

本地多行栅栏覆盖节点活跃调度协议

曹莹莹,于建江,朱立才,孙家军,万小霞

(盐城师范学院 信息科学与技术学院,江苏 盐城 224002)

(cyhhuc@sohu.com)

摘要:为了满足沿海泥滩等复杂自然环境中入侵监测系统的需要,改进了栅栏覆盖网络模型,提出了一种本地多行栅栏覆盖调度协议 k -MLBCSP,设计了覆盖规划算法与覆盖调整算法。 k -MLBCSP 协议将网络生命期分为三个阶段,覆盖规划算法保证了初始化阶段网络的合理设置,覆盖调整算法提供了调整阶段 sink 节点与存活传感器节点进一步协商覆盖规划策略的有效方法。理论分析与仿真结果表明,相比于 LBCP、RIS 等协议, k -MLBCSP 协议提高了网络覆盖率与网络生存期,且节点计算复杂度低,网络负载小。

关键词:无线传感网络;栅栏覆盖;节点活跃调度协议;能量有效;沿海泥滩

中图分类号: TP393.17 **文献标志码:** A

Active scheduling protocol of local multi-line barrier coverage sensors

CAO Ying-ying, YU Jian-jiang, ZHU Li-cai, SUN Jia-jun, WAN Xiao-xia

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

Abstract: To meet the need of intrusion detection system used in complex natural environment, such as coastal mudflats, an improved barrier coverage model, a multi-line barrier coverage scheduling protocol named k -MLBCSP, a coverage layout algorithm and a coverage adjustment algorithm were proposed. The k -MLBCSP protocol divided the network lifetime into three phases. In the initialization phase, the coverage layout algorithm guaranteed reasonable network settings. In the adjustment phase, the coverage adjustment algorithm provided an effective way for the sink and alive sensors to further negotiate coverage layout strategies. The theoretical analysis and simulations show that compared with LBCP and RIS, k -MLBCSP increases the sensor network's coverage probability and lifetime. Furthermore, k -MLBCSP reduces the time complexity and the network load.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); barrier coverage; sensor activity scheduling protocol; energy efficiency; coastal mudflat

0 引言

入侵监测与边界监视是无线传感网络的一类重要应用。一系列活跃的传感器在一个狭长的带状区域内组成一个或多个栅栏,当入侵者穿越保护区域边界时,传感器能感知并报告入侵事件的发生。

文献[1]首次对栅栏覆盖进行了定义与理论分析,并证明栅栏覆盖传感网中的节点无法本地确定整个带状区域是否被 k 覆盖。 k 栅栏覆盖节点活跃调度算法分为集中式^[1-4]与分布式^[5-7]两类。实际应用中集中式算法因网络负载过重而不可行,分布式算法成为近几年的研究热点。本地栅栏覆盖协议(Local Barrier Coverage Protocol, LBCP)^[5]提出了一种本地化的 k 栅栏覆盖算法,以每个活跃节点周围小面积区域均能满足 k 栅栏覆盖的情况逼近全局覆盖的效果,该算法在带状区域宽度较窄且必须小于通信半径时,准确性接近全局调度算法。但是,当带状区域宽度超过通信半径后,相当数量的横坐标接近的节点之间距离超过通信半径,该算法会在带状区域内同时激活两个或多个节点不相关的 k 覆盖支配集,造成整个带状区域的栅栏覆盖度为 $\geq 2k$ 。

根据本文的调研结果,大部分关于栅栏覆盖的研究假设栅栏覆盖区域是一个宽度较窄,不超过传感器的传播半径,如

ExScal 系统^[8]的覆盖区域是一个 $1\,300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 的矩形区域。对于环境较好的场景,如校园的边界,这种假设是合理的,但对于环境复杂恶劣的海岸带泥滩,这种假设则存在一定的缺陷。

海岸带是由海洋向陆地的过渡地带,沿海泥滩是海岸带的重要组成部分。泥滩占我国滩涂面积的 80% 以上,我国泥滩岸线约 $4\,000\text{ km}$ ^[9]。沿海泥滩自然环境复杂,风浪极易改变传感器节点的位置,甚至破坏传感器节点,泥滩生物尤其是穴居海洋生物对传感器节点的位置以及破坏也是不能忽视的因素。如果按照传统的方法在一个宽度较窄的区域部署传感器,整个网络容易因为风浪对部分传感器位置的改变或破坏而达不到 k 栅栏覆盖的要求。进一步分析, k 值越大,传感器部署密度越大,传感器越容易遭到泥滩生物的破坏。因此,传统的栅栏覆盖的带状区域的设置不符合沿海泥滩实际要求。

