

## 移动无线传感器网络 $k$ -栅栏覆盖构建算法\*

班冬松<sup>1+</sup>, 温俊<sup>2</sup>, 蒋杰<sup>1</sup>, 窦文华<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

<sup>2</sup>(解放军理工大学 总参第 63 研究所, 江苏 南京 210007)

### Constructing $k$ -Barrier Coverage in Mobile Wireless Sensor Networks

BAN Dong-Song<sup>1+</sup>, WEN Jun<sup>2</sup>, JIANG Jie<sup>1</sup>, DOU Wen-Hua<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>2</sup>(The 63rd Research Institute of General Staff, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

+ Corresponding author: E-mail: dsban@nudt.edu.cn

**Ban DS, Wen J, Jiang J, Dou WH. Constructing  $k$ -barrier coverage in mobile wireless sensor networks.**

*Journal of Software*, 2011, 22(9): 2089–2103. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3877.htm>

**Abstract:** This paper focuses on the energy efficient construction of a  $k$ -barrier coverage in mobile sensor networks. First, this paper formulates 1-BCMS (1-barrier coverage min-sum of moving distance) problem for constructing 1-barrier coverage energy efficiently, reduces the 1-BCMS problem to 1-GBMS (1-grid barrier min-sum of moving distance) problem based on grid model, and present the reduced problem's Linear Programming Model and prove it to be NP-hard. Secondly, this paper presents a CBGB (constructing baseline grid barrier) algorithm to construct 1-barrier coverage energy efficiently. CBGB is an approximation algorithm for 1-GBMS problem and the solution of CBGB is close to the optimal solution. Finally, a Divide-and-Conquer algorithm is proposed to construct  $k$ -barrier coverage. This algorithm significantly reduces communication overhead and computation cost compared to other algorithms. Simulation demonstrates the effectiveness of the proposed algorithm in constructing  $k$ -barrier coverage.

**Key words:** mobile wireless sensor networks; barrier coverage; relocation

**摘要:** 研究了节点无移动能力的静态传感器网络中的栅栏覆盖问题. 考虑在传感器节点具有有限移动能力时, 如何构建  $k$ -栅栏覆盖的问题. 首先定义了 1-栅栏覆盖最小移动距离和问题(1-barrier coverage min-sum of moving distance, 简称 1-BCMS). 在网格划分模型情况下, 将 1-BCMS 问题近似为 1-网格栅栏最小移动距离和问题(1-grid barrier min-sum of moving distance, 简称 1-GBMS). 给出了 1-GBMS 问题的整数线性规划描述, 证明了其是 NP-hard 的; 然后提出了 1-GBMS 问题的近似算法——CBGB(constructing baseline grid barrier)算法, 能量高效地构建 1-栅栏覆盖. 仿真实验结果表明, CBGB 算法的求解结果与最优解接近. 最后, 提出了一种基于分治策略的  $k$ -栅栏覆盖构建算法. 该算法极大地降低了通信和计算开销. 仿真实验验证了该算法的有效性和可扩展性.

**关键词:** 移动无线传感器网络; 栅栏覆盖; 重部署

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60603061, 60603064, 60903223)

收稿时间: 2009-10-14; 修改时间: 2010-01-20; 定稿时间: 2010-04-27

无线传感器网络在诸多领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>,如将无线传感器网络沿边境线部署以探测非法越境者、将无线传感器节点布撒在森林边缘以探测火情的蔓延情况或放置在重要管道沿线以监视针对管道的破坏活动等<sup>[4]</sup>.在上述列举的应用中,传感器节点被部署于狭长的带状区域内,对穿越监控区域的移动目标进行检测.栅栏覆盖<sup>[5,6]</sup>通过相邻节点感知区域的相互交叠,在监控区域中形成传感器感知栅栏,使得移动目标沿任意路径穿越监控区域时都能够被感知.并且栅栏覆盖不必覆盖监控区域中的所有位置点,因而相对于无线传感器网络的区域覆盖策略<sup>[6,7]</sup>,栅栏覆盖所需的节点数目较少,更适合在狭长监控区域内对移动目标进行检测的应用场景.

