

一种 WSN 分簇路由协议研究和实现

侯彦军 谭国真

(大连理工大学计算机科学与技术学院 大连 116024)

摘要 近年来,我国兴建了众多基础设施,基础设施的健康监测直接关系到人们的生命和财产安全,也关系着基础设施的正常运行,因此研究面向基础设施健康监测的无线传感器网络分簇路由协议至关重要。目前已经有多个成熟平面路由协议和分层路由协议,但它们都存在传感器节点能量有限、结构简单等缺陷。为了延长网络寿命、提高信息传输的可靠性,就需要对现有的路由协议做一些改进,以适应大规模的无线传感器网络。首先分析了设计无线传感器网络路由协议时面临的挑战,分类总结了典型的无线传感器网络路由协议及其优缺点;然后在详细分析 LEACH 协议的基础上,对 LEACH 协议在簇头节点选择和簇间路由方面进行改进,提出了面向基础设施健康监测的无线传感器网络分簇路由协议。将分簇优化算法和簇间多跳路由算法相结合,组成面向基础设施健康监测的无线传感器网络分簇路由协议。实验仿真表明,该路由协议有效地均衡了网络的能耗,推迟了多数节点的死亡,延长了网络的有效寿命。

关键词 基础设施,健康监测,无线传感器网络,LEACH 协议,路由协议,智能优化算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.032

Research on Clustering Routing Protocol in Wireless Sensor Networks

HOU Yan-jun TAN Guo-zhen

(Department of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract Wireless sensor networks (WSN) are comprised of a large number of minuscule sensors by self-organization and self-adaption in the monitoring area, and the sensors have a certain ability of collecting data, processing data and communicating. So the WSN are widely used in infrastructure health monitoring. We analyzed the challenges in the routing protocol design of WSN, and summarized typical routing protocols of WSN, even the advantage and shortcoming of these protocols. Then, on the base of specifying the LEACH protocol, a clustering routing protocol in wireless sensor networks for infrastructure health monitoring was proposed against the shortcoming of LEACH protocol in head node selection and routing between clusters. The clustering algorithm and inter-cluster routing algorithm were combined together to make up the clustering routing protocol for infrastructure health monitoring in WSN. The result of experiment simulation shows that the routing protocol postpones the death of major nodes, balances the energy consumption of the network and prolongs the effective life-time of the network.

Keywords Infrastructure, Health monitoring, Wireless sensor networks, LEACH protocol, Routing protocol, Intelligent optimization algorithms

随着传感器技术、无线通信技术、微电子技术、嵌入式计算技术以及分布式信息处理技术的快速发展,一个极具挑战但充满机遇的新的研究领域——无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)正迅速发展并逐渐走向成熟^[1]。无线传感器网络的出现引起了全世界范围的广泛关注,其应用已经由军事国防领域扩展到基础设施健康监测领域,使人们可以在任何时间、任何地点以及任何环境都能够获取到大量的可靠信息。

信息路由问题是无线传感器网络研究中一个很基本、很重要的问题。由于单个传感器的信息收集、传输能力是有限的,为了让无线传感器网络能够完成信息的传递,必须设计一种行之有效的路由协议^[2]。目前已经有多个成熟平面路由协议和分层路由协议,但是考虑到传感器节点能量有限、结构简

单等特点,延长网络寿命、提高信息传输的可靠性成为设计面向基础设施健康监测的无线传感器网络路由协议关注的重点。在节点数量少的情况下,这些路由协议可以较好地完成任务;但是在大规模的无线传感器网络中,就需要对现有的路由协议做一些改进,以适应大规模的无线传感器网络,本文正是基于这一背景展开的。

1 面向基础设施健康监测的 WSN 分簇路由协议的概述

1.1 面向基础设施健康监测的无线传感器网络路由协议设计面临的挑战

作为无线传感器网络研究的关键技术之一,面向基础设施健康监测的无线传感器网络路由协议的作用是在网络资源

合理分配的情况下将监测到的基础设施健康数据传送给用户。面向基础设施健康监测的无线传感器网络路由协议设计时面临如下挑战：

(1)能量受限。由于传感器节点的能量是由电池提供的，因此能量受到限制，通常传感器节点的能量补充非常困难。当传感器节点的能量低于一个阈值时，节点就不会正常工作，这将会影响到整个网络的性能。因此，在设计路由协议时需要充分考虑节能以尽可能地延长节点寿命，进而延长网络寿命并确保网络的全局性能。