本文改进了文献[5]中的网络模型以及 LBCP 以满足沿海泥滩应用场景中宽矩形区域的要求,并提出了一种多行 k 栅栏覆盖调度协议 k -MLBCSP (k Multi-Line Barrier Coverage Scheduling Protocol)。 k -MLBCSP 为网络提供了自适应覆盖策略机制,最大化延长网络生存期。仿真结果表明, k -MLBCSP 能够提供宽矩形区域的 k 栅栏覆盖要求,在计算复杂度方面性能优于 LBCP^[5],在覆盖率与网络生存期方面性能优于

收稿日期: 2010-10-18; **修回日期:** 2010-12-02。 **基金项目:** 江苏省自然科学基金资助项目(BK2010293);江苏省高校自然科学基金基础研究项目(07KJB510125);盐城师范学院校级项目(09YCKL012)。

作者简介: 曹莹莹(1979-),女,江苏盐城人,讲师,硕士,CCF 会员,主要研究方向:网络安全、无线传感网络; 于建江(1975-),男,江苏靖江人,副教授,博士,主要研究方向:智能信息处理与控制、网络控制系统; 朱立才(1969-),男,江苏盐城人,副教授,硕士,主要研究方向:无线传感网络、网络体系结构; 孙家军(1974-),男,江苏泗洪人,讲师,硕士,主要研究方向:无线传感网络; 万小霞(1978-),女,江苏连云港人,讲师,硕士,主要研究方向:无线传感网络。

LBCP 和随机独立休眠(Random Independent Sleeping, RIS)协议^[10],在网络负载方面性能优于覆盖配置协议(Coverage Configuration Protocol, CCP)^[11]。

1 问题描述与网络模型

1.1 模型的提出

沿海泥滩中的自然保护区等区域均具有岸线长、面积大、环境恶劣的特点,飞机随机抛洒是一种比较合理的部署方式。本文假设,飞机沿直线进行传感器抛洒,也就是说,其传感器覆盖区域为一个矩形,在面积广袤的沿海泥滩场景中,这种假设是合理的。本文考虑增加栅栏覆盖带状区域的宽度,假设传统的窄带栅栏覆盖方式的带状区域宽度为 w ,将其扩宽 m 倍,即新的栅栏覆盖带状区域的宽度为 $m \times w$,然后逻辑上将其划分为 m 个子带区域,每一个栅栏带承担一定的覆盖任务, m 个子带区域通过多 sink 节点协作进行合理调度。传感网络运行较长时间后,容易出现 m 个子带区域均不能达到覆盖要求但各子带区域中存活的节点数量总数仍然较大的情况,由于带状区域是连续的,传感网络可以自适应地进行子带区域位置的调整,找到新的 k 覆盖支配集,达到最大化网络生存期的目的。

1.2 相关定义

定义1 矩形带状区域。矩形带状区域是宽度为 W_B 的矩形区域,如图1整个区域所示。

定义2 w 矩形子带区域。 $w > 0$,平行于水平边界的水平线以 w 为宽度对矩形带状区域进行分割,分割后的宽度为 w 的矩形带状区域成为 w 子带区域,如图1中黑色区域所示。

定义3 $2dw$ 矩形窄带区域。 $d > 0, w > 0, 2dw$ 矩形窄带区域是 w 矩形子带区域中闭合矩形区域,其中两条边为 w 矩形子带区域的水平边界,两条边距离为 w ,另两条边与水平边界垂直距离为 $2d$,如图1中深灰色区域所示。

定义4 $2dw(u)$ 矩形窄带区域。 $d > 0, w > 0, 2dw(u)$ 窄带区域是一个长度为 $2d$,宽度为 w 的矩形窄带区域,并且节点 u 位于其中垂线上。如图1中浅灰色区域所示。

定义5 Lw 本地 k 栅栏覆盖。 $W_B > 0, k > 0, m > 0, d > 0, w = W_B/m, k' = \lceil k/m \rceil, k'' = \lfloor k/m \rfloor, L = \max\{2d - 2r, d + r\}$,如果同一 w 子带区域中的所有 $2dw(u)$ 矩形窄带区域同被 k_i 覆盖,且 m 个 w 矩形子带区域覆盖度之和等于 k ,即 $k_i = \{0, 1, \dots,$