栅栏覆盖是无线传感器网络的研究热点之一,已取得了一些研究成果<sup>[4,6,8,9,13-16]</sup>,但已有工作主要基于无移动能力的节点组成的静态传感器网络.利用随机部署的静态传感器网络对监控区域实施栅栏覆盖,主要存在两个问题:1) 由于部署的随机性,传感器网络中可能存在空隙,不能保证在监控区域内形成可靠的栅栏覆盖,使得移动目标可能通过监控区域而不被检测到<sup>[8]</sup>;2) 为避免空隙存在,确保能够形成栅栏覆盖,需要提高部署密度,布撒大量节点,从而造成节点冗余浪费<sup>[9]</sup>.

若传感器节点具有移动能力<sup>[14,15]</sup>,则当网络初始部署后,可以利用节点的移动能力进行重部署<sup>[16]</sup>,最终形成1条或 $k$ 条不间断的横贯监控区域的传感器感知栅栏,实现1或 $k$ -栅栏覆盖,并且使用的节点数量与静态传感器网络相比将减少很多.传感器节点能量有限<sup>[14,15]</sup>,节点移动将消耗较大能量,因此重部署时需要尽量减少节点的移动距离.而且,栅栏覆盖与区域覆盖不同,传感器节点无法根据周围邻居节点的信息来判定整个监控区域中是否已形成栅栏覆盖<sup>[6]</sup>.但若利用整个网络的全局信息进行判断,将带来大量的通信和计算开销.因此,如何设计具有较小通信和计算开销的 $k$ -栅栏覆盖构建算法是一个难点.

本文针对狭长的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,主要研究工作包括:1) 形式化定义了1-栅栏覆盖最小移动距离和问题(1-barrier coverage min-sum of moving distance,简称1-BCMS).基于网格划分模型,将1-BCMS问题近似为1-网格栅栏最小移动距离和问题(1-grid barrier min-sum of moving distance,简称1-GBMS),给出了1-GBMS问题的整数线性规划描述,证明了该问题是NP-hard的;2) 提出了1-栅栏覆盖构建算法——CBGB(constructing baseline grid barrier)算法.实验表明,CBGB算法的求解结果与该问题的最优解接近;3) 提出了基于分治策略的 $k$ -栅栏覆盖构建算法.与全局算法相比,该算法极大地降低了通信和计算开销.

本文第1节介绍栅栏覆盖领域的相关研究工作.第2节描述网络模型,定义1-BCMS问题.第3节在网格划分模型下,将1-BCMS问题近似为1-GBMS问题.第4节详细描述1-栅栏覆盖构建算法——CBGB算法.第5节详细描述基于分治策略的 $k$ -栅栏覆盖构建算法.第6节通过仿真实验对提出的两种算法进行性能评估.第7节总结全文并介绍下一步工作.

## 1 相关工作

目前,对静态无线传感器网络中的栅栏覆盖问题的研究已取得了一些研究成果.Meguerdichian<sup>[10]</sup>考虑当移动目标沿任意路径穿越无线传感器网络的部署区域时,移动目标被检测到的概率问题,提出了确定最大支撑路径和最大突破路径的集中式算法.Kumar<sup>[6]</sup>首次引入了弱 $k$ -栅栏覆盖和强 $k$ -栅栏覆盖的概念,设计了一种判定监控区域是否被 $k$ -栅栏覆盖的集中式算法,推导出了随机部署的传感器网络中存在弱 $k$ -栅栏覆盖的临界条件.Chen等人<sup>[4]</sup>针对移动目标穿越监控区域时一般只在局部区域活动的特点,引入了局部栅栏覆盖概念,设计了一种确定监控区域是否被局部栅栏覆盖的分布式算法.Balister等人<sup>[9]</sup>研究了可靠的节点部署密度估计方法,使得按照密度的估计值进行随机部署的传感器网络可以形成1-栅栏覆盖,并且是 $s$ - $t$ 连通的.Chen<sup>[11]</sup>提出了一种评价栅栏覆盖质量的参数标准,以及如何有效检测覆盖质量的方法.Liu等人<sup>[8]</sup>推导出了随机部署的传感器网络中存在强 $k$ -栅栏覆盖的临界条件,设计了一种在大规模静态传感器网络中寻找传感器感知栅栏的算法.Jiang<sup>[15]</sup>考虑高密度传感器网络中的双重栅栏覆盖问题,即在传感器网络中找到一个具有最少数量节点的集合 $V$ 和一条连接监控区域左右两端边界的线段 $l$ ,使得线段 $l$ 上的每一点至少被集合 $V$ 中的节点覆盖2次.设计了一种构建双重栅栏覆盖的分布式算法.Saipulla等人<sup>[13]</sup>考虑飞机沿直线布撒传感器节点的部署方式,基于正态随机分布模