(2)节点定位。传感器节点位置的定位是另一项挑战，许多的路由协议中假定传感器的位置已经通过某些技术获知。

(3)硬件资源受限^[3]。传感器节点不仅受能量的限制，存储能力和计算能力同样受到限制，因此节点功能十分有限，这给路由协议的设计和软件开发带来了巨大的挑战，在设计的过程中需要充分考虑如何利用有限的资源实现高效通信。

(4)大量节点的随机分布。传感器节点在网络中的分布取决于应用的不同，部署的不同方式将最终影响路由协议的性能。在面向基础设施健康监测的应用中，传感器节点被随机播撒在指定区域，或者大量播撒在恶劣、难以接近的地区。在这种情况下，使用优化的分簇算法可以在保证网络连通性的前提下，提高网络运行的效率。

(5)网络特征和不可靠的环境。传感器网络的环境经常动态改变，由传感器节点间通信链路所构成的网络拓扑，会随着节点的加入、损坏、移动、死亡和节点能量损耗等情况，频繁地发生变化。另外，传感器节点间的链路是通过无线信号相连的，与无线信道相关的一些问题(如衰落、高误码率等)同样会影响到传感器网络的运行。因此，建立路由路径时应考虑有限的资源和动态的网络拓扑结构，并在网络覆盖范围和连接方面提高网络对于满足具体应用需求的能力。

(6)数据融合。传感器节点会采集大量的数据，节点需要融合来自多个节点的相似的数据包以减少数据量。在很多路由协议中，数据融合技术用来优化数据的传输，减少网络中传输的数据量，实现高效通信^[4]。

(7)可扩展。路由协议应能适应网络规模的变化，当有多个新的节点加入或者多个节点死亡时，性能不应出现明显下降。另外传感器节点在节点能量、处理能力、通信能力和感知能力上都会有所不同，这样就导致节点间的通信链路不对称；同时在设计路由协议时，两个节点间可能只存在单向的通信的问题也要引起重视^[5]。

1.2 面向基础设施健康监测的无线传感器网络的典型路由协议

目前面向基础设施健康监测的无线传感器网络典型路由协议主要有以下两种(各路由协议的性能比较见表1)。

表1 典型路由协议的性能比较

路由协议	拓扑结构	节能性	网络寿命	QoS	鲁棒性	数据融合	扩展性
Flooding	平面	无	短	否	不好	无	差
Gossiping	平面	有	一般	否	一般	无	一般
SPIN	平面	有	长	否	好	有	一般
DD	平面	有	长	是	好	有	一般
LEACH	层次	一般	长	否	好	有	好
TEEN	层次	好	长	否	好	有	好
PEGASIS	层次	一般	长	否	好	有	一般

(1)平面路由协议

平面路由协议中各传感器节点地位相同，不存在任何特殊的节点，区域内的节点在路由协议里完全可以相互代替，也不存在分层等一些繁琐的结构。下面重点介绍泛洪(Flooding)协议。

泛洪协议规定，每个节点接收来自其他节点的信息，并以广播的形式发送给其他邻居节点，这个过程一直重复直到该分组到达汇聚节点，或者该分组的生命周期到期。泛洪路由协议实现简单，不需要为保持网络拓扑信息和实现复杂的路由发现算法而消耗能量，而且网络中源节点和目的节点只要有路径存在，数据就能进行正确的路由选择，路由可靠性很高^[6]。但该协议也存在诸多不足：

①它容易引起信息的“内爆”(Implosion)，即出现一个节点重复接收到相同的数据，如图1(a)所示。

②出现“重叠”(Overlap)现象，即处于同一监测区域内的两个相邻传感器节点对同一个事件作出反应，二者采集的数据性质相同，数值相近，如图1(b)所示。

③盲目使用网络资源，即不考虑各节点能量可用状况因而无法作出相应的自适应路由选择；存在资源极度浪费，即一次数据传输过程中，由源节点形成的广播域中所有的节点都进行接收和发送。

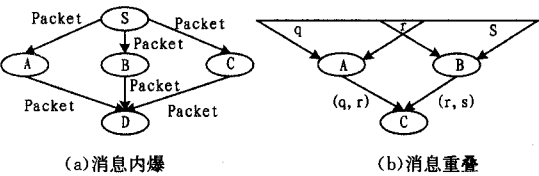


图1 泛洪路由的缺点

(2)层次路由协议

在层次路由协议中，节点按照不同的分簇算法分成相应的簇，每个簇由一个簇首和多个簇成员构成。下面重点介绍LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)协议。

LEACH中节点轮流担任簇头，让各个节点平均分担能量消耗，采用数据融合减少网络通信量，确实延长了网络的生存时间。但是协议认为所有簇头都能与Sink节点直接通信，簇头与Sink节点的距离只能为一跳范围之内，这样就限制了网络的规模，同时协议采用随机成簇的方式，虽然降低了算法的复杂度，但可能导致所有簇头都聚集在网络的一角，此时大量节点都需与距离较远的簇头通信，造成了能量的浪费^[7]。

