一种鲁棒的无线传感器网络覆盖空洞修补方法

闫雒恒 贺昱曜

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘 要 在静态节点和少量移动节点构成的无线传感器混合网络中,针对部分静态节点失效会导致形成若干覆盖空 洞的问题,提出了一种鲁棒的空洞修复算法。受鱼群运动模式的启发,该算法以网络覆盖率为目标函数,将移动节点 的位置迁移过程抽象为人工鱼的生物行为,在传统鱼群觅食、追尾、聚群运动模式的基础上又定义鱼跃、优胜劣汰重生 两个新的运动行为以提高寻优的收敛性;在人工鱼状态更新的过程中,采用自适应的视野和步长;最后以实际随机部 署的移动节点距离目标点最近为原则,通过鱼群寻优完成空洞目标位置的修补。模拟实验结果表明,该算法无需修补 前的地理位置信息和空洞探测,鲁棒性强,能够在使用较少移动节点的情况下快速完成空洞修复,显著地提高了网络 覆盖率。

关键词 无线传感器网络,混合网络,覆盖空洞修补,人工鱼群算法,鲁棒性
 中图法分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j. issn. 1002-137X. 2017. 02. 018

Robust Approach for Holes Recovery of Wireless Sensor Networks

YAN Luo-heng HE Yu-yao (School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract In the wireless sensor hybrid networks composed of stationary nodes and mobile nodes, coverage holes is one of the key problems because it directly reduces the performance of network. In order to solve this problem, a robust approach based on improved artificial fish swarm algorithm was presented for holes recovery in this paper. The movement of mobile nodes is analogized to the motion of artificial fish such as prey, follow and swarm with the network coverage as object function. Two new fish motions called as jump and rebirth are also presented to enhance the convergence of this algorithm. The self-adaptive visual distance and step size of fish are implemented when the status of artificial fish is updated to recover the hole of networks. Simulation experiments show the robustness of the algorithm. The holes can be recovered efficiently without location information and holes probe using the least amount of mobile nodes. The network coverage is improved significantly with this proposed algorithm.

Keywords Wireless sensor networks, Hybrid network, Holes recovery, Artificial fish swarm algorithm, Robustness

无线传感器网络中,由于传感器节点随机部署、能耗不均 衡、受攻击或故障损毁等各种原因引起的节点失效退出网络, 导致某些区域不能被传感器节点监测到,即产生覆盖空洞或 者覆盖盲区,空洞造成网络的覆盖度和连通性下降,严重地影 响了网络的性能。近年来,检测和修复空洞成为了无线传感 器网络的一个研究热点。

文献[1]提出在网络第一代节点部分失效而出现覆盖空 洞后,通过随机性播撒的方式投放第二代节点,这样修复空洞 不仅代价高昂,而且不能保证覆盖空洞区域获得足够数量的 新节点。多重覆盖也是较为常见的避免覆盖空洞的办法^[24], 在监测区域内每个点都至少被 k 个节点监测,即 k 覆盖,k 覆 盖多采用休眠-唤醒机制节省资源耗费并减少密集部署造成 的节点通信干扰。但是,受资源和成本的限制,k 覆盖重数不 可能很大,依然存在 k 重节点受攻击后全部损坏而出现覆盖 空洞的可能性。文献[5]把监测区域划分为网格,在网格中随 机分布多个探测点,利用探测点检测空洞,通过向目标区域中 添加新节点覆盖区域中的探测点来修复空洞,但算法依赖于 探测点分布概率且需要精确的地理信息。文献[6-8]基于 Voronoi 图解决空洞覆盖的问题,重新布置传感器网络的节 点,最大效率利用节点进行覆盖,但该方法需要节点都具有一 定的移动能力,且重新部署代价大,需要节点精确的地理信 息。精确的地理信息需要 GPS 设备支持,GPS 设备不仅价格 较高而且受环境影响较大,在卫星受到一定程度干扰或者地 下隧道、水下环境等信号无法到达的区域,无线传感器网络就 无法获取到地理位置信息。文献[9]等提出的 SOI(Search Optimistic Inner)算法,不需要增加 GPS 设备,也不需要增加 新节点,只需通过选择最优内点确定空洞边缘节点的移动位 置,实现对空洞的修补,但该算法也要求全部节点具有移动

到稿日期:2015-11-02 返修日期:2016-01-30 本文受国家自然科学基金资助项目(61271143),国家科技重大专项(2014ZX03005001)资助。 闫維恒(1977-),女,博士生,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:ylhhfzmylh@126.com;贺昱曜(1956-),男,博士, 教授,博士生导师,主要研究方向为非线性控制理论、智能控制、无线传感器网络。

