物理学报 Acta Physica Sinica



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 fusaggregation 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⁾

(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

^{© 2015} 中国物理学会 Chinese Physical Society

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 WSANs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 WSANs 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 WSANs 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 WSANs实时覆盖问题

Gungor 等认为^[5], WSANs 的实时性是指存在 某个上界 Δ_{e2a} ,从WSANs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WSANs由m个sensor节 点 s_1 , …, s_m 和n个actor节点 a_1 , …, 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:

$$C_{i} = \begin{cases} 1, \quad \exists \ j | d(s_{i}, a_{j}) \leq R_{a}, (s_{i} \in S, a_{j} \in A), \\ (1 \leq i \leq m), \ (1 \leq j \leq n), \\ 0, \quad \not{I} \not{!} th, \end{cases}$$
(1)

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

$$(2)$$

覆盖最大化的目标函数为

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

约束条件为

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





定理1 WSANs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WSANs覆盖最大化问 题是NP难的. 假设A为求解WSANs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WSANs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 会有一定的局限性,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,其邻居网格的 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.

局部遍历和最优移动 3.3

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pai (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WSANs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 $(a_{\rm F})$ && $a_i \notin a_{\rm F}$

3 While (not every actor stop searching) 4 for $a_i \in \text{Neighbor}(a_F)\&\&a_i \notin a_F$ 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:

 $G_{\text{other}} = \{ a \in G_a | a \notin (\text{Neighbor}(a_{\text{F}}) \cup a_{\text{F}}) \}.$ (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opa;代表节点ai初始位置.

for $a_i \in G_{\text{other}}$ 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 m×1000 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 $R_a = 140$ m.

网络区域	$1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$
sensor 节占个数	1000
	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

表1 算法实验参数

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WSANs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WSANs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WSANs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

- 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 Pres) 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