2 面向基础设施健康监测的WSN分簇路由协议的设计

2.1 基本蚁群算法的数学模型

20世纪90年代，意大利学者M. Dorigo、V. Maniezzo、A. Colomni等受到生物进化机制的启发，通过模拟自然界蚂蚁搜索路径的行为，提出一种新型的模拟进化算法——蚁群算法，蚁群算法引入正反馈并行机制，拥有很好的分布式计算机制、较好的鲁棒性和与其它方法易于结合等优点。

根据不同的信息素更新规则，Dorigo M给出了Ant-Cycle、Ant-Quantity以及Ant-Density 3种基本的蚁群算法模型。这3种模型的区别在于求解方法不相同。

在模型Ant-Cycle中，

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过}(i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

其中, Q 为一个表示信息素强度的常量, 算法的收敛速度受其一定程度的影响; L_k 表示在当前循环中第 k 只蚂蚁走过的总的路径长度。

在模型 Ant-Quantity 中,

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间经过}(i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

在模型 Ant-Density 中,

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在 } t \text{ 和 } t+1 \text{ 之间经过}(i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

这 3 个模型的区别在于: 式(2)和式(3)中使用的是局部信息, 蚂蚁每走完一步后都对路径上的信息素进行更新; 而式(1)中利用的是全局信息, 蚂蚁走完一个循环后对所有路径上的信息素进行更新, 在求解 TSP 时性能较好, 因此蚁群算法的基本模型通常选用式(1), 即 Ant-Cycle 模型。

2.2 基于改进蚁群算法的簇间多跳路由

本文所提出的基于改进蚁群算法的簇间路由算法利用改进遗传算法的分簇结果, 使用下面基于改进蚁群算法建立簇间的多跳路由, 将簇头节点间路由的数据发送到基站。

2.2.1 蚁群算法在无线传感器网络中的改进

本文在无线传感器网络簇间路由选择过程中, 对基本蚁群算法进行改进并依据 Q-Learning 算法中的代理策略对蚁群算法的收敛性进行优化。在基本蚁群算法中, 很容易出现两个问题: 陷入局部最优解和搜索到全局最优解的时间过长。为了解决这两个问题, 对基本蚁群算法的改进如下:

(1) 簇头节点 i 在选择它的下一跳簇头节点 j 时, 不仅要考虑与 j 的距离, 还要考虑 j 的剩余能量与传输到 j 所消耗的能量, 这时状态转移概率变为:

$$P_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{[\tau(i, j)]^\alpha \times [\theta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in J_k(i)} [\tau(i, s)]^\alpha \times [\theta_{is}(t)]^\beta}, & j \in J_k(t) \\ 0, & j \notin J_k(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_{ij} = \frac{E_{i_remain} + E_{j_remain} - E_{ij_consume}}{\sigma(i, j)}, j \in J_k(t) \quad (5)$$

其中, θ 表示第 k 只蚂蚁寻找下一跳簇头节点的期望程度, E_{i_remain} 与 E_{j_remain} 分别为当前簇头节点 i 与下一跳簇头节点 j 的剩余能量, $E_{ij_consume}$ 为从簇头节点 i 传输到簇头节点 j 所消耗的能量, 在实验中认为基站为目的节点, 将基站也看做一个簇头节点, 以加速蚂蚁向基站靠拢, 并保护基站附近的簇头节点不因为过多地参与数据转发而太早耗能量。 $\sigma(i, j)$ 为两个簇头节点间的距离。 $J_k(t)$ 是蚂蚁 k 还未访问过的簇头节点的集合, 与簇头节点的剩余能量和簇头节点间的距离有关。节点间距离越近, 节点越容易被选择, 并没有考虑网络中簇头节点与基站的相对位置, 这样容易导致最优解的退化。

针对上面出现的问题我们对其进行改进, 引入一个与簇头节点和基站的相对位置有关的平衡因子 γ , 该因子的引入使蚂蚁在选择下一跳时, 充分利用了无线传感器网络的信息。对式(5)修改如下:

$$\theta_{ij} = \gamma \times \frac{E_{i_remain} + E_{j_remain} - E_{ij_consume}}{\sigma(i, j)}, j \in J_k(t) \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{[\sigma(i, BS) + \sigma(i, j)]^2 - \sigma^2(j, BS)}{4\sigma(i, BS) \times \sigma(i, j)} \quad (7)$$

