

WSANs 中基于蜂巢结构的移动容错恢复算法

杜景林 郑若钦 谢立

Honeycomb architecture based mobile fault-tolerant recovery algorithm in WSANs

Du Jing-Lin Zheng Ruo-Qin Xie Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 018901 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.018901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无线传感器网络中无标度拓扑的动态容错性分析

Dynamic fault-tolerance analysis of scale-free topology in wireless sensor networks

物理学报.2014, 63(11): 110205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110205>

基于动态最小生成树路由协议的数据聚融算法

Data fusion aggregation algorithm based on dynamic minimal spanning tree routing protocol

物理学报.2014, 63(9): 090206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.090206>

一种无线传感器网络簇间拓扑演化模型及其免疫研究

Study on a model of topology evolution of wireless sensor networks among cluster heads and its immunization

物理学报.2012, 61(9): 090202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.090202>

WSANs 中基于蜂巢结构的移动容错恢复算法*

杜景林¹⁾²⁾ 郑若钦^{1)†} 谢立²⁾

1) (南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

2) (南京大学计算机科学与技术系, 南京 210023)

(2014 年 7 月 7 日收到; 2014 年 8 月 25 日收到修改稿)

旨在研究无线传感器与执行器网络 (WSANs) 中节点失效情况下恢复执行器 (actor) 节点服务的算法. 首先说明了 WSANs 中的实时覆盖模型, 证明 WSANs 覆盖恢复问题是 NP 难问题, 给出了近似求解方案. 在此基础上, 提出了一种基于六边形蜂巢结构的移动容错算法 HMFR 用于恢复失效 actor 节点, HMFR 算法在限制网络初始部署的条件下拥有很好的性能. 通过实验与现有的恢复算法进行比较, 发现 HMFR 算法在 actor 覆盖 sensor 节点数和移动距离方面有更好的性能.

关键词: 无线传感器与执行器网络, 节点部署, 覆盖恢复, 六边形蜂巢

PACS: 89.20.Ff, 02.40.Pc

DOI: 10.7498/aps.64.018901

1 引言

无线传感器与执行器网络 (WSANs)^[1] 由大量传感器节点 (sensor) 和少量执行器节点 (actor) 节点构成, 分布在特定检测地理区域中. 传感器节点用来检测物理环境, 执行器节点根据传感器节点汇报的事件和收集的数据执行相应的分配任务^[2]. 普通的传感器网络主要以收集环境信息为目的, 不具有与环境交互的能力, 而在许多应用场景中需要传感器网络与环境进行交互^[3,4], 例如, 在火灾检测应用中, 传感器能够转发精确的起火点位置和强度, 喷水执行器可以在大火蔓延前把大火熄灭; 此外, 传感器可以检测出浮沉等可见或可测量的水中或空气中排放的污染物, 执行器可以据此采取相应对策.

覆盖问题是 WSANs 中一个非常重要的设计目标^[5,6], 为了加快 actor 节点的响应速度, 应使 actor 对 sensor 的实时覆盖最大化. 较为理想的情况是在 sensor 部署的监测区域内, actor 能实时覆盖到

每个 sensor 节点且各 actor 之间的覆盖重叠区域最小. 但由于特殊场景或者其他因素的影响, 会出现单个或多个 actor 节点失效的情况. 此时须考虑如何在保证剩余 actor 节点有效连接的前提下对剩余 actor 采取最小移动的方式来满足最多数的 sensor 节点. 为此需要一种容错^[7,8] 算法来对 actor 节点进行重定位, 以使 WSANs 网络的实时局部覆盖最大化.

本文旨在研究 WSANs 中当 actor 节点执行单个任务或者协作任务时, 由于特殊场景等影响而造成单个或多个 actor 节点失效的情况下, 如何在保证剩余 actor 节点有效连接的前提下, 使其移动最小距离 (即最快速) 来尽可能多地覆盖 sensor 节点.

目前, 关于 WSANs 在网络连接、覆盖与分簇机制等方面问题的研究已取得了一些研究成果. 在 WSANs 网络中一个突出挑战是如何部署 actor 节点来提高 WSANs 网络满足应用的需要, 关于这方面的工作最早在文献^[9] 中有所介绍, 作者主要是解决在一个特定事件区域内选取合适的 actor 节点

* 国家自然科学基金面上项目 (批准号: 61372128, 61471153)、江苏省科技支撑计划 (工业) 项目 (批准号: BE2011195) 和江苏省高校自然科学基金重大项目 (批准号: 14KJA510001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhengruoqin@2008.sina.com

对事件做出快速反应; 文中提出了一种竞拍协议, 该协议在最低能量消耗与最小延迟的条件下分布式地分配 actor 给重叠区域, 然而这里没有考虑连接问题. 文献 [10] 中提出的 COLA 算法既保证降低 sensor 到 actor 之间的延迟又能提高节点的覆盖区域, 初始时 actor 节点为了满足最大覆盖均匀地放置在检测区域内 (最小化 actor 覆盖重叠范围). 当分簇后, 每个 actor 节点为了最小化簇内距离最远的 sensor 节点时延, 利用 COLA 算法重定位 actor 到所在簇的 1-中心位置; 然而该工作同样没有考虑 actor 间的连接问题, 而 COCOLA 算法 [11] 在此基础上考虑了 actor 之间的连接问题. 文献 [2] 提出的 RCC 算法是利用虚拟势场, 使 actor 节点分散到整个网络, 最终能有效提升 actor 节点网络的覆盖区域, 同时也保证了 actor 节点之间的连接.