能力,这增加了网络构建代价。文献[10]等考虑到移动节点 的代价相对昂贵,在静态节点部署的网络中加入少量移动节 点实现覆盖空洞修复。这种混合网络比移动传感器网络造价 低,比静态传感器网络灵活,是传感器网络中节点成本和覆盖 度的一种平衡,因此成为了目前网络覆盖控制研究较多采用 的网络模型。文献[11]受计算机图形学中三角网格模型启发 提出了基于移动节点的三角形逐个贴片修复方法(PATT), 从理论上证明了一种最优的节点移动位置,以及基于该位置 部署移动节点理论上拥有 90%以上的覆盖率,但这算法需要 在已知空洞位置和空洞边缘节点精确坐标的前提下进行。文 献[12]通过向传感器网络添加新的移动节点来完成空洞修 复,基于两个准则:1)加入新节点不会造成空洞分裂,2)加入 新节点至少能消除一段覆盖弧,提出了在没有地理位置信息 条件下传感器网络的自愈合算法(Coverage Hole self-Healing,CHH),但该算法只适合大范围闭合空洞,即只有一个空 洞的情况。文献[13]基于人工智能提出了一种基于蚁群算法 的盲区修复方法,把网络中的覆盖盲区看作食物,移动节点看 作蚂蚁,但此方法容易出现同一空洞被多个移动节点发现而 使得多个移动节点去修复网络中的同一空洞的问题,移动节 点使用数量多且效率不高。

现有覆盖空洞修补的方法^[14-15]中,大多是在空洞检测的 基础上展开空洞修补,利用图形学在节点"最优"移动位置及 "最佳"覆盖度之间寻找空洞修补的最优方案。本文针对加入 少量移动节点的混合网络,受鱼群寻优运动模式的启发,提出 基于改进鱼群算法的覆盖空洞修补方法(Wireless sensor network hole patching algorithm based on fish swarm optimization,FSHP)。FSHP 算法不需要精确的地理信息和空洞探 测,空洞探测与修复通过人工鱼的移动同步完成,算法适用于 各种空洞大小、形状、数量。

1 网络模型和问题描述

1.1 网络模型

在边长为 L 的正方形监测区域 M 内,部署包括 n 个静态 节点和 k 个移动节点的无线传感器网络,传感器总个数为 N, 节点坐标值在(0,0)-(L,L)之间分布。现作如下设定:

(1)网络中的各静态节点同构,能量不能再补充;移动节 点同构,其参数不要求必须与静态节点相同,但能量可以得到 补充,且在相关通信协议的支持下可随时接受汇聚节点指令 迁移到监测区域内某个指定的位置。所有节点的最大通信半 径 *R*, 是最大感知半径 *R*, 的 2 倍,以保证网络的连通性。

(2)网络初始化时,静态节点已部署,所有移动节点随机 部署在监测区域内,处于休眠状态,节点本身都没有 GPS 装 置,但采用相关的无线定位算法,各节点能够获取自身在监测 区域的相对坐标位置信息。

(3)由网络中计算、存储和通信能力较强的汇聚节点控制 并实现传感器网络的部署及支配移动节点进行空洞修补。

(4)为减少移动节点来回移动的能量损耗,算法启用虚拟 节点进行计算,在空洞修补算法迭代若干次、覆盖率达到目标 值后,启用移动节点向算法输出的修补位置进行一次可靠的 位置迁移修补空洞。 文献[2]指出除军事等特殊场合外,绝大部分应用场合并 不要求无线传感器网络实现全覆盖,为此,本文假设无线传感 器网络的覆盖率达到 90%以上时,就可以满足实际应用需 求。

1.2 节点覆盖模型

假设传感器节点集 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_N\}$ 内每个节点 c_i 在监测区域内的相对坐标 $c_i = \{x_i, y_i, R_s\}, R_s$ 为节点的感知 半径,监测区域内任意一点 Q(x, y)被传感器节点 c_i 所覆盖 的概率为 $P_{av}(x, y, c_i), Q = c_i$ 的欧氏距离为 $d(Q, c_i)$, 传感 器节点采用圆盘布尔模型,则任意点 Q 的 $P_{av}(x, y, c_i)$ 为:

$$P_{avv}(x,y,c_i) = \begin{cases} 0, & d(Q,c_i) > R_s \\ 1, & d(Q,c_i) \leq R_s \end{cases}$$
(1)

假设所有覆盖事件相互独立,则节点集 C 对 Q 的联合检 测概率覆盖率^[16]可以表示为:

$$P_{av}(Q,C) = 1 - \prod_{c, \in C} (1 - P_{av}(x, y, c_i))$$
(2)

1.3 覆盖率的定义与计算

网络中所有工作节点构成的监测区域面积占整个监测区 域 M 面积的比例称为该网络的覆盖率。

$$\eta = \frac{\operatorname{area}(\bigcup_{c_i \in C} S_i \cap M)}{\operatorname{area}(M)}$$
(3)

其中,C为所有工作节点集,S_i表示节点 c_i 的监测区域,area (US_i \cap M)表示所有工作节点构成的监测区域与 M 相交部 分的面积,area(M)表示整个监测区域的面积。布尔模型中, 只要点 Q(x,y)被节点集 C 中任意一个节点覆盖,即可认为 该点被覆盖。在概率感知模型^[17]中,设目标点能够被检测到 的概率阈值为 C_{t_i} ,那么目标点 Q(x,y)能被有效检测到的条 件为:

P_{ωv}(*Q*,*C*)≥*C_h* (4) 满足条件(4)的目标点可认为被节点集*C*所覆盖。对于

多个节点覆盖圆叠加所形成的不规则图形,用式(3)精确计算 节点集 C 的覆盖面积是个 NP 难问题,但是利用计算机技术 可以近似精确地计算出监测区域覆盖率,二值图像法、网格法 和蒙特卡洛随机布点法^[18]对于计算多个节点覆盖圆在监测 区域的覆盖率都是有效的方法。二值图像法利用二值图中像 素点色彩值只有 0 和 1 的原理来计算节点集在监测区域的覆 盖率,但只适合于节点是布尔感知模型的覆盖率计算。用蒙 特卡洛法随机产生大量坐标点 Q,计算点 Q 落在节点集 C 覆 盖区域的概率,通过大量实验,可近似计算出节点集的覆盖 率。

