

基于虚拟力的栅栏覆盖中可移动节点调度协议

曹莹莹, 于建江, 朱立才

(盐城师范学院 信息科学与技术学院, 江苏 盐城 224002)

摘 要: 在栅栏方式部署的无线传感器网络存活后期, 借助少量具有一定移动能力的无线传感器节点, 可以有效延长网络的生存期. 首先, 分析了可移动无线传感器节点分布特点, 提出了一种确定寻找移动替换无线传感器范围的自适应调整协议; 然后, 建立了不同状态节点间的虚拟力模型, 提出了一种基于虚拟力的移动传感器位置优化算法; 最后, 提出了一种基于虚拟力的栅栏覆盖移动节点活跃调度协议. 实验结果表明, 提出的方法在覆盖率与网络生存期方面均明显高于传统的静态无线传感器网络, 网络负载没有显著增加.

关键词: 栅栏覆盖; 虚拟力; 可移动无线传感器; 最优化活跃调度协议

中图分类号: TP309

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)12-0121-04

An Active Mobile Sensor Scheduling Protocol Based on Virtual Force

CAO Ying-ying, YU Jian-jiang, ZHU Li-cai

(School of Information Science and Technology, Yancheng Teachers University, Yancheng 224002, China)

Abstract: In the last period of wireless sensor network deployed by barrier coverage, the lifetime can be prolonged with the help of limited mobile wireless sensor. In this paper, we first analyze the distribution characteristics in the scene and propose an adaptive adjustment method of scoping replaceable mobile wireless sensor. Then, we establish a virtual force model of wireless sensor in different states. Last, we propose a mobile sensor active scheduling protocol based on virtual force. Simulations show that our methods provide effective enhancement in coverage probability and lifetime, compared with traditional static wireless sensor network. And, our methods bring minimal increase in network load.

Key words: barrier coverage; virtual force; mobile wireless sensor; optimal active scheduling

1 引言

入侵检测和边界监控是无线传感器网络的重要应用之一^[1]. 栅栏方式部署的无线传感器节点能够准确地检测到穿越其覆盖区域的运动.

目前, 利用有限数量的移动节点辅助构建 k 栅栏覆盖的研究尚未得到充分的关注. 在文献[2]中, 首次讨论了使用移动能力有限的无线传感器节点填补栅栏中的空洞问题, 并且提出了一个最小移动距离的栅栏构建算法. 文献[3-5]进行了相关研究, 提出了相应的 WSN 部署方法.

在无线传感器网络部署时, 按照检测范围的大

小与检测强度与网络运行时间的要求, 在被保护目标的外围带状区域中随机抛洒一定数量的无线传感器节点, 其中包含少量的可移动无线传感器节点. 本文考虑采用机械驱动的可移动节点可以进一步减少其因移动位置而造成的电池能耗.

在网络运行初期, 移动无线传感器处于休眠状态, 仅接收邻居节点的消息, 不参与检测与路由. 在网络运行后期, 如果某小区域因电力耗尽而死亡的节点过多, 剩余存活节点法构成 k 个栅栏, 能量即将耗尽活跃节点在邻居中无法找到可唤醒节点时, 将广播可移动节点请求消息, 寻找合适的可移动节点替代其工作. 可移动节点收到该请求消息后, 迅速移

动到合适位置,并进入活跃状态,执行本网络中的节点活跃调度协议,与其他存活节点协作构成新的 k 个栅栏。为了有效实现这一策略,需要解决两个关键问题:(1)静态无线传感器节点如何设定寻找移动替换节点的范围并自适应调整;(2)如何计算可移动无线传感器节点最终位置,该位置应具有全局最优性,即在活跃调度算法的调控下,能够使得全网生存期最大化。

2 寻找移动替换传感器范围自适应调整协议

以即将被替换的无线传感器节点为中心的圆盘区域内广播可移动节点请求消息,寻找替换移动节点是一种较为合理且容易实现的方案,但是此圆盘区域的半径设置是一个值得商榷的问题。栅栏覆盖示意图见图 1。