文献 [12] 主要是针对狭长带状区域内随机部署的移动传感器网络, 研究如何通过节点的重部署能量高效地构建 k -栅栏覆盖的问题. 文献 [13] 主要研究基于 Voronoi 图的 actor 节点最大实时覆盖部署策略, 使 WSNs 获得更好的实时性, 且在收敛速度、能量消耗方面具有较好的性能. 最后, 文献 [14] 介绍了一种覆盖和连接有效的分簇部署算法 CCAC, 在保证覆盖和连接的同时可有效减少部署阶段的 actor 节点数量.

上述的所有研究工作主要考虑如何利用 actor 节点实现覆盖数的增加, 然而 WSNs 网络常常因部署在恶劣环境下, actor 节点可能会失效, 在原有的研究工作中没有针对 actor 失效情况下的节点覆盖恢复方案. 这一方面, 文献 [15] 是一篇恢复方案的综述, 介绍了一些典型的 actor 连接失效后的连接恢复算法, 可是没有考虑节点的覆盖情况. 文献 [16] 介绍了一种启发式算法, 用于在重新部署 actor 节点时同时减少 sensor 到 actor 的距离以及 actor 的移动距离, 但是此算法计算开销过大且需要全网信息, 不利于在能量有限的 WSNs 网络中部署实施.

基于以上分析, 本文研究了 actor 节点失效情况下如何利用剩余 actor 节点来高效地构建对 sensor 节点最大覆盖的问题, 在文献 [17] 的基础上设计了具有较好性能的 HMFR 算法来移动 actor 节点, 以求解 actor 局部覆盖最大化的问题.

2 问题描述

2.1 WSNs 实时覆盖问题

Gungor 等认为 [5], WSNs 的实时性是指存在某个上界 Δ_{e2a} , 从 WSNs 中的任何一个事件的发生到所需动作得到实施之间的延迟均应小于 Δ_{e2a} , 其等价于存在某个上界 R_{rt} , 只要 sensor 节点 s 到 actor 节点 a 的距离小于 R_{rt} , a 就可以对 s 发现的事件实时响应, 此时称 a 实时覆盖 s , 而上界 R_{rt} 就是 actor 的行动半径.

假设二维平面上的 WSNs 由 m 个 sensor 节点 s_1, \dots, s_m 和 n 个 actor 节点 a_1, \dots, a_n 组成, sensor 集合为 S , actor 集合为 A . 分别以 R_a 和 R_c 表示 actor 节点的行动半径和通信半径 ($R_c = 2R_a$), 定义目标区域的实时覆盖数为 σ , 则实时覆盖最大化问题可定义如下:

$$C_i = \begin{cases} 1, & \exists j | d(s_i, a_j) \leq R_a, (s_i \in S, a_j \in A), \\ & (1 \leq i \leq m), (1 \leq j \leq n), \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (1)$$

$$L_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{if there is access from } a_i \text{ to } a_j, \\ & (a_i, a_j \in A), (1 \leq i \neq j \leq n), \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (2)$$

覆盖最大化的目标函数为

$$\sigma = \text{Maximum} \sum_{i=1}^m C_i. \quad (3)$$

约束条件为

$$\sum_{j=1}^n L_{i,j} = n - 1, (\forall i). \quad (4)$$

(1) 式中, C_i 的值表示 s_i 是否被覆盖 (1 则是被覆盖), $d(s_i, a_j)$ 代表 sensor 节点 j 和 actor 节点 i 的欧氏距离. (2) 式中的 $L_{i,j}$ 说明了 a_i 和 a_j 的连通情况, 1 则表示 a_i 和 a_j 之间存在通路. (3) 式中 $\sum_{i=1}^m C_i$ 是被覆盖的 sensor 节点总数, σ 为求其最大值. (4) 式保证了网络拓扑必须为连通图, 即对于任意 a_i , 都至少可以通过一条路径到达其余任意节点.

定义 1 对于某个给定 R_a 和 R_c 的 WSNs 网络, 若函数 σ 在 $P_m(a_i)$ 处取得最大值 $a_i \in A$,

($1 \leq i \leq n$), 则称 $P_m(a_i)$ 为最优位置集. WSNs 网络的覆盖优化问题即是对于任意给定 R_a , R_c 的网络, 求解其最优位置集.

定义 2 假设节点 p, q, t 是失效节点的邻居节点, 对于某个给定 R_a 和 R_c 的 WSNs 网络, 设函数 σ_{local} 为 actor 节点 p, q, t 的局部覆盖数, 局部覆盖数是指仅考虑局部区域内的节点 p, q, t 所覆盖的 sensor 节点个数, 由于分布式算法很难获取全局覆盖情况, 所以在失效恢复算法中以局部覆盖数作为重定位标准. 若函数在 p_p, p_q, p_r 处取得最大值, 则称 (p_p, p_q, p_r) 为局部最优节点位置序列.