$k', k''\}$, $\sum_{i=1}^m k_i = k$,则称矩形带状区域被 Lw 本地 k 栅栏覆盖。

文献[6]已证明了当 $d > r, L = \max\{2d - 2r, d + r\}$ 时,整个带状区域能够被 L 本地栅栏覆盖。下面用反证法证明定义5的结论。

假设矩形带状区域存在一条未被覆盖的穿越路径,如图1中虚线所示。再假设暴露位置发生在图1中 $2dw(u)$ 区域,即在第2~4子带,该路径被覆盖了 $k - k_1$ 次,而在第1子带中,该路径被覆盖次数小于 k_1 。这与 $2dw(u)$ 区域提供 k_1 本地覆盖的前提矛盾。

1.3 w 子带区域的划分以及 w 的选取

为了降低计算复杂度与网络通信负载,本文将宽度为 W_B 的带状区域划分为若干个宽度为 w 的平行子带区域。 w 取值过小,比如 $w \leq 2R_s$,容易造成 $2dw(u)$ 区域因节点数量过少,不能实现 k_i 覆盖;另一方面, w 取值过小,不同平行子带区域中的节点覆盖区域重叠过多,影响传感器网络的检测性能。

3.1 节的实验表明,当 $w \geq 5R_s$,上述两方面的问题均有所改善。为了避免多跳转发增加网络负载与通信复杂度,同一 $2dw(u)$ 窄带区域中的节点间必须能够直接通信,也就是说,任意节点 $x, y \in 2dw(u), d(x, y) \leq R_c$ 。对于矩形 $2dw(u)$ 窄带区域来说,对角线两点间距离最远,即当 $\sqrt{(2d)^2 + w^2} \leq R_c$,矩形 $2dw(u)$ 窄带区域中任意两点间距离小于 R_c 。

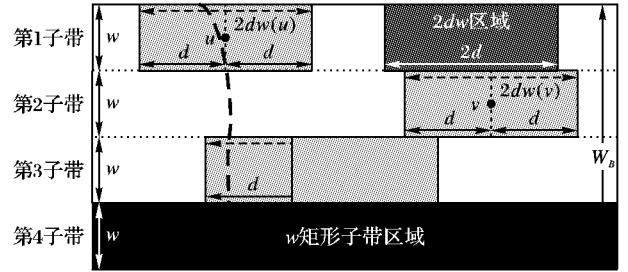


图1 网络模型

2 多行栅栏覆盖调度协议 k -MLBCSP

基于1.2节的网络模型,本文提出了一种适用于宽矩形覆盖区域的多行栅栏覆盖调度协议 k -MLBCSP,并设计了覆盖规划算法与覆盖调整算法。 k -MLBCSP 协议分为将网络生命过程分为初始化、运行和调整三个阶段,INITIAL、ACTIVE、SLEEP 和 AJUST 四个不同状态,且网络初始化只进行一次。覆盖规划算法保证网络初始化阶段能够有效地进行自适应子带区域划分以及各子带区域覆盖度的设置。运行阶段采用 LBCP 算法^[5]实现每个 $2dw$ 区域的本地覆盖进而达到全网络的本地 k 栅栏覆盖。sink 节点在调整阶段依据覆盖调整算法与传感器节点协商新的规划策略。 k -MLBCSP 协议的状态迁移如图2所示。