型,确定了这种部署方式下存在栅栏覆盖的下界,研究了沿多条直线部署的场景中栅栏覆盖的存在条件与相邻部署直线之间的距离等参数的相互关系.

利用移动传感器节点形成栅栏覆盖已进行了一些研究工作.Bhattacharya 等人<sup>[17]</sup>考虑移动传感器节点初始时部署在监控区域内部,针对简单多边形区域和圆形区域,提出了将节点从内部最优地移动至监控区域的边界,在边界上形成 1-栅栏覆盖的近似算法.Kloder<sup>[18]</sup>针对具有可变感知范围的有向移动传感器节点,提出了一种在有障碍物存在的监控区域中,通过建立栅栏备选图(barrier candidate graph)的方式,为移动节点寻找组成最小长度栅栏位置的算法.Yang 等人<sup>[19]</sup>针对最终形成的传感器栅栏可能被障碍物阻断和未被阻断这两种情况,利用博弈理论提出了相应的最优移动策略.Shen 等人<sup>[20]</sup>研究了如何能量高效地在矩形区域中实现 1-栅栏覆盖的问题,设计了实现 1-栅栏覆盖的一种集中式算法——CBarrier 算法和一种基于虚拟力模型的分布式算法——DBarrier 算法,但 CBarrier 和 DBarrier 算法均不是能量高效的,因为这两种算法要求网络中的所有节点均参与移动.上述的所有研究工作只考虑如何利用移动传感器实现 1-栅栏覆盖,没有针对  $k$ -栅栏覆盖提出有效的构建算法.本文则研究在狭长带状区域中如何利用移动传感器节点能量高效地构建  $k$ -栅栏覆盖的问题,设计了具有较小通信和计算开销的  $k$ -栅栏覆盖构建算法.

## 2 模型与问题描述

### 2.1 网络模型

假设监控区域  $A$  为矩形,区域长为  $l$ ,宽为  $w$ .监控区域左边界横坐标  $x_{lb}=0$ ,右边界横坐标  $x_{rb}=l$ .传感器节点随机部署于监控区域  $A$  内,记节点集合为  $S=\{s_1,s_2,\dots,s_M\}$ ,总节点数为  $M$ .各节点的感知半径  $R_s$  相等,通信半径  $R_c$  相等,假设初始部署的传感器网络是连通的.节点具有有限的移动能力,即每个传感器节点在初始部署后只能移动一次.节点  $s_i$  的初始位置坐标为  $(x_i,y_i)$ ,重部署后坐标为  $(x'_i,y'_i)$ .节点能够获知自身地理位置信息.

**定义 1(穿越路径).** 位于监控区域  $A$  内,起点和终点分别在区域  $A$  的上边界和下边界,且将区域  $A$  分割为左右两个子区域的任意曲线段称为穿越路径.

**定义 2( $k$ -栅栏覆盖( $k$ -barrier coverage)).** 若移动目标沿任意穿越路径通过部署了传感器节点的监控区域  $A$  时,至少被  $k$  个传感器节点感知,则称区域  $A$  是  $k$ -栅栏覆盖的.

监控区域  $A$  是  $k$ -栅栏覆盖的,说明区域  $A$  中至少存在  $k$  条不相交的传感器栅栏<sup>[6]</sup>.图 1 是 3-栅栏覆盖示意图,当移动目标沿任意穿越路径穿越该区域时,至少会被 3 个传感器节点感知.