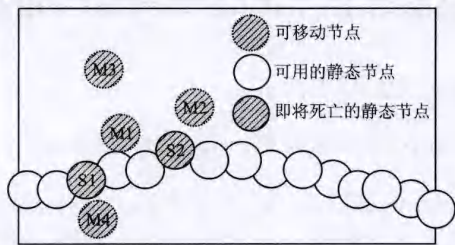


图 1 栅栏覆盖示意图

首先,该半径值应该是动态可调整的。当在初始设定的范围内无法找到移动替换节点,即将被替换的无线传感器节点可以自适应地增大该半径值,以便在更广泛的范围内寻找合适的移动替换节点。其次,寻找半径的大小与目前存活且尚未参与替换工作的可移动节点分布密度相关,不宜太大。半径越大,广播可移动节点请求消息消耗的能量越高,如果寻找区域的半径超过了节点的通信半径,可移动节点请求消息还需要借助其他节点进行多跳转发。另一方面,寻找范围越大,可移动节点进行位置调整时需要移动的距离越大,能耗相对越大。第三,寻找区域的半径同样不宜太小。寻找区域越小,找到合适的替换移动节点的概率越小,另一方面,在过小区域中得到的最优方案容易陷入局部最优的现象。

本文以目前存活且尚未参与替换工作的可移动节点分布密度作为设定寻找区域半径的重要参考。假设,目前存活且尚未参与替换工作的可移动节点平均分布密度为 λ_m ,理论上,当寻找区域的半径 R_i 值为 $\frac{1}{\sqrt{\pi\lambda_m}}$ 时,该寻找区域里有一个上述的可移动节

点。然而, λ_m 值是动态变化的,通过广播相关查询信息进行查询统计虽然可以较为准确地获得其实时值,但能耗较大。本文发现无线传感器网络中可移动节点的初始分布密度是一个固定值,在网络初始化阶段 sink 节点会向全网以泛洪方式广播包括该初始移动节点分布密度在内的网络状态信息。同时考虑到,可移动节点在位置调整成功并激活后都会在一定范围内广播其状态信息,无线传感器网络中的其他节点可以通过“偷听”这些广播信息的方式,主动学习网络中可移动节点的数量、位置、能力等状态变化情况。因此,本文提出了一种寻找移动替换节点范围自适应调整协议 AAP-SRMS,该协议采用在自学习的基础上预测 λ_m 值,进而确定寻找区域的半径 R_i 值。协议工作过程如下:

step 1: 网络初始化阶段,每个节点根据 sink 节点广播的可移动节点初始密度,确定寻找区域 A_f 的半径,保证 A_f 区域内至少两个可移动节点,并启动可移动节点状态表 B_i 和计数器 $\text{Count}_m(A_f)$,分别记录学习到的可移动节点的状态(可用、已用或死亡)以及未被使用且存活的可移动节点数量。

step 2: 在网络运行过程中,存活节点“偷听”网络中的消息,并更新 B_i 和 $\text{Count}_m(A_f)$ 的值。当节点“偷听”到其他节点广播的 B_i 表和可移动节点广播的状态信息,则更新自己的 B_i 。当节点“偷听”到该寻找区域 A_f 内可移动节点被使用,则自己的 $\text{Count}_m(A_f)$ 减 1;当计数器 $\text{Count}_m(A_f)$ 值为阈值 $T_m(A_f)$ 时,则跳转到第 3 步执行。

step 3: 如果计数器 $\text{Count}_m(A_f)$ 值为阈值 $T_m(A_f)$ 的节点为可移动节点,则将消息广播区域 A_i 的半径扩大一倍,并在新的 A_i 内广播自己的 B_i 。如果计数器 $\text{Count}_m(A_f)$ 值为阈值 $T_m(A_f)$ 的节点为静态节点,则将寻找区域 A_f 的半径扩大一倍,并在新的 A_i 内广播自己的 B_i 。当寻找区域 A_f 未超出栅栏边境,则返回第 2 步继续执行,否则结束 A_i 半径和 A_f 半径的调整,并向包括 sink 节点发送整个区域内无法找到可用节点消息,提醒该无线传感器网络的维护人员及时通过其他途径提高网络中的存活节点数量,协议终止运行。

需要说明的是,存活节点通过“偷听”方式获取的网络中可移动节点数量和状态信息并不完全,因此计数器 $\text{Count}_m(A_f)$ 的阈值不适宜设置为 0,随着 A_i 范围的不外扩,存活节点获取到的信息会越来越完全, $\text{Count}_m(A_f)$ 的阈值则可以不断减少,并等于 0。此外,当 A_i 范围超过节点的单跳通信范围,其

广播消息需要其他节点按照网络中使用的广播通信协议进行转发。

3 虚拟力的分析

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k \vec{F}_{ij} + \vec{F}_R + \sum_{h=1}^m \vec{F}_{ih} \quad (1)$$