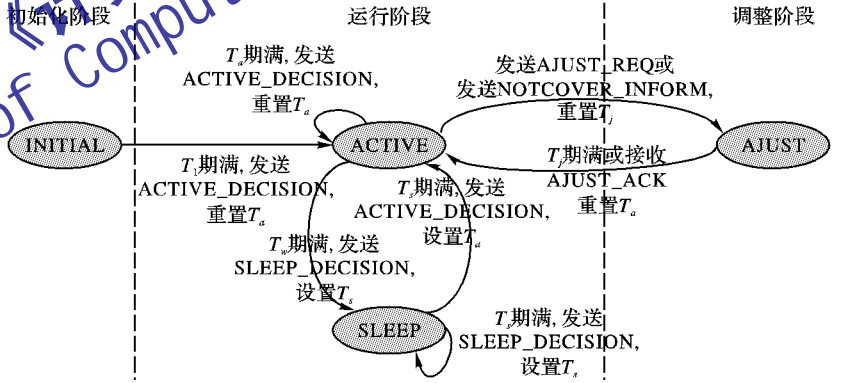


图2 k -MLBCSP 协议状态图

2.1 k -MLBCSP 的覆盖规划与调整策略

k -MLBCSP 协议的覆盖规划算法基本思想简单高效,初始时 $m = k$,即将矩形区域划分为 k 个子带并判断划分后的子带宽度是否满足1.3节的要求,如果 w 过大,则不断增加 m 值,如果 w 过小,则不断减少 m 值,直到 w 值符合要求。在确定 m 后,进一步确定每个子带的 k_i 值,如果 k 是 m 的整数倍,则平均分配,否则第1~ $(k - k/m)$ 子带的 $k_i = k/m + 1$,其余子带的 $k_i = k/m$ 。

k -MLBCSP 协议的调整工作分为两个阶段:第一阶段 sink 仅调整某些 w 子带区域的 k_i 值,如果第一阶段调整失效,则进入第二阶段;在第二阶段中 sink 先调整各个 w 子带矩形区域的位置,再调整某些 w 子带区域的 k_i 值。调整子带的位置是为了调整节点间的相关性,将子带位置下移 $w/2$,则原来第 i 个子带的下半段中的存活节点与第 $i + 1$ 个子带的上半段的存活节点成为位置相关的节点,可以协作满足覆盖要求。将子带位置上移 $w/2$,效果亦然。 w 子带区域间覆盖度调整的基本思想是首先降低发出 AJUST_REQ 数据包的节点所在子带的

覆盖度,然后选择覆盖度最低且能够提供更高覆盖度的子带增加覆盖任务,直到达到整个矩形区域的覆盖要求。覆盖调整算法如下。

输入: $m, k, \text{节点 } u \text{ 位置}, w \text{ 子带区域位置移动情况 } wzs$;
输出: 每个 w 子带区域调整后的 k_i 。
 $w \leftarrow W_B/m$; // 根据节点 u 的位置计算其属于子带区域的序号 i
if $wzs = \text{不变化}$ then
 $i \leftarrow \lceil \text{节点 } u \text{ 的纵坐标} / w \rceil$;
else if $wzs = \text{下移}$ then
 $i \leftarrow \lceil (\text{节点 } u \text{ 的纵坐标} + w/2) / w \rceil$;
else if $wzs = \text{上移}$ then
 $i \leftarrow \lceil (\text{节点 } u \text{ 的纵坐标} - w) / w \rceil$;
end if
 $k_i \leftarrow k_i - 1$; // 降低第 i 个子带覆盖度
 $k_{\text{dec}} \leftarrow k_{\text{dec}} \cup \{i\}$; // k_{dec} 为覆盖度降低记录表
for $j \leftarrow 1$ to m // 寻找除 i 子带外的 $m-1$ 个子带中覆盖度
 // 最小且未被记录到覆盖度降低记录表的子带号
 if $j \neq i$ and $j \notin k_{\text{dec}}$ and k_j 为最小 then
 $k_j \leftarrow k_j + 1$; // 将增加第 j 个子带覆盖度
 end if
end for

2.2 k -MLBCSP 的初始化工作

在初始化阶段,每个节点维护一个初始化阶段计时器 $T_i, N(u)$ 和 $A(u)$ 两张信息表。 $N(u)$ 记录节点 u 的邻居节点的 ID、位置信息、剩余生命期以及当前状态,即 $N(u) = \{v; v \in 2dw(u) \text{ or } u \in 2dw(v)\}$; $A(u)$ 记录已被节点 u 批准休眠但未得到所有邻居批准休眠的节点。初始化工作流程如下。

步骤 1 sink 节点根据覆盖规划算法计算子带区域宽度 w 、划分的 w 子带区域的个数 m 以及每个子带的覆盖度 k_i 。sink 节点广播 COVERAGE_ACK 数据包,该数据包包含子带区域宽度 w 以及每个子带的 k_i 。