γ 为 i, j, BS 组成的三角形中角 i 的余弦值加 1 后除 2。状态转移概率公式引入 θ_k 之后, 蚁群算法的启发因子不只是两簇头节点间的距离, 还有两节点剩余能量因子和通信能耗因子, 说明蚂蚁在寻找最优路径时受到了节点能量的限制。蚁群算法在收敛于最优解的同时, 还平衡了节点的能耗, 避免了蚂蚁在完全收敛于最优解时造成拥塞, 并且使得能耗相对均衡, 最大限度地延长了无线传感器网络的生命周期。

(2) 在蚁群算法中, 信息素的挥发速度与信息素的浓度有关, 浓度越高挥发越快。

为了防止某些路径上信息素浓度无限增长或者很快变为 0, 改进的蚁群算法引入信息素的局部更新规则, 避免了算法陷入局部最优解。蚂蚁从簇头节点 i 移动到簇头节点 j 后, 应用式(8)给出的局部更新规则更新路径 (i, j) 上的信息素。

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \times \tau(i, j) + \rho \times \Delta\tau(i, j) \quad (8)$$

式中, ρ 为信息素挥发参数, 在 $(0, 1)$ 间取值。

(3) 蚂蚁选择一跳路径为其路由后, 在该路径上释放信息素进而增加该路径信息素浓度, 引导后来的蚂蚁。这个过程与 Q-learning 算法的收益值获取过程非常相似。因此, 可以将蚁群算法中信息素的更新抽象成 Q-learning 算法的代理收益值的获取过程: 将蚂蚁选择下一跳抽象成代理对行动的选择; 将蚂蚁移动到下一跳簇头节点抽象为代理执行了某个行动后转移至下个状态; 将蚂蚁对通过的路径上的信息素的更新抽象为代理在执行某个行动后获得的收益。将 3 个抽象步骤转化为具体公式, 如下:

$$\tau(i, j) = (1 - \rho) \times \tau(i, j) + \rho \times [\Delta\tau_{ij}^k + \lambda \times \tau_{max}(j, c)] \quad (9)$$

其中, λ 为 Q-learning 算法的学习因子, $c \in J_k(t)$, $J_k(i)$ 为没有出现在蚂蚁 k 的 tabu 表中的节点 i 的邻居节点; $\Delta\tau_{ij}^k$ 的计算公式如下:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \frac{Q_{global}}{(C - \frac{E_{k_min}}{E_{k_avg}}) \times L_k} \quad (10)$$

式中, Q_{global} 为一个设定的常量, C 为普通节点初始化时所具有的能量水平, E_{k_min} 为蚂蚁 k 经过路径上的节点的最小能量, E_{k_avg} 为蚂蚁 k 经过路径上的所有节点的平均能量。 L_k 为蚂蚁 k 从源节点到目的节点所走过的路径长度。从式(7)中可以看出, 在蚂蚁 k 经过的路径上如果某个传感器节点剩余能量很小, 最后该路径上信息素的更新会受负面影响; 相反, 如果路径上的所有传感器节点中, 最小的剩余能量较大, 该路径上的信息素更新量相对较大, 这样有助于平衡网络能耗, 保护能耗较大的节点。

2.2.2 基于改进蚁群算法的簇间路由设计

簇间路由由路由建立和数据传输两个阶段组成, 在基站的虚拟拓扑中运行算法, 寻找虚拟簇头节点与基站之间的最优路径。基站找到最优路径后, 将最优路径信息广播给无线传感器网络中的簇头节点, 建立簇间路由^[8]。每个簇头节点都会维护一个簇头节点路由表, 如表 2 所列。

表 2 簇头节点路由表

簇头序号	簇头横坐标	簇头纵坐标	剩余能量	到下一跳簇头的距离	到基站的距离	信息素浓度
ID	x	y	E _{now}	Dist_CH	Dist_BS	τ_{ij}

下面介绍寻找最优路径的详细过程,在蚁群算法中有前向蚂蚁和后向蚂蚁两种蚂蚁,蚂蚁的数据模型如图 2 所示。

Ant ID	Ant Type	Source ID	Tabu list	Pheromone	Path(k)
--------	----------	-----------	-----------	-----------	---------