网格法把监测区域划分为 m×m 个网格,相邻格点间的 距离取值越小,计算精度越高。计算每个网格交叉点 Q 是否 被节点集 C 所覆盖,节点若采用布尔感知模型,则用式(1)、 式(2)求解各个格点处的联合检测概率,联合检测概率为1的 网格点数与总网格点数的比值即为网络覆盖率;若采用概率 感知模型,则用式(2)、式(4)求解各个格点处的联合检测概 率,满足联合检测概率大于或等于检测概率阈值 C₆ 的网格点 数与总的网格点数的比值即为网络覆盖率。

1.4 问题描述

人工鱼群算法[19] 是一种仿生智能优化方法,它通过构造

人工鱼群来模拟鱼群的觅食、追尾、聚群和随机等行为,每条 人工鱼通过对行为的评价,选择最优行为执行,从而聚集在食 物浓度更高的位置,即目标函数的最优值,从而求解问题。该 算法可通过群体简单行为求解复杂问题,适应性强,对算法初 始条件要求不高,不需要建立问题的严格模型,鲁棒性强。因 此,本文以网络覆盖率为目标函数,设网络当前状态下所有传 感器节点的位置向量为Z=[X;Y],其中移动节点位置向量 为 $Z_k=[X_k;Y_k],X_k=\{x_1,x_2,...,x_k\},Y_k=\{y_1,y_2,...,y_k\},k$ 为修补空洞预使用的移动节点数目;静态节点位置向量为 $Z_n=$ $[X_n;Y_n],X_n=\{x_{k+1},x_{k+2},...,x_{k+n}\},Y_n=\{x_{k+1},x_{k+2},...,x_{k+n}\},n$ 为处于工作状态的静态节点数目。目标函数f(Z)利 用网格法计算,将监测区域M划分为 $m \times m$ 个网格,则网格 共有 $(m+1) \times (m+1)$ 个交叉点。记每个交叉点为Q(x,y), 节点若采用布尔感知模型,则由式(2)、式(3)可得:

$$f(Z) = \frac{\sum_{x=0}^{m} \sum_{y=0}^{m} P_{xv}(x, y, Z)}{(m+1) \times (m+1)}$$
s. t. $x \in [0, L], y \in [0, L]$

$$(5)$$

节点若采用概率感知模型,用式(2)求解各个交叉点 Q(x,y)处的联合检测概率,若满足式(4)记为1,也就是联合 $检测概率大于或等于检测概率阈值<math>C_{4}$ 的网格点数总和与 $(m+1) \times (m+1)$ 的比值,即为目标函数f(Z)。

初始监测区域的工作节点只有静态节点,当 $f(Z_n) \leq T_{min}$ 时,启动 FSHP,加入虚拟移动节点,即 $Z = [Z_k, Z_n]$,把空洞修补问题抽象为以f(Z)为目标函数的高维向量寻优求极大最优化问题。将覆盖空洞修补问题中移动节点的位置迁移过程抽象为人工鱼的觅食、追尾、聚群、鱼跃、优胜劣汰重生等生物行为,无需检测空洞位置,无需界定空洞边界节点,不依赖于精确的地理信息,所求出的最优解就是移动节点修补空洞的目标位置。

2 混合网络覆盖空洞修补方法 FSHP 算法

2.1 空洞修补策略

将大面积网络划分为若干小面积区域,每个区域有一个 计算和通信能力较强的汇聚节点,根据实际无线传感器网络 应用监测任务实效性的需要,汇聚节点定时检测或收集网络 状态,两次监测期内可能会有若干静态节点逐个或忽然大范 围失效,网络必然出现覆盖空洞。当监测到网络覆盖率低于 修补阈值 Tmin时,汇聚节点启动 FSHP 算法,输入工作静态节 点相对区域位置坐标,评价覆盖率函数,经过若干轮鱼群觅 食、追尾、聚群、随机移动等行为,直至目标函数值达到覆盖率 的目标值 Tmax,算法终止;根据此时输出的各移动节点相对位 置坐标,即待修补空洞的移动节点位置坐标,汇聚节点发出指 令,控制移动节点迁移至目标位置,完成一次修复任务。

空洞修补方法的步骤如下:

Step1 汇聚节点每隔时间 t 收集工作节点相对位置信息,监测网络覆盖状况,若检测到网络覆盖率低于修补阈值 Tmin,则转 Step2,否则转 Step1 继续监测网络覆盖状况。

Step2 输入工作静态节点相对区域位置坐标,启动虚拟 移动节点采用 FSHP 算法检测并同步修补空洞。 Step3 输出各移动节点修补空洞在监测区域目标位置 坐标,汇聚节点发出指令,计算实际距目标修补位置最近的移 动节点并将其迁移至目标位置,使网络覆盖率修补后达到目 标值 T_{max},转 Step1 继续监测网络覆盖状况。