2.2 初始场部署及失效恢复

节点的初始部署如图 1 所示, actor 节点静止于每个矩形区域中心, sensor 节点以 actor 节点为中心均匀分布. 在理想状态下, 所有 actor 节点一直处于区域中心位置且正常工作, 而所有 sensor 节点则一直处于与 actor 节点通信状态. 但在实际网络中, actor 节点并非总是处于静止且有效的状态, 当出现某些 actor 节点失效等极端情况, 如图 2(a) 所示, 为保持网络连通性, 部分或全部 actor 节点将在一定范围内进行协同位移, 感知孤立 sensor 群, 去 sensor 孤岛, 以实现任务区域内网络拓扑重构.

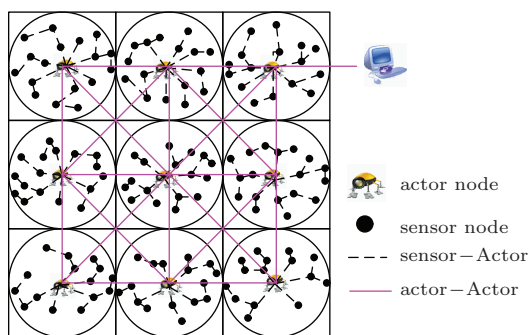


图 1 (网刊彩色) 标准执行器分布图

图 2(b) 描述了一个简单场景中节点失效之后的恢复情况, 可以看出失效节点的邻居会重定位到合适的位置, 实现对尽可能多 sensor 的覆盖. 在单个或多个 actor 节点失效的情况下, 通常是通过移动剩余 actor 节点来暂时接替失效的 actor 节点为 sensor 节点服务; 同时为了减少 actor 节点的移动距离, 只考虑移动失效 actor 附近区域的邻居 actor 节点来使局部区域的 sensor 节点覆盖数最大化, 因此失效区域的覆盖恢复问题实际等价于求解局部

覆盖最大化的问题, 而在节点失效后如何恢复覆盖的是一个 NP 难问题.

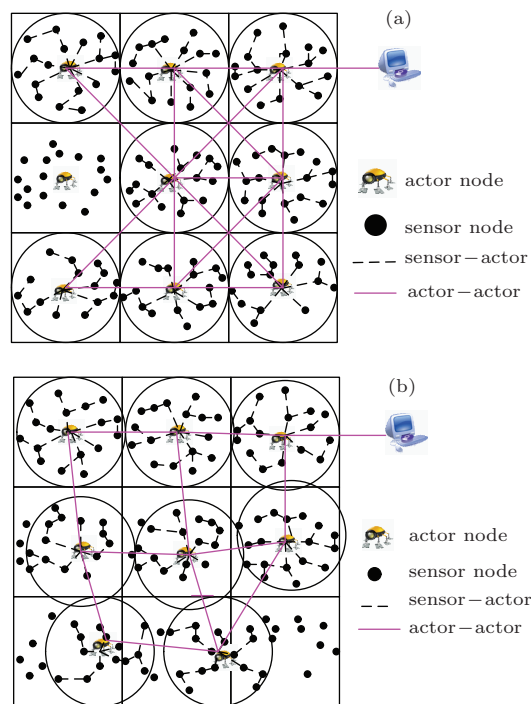


图 2 (网刊彩色) 失效前后执行器分布图

定理 1 WSNs 覆盖恢复问题是 NP 难问题.

证明 覆盖恢复问题可以等价于求解局部覆盖最大化问题, 因此先证明 WSNs 覆盖最大化问题是 NP 难的. 假设 A 为求解 WSNs 覆盖最大化问题的算法, 则利用 A 可以构造出求解能否用 k 个半径为 r 的圆盘完全覆盖平面点集 P 的判定问题的算法. 在算法 A 中, 判断 P 上的点是否被完全覆盖可以在多项式时间内完成. 因此 k -圆盘完全覆盖问题可以在多项式时间内归约到 WSNs 覆盖最大化问题. 由于 k -圆盘完全覆盖 P 问题已被证明为 NP 难问题^[13], 因此覆盖最大化问题是 NP 难问题, 从而证明覆盖恢复问题是 NP 难问题.

如上所述, 由于覆盖恢复问题是 NP 难问题, 无法直接求解局部区域最大覆盖问题, 因此本文将构造一种近似算法求解覆盖问题.

2.3 覆盖恢复问题的近似求解

覆盖恢复问题无法在多项式时间内求解, 本文的求解方案是对网络进行分区, 将每个分区的中心设为 actor 的候选位置, 如此问题就转换成了集合覆盖问题^[18]. 对于集合覆盖问题, 现有的贪心近似

算法可以求出近似最优解. 但是考虑到贪心算法属于全局算法, 很难在分布式网络中实现, 因此本文采用贪婪搜索的方法按区进行局部搜索, 找出最优位置的近似解. 这个近似解和分区的大小有关, 分区越细, 解就越精确, 且这个求解过程是可以通过有限步搜索实现的.

定理2 采用贪婪分区搜索的WSANs覆盖问题是 P 问题.

证明 假设整个网络被分为 n 个分区, 一共有 k 个actor节点, 且actor节点只能移动到各分区的中心位置. 如此整个问题可等价为 k -圆盘在点集 P 上选择固定点集 K 的覆盖问题. 假设每次搜索步长一致, 每次搜索所用的时间为 T . 对于每一个actor节点其候选位置共有 n 个, 对于 k 个actor节点来说, 可选位置一共有 n^k 种组合. 如采用贪婪搜索, 找出近似最优位置集 $P_m(a_i)$ 所需的时间为 $T(k) = T \times n^k$, 可见在节点数 k 固定的情况下, 算法的时间复杂度为 $O(n^k)$, 证明其可在多项式时间内解决.