图 2 蚂蚁的数据模型

其中, Ant ID 表示蚂蚁编号; Ant Type 表示蚂蚁类型,“F”为前向蚂蚁,“B”为后向蚂蚁; Source ID 表示蚂蚁出发的簇头节点 ID; Tabu list 表示蚂蚁的禁忌表,每经过一个中间节点就将该节点的 ID 存入其中; Pheromone 表示信息素量更新值,只在后向蚂蚁中有效; $Path(k)$ 为蚂蚁 k 走过的路径上的信息,包括经过节点的总能量、最小能量和节点数。前向蚂蚁选路根据状态转移规则选择下一跳,并更新该蚂蚁走过的路径信息,下面给出前向蚂蚁算法设计:

```

//forward and k move from a source node  $src^k$  to BS
Forward_ant(k,  $src^k$ , d)
Begin
  Initialization:
   $\tau(i,j)=\tau_0$ 
   $i=src^k$ 
   $tabu_k=\{\}$  //which includes the nodes that the ant k has been visited
  Push( $tabu_k, i$ )
   $L_k=0$ 
   $p^k=\{\}$  //which includes the sequence of  $\langle E_{k\_min}, E_{k\_total}, count \rangle$ 
  while  $i \neq BS$ 
    compute  $P_k(i,j)$  base on formula 1,3
    Select j based on probability
    If  $E_j < E_{min}$  //get the minimum energy node
       $E_{min}=E_j$ 
    End if
     $E_{total}=E_{total}+E_j$  //get the total energy of the node on the path
    Count++
     $L_k=L_k+length(i,j)$ 
    Next $i=j$ 
    move to j
  end while
end

```

图 3 前向蚂蚁运动时的操作

以上伪代码给出在一次迭代开始时,一只前向蚂蚁从源节点 i 寻找通向基站路径的过程。 $tabu_k$ 为记录了蚂蚁 k 已经访问过的簇头节点的 tabu 表,禁忌表有效防止了蚂蚁因为反复选择已经走过的节点而造成路由的环回; p^k 为记录蚂蚁从源簇头节点到达基站所经过的路径上的节点的最小能量、节点的总能量和节点的总数, p^k 的设计是为了计算式(9)的值,即蚂蚁 k 在其所经过路径上信息素含量的更新值。

后向蚂蚁更新路径上的信息素算法设计如图 4 所示。

```

//backward_ant k move from BS to  $src^k$ 
Backward_ant(k, pheromone, BS,  $src^k$ )
i=BS
node d compute global updating volume using the formula 6
//the backward ant updating the path that the forward ant k has visited with
clear  $p^k$  and push( $p^k$ ,)
begin
  while  $i \neq src^k$ 
     $j=pop(tabu_k)$ 
    move to j
    update the pheromone of path(i,j) using
     $i=j$ 
  end while
end

```

图 4 后向蚂蚁运动时的操作

前向蚂蚁 k 到达基站 BS 后,基站从前向蚂蚁的记忆存储区内获取 p^k 所包含的 E_{k_min} 、 E_{k_total} 和 $count$ 。然后根据 E_{k_total} 和 $count$ 求得蚂蚁 k 从出发节点到基站所经过的路径上传感器节点剩余能量的均值 E_{k_avg} 。最后根据式(9)求得蚂蚁 k 在当前迭代中信息素的更新量。当完成计算后,前向蚂蚁 k 被基站 BS 转变成后向蚂蚁 k ,使后向蚂蚁从基站出发,沿着与前向蚂蚁搜索路径的相反方向向源节点移动,并更新路径上

的信息素含量。蚂蚁 k 每到达一个节点 j 时都使用式(8)更新节点 j 维护的一张包含它与邻居簇头节点之间路径的信息素含量表。蚂蚁 k 在更新完成后继续向下一个节点移动,直到它回到源节点后结束本次迭代。

2.2.3 基于改进蚁群算法的簇间路由算法的流程

下面给出基于改进蚁群算法的簇间多跳路由算法的建立流程:

Step1 初始化参数。设置最大循环次数 Nc_max ,蚂蚁数 m ,所有蚂蚁的禁忌表 $tabu$ 为空,记忆存储区内 p^k 为空。各簇头节点之间路径的信息素初始值为 τ_0 。令循环次数 $Nc=0$,初始蚂蚁个数 $k=1$,簇头节点数为 K 。

Step2 将 m 只蚂蚁置于各簇头节点上,并将该簇头节点 ID 加入相应蚂蚁的禁忌表。

Step3 循环次数 $Nc=Nc+1$ 。

Step4 蚂蚁个数 $k=k+1$ 。

Step5 簇头节点 CH_i 上的蚂蚁 k 根据状态转移规则式(4)和式(6)计算出的状态转移概率,选择向簇头节点 CH_j 移动。

Step6 蚂蚁 k 移动到新的簇头节点 CH_j ,并将该簇头节点加入自己的禁忌表,更新记忆存储区的相关信息。

Step7 如果蚂蚁 k 的下一跳为基站,继续执行;否则跳到 Step5。

Step8 记录蚂蚁 k 从源簇头节点到基站所经过的簇头节点以及路径长度,根据式(9)和记忆存储区中的数据更新该路径的信息素(利用后向蚂蚁)。如果 $k>m$,继续执行;否则跳到 Step4。