2.2 FSHP 相关定义

设人工鱼个体数量为 Total,人工鱼的视野为 Visual,人 工鱼的移动步长为 Step,鱼群的拥挤度因子为 δ,尝试次数为 Try_number,每条人工鱼 AF,为一个 2k 维向量,即

$$AF_{i} = \begin{bmatrix} x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ik} \\ y_{i1}, y_{i2}, \cdots, y_{ik} \end{bmatrix} (i=1, 2, \cdots, Total)$$
(6)

其中,x_k表示第*i*条人工鱼的第*k*个移动节点的*x*坐标,y_k表示第*i*条人工鱼的第*k*个移动节点的*y*坐标。

任意两条人工鱼个体 AF_i 和 AF_j ($i, j = 1, 2, \dots, Total$, 且 $i \neq j$)之间的距离定义为:

$$d_{ij} = \|AF_i - AF_j\| = \sqrt{\sum_{t=1}^{k} [(x_i - x_{jt})^2 + (y_{jt} - y_{jt})^2]}$$
(7)

2.2.2 自适应视野步长

在基本人工鱼群算法^[20]中,视野和步长是固定值,人工 鱼的各个行为都是在视野范围内进行的,视野的选取对算法 影响较大,视野确定了人工鱼的搜索范围,步长则决定了收敛 速度和寻优的精度。为方便表述,令 $Z_{af} = AF_i = (z_1, z_2, ..., z_k)$ 表示当前人工鱼的状态, $Z_v = (z_{1v}, z_{2v}, ..., z_{kv})$ 表示视野内 的一个状态,如果 Z_v 的食物浓度即 $f(Z_v)$ 优于 $f(Z_{af})$,则朝 Z_v 方向移动一步到状态 Z_{rest} :

$$Z_v = Z_{af} + Visual \cdot Rand() \tag{8}$$

$$Z_{next} = Z_{af} + \frac{Z_v - Z_{af}}{\|Z_v - Z_{af}\|} \cdot Step \cdot Rand()$$
(9)

覆盖空洞修补问题是高维向量求解极值的问题,且局部 极值突出,如果视野选择较小,人工鱼受视野的限制,在局部 极值附近的人工鱼只在邻近区域无意义地搜索,无法看到全 局极值:如果视野选择过大,在一定程度上扩大了搜索范围, 会使算法收敛速度变慢,大量计算时间用在随机移动中。在 算法初始化时,鱼群相对分散,相互距离较大,因此人工鱼的 视野和步长应取较大值,这样可以快速收敛,避免在局部极值 附近浪费时间。随着鱼群的聚集,人工鱼的相互距离不断缩 小,此时如果视野步长在较大范围内变化,人工鱼必然在最优 值附近来回震荡,因而难以精确逼近最优值,因此人工鱼的视 野和步长应随着人工鱼的状态自适应地变化。因此,本文在 算法中采用自适应的视野和步长,每次迭代前,人工鱼都要对 其他人工鱼到自身的距离进行计算,并求平均值作为本次迭 代自身的视野 Visual, 假设监测区域 M 有 m 条人工鱼 AF_0 , $AF_1, AF_2, \dots, AF_{m-1}$ 。按式(7)计算 AF_0 到 AF_1, AF_2, \dots , AF_{m-1} 的距离分别是 $d_1, d_2, \dots, d_{m-1},$ 则此次迭代人工鱼 AF_0 的视野为:

$$Visual_{0} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} d_{i}$$
 (10)

 AF_0 在视野 Visual₀ 内由式(8)计算出 Z_v ,求出 Z_v 处的 食物浓度即 $f(Z_v + Z_n)$,如果 $f(Z_v + Z_n) \ge f(Z_0 + Z_n)$,则朝 Z_v 方向移动一步到状态 Z_{next} ,自适应步长为:

$$r_{step} = \left|1 - \frac{f(Z_0 + Z_n)}{f(Z_v + Z_n)}\right| \cdot Step \tag{11}$$

算法初始时, $f(Z_0 + Z_n)/f(Z_v + Z_n)$ 较小,因此步长 r_{sep} 较大,随着算法逼近极值, $f(Z_0 + Z_n)/f(Z_v + Z_n)$ 较大,甚至 接近 1,此时步长 r_{sep} 较小。在觅食、追尾、聚群各行为中自适 应步长的计算方法与上式类似。

2.2.3 修补节点数量的确定

覆盖空洞修补使用节点的数量,也就是算法启用移动节 点的数量与空洞面积正相关。移动节点越多,空洞越容易修 补,但在一些条件下,会出现空洞面积较小而需要修补节点数 量较多的情况,因为修补空洞所需要的修补节点数量不仅与 空洞面积有关,还与空洞的形状相关。由于移动节点价格成 本较高,因此移动节点利用率 ω是度量算法效率的一个重要 指标。ω定义为:

 $\omega = S/N\pi R_s^2$

(12)