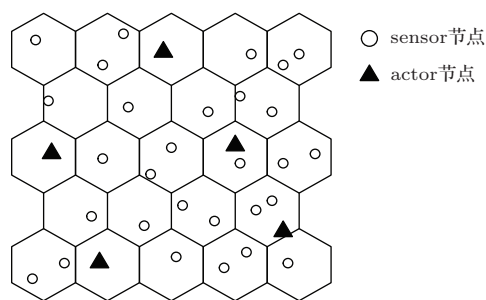


图3 蜂巢结构的网络分区图

本文的分区方案是利用文献[17]中的蜂巢(hexagonal cell)结构来将感知区域分为若干个六边形. 如图3所示, 正六边形是高度对称的图形, 相

邻六边形中心点的距离都是相等的, 如此在遍历整个网络时可以保证每次搜索的公平性和一致性. 但是如果将这种贪婪式的搜索方案应用到覆盖恢复会有一些局限性, 一是搜索区域过大, 算法收敛时间很长; 二是需要一个中心节点来收集所有节点的位置信息, 从而产生大量通信开销. 为了满足覆盖恢复只考虑局部覆盖数的情况, 需要对网络的初始部署加以限制, 因此本文采用图1中的初始场部署方式, 以网格划分actor活动区域, 一方面可减少actor节点覆盖范围的重叠, 另一方面可限制每个actor的搜索区域. 当有节点失效时, 其邻居网络的节点会发起搜索, 同时搜索的范围也被限定在了网格区域之内.

3 HMFR算法

3.1 基本思想

出现失效actor节点后, 网络会产生一个覆盖区域空洞, 此时需通过剩余actor的移动来增加actor对sensor的覆盖数. 出于减少移动距离的考虑, HMFR算法会选取失效节点的邻居节点向失效区域移动, 为了找出移动的最优位置, actor按六边形分区进行搜索; 同时为了限制actor的移动范围, 规定每个actor只能在自己所在的网格内移动.

3.2 蜂巢结构简介

文献[15]中蜂巢结构的构建主要是通过节点的坐标转换来完成的. 整个网络按六边形(hexagonal cell)分簇, 每个六边形边长为 r , 其中心点落在 (id, jh) 的位置, i 和 j 是整数, 此分区单元被命名为 $[i, j]$, $[i, j]$ 被称为cell坐标. 图4(a)给出了六边形

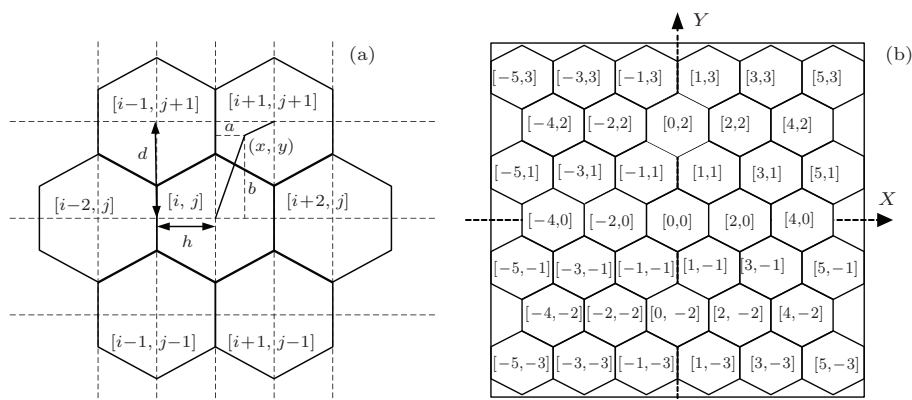


图4 (a) cell坐标与直角坐标的联系; (b) cell坐标

$[i, j]$ 及其邻居 cell 坐标和直角坐标的对应关系, 而图 4(b) 给出了整个蜂巢结构的单元命名情况.

随机分布在网络中的节点可根据文献 [15] 中的算法 2 将自身的直角坐标转化为对应的 cell 坐标. 由于此算法是一个本地算法, 因此不需要通信开销, 且计算量很小, 非常适合能量有限的 sensor 节点. 为了统计 sensor 节点覆盖数, HMFR 会在每个 cell 中放置一个计数器用于记录其包含的 sensor 个数, 同时每个 actor 可以根据自身的 cell 坐标找出邻近的 cell 坐标及其对应的位置.

3.3 局部遍历和最优移动

当一个或多个节点失效之后, 其邻居节点需要移动到合适的位置来暂时接管失效区域内的 sensor 节点, 为了找到一个最优的位置来进行协同移动, 需要对失效节点的临近区域进行局部遍历. 整个算法如算法 1 所示, 一开始记录下失效节点 a_F (a_F 代表失效节点的集合) 的所有未失效邻居节点的位置序列 $p(a_i)$, 并存储在候选位置序列 $Candidate-Position(0)$ 中 (算法 1 第 1 行, 候选位置意味着当前位置有可能是局部搜索中的最优移动位置), 然后每个邻居节点依次搜索附近的 cell (第 7 行), 每次的搜索步进为 1 个六边形. 搜索原则一是保证 actor 向着失效节点移动, 如果出现多节点失效的情况, 就向距自己最近的失效节点移动; 二是选取计数器值最大的 cell 作为候选最优位置, 这样既可以缩小搜索范围也可以保证向 sensor 节点密度大的方向搜索. 每一轮搜索结束之后, 更新当前的节点位置 p_{a_i} (第 8 行), 同时更新候选位置序列信息 (第 9 行), 并计算出当前的局部节点覆盖数 $C(j)$ (第 10 行). 当所有节点都搜索到所在正方形区域边界时, 整个局部搜索便终止了.