步骤 2 节点 u 收到 COVERAGE_ACK 数据包后参考自身位置计算 $2dw(u)$ 区域。节点 u 判断 $2dw(u)$ 区域能否被 k_i 栅栏覆盖,如果不能被 k_i 栅栏覆盖,则通过汇聚节点向 sink 节点发送 COVERAGE_REQ 数据包,请求 sink 节点进一步调整,该数据包携带节点 u 的位置、当前的 k_i 和调整次数;否则启动 T_i ,等待其他节点判断其 $2dw$ 区域覆盖情况,并初始化其 $A(u), N(u)$ 信息表, $A(u) = \emptyset, N(u) = \emptyset$ 。同一调整轮次中,汇聚节点不再转发同一 w 子带矩形区域中其他节点的 COVERAGE_REQ 数据包,避免 sink 节点重复进行相同策略的调整。

步骤 3 sink 节点收到 AJUST_REQ 数据包后,如果该数据包携带的调整次数等于 sink 节点已调整次数, sink 继续依据覆盖规划算法,调整某些 w 子带矩形区域的 k_i 值,并向 k_i 所调整的子带矩形区域中的节点发送 AJUST_ACK 数据包,该数据包携带每个子带新的 k_i ; 否则 sink 节点抛弃 AJUST_REQ 数据包。

步骤 4 若步骤 2~3 多次执行后,覆盖规划算法中的规划策略均不能满足覆盖要求,则 sink 节点通知网络管理者进行覆盖增强,并通知所有节点休眠。

步骤 5 当 T_i 计时结束后,节点 u 认为 w 和 k_i 已调整成功,节点 u 广播 INITIAL_REQ 数据包,该数据包携带节点 u 的 ID、位置和剩余生命期信息。当其他节点 v 收到节点 u 的 INITIAL_REQ 数据包后,节点 v 将节点 u 记录到节点 v 的 $N(u)$ 中,即 $N(v) = N(v) \cup \{u\}$ 。如果节点 $u \notin 2d(w)$,节点 v 发送 INITIAL_ACK 数据包响应节点 u ,数据包携带节点 v 的 ID、位置和剩余生命期信息。

步骤 6 节点 u 收到节点 v 的 INITIAL_ACK 数据包后,将节点 v 记录到 $N(u)$ 中,即 $N(u) = N(u) \cup \{v\}$ 。

2.3 k -MLBCSP 的调整工作

为了维持网络功能, T_i 计时结束后即使节点所在区域的覆盖要求达到不满足,节点也会返回 ACTIVE 状态,等待管理人员人工干预。节点在 AJUST 状态中工作流程如下。

步骤 1 sink 节点收到 AJUST_REQ 或 INFORM_NOTCOVER 数据包后,依据覆盖调整算法,调整某些子带的 k_i 值,并向 k_i 所调整的子带矩形区域中的存活节点发送 AJUST_ACK 数据包,该数据包携带每个子带新的 k_i 。

步骤 2 节点 u 收到 AJUST_ACK 数据包后,取消 T_i 计时,与其维护的 k_i 进行比较,如果相同,节点 u 保持原有状态;否则节点 u 判断 $2dw(u)$ 区域能否满足新的 k_i 覆盖,如果不能满足 k_i 覆盖,则通过汇聚节点向 sink 节点发送 AJUST_REQ 数据包,请求 sink 节点重新调整;否则重置 T_i 计时,等待其他节点判断其 $2dw$ 区域覆盖情况。同一调整轮次中,汇聚节点不再转发同一 w 子带矩形区域中其他节点的 COVERAGE_REQ 数据包,避免 sink 节点重复进行相同策略的调整。

步骤 3 若步骤 1~2 多次执行后,覆盖调整算法中的规划策略均不能保证 $2dw(u)$ 区域满足覆盖要求,节点向 sink 节点发送 INFORM_NOTCOVER 数据包,通知 sink 节点网络已经无法提供 k 覆盖。

步骤 4 如果 sink 收到 INFORM_NOTCOVER 数据包,首先判断是否是第三次收到相同节点的 INFORM_NOTCOVER 数据包。如果是,且 w 子带区域位置移动情况信息已经设置为上移, sink 节点认为传感网络已经失效,通知管理员,并向所有存活节点广播 INFORM_NEVER 数据包;否则 sink 节点根据收到该数据包的次数,以及记录的 w 子带区域位置移动情况信息,在 AJUST_ACK 数据包写入 w 子带区域位置移动策略(上移 $w/2$ 或上移 w),并维持每个子带原有 k_i ,向所有存活节点广播该数据包。