全覆盖中 S 即为监测区域面积 area (M);不完全覆盖中 S 为覆盖区域的净面积(各节点覆盖圆面积和去除边界外及 节点之间重叠的面积)。

例如,在面积为100m×100m的监测区域内,感知半径 R,为12m的传感器节点部署中,如果要求覆盖率达到 100%,则至少需要 33 个这样的同构节点,部署形式如图 1 (a)所示,相邻3个节点的覆盖圆交于一点,节点重叠覆盖区 域最小,内部节点利用率最高,但覆盖率计算需要考虑边界问 题,用式(12)计算平均节点利用率 $\omega = 67\%$ 。假设在图 1(a) 确定覆盖部署下,9个中心节点失效,没有边界节点失效,覆 盖区域只有一个中心空洞,如果出现空洞,如图1(b)所示,此 时覆盖率为 69.85%,则最理想的状况如图 1(a)所示修补,节 点利用率最高,只需要9个节点即可修复完成,且覆盖率可达 100%;但同样9个节点失效,如图1(c)所示,此时覆盖率为 74.30%,则最理想状况也如图1(a)所示修补,也需要9个节 点即可修复完成。如果节点部署如图 1(d)所示,覆盖率为 74.58%,原本 33 个节点并未达到全覆盖,同样 9 个节点失效 出现多个空洞,但因为存在许多零星的小碎片空洞,在这种状 况下,显然只用9个节点去修复空洞,最好情形也是不可能达 到100%的覆盖率。



由于静态节点的可能部署情况复杂,节点失效状态更是 不可预测,因此找到精确的确定修补空洞节点个数的计算公 式也是困难的。由于鱼群算法本身的鲁棒性强,而且大多数 实际修复应用也不需要达到全覆盖,因此本文给出修补空洞 移动节点个数的近似算法:

$$k = \left\lceil \frac{(1-P_0) * S * P}{\omega * \pi R_s^2} \right\rceil \pm 1 \tag{13}$$

P。为修补前的覆盖率,P为修补后要求达到的覆盖率,S 为监测区域面积,「]表示四舍五入取整,ω为在监测区域(如 图 1(a)所示)全覆盖时节点的利用率。

2.3 FSHP 算法行为描述

为进一步提高算法寻优的收敛性,在传统觅食、追尾、聚 群行为的基础上,定义两个新的运动行为。

2.3.1 鱼跃行为

由于空洞修补问题的目标函数复杂,局部极值突出,若单 纯采用人工鱼群基本算法,每条人工鱼经过若干轮觅食、追 尾、聚群、随机移动等行为后,其适应度值几乎不变,人工鱼都 陷入局部最优呆滞不动,这会影响算法的收敛速度和寻优结 果。此时若采用强制行为,按概率随机激发某些人工鱼大幅 度改变参数,即发生鱼跃行为,使其跳出局部极值区域,有利 于人工鱼提高全局搜索能力,加速收敛到最优值。具体描述 为:迭代发生次数 j 大于某一设定值 iter_hop 后,当公告牌上 连续两次适应度值差小于一个预先设定的容忍度值 toler 时, 对每一条人工鱼产生一个 0~1 之间的随机数 rand(),当随 机数大于某一跳跃比例阈值 T_{kop} (T_{kop} 的取值与预发生鱼跃 行为的人工鱼的比例有关)时,当前人工鱼在视野范围内执行 一次跳跃行为:

$$Z_{af}(t+1) = Z_{af}(t) + \mu * Visual * rand(2,k)$$
(14)

s.t. $rand() > T_{hop}$

其中,μ为鱼跃步态系数,rand(2,k)函数产生一个2行、k列的随机数,这样人工鱼在视野范围内的位置发生一次较大变化(超出监测边界的节点坐标要修正回监测区域内),有利于 其跳出局部最优,展开更大范围的搜索。

2.3.2 优胜劣汰重生行为

覆盖空洞修补问题由于空洞在监测区域每一处都有可能 出现,形成的空洞形状复杂,因此人工鱼的寻优区域较大,一 部分人工鱼将处于来来回回的随机移动之中,且很长时间处 于变化不大的区域,导致算法收敛很慢。因此,经几次迭代之 后,若人工鱼的适应度值低于淘汰阈值 T_{del},则:

 $T_{del} = \min(T_{surv} + j \star \theta, T_{max})$ (15)

阈值 T_{ut} 随着迭代次数的增加也相应增加,并且最大不 超过目标值 T_{max},θ为适应值增量系数,T_{sur},为适应值基础 值。受优胜劣汰的自然规律的启发,认为这部分人工鱼竞争 能力较弱,让这部分人工鱼在解域内随机重生,但是同样受自 然鱼类生存规律启发,鱼类在死亡前必然全力挣扎,因此在淘 汰之前,给人工鱼一次生存下去的机会,让其奋力一跃,如果 鱼跃行为之后适应度值高于阈值,则继续生存参与竞争,否则 淘汰重生。每隔几次迭代后评价一次人工鱼是否需要进行优 胜劣汰重生行为,给每条人工鱼充分的竞争寻优时间,即生存 期,同时又要适者生存、弱者淘汰。具体行为描述为: 迭代发生次数 j 大于某一设定值 $iter_del E_i$,对每一条 人工鱼 AF 评价适应度值 $f(Z_{af})$,如果 $f(Z_{af}) < T_{del}$,首先执 行一次鱼跃行为,之后再次评价适应度值,如果 $f(Z_{af}) < T_{del}$,首先执 依然成立,则执行重生行为,即在解域内初始化这条鱼。随着 迭代进行,劣者被淘汰,使陷入局部极值的人工鱼重生,将有 机会展开更广范围的搜索,同时整体鱼群的适应度值不断提 升,必然会加快找到全局最优值的速度。