算法收敛后可以得到所有候选位置序列对应的 actor 对 sensor 节点局部覆盖数, 从中选出最大值 (第 14 行), 其对应的候选位置序列就是局部最优位置序列, 之后直接把邻居节点移动到相应位置即可. 这些位置可以看做 WSNs 网络局部最大覆盖问题的近似解.

算法 1 (HMFR 算法):

```

1  $Candidate-Position(0) = p(a_i) \ \forall a_i \mid a_i \in$ 
   $Neighbor(a_F) \ \&\& \ a_i \notin a_F$ 
2  $j = 0$ 
```

```

3 While (not every actor stop searching)
4 for  $a_i \in Neighbor(a_F) \ \&\& \ a_i \notin a_F$ 
5 if (actor does not reach the border)
6  $j = j + 1;$ 
7 search nearby cell
8 update  $p_{a_i}$ 
9  $Candidate-Position(j) = update(Candidate-$ 
   $Position(j-1), p_{a_i})$ 
10  $C(j) = \bigcup C(a_i)$ 
11 end if
12 end for
13 end while
14 Find the  $Candidate-Position(m)$  assigned
  to maximum  $C(j)$ 
15 Move all neighbor to  $Candidate-Position$ 
  ( $m$ )
```

3.4 算法的进一步优化

最优移动只考虑了失效节点临近区域的情况, 而没有考虑其余位置的 actor 节点. 设 actor 集合为 G_a , 则下式给出了剩余节点集合 G_{other} 的定义:

$$G_{other} = \{a \in G_a \mid a \notin (Neighbor(a_F) \cup a_F)\}. \quad (5)$$

由于网络初始部署的特殊性, 可看出一般情况下, actor 节点处于所在网格的中心可以最大化 sensor 覆盖数, 因此将 G_{other} 中的所有节点都移动回自己的初始位置, 以增加 actor 对 sensor 的覆盖数, 其算法描述如下, 其中 op_{a_i} 代表节点 a_i 初始位置.

```

for  $a_i \in G_{other}$ 
  move  $a_i$  to  $op_{a_i}$ 
```

3.5 算法性能分析

在 HMFR 算法中, 假设失效节点一共有 N 个未失效的邻居节点, 每次搜索所需时间为 $T(s)$, 那么所有邻居节点搜索完一轮所需时间为 $N \times T(s)$. 考虑单个节点搜索的距离, 其最坏情况如图 5 所示, 在 actor 所在正方形区域中, actor 节点 a_i 沿着正方形 ABCD 的 AB 和 BC 边搜索, 设正方形的边长为 L , 相邻六边形的横向间隔为 $2h$, 纵向间隔为 d (可参考图 4(a)), 则节点 i 搜索时经过的 cell 个数为 $L/(2h) + L/d$, 因此所有邻居节点搜索完毕的最

长时间是

$$T(N) = \left(\frac{L}{2h} + \frac{L}{d} \right) \times N \times T(s),$$

所以此算法的时间复杂度为 $O(n)$.

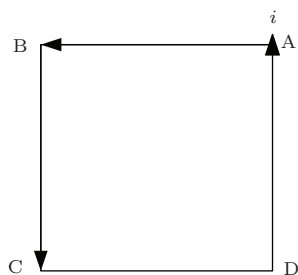


图5 最长搜索距离

4 算法仿真与性能分析

为了考察算法的性能,我们对HMFR算法进行仿真实验,并加入平均算法,COLA和RCC算法进行比较.

4.1 实验参数

仿真实验是在一个 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的区域里随机部署 1000 个 sensor 和 25 个 actor 节点,网络被划分为 25 个网格,actor 初始部署位置固定在网格中心.假设 actor 节点可以随时与其他节点通信,节点的最大通信范围为行动半径的两倍.在此次实验中,我们令 25 个 actor 节点在本网格内随机进行移动.移动之后,随机选取失效节点,失效节点个数为一个或多个.实验参数如表 1 所示,actor 节点行动半径 R_a 及失效节点个数 N 作为仿真输入参数,以观察不同值下的算法性能;多节点失效的对照实验,控制 $R_a = 140 \text{ m}$.

表 1 算法实验参数

网络区域	1000 m × 1000 m
sensor 节点个数	1000
actor 节点个数	25
sensor 节点通信半径/m	100
actor 节点行动半径 R_a /m	100, 110, 120, 130, 140
actor 节点通信半径 R_c	$2R_a$
失效节点个数	1, 2, 3, 4, 5

在节点失效后,利用HMFR算法进行失效恢复,同时加入平均算法、COLA, RCC进行性能比

较.在HMFR算法中,每个分区的计数器记录区域内的sensor节点个数,每个actor节点中储存临近actor节点以及自身区域覆盖的sensor节点数.算法的评价指标包含actor节点对sensor的覆盖数(考察恢复算法的效果),actor节点的移动距离(考察能耗情况)以及sensor节点距离最近actor节点的最远距离(考察极端情况下actor对sensor的服务,越小越好).