步骤 5 重复步骤 1~4。

步骤 6 节点 u 收到 INFORM_NEVER 数据包, T_i 清零,返回并保持 ACTIVE 状态直到人工干预或电池耗尽。

步骤 7 当 T_i 计时结束后,节点 u 认为新的 k_i 已调整成功,启动 T_a 计时,节点 u 迁移到 ACTIVE 状态。

3 性能分析

为了合理比较 k -MLBCSP 与 LBCP、RIS 协议的性能,本文同样选用 Matlab 进行仿真实验,传感器节点的基本参数与文献[5]相同,具体参数设置如表 1 所示。为了模拟沿海滩涂等大规模环境,实验仿真在一个 2000×400 的矩形区域随机抛撒 N 个传感器节点,部署区域宽度是文献[5]部署区域宽度的 4 倍,因此节点数量相应增加为文献[5]的 4 倍。

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数值
通信半径 R_c	250 m
感知半径 R_s	30 m
初始生命期 T_0	1680 h
收发一个数据包对生命期损耗	6 s
每个活跃时隙耗能	168 h
$2dw$ 矩形区域中的 d	75 m
子带矩形区域宽度 w	200 m
覆盖度 k	4

3.1 区域栅栏覆盖率

按照仿真设置,整个矩形区域被划分为 2 个子带,即 $m=2$ 。为了比较不同 w 值对覆盖率的影响, w 分别取 100, 150, 200, $d=150$, 对于每一个 w ,进行了 100 次随机场景的实

验^[1],覆盖率 = 满足覆盖要求的场景数/100。实验结果如图3所示,实验结果表明,覆盖率与 w 、 N 成正比,当 $w > 6R_s$, $N \geq 500$ 时,覆盖率接近1。从仿真结果还可以发现,当 $N \leq 1000$ 时, $w = 200$, $k_i = 2$ 时, k -MLBCSP覆盖率明显优于LBCP;当 $N \geq 1600$ 时,几种不同参数设置的 k -MLBCSP覆盖率均达到100%。这种现象的原因是,矩形区域宽度过大,节点位置比较分散,影响了LBCP的覆盖率;另一方面, $w = 150$ 时,子带中的节点数量过少,影响了 k -MLBCSP ($k_i = 2$)的覆盖率。

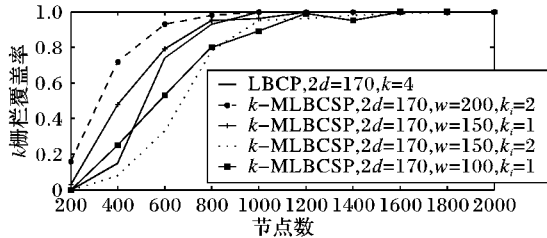


图3 不同 w 的 k -MLBCSP与LBCP覆盖率比较

3.2 网络生命期

本文将 k -MLBCSP与RIS^[10]协议进行网络生命期的比较,LBCP无法正确运行在宽矩形区域,故不予以比较。为了验证覆盖调整的有效性,本文将 k -MLBCSP分为使用覆盖调整策略与不使用移动策略两种情况,实验结果如图4所示。图4的实验表明,理想状态下,网络生存期与节点数量等比例增长;与RIS协议相比, k -MLBCSP明显延长了网络生命期,且更接近与理想值,另外使用覆盖调整策略能进一步延长网络生命期。

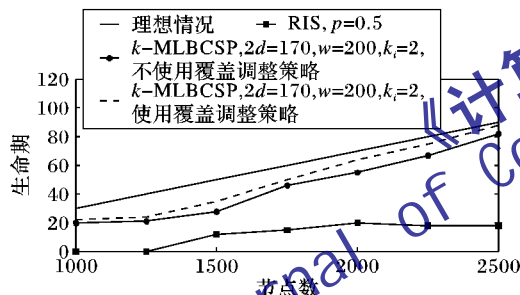


图4 k -MLBCSP与RIS网络生存期比较

3.3 网络负载

以仿真实验的网络设置为例,本文分析了全网节点数为2000和3000两种情况下,CCP与 k -MLBCSP协议中每个节点收发数据包数量以及全网的负载,具体分析结果如表2所示。 f 为不相关的 k 覆盖支配集的平均个数, U_{total} 为节点 u 整个生命期内收发数据包总数, N_{total} 为网络负载总数。对于CCP, M 为节点 u 通信半径范围的平均节点数, f 为不相关的 k 覆盖支配集的个数。对于 k -MLBCSP协议, M 为以节点 u 为中心的 $N(u)$ 范围内平均节点数, $U_{initial}$ 、 U_{work} 、 U_{adjust} 分别为初始化、运行、调整阶段的节点 u 收发数据包, f 与 M 为多次实验的统计均值,分析结果表明, k -MLBCSP协议的网络负载远小于CCP。