2.4 FSHP 算法描述

FSHP算法各参数的含义见表1。

衣 I FORF 异伍 少 奴 说 明

参数说明	符号		
人工鱼个体数量	Total		
基本移动步长	Step		
拥挤度因子	δ		
尝试次数	Try_number		
算法最大迭代次数	Iter		
移动节点利用率	ω		
淘汰开始迭代次数	iter_del		
容忍度值	toler		
鱼跃比例阈值	Thop		
适应值增量系数	θ		
适应值基础值	Tsurv		
鱼跃步态系数	μ		
鱼跃开始迭代次数	iter_hop		

具体算法描述如下。

Step1 按式(13)计算修补移动节点个数 k,在监测区域 内随机生成 Total 条人工鱼,任意一条人工鱼 AF_i 为一个 2k 维向量,向量的值为移动节点的初始化位置。初始化公告牌, 公告牌记录每次迭代最优人工鱼的状态和同步的目标函数最 优值。

Step2 由式(10)计算当前人工鱼的自适应视野;对每条 人工鱼执行 Step2.1 和 Step2.2。

Step2.1 对当前人工鱼进行评价,进行包括觅食、追尾、 聚群、随机移动行为的选择(在觅食、追尾、聚群中均采用类似 式(11)的自适应步长),执行当前人工鱼的行为选择,更新当 前人工鱼的状态;

Step2.2 计算当前人工鱼的适应度值并与公告牌进行 比较,更新公告牌;判断是否满足优胜劣汰重生条件,若满足 则执行优胜劣汰重生行为。

Step3 计算前后两次公告牌差值,判断是否满足鱼跃行 为条件,若满足,则按式(14)对满足条件的人工鱼执行鱼跃行 为。

Step4 根据公告牌值和当前迭代次数进行判断,若公告 牌大于或等于目标值并且迭代次数小于或等于最大迭代次数,则算法结束,输出公告牌上的最优人工鱼状态;若公告牌 小于目标值且已达最大迭代次数,则 *k*=*k*+1,转 Step1,若未 达最大迭代次数,则转 Step2 开始下一次迭代。

3 仿真及分析

利用 Matlab 在 $100m \times 100m$ 监测区域内对算法进行仿 真,节点感知半径 $R_s = 12m$,通信半径 $R_c = 2R_s = 24m$ 。假设 监测到的网络覆盖状况如图 1(b)、图 1(c)和图 1(d)所示,节 点采用布尔模型,采用网格法计算覆盖率,监测区域都有 24 个静态节点在工作,但网络覆盖率分别是 69.85%,74.30%, 74.58%,都低于修补阈值75%。实验仿真了在不同空洞大小、形状条件下,算法进行空洞修补的结果。算法各参数的取 值如表2所列。

表 2 参数国	表 2 参数取值表					
参数	取值					
Total	15					
Step	5					
δ	0.3					
Try_number	3					
Iter	20					
ω	67%					
iter_del	5					
toler	0.1					
Thop	0.5					
θ	0.5					
Tsuro	80					
μ	0.1					
iter_hop	4					

3.1 实验 1:修补节点数量与空洞面积、空洞个数与形状的 关系

算法分别仿真了图 1(b)、图 1(c)、图 1(d)为修补前覆盖 空洞位置的情况,也就是只有一个中央闭合空洞、多个非闭合 空洞、多个碎片空洞的情况,移动节点个数分别取k=7,8,9, 10,所取结果均为算法运行 20 次的平均结果。为观测算法的 效果,暂不指定 T_{max}作为迭代结束条件。



图 2 节点覆盖示意图

因图 1(b)只有一个中央闭合空洞,将其作为初始图,按 式(13)计算修补空洞节点个数 k=9±1,图 2(a)为启用 9 个 节点随机生成的覆盖空洞修补示意图,图 2(b)为本算法迭代 10 次后的覆盖示意图。图 3 为采用不同节点数量修补,网络 覆盖率随迭代次数的变化图。从图中看出,不论采用 8 个、9 个还是 10 个节点,算法在迭代 10 次以内均能达到 90%以上 的覆盖率,且随着迭代次数增加,覆盖率不断提高。采用节点 数量越多,算法能越快达到目标覆盖率,但这种只有一个闭合 空洞的情况下,节点利用率高,从图 2(b)中可以看到,如果 8 个节点布局合理,实际修补以后,覆盖率就可达到 90%以上, 节点数的增多对覆盖率提高区分度不明显。



因图 1(c) 有多个非闭合空洞,将其作为初始图,按式 (13)计算修补空洞节点个数 k=8±1,图 4 为采用不同节点 数量修补,网络覆盖率随迭代次数的变化图。从图中看出,不 论采用 8 个、9 个还是 10 个节点,算法在迭代 10 次以内均能 达到 90%以上的覆盖率,且随着迭代次数增加,覆盖率不断 提高。在多个洞的情况下,采用节点的数量对覆盖率的增长 速度的影响大于一个闭合洞的情况。