Step9 在所有蚂蚁完成寻路后,求出各簇头节点到基站的最优路径,根据式(9)和相应的记忆存储区中的数据更新这些最优路径上的信息素。

Step10 如果循环次数 $Nc>Nc_max$,则输出从起始簇头节点 CH_i 到基站的最优路径;否则,清空禁忌表并跳转到 Step3。

2.3 面向基础设施健康监测的 WSN 分簇路由协议建立流程

结合基于 IGA 的分簇协议流程和上面给出的基于改进蚁群算法的簇间多跳路由算法的流程,在此给出面向基础设施健康监测的 WSN 分簇路由协议的工作流程:

Step1 采用 LEACH 算法的策略进行一轮信息的收集,使基站拥有网络中节点的位置和能量信息。

Step2 使用基于 IGA 的簇头节点的优化选举策略,选举出本轮簇头。

Step3 基站将选举出的簇头信息发布到传感器网络中,网络中的节点根据广播的簇头消息自组织成簇。

Step4 簇内采用与 LEACH 协议簇内通信方式相同的通信方式。

Step5 分簇建立后,根据本节提出的基于改进蚁群算法的簇间路由算法建立簇头节点之间的路由。

Step6 簇头节点间的路由建立完成后,进入稳定阶段。在稳定阶段簇内节点将监测到的数据发送给簇头节点,簇头节点对接收到的数据进行数据融合后根据 Step5 建立的路由发送到基站。在稳定节点结束前,簇头节点收集所有簇内节点的节点信息发送给基站,然后基站更新网络中节点的信息,进入下一轮的簇头选择直到耗尽网络能量。

3 仿真实验

(1) 实验 1

在 $200 \times 200 \text{m}^2$ 的实验场景范围内随机部署 100 个节点,将基站位置设在 (100, 0) 处。对 IOACRP、IACORP、IGARP 和 LEACH 协议进行仿真,分别记录当网络中 1% (第一个节点)、10%、20%、...、100% 的节点死亡时,应用 IOACRP、IACORP、IGARP 和 LEACH 协议的无线传感器网络运行的轮数。并记录当网络中节点数目增加时,网络中出现首个死亡节点的轮数。

在无线传感器网络中,我们认为当有 80% 的节点死亡后网络就会失效。从图 5 中可以看出,IOACRP 相比于 LEACH 协议,将网络的有效时间延长了 700 多轮,相比于 IGARP 和 IACORP 也延长了 300 多轮。

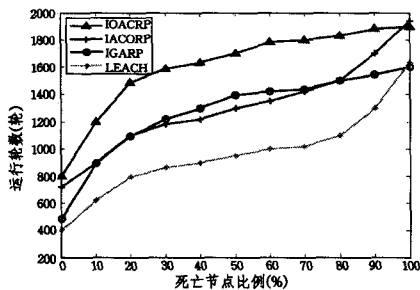


图 5 节点死亡比例不同时协议运行的轮数

图 6 反映了网络中节点数量与网络出现第一个死亡节点的关系。可以看出,当节点数量增加时,LEACH 协议并不能使第一个节点死亡的时间明显推迟,这是因为 LEACH 协议没有考虑能量均衡的问题;IGA 受限于与基站之间一跳通信,虽然考虑了网络中能量的均衡问题,但是仍存在在网络运行中某个簇头节点由于能量消耗过大而死亡的危险;IACORP 虽然改善了簇头节点与基站之间一跳通信的情况,但是其簇头选择具有随机性,当某些能量低的节点当选为簇头时,还是会加剧其能量消耗;IOACRP 在簇头选择时充分考虑了节点剩余能量和簇内、簇间结构,使网络中各个节点能量消耗相对均衡。簇间路由时,综合考虑簇头节点间、簇头节点与基站的位置和簇头节点的剩余能量 3 个因素,使得簇头节点的能耗更均衡。实验证明,IOACRP 的性能更优。