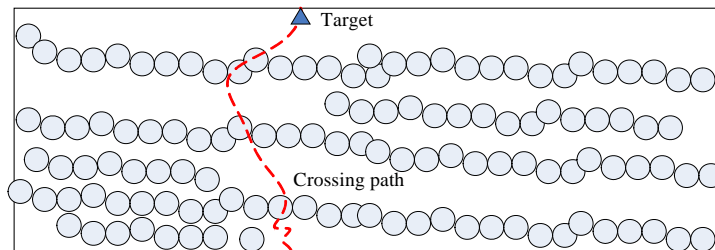


Fig.1 An instance of 3-barrier coverage

图 1 3-栅栏覆盖示意图

### 2.2 栅栏覆盖最小移动距离和问题

移动传感器节点初始时随机部署于监控区域  $A$  中,由于部署的随机性,难以保证区域  $A$  是 1 或  $k$ -栅栏覆盖的.因而需要通过对随机部署的传感器节点进行重部署,在监控区域中形成 1 或  $k$ -栅栏覆盖.但传感器节点能量有限,节点移动消耗大量能量.因此希望节点重部署时,尽量减少节点移动的距离,降低节点移动的能量开销,以延长网络的生存期,因而本文提出了栅栏覆盖的节点移动距离和最小化问题.

首先,针对如何能量高效地形成 1-栅栏覆盖,定义 1-栅栏覆盖最小移动距离和问题.

**定义 3(1-栅栏覆盖最小移动距离和问题(1-BCMS)).** 给定传感器节点集合  $S$  和监控区域  $A$ ,如何找到  $S$  的一个子集  $S_c$  以及  $S_c$  中每个节点  $s_i$  的重部署位置  $(x'_i, y'_i)$ ,使得对  $S_c$  重部署后,区域  $A$  是 1-栅栏覆盖的,并且移动距离之和最小.

一些应用场景中,需要在监控区域中形成多条栅栏,使得穿越监控区域的移动目标能被多次感知,确保其被可靠探测.针对形成多条栅栏情况,下面定义  $k$ -栅栏覆盖最小移动距离和问题.

**定义 4( $k$ -栅栏覆盖最小移动距离和问题).** 给定传感器节点集合  $S$  和监控区域  $A$ ,如何找到  $S$  的  $k$  个不相交子集  $S_{c1}, S_{c2}, \dots, S_{ck}$  以及这些子集中每个节点  $s_i$  的重部署位置  $(x'_i, y'_i)$ ,使得对  $S_{ci}(i=1,2,\dots,k)$  重部署后,区域  $A$  是  $k$ -栅栏覆盖的,并且移动距离之和最小.

从上述定义可以看出,1-BCMS 问题是  $k$ -BCMS 问题的特例.

### 3 理论基础

移动传感器节点在监控区域中可移动至移动能力限制范围内的任意位置处,通过重部署而形成的传感器栅栏可以是任意形状的曲线,如图 1 所示.为便于求解,与文献[14,21]类似,本文对监控区域进行网格(grid)划分,给出了 1-BCMS 问题在网格划分模型下的对应问题 1-GBMS 问题的定义和整数线性规划描述.

将监控区域  $A$  划分为  $N$  个网格,其中  $N=n_l \times n_w, n_l = \lceil l/2R_s \rceil, n_w = \lceil w/2R_s \rceil, n_l$  是监控区域长度方向上网格的数量,  $n_w$  是宽度方向上网格的数量.记被划分的网格的中心位置点集合为  $G=\{g_1, g_2, \dots, g_N\}$ .若传感器节点  $s_i$  位于  $g_k$ ,则沿任意穿越路径穿越  $g_k$  所在网格的移动目标都能够被节点  $s_i$  感知.即只要 1 个网格的中心处存在 1 个传感器节点,该网格内就能够实现 1-栅栏覆盖.所以,本文假设每个传感器节点的重部署目的位置将在  $G$  中选择,即节点只能移动至某个网格的中心点处.本文所指的网格划分均按照上述模型.