图 4 多个非闭合空洞不同节点数量修补覆盖率变化图

因图 1(d)有多个碎片空洞,将其作为初始图,图 5 为以 图 1(d)为初始图,采用不同节点数量修补,网络覆盖率随迭 代次数的变化图。按式(13)计算修补空洞节点个数 k=8± 1,从图中看出,采用 8 个节点迭代 20 次后,平均覆盖率接近 90%;采用 9 个节点在 20 次迭代以内算法每次能达到 90% 以上的覆盖率;而采用 10 个节点,在迭代 10 次以内算法每次 能达到 90%以上的覆盖率,且随着迭代次数增加,覆盖率不 断提高。



图 5 多个碎片空洞不同节点数量修补覆盖率变化图

实际使用中,由于 FSHP 算法不需要检测空洞位置,并 不能预先知道空洞的形状,因此类似图 1(b)空洞形状由于修 补节点实际利用率ω高于本算法所取的 67%,所以式(13)中 正负号取-1合适,这样能减少移动节点个数,节省成本;而 图 1(d)中由于空洞多且零碎,节点实际利用率低于ω,因此取 +1合适,这样更容易快速算出修补位置。具体在应用时,需 要根据时效优先或者成本优先来选取式(13)中的正负符号。 同时在覆盖空洞面积较小时,面积变化及洞的边缘情况对节 点利用率均有较大影响,但随着覆盖空洞面积变大,这种影响 会越来越小。

3.2 实验2:覆盖质量与算法迭代次数的关系

表3显示了在使用不同移动节点数目去修补空洞,达到 90%覆盖率时算法的平均迭代次数。总体来说,随着算法迭 代次数的递增,空洞的覆盖率不断增加,同时空洞面积不断减 小,在空洞多且零碎的情况下局部极值问题更为突出,需要的 迭代次数较多。

表 3 覆盖质量与算法迭代次数的关系

覆盖空洞形状	图 1(b) 69.85%		图 1(c) 74.30%		图 1(d) 74.58%	
11. mm = 1 = 241 = 14. hr	k	迭代次数	k	迭代次数	k	迭代次数
使用 k 个移动节点 、	8	10	8	10	8	20 以上
修补达到 90% 覆盖率 的平均迭代次数	9	9	9	7	9	16
	10	7	10	5	10	8

3.3 实验3:不同算法之间的比较

图 6 比较了基于图 1(c)基本鱼群算法与 FSHP 算法在 迭代过程中网络覆盖率的变化情况。除本文特有的参数外, 其他参数一致,如图 6 所示,在算法迭代 10 次以后,基本鱼群 算法下的网络覆盖率已基本不变,人工鱼群几乎全部陷入局 部极值而无法突破,收敛速度较慢;而 FSHP 算法随着迭代 次数的增加,覆盖率不断提高。



图 6 多个非闭合空洞不同节点与基本鱼群算法覆盖率变化比较图

与文献[12]中的 CHH 算法相比较,虽然 CHH 算法在 大范围闭合空洞修补中可以达到近似 100%的覆盖率,但是 算法需要在修补前检测空洞边缘节点位置,且对非闭合空洞 边缘节点所产生的空洞弧无法直接修复,因此 CHH 算法对 修复非闭合空洞问题不够理想。

与文献[11]中的 PATT 算法相比较:PATT 算法采用计 算机图形学中三角形贴片法,目标与 FSHP 算法相同,都是 达到 90%以上的覆盖率,PATT 算法仿真只验证了在一个大 的闭合覆盖空洞下节点的修补覆盖空洞的情况,与本文在图 4 中所示情况类似,通过计算,用 PATT 算法修补需要 8 个以 上的移动节点,节点利用率 ω=71%;而 FSHP 算法(如图 3 所示)只需要 8 个节点,并且在 10 次以内迭代就可达到目标, 而利用 FSHP 算法不但不需要检测空洞边缘节点位置,而且 无论对于闭合空洞和非闭合空洞、一个还是多个空洞,都能快 速修复,适用性及鲁棒性远远优于以上算法。

结束语 本文针对无线传感器网络覆盖控制中的空洞修补问题,以静态节点和少量移动节点构成的混合网络为基础, 将仿生智能计算理论、人工鱼群算法应用到无线传感器网络 的覆盖空洞修补中,提出了一种鲁棒的无线传感器网络覆盖 空洞修补方法 FSHP 算法。该算法无需 GPS 地理信息的支 持,也无需预先检测空洞位置,虚拟启动移动节点,以网络覆 盖率为目标函数,在人工鱼群觅食、追尾、聚群、随机行为基础 上加人鱼跃、优胜劣汰重生等生物行为,并在人工鱼状态更新 过程中采用自适应的视野和步长,最后以实际随机部署的移 动节点距离目标点最近为原则将移动节点迁移至修补空洞目 标位置。仿真实验结果表明,FSHP 算法鲁棒性强,不但适用 于一个闭合空洞也适用于多个非闭合空洞甚至包含多个零碎 空洞的恶劣情况,能够在使用较少移动节点的情况下快速完 (下转第 146 页) es/misan/mobmodel. html.

- [12] SÁNCHEZ M, MANZONI P. ANEJOS: a Java based simulator for ad hoc networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2001,17(5):573-583.
- [13] LIU J, JIANG X, NISHIYAMA H, et al. Delay and Capacity in Ad Hoc Mobile Networks with f-cast Relay Algorithms [J].
 IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2738-2751.
- [14] KNUTH D E. Big Omicron and big Omega and big Theta[J].