节点 i 所受的引斥力如式(1)所示,其中, F_{ij} 表示节点 i 与节点 j 间的引斥力, F_h 表示节点 i 与发起可移动节点请求的节点 h 间的引斥力, F_R 表示障碍物对节点 i 的斥力。

节点间的引斥力 F_{ij} 与两节点间距离成反比,与剩余能量成正比,与消耗能量成反比,因此,两节点间的虚拟力表示如式(2)所示, $Left_j$ 表示节点 j 的剩余能量, $Ecost_j$ 表示节点 j 在其一个活跃周期内的能耗, α_{ij} 表示节点 i 与节点 j 间的角度, R_c 表示通信半径, d_{ij} 表示节点 i 与节点 j 间的欧式距离, W_A 为引力因子, W_R 为斥力因子。

$$\vec{F}_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{w_A \cdot Left_i \cdot Left_j \cdot (R_c - d_{ij})^p}{Ecost_i^2 + Ecost_j^2}, \alpha_{ij} \right), & \text{if } d_{ij} > d_h \\ 0, & \text{if } d_{ij} = d_h \\ \left(\frac{w_R \cdot Left_i \cdot Left_j}{(Ecost_i^2 + Ecost_j^2) \cdot d_{ij}^p}, \alpha_{ij} + \pi \right), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

发起启动请求的节点 h 对可移动节点 i 的引力表示如式(3)所示,其中 W_H 为节点 h 对节点 i 的引力因子, α_h 表示节点 i 与节点 h 间的角度, d_{ij} 表示节点 i 与节点 h 间的欧式距离。其他参数的物理含义与式(2)相同。

$$\vec{F}_h = \left(\frac{w_H \cdot Left_i \cdot (R_c - d_{ij})^p}{Ecost_i^2}, \alpha_h \right), \text{if } d_{ij} > 0 \quad (3)$$

文献[6]对式(2)、(3)中参数 p 的取值进行了分析讨论,它认为 p 取值为 1 时,算法的局部精细搜索能力和全局搜索效率相对于其他取值都有所提高,因此本文中 p 取值也为 1。

修复节点的运动方程如式(4):

$$P_i(t+1) = \frac{F_i}{|F_i|} \bar{v} + P_i(t) \quad (4)$$

考虑到现有的移动无线传感器节点速度较难自适应调节,因此,本文考虑使用相同的平均速度 v 描述节点运动过程中的速度变化。

4 基于虚拟力的移动传感器位置优化算法 MSLOA

基于以上分析,本文提出了 MSLOA 算法,该

算法是一种分布式算法,在每个被激活的可移动无线传感器节点上并发执行。在任意一个可移动无线传感器节点 S_i 中 MSLOA 算法的描述如下:

输入:网络中所有已知的存活无线传感器节点集合 ϕ 的状态信息,对于第 j 个无线传感器节点状态可以表示为 $\langle P_j, R_{js}, R_{jc}, Left_j \rangle$ 四元组,分别描述无线传感器节点 S_j 所在位置、最大感知半径、最大通信半径、剩余能量;网络中所有已知的发起可移动节点请求的无线传感器节点集合 Φ 的状态信息,对于第 h 个发起可移动节点请求的无线传感器节点 S_h 的状态可以表示为 $\langle P_h, R_{hc} \rangle$ 二元组,分别描述无线传感器节点所在位置、最大通信半径。

输出:可移动节点 S_i 最终停留位置的信息。

Begin :

初始化迭代计数器 $t = 0$, S_i 所受合力 $F_i = 0$, S_i 所受斥力 $F_R = 0$;

While (1)

$t++$;

For each $S_j \in \phi$

$F_{ij} = 0$;

For each $S_h \in \Phi$

$F_{ih} = 0$

For each $S_j \in \phi$ and $i \neq j$

使用式(2),计算 S_j 对可移动节点 S_i 虚拟力 F_{ij} ;

For each $S_h \in \Phi$

使用式(3),计算 S_h 所覆盖区域对可移动节点 S_i 的虚拟力 F_h ;

使用式(1),计算合力 F_i ;

If $|F_i| > \epsilon / *$ 如何 F_i 大于阈值 $\epsilon / *$

使用式(4),计算该节点的新位置

Else

可移动节点 S_i 广播自己的新位置;

Break;

End

每一步长移动初始,节点更新网络中存活节点、障碍物、空洞的位置坐标,以适应网络拓扑的动态变化,并计算其自己所受到的引斥力合力。节点并不是在每一次计算出 P_{new} 都需要移动,而是将计算出来的 P_{new} 记录下来,当算法迭代停止的时候,利用最后一次得出的 P_{new} ,一次性移动到该坐标位置上,并广播自己的新位置。此算法中,设置了一个阈值 ϵ ,当计算出的合力小于 ϵ 时,本文认为进一步调整该移动节点位置对整体性能提高不大,则停止迭代。

网络中会出现不止一个移动节点需要移动的情况,一个移动节点位置发生改变后,有可能影响其他移动节点的所受虚拟力情况.为了降低计算复杂度,避免多个移动节点同时移动的情况,本文选择所受虚拟力绝对值最大的节点优先计算移动方案.