表2 CCP与 k -MLBCSP网络负载分析表

N	算法	M	f	$U_{initial}$	U_{work}	U_{adjust}	U_{total}	N_{total}
2000	CCP	154	50	/	/	/	23100	4.62×10^7
	k -MLBCSP	75	8	78	1850	18	1946	3.892×10^6
3000	CCP	276	50	/	/	/	41400	8.18×10^7
	k -MLBCSP	113	11	116	2464	18	2498	4.996×10^6

3.4 计算复杂性

基于覆盖图的最大网络流算法是寻找 k 栅栏覆盖节点集有效方法^[1],该类算法的时间复杂度为 $O(k^2|V|)$,其中 V 为覆盖图中节点的数量, k 为节点不相关的路径的数量。

k -MLBCSP将覆盖区域分为 m 个宽度为 w 的子带区域,假设节点 u 为第 i 个 w 子带区域中任意一个活跃节点,节点 u 仅需要检查其 $2dw(u)$ 区域能否被 k_i 覆盖, $k_i = \{0, 1, \dots, k/m\}$ 。假设矩形带状区域 A 中节点为均匀随机分布,则 $2dw(u)$ 中节点数量 $N' = \frac{2 \times N \times d \times w}{|A|}$,其中 N 为矩形带状区域中传感器节点

的数量, $|A|$ 为矩形带状区域面积。因此,节点 u 使用最大网络流算法对 $2dw(u)$ 区域进行 k_i 覆盖监测的时间复杂度为 $O\left(k_i^2 \left| \frac{2 \times N \times d \times w}{|A|} + 2 \right| \right)$ 。可见,与集中式调度协议相比,

k -MLBCSP的计算复杂性明显减低。

4 结语

为了满足沿海泥滩应用场景中宽矩形区域 k 栅栏覆盖的要求,本文改进了栅栏覆盖网络模型并提出了一种多行 k 栅栏覆盖调度协议 k -MLBCSP。理论分析与实验表明,与LBCP等协议相比, k -MLBCSP提高了网络覆盖率与网络生存期,降低了节点计算复杂度,同时网络负载较小。但 k -MLBCSP工作过程中需要多sink节点参与信息传输,通信成本较高,下一步工作中,将重点研究不需要sink节点参与的低网络负载的覆盖策略调整算法。

参考文献:

- [1] KUMAR S, LAI T H, ARORA A. Barrier coverage with wireless sensors[C]// Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2005: 234-239.
- [2] SAIPULLA A, LIU B, XING G, et al. Barrier coverage with sensors of limited mobility[C]// Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2010: 201-210.
- [3] CHEN A, LAI T H, XUAN D. Measuring and guaranteeing quality of barrier-coverage in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2008: 421-430.
- [4] YANG G, QIAO D. Barrier information coverage with wireless sensors[C]// Proceedings of the 28th Conference on Computer Communications. New York: IEEE, 2009: 918-926.
- [5] CHEN A, KUMAR S, LAI T H. Local barrier coverage in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 491-504.
- [6] LIU B, DOUSSE O, WANG J, et al. Strong barrier coverage of wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2008: 411-420.
- [7] HE J, SHI H. Finding barriers with minimum number of sensors in wireless sensor networks[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2010: 1-5.
- [8] ExScal: Extreme Scale Wireless Sensor Networking, The Ohio State University [EB/OL]. [2010-09-05]. <http://ceti.cse.ohio-state.edu/exscal/>.
- [9] 李小焕. 我国滩涂资源的开发与利用研究[D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2008.
- [10] CHOI W, DAS S K. Coverage-adaptive random sensor scheduling for application-aware data gathering in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(17): 3476-3482.
- [11] XING G, WANG X, ZHANG Y. Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks, 2005, 1(1): 36-72.