(上接第128页)

成空洞修复,节能、高效地提高了网络覆盖率,修补效果较好, 有效延长了网络生存期。

文中只验证了二维平面覆盖环境下 FSHP 算法的性能, 下一步将本算法进行进一步拓展,使其适合于三维水下无线 传感器网络。

参考文献

- [1] WANG L,GUO Y,ZHAN Y. Security topology control method for wireless sensor networks with node-failure tolerance based on self-regeneration[J]. Eurasip Journal of Wireless Communications and Networking, 2010(1); 1-11.
- [2] LIU M, CAO J N, ZHENG Y, et al. Analysis for multi-coverage problem in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2007, 18(1); 127-136. (in Chinese)

刘明,曹建农,郑源,等.无线传感器网络多重覆盖问题分析[J]. 软件学报,2007,18(1):127-136.

- [3] BEJERANP Y. Simple and efficient k-coverage verification without location information [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications, Phoenix, 2008;291-295.
- [4] KUMAR S, LAI T H, BALOGH J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network[C] // Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Philadelphia, PA, USA, 2004; 144-158.
- [5] NITIN K, DIMITRIOS G. Sensor network coverage restoration[J]. CITESEER, 2008, 10(12): 21-24.
- [6] LI X, DAVID H. Distributed coordinate free hole recovery [C] // Proc. of GLOBECOM, Beijing, 2006; 189-194.
- [7] XU P F, CHEN Z G. Distributed voronoi coverage algorithm in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2010, 31(8):25-34. (in Chinese)

徐鹏飞,陈志刚. 无线传感器网络中的分布式 Voronoi 覆盖控制 算法[J]. 通信学报,2010,31(8);25-34.

- [8] WANG G,CAO G,PORTA T. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2006, 5 (6):640-652.
- [9] YANG K, LIU Q, ZHANG S K, et al. Holerecovery algorithm based on mobile inner nodes in wireless sensor networks [J]. Journal on Communications, 2012, 33(9):116-117. (in Chinese) 杨凯,刘全,张书奎,等. 利用移动内点来修复传感器网络空洞的 算法[J]. 通信学报, 2012, 33(9):116-117.
- [10] WANG G, CAO G, BERMAN P, et al. Bidding protocols for deploying mobile sensors [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(5):563-576.

Acm Sigact News, 1976, 8(2): 18-24.

- [15] NEELY M J, MODIANO E. Capacity and delay tradeoffs for adhoc mobile networks [C] // First International Conference on Broadband Networks, 2004. IEEE, 2004; 3687-3687.
- [16] LIUYT, ANJP. Asymptotic node distribution of self-organizing Network random walk model[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2010, 35(5): 573-577. (in Chinese) 刘宴涛,安建平. 自组织网络随机游走模型的渐近节点分布[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 573-577.
- [11] WANG L M, LI F, QIN Y. Resilient method for recovering coverage holes of wireless sensor networks by using mobile nodes
 [J]. Journal on Communications, 2011, 32(4):1-8. (in Chinese)
 王良民,李菲,秦颖. 基于移动节点的无线传感器网络覆盖洞修
 复方法[J]. 通信学报, 2011, 32(4):1-8.
- [12] SU H, WANG Y. A self-healing algorithm without location in sensor networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32 (10):1957-1970. (in Chinese)
 苏瀚,汪芸. 传感器网络中无需地理信息的空洞填补算法[J]. 计算机学报,2009,32(10):1957-1970.
- [13] JIANG D. Research on the discovery and restoration of blind spots in wireless sensor networks[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008. (in Chinese) 蒋丹. 无线传感器网络覆盖盲区的发现与修复方法研究[D]. 沈
- [14] YAN F, MARTINS P, DECREUSEFOND L. Accuracy of homology based coverage hole detection for wireless sensor networks on sphere [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(7): 3583-3595.

阳:东北大学,2008.

[15] DAI G Y, CHEN L Y, ZHOU B B, et al. Coverage hole detection algorithm based on Voronoi diagram in wireless sensor work [J]. Journal of Computer Application, 2015, 35(3); 620-623. (in Chinese)

戴国勇,陈麓屹,周斌彬,等.基于 Voronoi 图的无线传感器网络 覆盖空洞检测算法[J].计算机应用,2015,35(3):620-623.

- [16] WANG R, LIU G Z. Wireless sensor network deployment based on fish-swarm optimization algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2); 8-11. (in Chinese)
 王蕊,刘国枝. 基于鱼群优化算法的无线传感网络部署[J]. 振动 与冲击, 2009, 28(2); 8-11.
- [17] ZOU Y, CHAKRABARTY K. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks [J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1):61-91.
- [18] HONG H H. Research on solving method of coverage area in wireless sensor networks [D]. Haibin; Haibin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

洪浩瀚.无线传感器网络覆盖面积求解方法研究[D].哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2015.

- [19] LI X L,SHAO Z J,QIAN J X. An optimizing method based on autonomous animates: fish-swarm algorithm [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2002(11): 32-38. (in Chinese)
 李晓磊,邵之江,钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式:鱼群 算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2002(11): 32-38.
- [20] 江铭炎,袁东风.人工鱼群算法及其应用[M].北京:科学出版 社,2012.