化比较剧烈。这是因为,对于本文算法,在每次网络运行后,网络中可能没有死亡节点,因此网络节点覆盖冗余度和网络拓扑结构也不会发生变化,网络将沿用上一轮的簇首和路由,因此可以使簇首数目相对保持平稳。

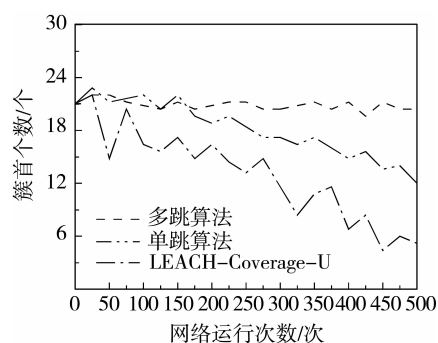


图5 3种算法的网络簇首数目

4.4 3种算法的网络覆盖率仿真分析

图6为3种算法的网络覆盖率随网络运行次数变化的仿真结果。由图7可以看出,多跳算法比单跳算法和 LEACH - Coverage - U 算法有较高的网络覆盖率。由前面网络存活节点数的对比分析图中可以看到,网络运行第50次时, LEACH - Coverage - U 算法与多跳算法存活节点数相同,但由图7可以看出,此时在网络覆盖率上多跳算法比 LEACH - Coverage - U 算法高出10%,即使是网络存活节点数较少的单跳算法也比 LEACH - Coverage - U 高出5%左右。在存活节点数相同的情况下,单跳算法比 LEACH - Coverage - U 网络覆盖率高近20%左右。在网络运行第80次时,多跳算法不仅有较多的节点存活数,而且有比 LEACH - Coverage - U 算法高得多的网络覆盖率。假设我们期望的网络覆盖率为60%左右,则满足这一指标网络可运行的次数分别为85、110、185次。这说明,相对与 LEACH - Coverage - U 算法,单跳算法和多跳算法

分别将网络声明周期延长了25次和100次。

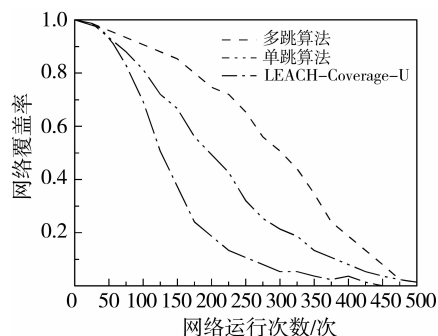


图6 3种算法的网络覆盖率达仿真分析

4.5 3种算法的死亡节点数仿真分析

图7的仿真图比较了3种算法随死亡节点数网络覆盖率变化趋势。可以看出,当死亡节点数相同时,多跳算法的网络覆盖率最高,其次是单跳算法,而LEACH-Convergence-U算法最低。这是因为,本文的算法得到的簇首都是CR较高的节点,因而网络覆盖率更高,而多跳算法比单跳算法网络覆盖率高也是因为下一跳节点的确定也是由CR决定的。

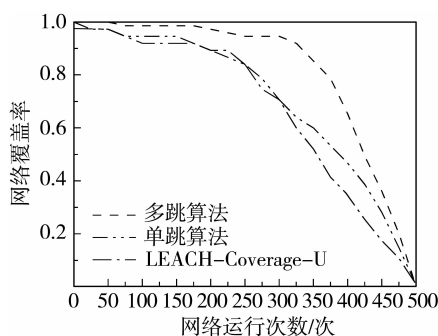


图7 死亡节点数对网络覆盖率的影响仿真图

5 结束语

在无线传感器网络中,其服务质量的好坏主要取决于网络的覆盖保持率。本文提出了一种覆盖保持路由算法,并重新定义了节点的覆盖冗余度(CR)。在该算法中,节点根据覆盖冗余度设置自己的等待时间,覆盖冗余度越高的节点等待时间越短。等待时间最短的节点首先发送成为“簇首”的消息并成为“簇首”。“簇首”将数据单跳传送至Sink节点,期间采用了TDMA/DSSS技术。由于“簇首”较高的能耗,为避免“簇首”过早死亡降低网络覆盖率,在单跳算法的基础上还提出了一种覆盖保持路

由的多跳算法,该算法首先对“簇首”采集的各节点数据进行融合处理,然后采用多跳路由传送至Sink节点,仿真实验表明,与传统的LEACH-Coverage-U算法相比,该算法能够有效地降低“簇首”能耗,提高网络覆盖率,从而改善粮堆中无线传感器网络的覆盖质量。

参考文献:

- [1] 黄艳,梁韦华,于海斌. 一种高效覆盖的水下传感器网络部署策略[J]. 电子与信息学, 2009,31(5):1035-1039.
- [2] 孙桂芝,桑恩方. 一种能量高效的水下传感器网络路由协议[J]. 声学技术, 2007, 26(1):134-136.
- [3] 于洋,相敬林,张效民. 水下传感器网络节点设计及实现[J]. 西北工业大学学报, 2010,28(2):207-210.
- [4] Domingo M C. A distributed energy-aware routing protocol for underwater wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2011,57(4):607-627.
- [5] 彭舰,洪昌建,刘唐,张云勇. 基于分层的水下传感器网络路由策略[J]. 通信学报, 2014, 35(6):25-31.
- [6] Tung Kei-Chen, Lu Jonathan Chun-Hsien, et al. A distributed sleep scheduling algorithm with range adjustment for wireless sensor networks[J]. Computational Collective Intelligence, Technologies and Applications, 2010,6423:387-397.
- [7] 蒋鹏,阮斌峰,谭劼. 全覆盖需求的水下传感器网络覆盖保持算法[J]. 传感技术学报, 2012,25(11):1591-1598.
- [8] Shen Fengyang, Sun Min-te, Liu Chunlei, et al. Coverage-aware sleep scheduling for cluster-based sensor networks[A]. Proceedings of 2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. Budapest: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2009. 1-6.
- [9] Shu Tao, Krunz Marwan, Vr udhula Sarma. Power balanced coverage-time optimization for clustered wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing [C]. New York Urbana-Champaign, IL, United States: Association for Computing Machinery, 2005. 111-120.
- [10] 黄俊杰,孙力娟,王汝传,黄海平. 三维水下传感器网络覆盖优化算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013,33(5):69-74.
- [11] 胡钢,谢冬梅,吴元忠. 无线传感器网络路由协议LEACH的研究与改进[J]. 传感技术学报, 2007,20(6):1391-1396.
- [12] 李芳芳,王靖. 一种基于LEACH协议的无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报, 2012,25(10):1445-1451.
- [13] Tsai Yun-Ren. Coverage-preserving routing protocols for randomly distributed wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(4):1240-1245. ㉞