4.2 算法分析

1) 平均算法评估分析.

平均算法是指在出现失效actor节点后,其邻居直接向失效节点移动原距离一半的距离,此算法非常简单,但是并没有考虑覆盖性能.

2) COLA 算法评估分析.

COLA^[9]算法主要是先计算出actor节点所在区域的1-中心位置,actor节点直接移动至此位置.这个算法考虑了让actor尽量处于sensor节点集的中心位置,减少所有sensor到actor的总的距离,从而间接提高每个区域内的WSANs覆盖数.

3) RCC 算法评估分析.

RCC^[2]算法是利用分子间排斥力的思想,算法根据相邻节点距离和方向(产生一个排斥合力)来计算出节点的移动方向和距离.为了保证节点的连通,每次的移动距离也进行了限制,同时还考虑了边界sensor排斥力的影响.

4.3 实验结果和算法性能分析

4.3.1 单节点失效

1) 覆盖数性能分析.

从图6和图7可以看出,在单节点失效情况下, HMFR算法性能是最好的,主要是因为其余算法未直接求解WSANs覆盖数的最优解,而HMFR算法是接近最优解的算法,且平均算法的性能最差,这和之前的分析是符合的.

2) 移动性能分析.

从图8和图9中可以看出, HMFR算法的性能依旧是最好的,节点的平均移动和最大移动距离都最小,这和算法设计有关,由于HMFR算法的设计目标是寻找最优位置,而这个最优位置通常不会让失效节点的邻居同时移动很多.而其余算法则不然,比如平均算法中的移动方式是让邻居节点都向

失效中心区域靠拢, 很容易造成相邻节点的覆盖范围重叠过大的问题, 这种移动方法既不经济, 也无法使覆盖数最大. 而在 RCC 算法中, 由于利用了虚拟势场, 导致只要存在相邻节点之间的排斥力就会有节点移动, 所以可以看出在增大了 actor 行动半径之后, 节点的邻居数更多了, 移动距离也更大了.

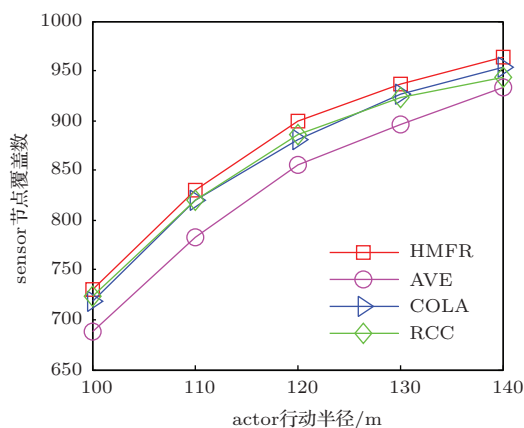


图6 (网刊彩色) sensor 节点覆盖数 (单节点失效)

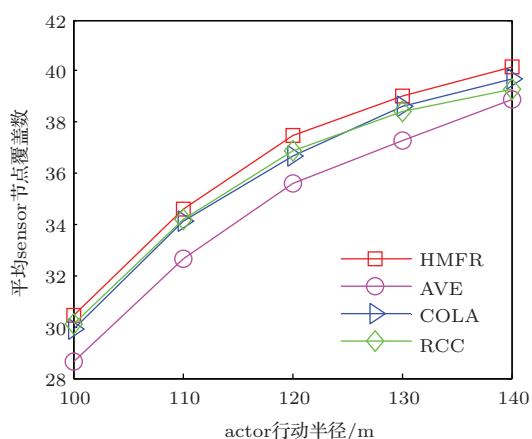


图7 (网刊彩色) 平均 sensor 节点覆盖数 (单节点失效)

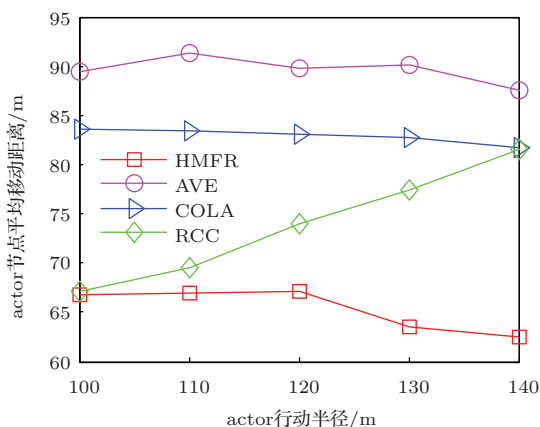


图8 (网刊彩色) actor 节点平均移动距离 (单节点失效)

3) 极端情况下响应实时性分析.

从图 10 可以看出, HMFR 算法性能要稍逊于平均算法, 而优于其余两种算法. 由于平均算法中邻居节点更接近节点区域中心位置, 所以最靠近失效节点的 sensor 能更接近其余 actor. 但是考虑到 HMFR 算法在兼顾了覆盖数和移动距离的前提下, 对 sensor 节点的极端响应能力也非常接近平均算法的性能, 说明其综合性能最好.