5 基于虚拟力的栅栏覆盖移动节点调度协议

在无线传感器网络部署的中前期,网络中节点丰富,网络可以使用 LBCP^[2]、DCACBC^[3]等协议周期性调度不同的无线传感器节点构成 k 栅栏覆盖.在网络运行后期,能量即将耗尽活跃节点使用上述协议在邻居中无法找到可唤醒节点时,则需要寻找可移动节点替换其工作.考虑到系统实现的可行性与低能耗,本文提出了一种分布式协议,基于虚拟力的栅栏覆盖移动节点调度协议 MSCP,该协议描述如下:

step 1:上文中能量即将耗尽活跃节点启动 AAP-SRMS 协议,确定寻找替换移动节点的范围,并在该范围内广播可移动节点请求消息.如果 AAP-SRMS 协议因为整个区域内无法找到可用节点消息已被终止,则结束该协议运行.

step 2:判断当前的移动节点激活请求广播范围是否超过该无线传感器网络覆盖范围;如果没有,范围内的可移动无线传感器节点运行 MSLOA 算法,确定自己的新位置,否则,向 sink 节点发送可移动节点调整无效的通知,提醒该无线传感器网络的维护人员及时通过其他途径提高网络中的存活节点数量,结束该协议运行.

step 3:依据 step2 方法,选中的可移动节点最终位置均计算完成后,sink 节点使用最大流方法测试调整后的网络能否构成应用需求的 k 个栅栏.如果可以,sink 节点通知上述的被选中的可移动节点移动到相应位置并运行网络前期使用的栅栏覆盖调度协议,网络调整完成;如果不可以,跳转到 step4.

step 4:判断在当前的移动节点激活请求广播范围设置下,sink 节点是否向上述被选中的可移动节点发过随机扰动命令;如果没有,sink 广播此命令要求随机改变 MSLOA 算法计算的最终位置,使移动节点摆脱局部运动陷阱,并跳转到 step2;否则,跳转到 step1 执行.

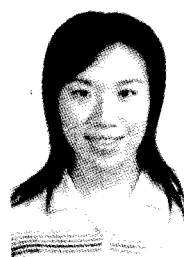
6 结束语

本文的贡献主要体现在:(1)提出了一种基于网络数据包“自学习”策略的确定寻找移动替换无线传感器范围方法与自适应调整协议;(2)建立了处于活跃状态节点与可移动节点、即将被替换的节点与可移动节点之间的虚拟力模型,提出了一种基于虚拟力的移动传感器位置优化算法;(3)提出了一种适用于栅栏覆盖网络存活后期的栅栏覆盖移动节点调度协议,以有效延长网络生存期.本文进行了仿真实验与性能分析,与几种活跃网络协议相比,本文协议明显延长了生存期,而几乎没有增加网络负载.

参考文献:

- [1] Santosh Kumar, Ten H Lai, Anish Arora. Barrier coverage with wireless sensors[C]//Proceedings of ACM International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom 05). New York: ACM, 2005: 284-295.
- [2] Saipulla A, Liu B, Xing G, et al. Barrier coverage with sensors of limited mobility[C]//Proceedings of the eleventh ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, Chicago, Illinois, USA:ACM, 2010: 201-210.
- [3] Zou Y,Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM, San Francisco, New York: IEEE,2003;1293-1303.
- [4] Wang G, Cao G, Porta T F L. Movement-assisted sensor deployment[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing (ToMC),2006,5(6):640-652.
- [5] 罗强,潘仲明.一种小规模水下无线传感器网络的部署算法[J].传感技术学报,2011,24(7):1043-1047.
- [6] 刘军,于耕,张慧鹏.基于节点控制的空间信息网拓扑重构算法[J].电子学报,2011,39(8):1837-1844.

作者简介:



曹莹莹 女,(1979—),硕士,讲师.研究方向为无线传感器网络、无线网络.