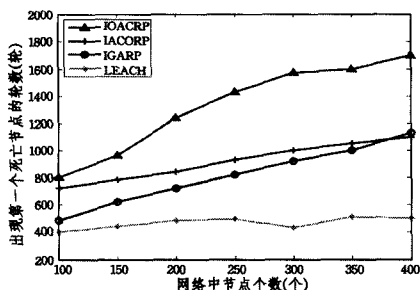


图 6 节点数不同时出现第一个死亡节点的轮数

(2) 实验 2

在本实验仿真中,将考虑基站位置对传感器网络寿命的影响。在 $200 \times 200 \text{m}^2$ 的实验场景范围内随机部署 100 个节点,基站横坐标不变,纵坐标以 50m 的速度增长,分别为 0、50、100、150、200、250、300、350、400,比较 IOACRP、IGARP、IACORP 和 LEACH 协议在这 9 种基站位置的情况下,网络中第一个节点死亡的轮数以及第 80 个节点死亡的轮数(即网

络的有效寿命)。仿真结果如图 7 所示。

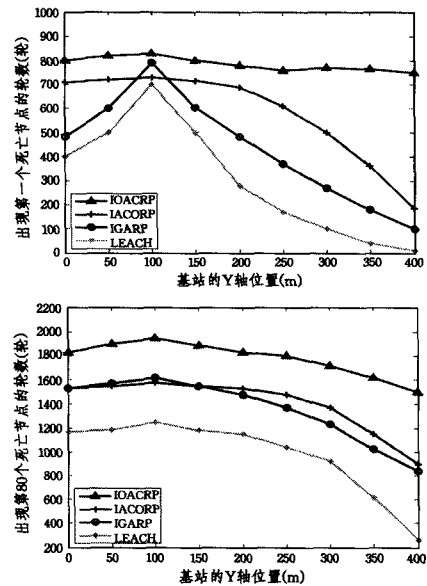


图 7 基站位置不同时第一个和第 80 个死亡节点出现的轮数

由图 7 可知,基站位置离网络中心越远,IOACRP 相比于其他 3 种协议在均衡网络负载和延长网络有效使用寿命方面的优势越明显,并且其性能受基站位置的影响相对较小。在实际应用中,基站位置往往距离无线传感器网络较远,因此 IOACRP 更具有实际价值。

结束语 利用无线传感器网络在任何时间、任何环境条件下都可以获得大量的可靠数据^[9]。低功耗、低成本、自组织、高容错、多功能等特性使无线传感器网络在恶劣环境状态的基础设施健康监测中具有传统 Ad-hoc 网络所不具备的优势。

在面向基础设施健康监测的无线传感器网络的研究中,无线传感器网络路由协议的研究一直是研究的核心内容之一。由于无线传感器能量较少且通常无法补充,无线传感器网络路由协议的主要目标是降低网络能耗,延长网络的有效使用寿命。基于此,本文将分簇优化算法和簇间多跳路由算法组成面向基础设施健康监测的分簇路由协议 IOACRP,使用了 MATLAB 对该协议进行仿真实验。实验结果表明,IOACRP 延长了网络的有效使用寿命。当网络中的节点数增加以及当基站远离网络中心时,IOACRP 都能均衡网络负载,推迟多数节点的死亡,延长网络的有效寿命。

参考文献

- [1] Bachir A, Dohler M, Watteyne T, et al. Leung. MAC Essentials for Wireless Sensor Network[J]. IEEE Communications Survey and Tutorials, 2010, 12(2): 222-248
- [2] Zytoone O, Aroussi M E, Aboutajdine D. An energy efficient clustering protocol for routing in Wireless Sensor Network[J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2011, 7(1): 54-59
- [3] Li Ji-ying, Dang Jian-wu. Ant colony algorithm and application based on quantum space[J]. System Engineering and Electronics, 2013(10): 89-93
- [4] Li Jian, Jing Bo. Adaptive Genetic Algorithm and Its Application in Multi-Lateral Multi-Issue Negotiation[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(6): 67-70

(下转第 187 页)

3.3 实验结果分析

本文设计并开发了一个基于软集和属性综合的软件漏洞原型检测系统(VDPS),其界面如图 4 所示,能实现 3 种检测工具的单独检测结果与综合检测效果在误报率和漏报率上的对比。

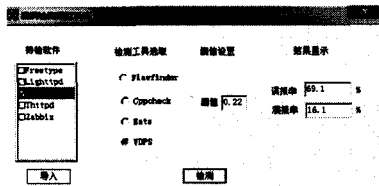


图 4 漏洞检测原型系统

由于实验所对比的检测工具软件都是已知真实漏洞个数,为统计方便,其检测结果直接计算为误报率和漏报率。VDPS 的误报率和漏报率实验数据如表 6 所列。

表 6 VDPS 检测软件的误报率和漏报率(%)

	Squid	Zabbix	Lighttpd	Freetype	Thttpd
FP	69.1	72.3	68.4	70.5	69.1
MP	16.1	18.4	17.9	16.4	17.1