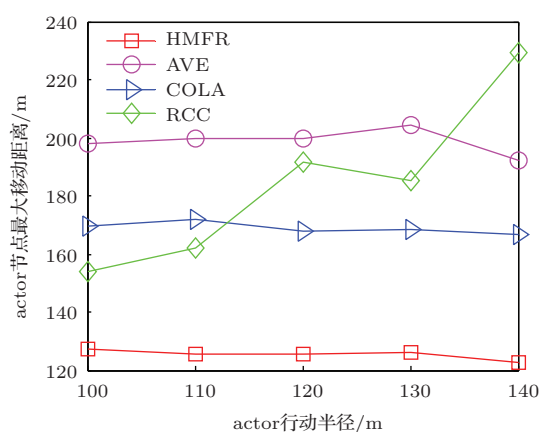


图9 (网刊彩色) actor 节点最大移动距离 (单节点失效)

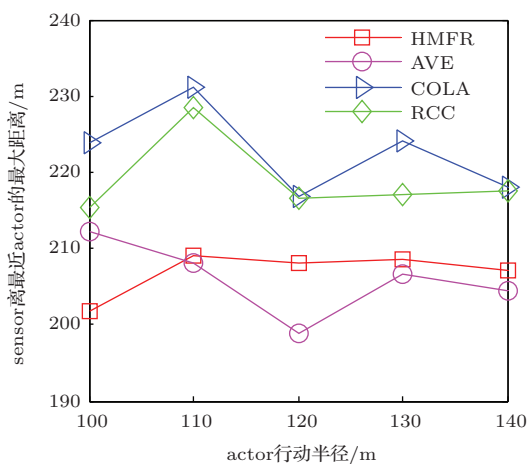


图10 (网刊彩色) sensor 离最近 actor 的最大距离 (单节点失效)

4.3.2 多节点失效

1) 覆盖数性能分析 (多节点失效).

从图 11 和图 12 可以看出在多节点失效的情况下, HMFR 算法性能依然是最好的, 而且随着失效节点的增加, 性能领先的优势更加明显.

2) 移动性能分析 (多节点失效).

从图 13 和图 14 可以看出 HMFR 算法的移动距离是最小的, 且在更多节点失效时优势更加明显.

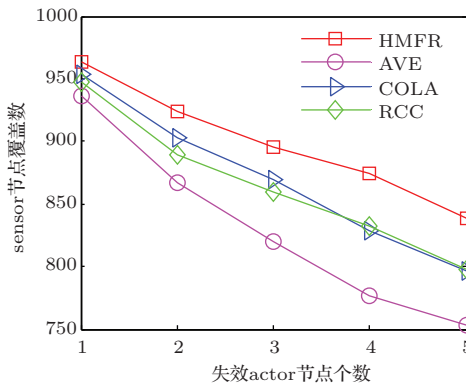


图 11 (网刊彩色) sensor 节点覆盖数 (多节点失效)

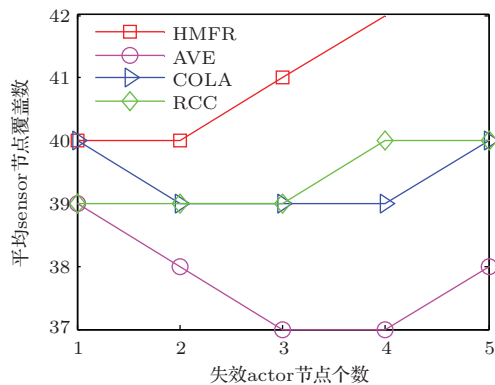


图 12 (网刊彩色) 平均 sensor 节点覆盖数 (多节点失效)

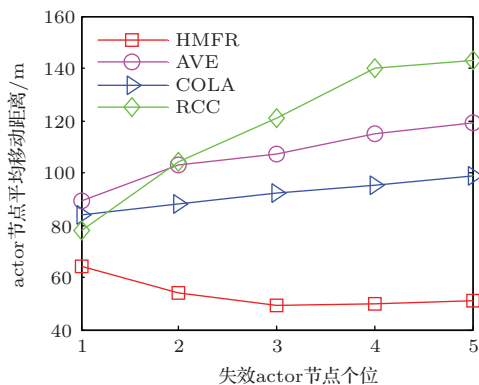


图 13 (网刊彩色) actor 节点平均移动距离 (多节点失效)

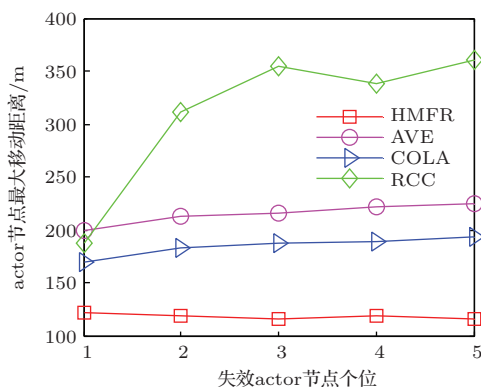


图 14 (网刊彩色) actor 节点最大移动距离 (多节点失效)

3) 极端情况下响应实时性分析 (多节点失效).

从图 15 中可以看出 HMFR 的总体性能在行动半径为 140 时不如平均算法, 但是和另外两算法相当.

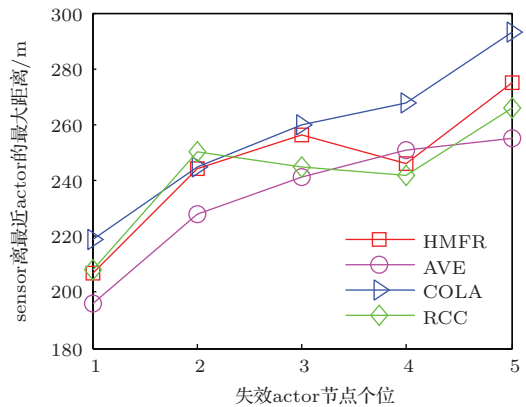


图 15 (网刊彩色) sensor 离最近 actor 的最大距离 (多节点失效)

4.4 综合性能分析

结合单节点和多节点失效的情况来看, HMFR 算法实现了网络覆盖数最大, 移动距离最小的目标, 虽然在极端情况下响应实时性方面有些逊色, 略微落后于平均算法, 但由于此性能的实际影响最小, 因此 HMFR 算法的综合性能是最优的.

5 结 论

本文研究的主要问题是: 在 WSNs 中节点失效的情况下如何以尽量小的节点移动代价恢复 actor 节点的服务, 实现局部区域的 actor 节点覆盖最大化. 本文首先说明了 WSNs 中相关的理论模型以及失效节点恢复的问题, 在此基础上提出了一种可以近似求解 WSNs 中局部覆盖最大化的算法 HMFR; 这个算法在限制网络初始部署的条件下拥有很好的性能. 最后通过实验考察了在不同 actor 行动半径以及失效节点个数的情况下 HMFR 算法的一些性能指标, 通过与现有的算法对比, 发现相对于其他的恢复算法, HMFR 算法拥有更好的综合性能.

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Kasimoglu I H 2004 *Ad Hoc Network Journal* **2** 351
- [2] Akkaya K, Janapala S 2008 *Computer Networks* **52** 2779

- [3] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E 2002 *Computer Networks* **38** 393
- [4] Petriu E M, Georganas N D, Petriu D C, Makrakis D, Groza V Z 2000 *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine* **3** 31
- [5] Gungor V C, Akan O B, Akyildiz I F 2008 *IEEE/ACM Trans. on Networking* **16** 359.
- [6] Melodia T, Pompili D, Gungor V C, Akyildiz I F 2007 *IEEE Trans. on Mobile Computing* **6** 1116
- [7] Liu H R, Yin W X, Han T, Dong M R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 040509 (in Chinese) [刘浩然, 尹文晓, 韩涛, 董明如 2014 物理学报 **63** 040509]
- [8] Liu B, Dong M R, Yin R R, Yin W X 2014 *Chin. Phys. B* **23** 070510
- [9] Melodia T, Pompili D, Gungor V C, Akyildiz I F 2005 *ACM Mobihoc*, Urbana-Champaign, IL, May 2005 p99
- [10] Akkaya K, Younis M 2006 *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Montreal, CA, September 25–28, 2006 p25
- [11] Akkaya K, Younis M 2008 *International Journal of Sensor Networks* **3** 152
- [12] Ban DS, Wen J, Jiang J, Dou WH 2011 *Journal of Software* **22** 2089 (in Chinese) [班冬松, 温俊, 蒋杰, 窦文华 2011 软件学报 **22** 2089]
- [13] Che N, Li ZJ, Jiang SX 2011 *Journal of Software* **22** 1361 (in Chinese) [车楠, 李治军, 姜守旭 2011 软件学报 **22** 1361]
- [14] Tuan CC, Wu YC 2014 *Science China Information Sciences* **57** 1
- [15] Ranga V, Dave M, Kumar Verma A K 2013 *Wireless Personal Communication* **72** 857
- [16] Kim H, Cobb J. A 2012 *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)* Jan 30–Feb 2 2012 p985
- [17] Erman A T 2011 *Ph. D. Dissertation* (University of Twente)
- [18] Cormen, T H, Leiserson, C E, Rivest R L, Stein, C (translated by Yin J P, Xu Y, Wang G, Liu X G, Su M, Zou H M, Wang H) 2013 *Introduction to Algorithms Third Edition* (China Machine Press) pp640–641 (in Chinese) [科尔曼 T H, C E, 李维斯特 R L, 斯坦 C 著 (殷建平, 徐云, 王刚, 刘晓光, 苏明, 邹恒明, 王宏志译) 2013 算法导论 (机械工业出版社) 第 658—659 页]

Honeycomb architecture based mobile fault-tolerant recovery algorithm in WSANs*

Du Jing-Lin¹⁾²⁾ Zheng Ruo-Qin^{1)†} Xie Li²⁾

1) (*School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

2) (*Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

(Received 7 July 2014; revised manuscript received 25 August 2014)

Abstract

This paper aims at finding an algorithm in wireless sensor and actor networks (WSANs) to recover the failure actor. First, this paper describes the real-time coverage model in WSANs, proves WSAN's coverage recovery is NP-hard. A cell-based mobile fault-tolerant algorithm HMFR is presented to recover the failure actor, which has a good performance under a limited condition of initial deployment of network. Through simulation experiments, the results show that the algorithm is more effective than the present algorithms in terms of actor coverage and move distance.

Keywords: wireless sensor and actor network (WSANs), deployment of nodes, coverage recovery, hexagonal cell

PACS: 89.20.Ff, 02.40.Pc

DOI: 10.7498/aps.64.018901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61372128, 61471153), the Science and Technology Support Program of Jiangsu Province, China (Grant No. BE2011195), and the Jiangsu Provincial Research Scheme of Nature Science for Higher Education Institute (Grant No. 14KJA510001).

† Corresponding author. E-mail: zhengruoqin@2008.sina.com