图 5 和图 6 分别为 VDPS 与 3 种单独检测工具的误报率和漏报率的比较。

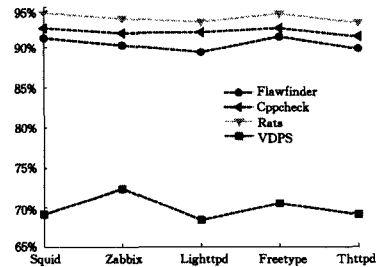


图 5 VDPS 与其他漏洞检测工具的误报率

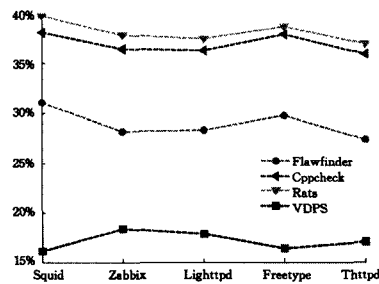


图 6 VDPS 与其他漏洞检测工具的漏报率

从实验结果可以看出,VDPS 的误报率和漏报率均有明显降低,对多种工具的检测结果进行基于软集和属性综合的数据分析,并在进行交互和反馈中调节阈值,提高了发现软件漏洞的范围和准确度,从而减少人工参与漏洞审查的工作量,并降低了漏洞误报率和漏报率。

结束语 本文重点在于利用多工具对软件漏洞检测的数据进行分析从而发现漏洞的过程。通过在建立软件漏洞影响评估模型并解决检测工具的可信度问题的基础上,引入软集理论获得漏洞影响因素的度量,结合多检测工具的方法优点以确定基于多属性综合的漏洞对软件安全的严重影响,为解决软件漏洞检测与发现提供了一种可行的思路,实验表明该方法是有用的,但不足之处在于是基于其他检测工具的实现,漏洞特征较有限,因此,提高多检测工具的智能综合能力,并改进相关漏洞知识和识别规则是下一步的主要研究方向。

参考文献

[1] 陈平,韩浩,沈晓斌,等. 基于动态程序分析的整形漏洞检测工具[J]. 电子学报,2010,38(8):1741-1747

[2] 张大林,金大海,宫云战,等. 基于缺陷关联的静态分析优化[J]. 软件学报,2014,25(2):386-399

[3] Williams C C, Hollingsworth J K. Automatic mining of source code repositories to improve bug finding techniques[J]. Journal of IEEE Transactions on Software Engineering, 2005, 31(6): 466-480

[4] Nahid S, Amel M, Edgardo M de O, et al. An advanced approach for modeling and detecting software vulnerabilities[J]. Information and Software Technology, 2012, 54(9):997-1013

[5] Ren J D, Cai B L, He H T, et al. A method for detecting software vulnerabilities based on clustering and model analyzing[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(4): 1065-1073

[6] Zhang Ruo-yu, Huang Shi-qiu, Qi Zheng-wei, et al. Static program analysis assisted dynamic taint tracking for software vulnerability discovery[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 63(2):469-480

[7] 孔德光,郑烱,陈超,等. 基于数据融合的源代码静态分析漏洞检测技术[J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29(6):1109-1112

[8] 李鑫,李京春,郑雪峰,等. 一种基于层次分析法的信息系统漏洞量化评估方法[J]. 计算机科学, 2012, 39(7):58-63

[9] 周亮,李俊娥,陆天波,等. 信息系统漏洞风险定量评估模型研究[J]. 通信学报, 2009, 30(2):71-76

[10] 李珍,田俊峰,杨晓晖. 基于检查点分级属性的软件动态可信预测模型[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(11):2397-2405

(上接第 164 页)

[5] Shio K, Singh M P, Singh D K. Routing Protocols in Wireless Sensor Networks- A Survey[C]//International Journal of Computer Science and Engineering Survey, 2010(1):66-67

[6] Zhou Ji-liang, Cao Qi-ying, Li Cai-xia, et al. A genetic algorithm based on extended sequence and topology encoding for the multicast protocol in two-tiered WSN[J]. Expert Systems with Applications: An International Journal, 2010, 37(2):1684-1695

[7] Babaie S, Shokraneh S, Ghaffari A, et al. CCGA: Clustering Based on Cluster Head with Genetic Algorithm in Wireless Sen-

sor Network[C]// International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. 2010:367-371

[8] Nematy F, Rahmani N, Yagouti R. An Evolutionary Approach for Relocating Cluster Heads in Wireless Sensor Networks [C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. 2010:339-343

[9] Awwad S A, Ng C K, Noordin N K, et al. Cluster Based Routing Protocol for Mobile Nodes in Wireless Sensor Network[J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2011, 61(2):251-281