下面首先对在该网格划分模型下移动节点重部署而形成的传感器栅栏进行形式化定义.

**定义 5(网格栅栏(grid barrier)).** 给定监控区域  $A$  和对  $A$  网格划分后的网格中心点集合  $G$ .若监控区域  $A$  中存在一个传感器节点集合  $S_x$  满足以下条件,则称  $S_x$  在  $A$  中形成 1 条网格栅栏:

$$1) \quad \forall s_i \in S_x, p_i \in G \quad (1)$$

$$2) \quad \forall s_i \in S_x - \{s_{x_{\min}}\}, \forall s_j \in S_x - \{s_{x_{\max}}\}, \text{总存在唯一的 } s_k \text{ 和 } s_q, s_k, s_q \in S_x \text{ 且 } k \neq q, \text{使得}$$

$$(d(s_i, s_k) \leq 2R_s) \wedge (x_k \leq x_i), \text{且 } (d(s_j, s_q) \leq 2R_s) \wedge (x_q \geq x_j) \quad (2)$$

$$3) \quad \exists s_i, s_j \in S_x \text{ 且 } i \neq j, \text{使得}$$

$$0 \leq x_i \leq R_s, l - R_s \leq x_j \leq l \quad (3)$$

其中,  $p_i$  为节点  $s_i$  的位置,  $x_i$  是  $s_i$  的横坐标,  $d(s_i, s_j)$  为  $s_i$  和  $s_j$  两节点中心之间的距离,  $s_{x_{\min}}, s_{x_{\max}}$  是  $S_x$  中横坐标最小和最大的节点.条件(1)说明,  $S_x$  中所有节点都位于网格中心.条件(2)说明,对  $S_x$  中任意节点,总存在唯一的一个感知区域与其重叠的左邻居或右邻居,且二者不相同.条件(3)表明,监控区域的左边界或右边界总能被  $S_x$  中至少一个节点覆盖.

如图 2 所示,移动传感器节点在监控区域  $A$  中形成了 1 条网格栅栏,区域  $A$  实现了 1-栅栏覆盖.这说明若利用移动节点在监控区域中构建 1 条网格栅栏,能够在监控区域中实现 1-栅栏覆盖.那么在网格划分模型下,1-BCMS 问题可以转化为如何移动距离和最小化地形成 1 条网格栅栏的问题.下面对该问题进行定义.

**定义 6(1-网格栅栏最小移动距离和问题(1-GBMS)).** 给定传感器节点集合  $S$  和对监控区域  $A$  网格划分后的网格中心点集合  $G$ ,如何找到  $S$  的一个子集  $S_g$  以及在  $G$  中为  $S_g$  中的每个节点  $s_i$  确定重部署的位置  $p_i$ ,即  $p_i \in G$ ,使得  $S_g$  在重部署后,能够在区域  $A$  中形成 1 条网格栅栏,并且移动距离之和最小.

下面对 1-GBMS 问题进行整数线性规划描述.首先对监控区域  $A$  进行网格划分,如图 3 所示,在区域  $A$  的左右两侧各增加一列虚拟网格,增加的左侧虚拟列的网格中心点集合为  $VG_l$ ,右侧的中心点集合为  $VG_r$ ,增加  $O, T$  两个虚拟节点,虚拟节点  $O, T$  分别只在左侧虚拟网格列和右侧虚拟网格列中移动.对包括虚拟节点在内的所有节点编号,节点  $O$  编号为 1,节点  $T$  编号为  $M'$ ,传感器节点编号从  $2 \sim M'-1$ .对包括虚拟网格在内的所有网格编号,网

格编号从  $1 \sim N'$ .

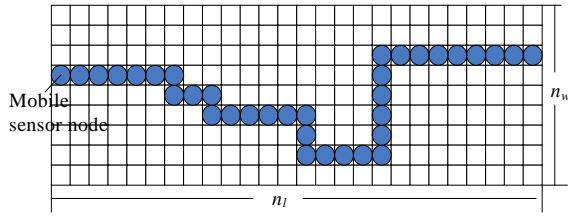


Fig. 2 A grid barrier  
图 2 1条网格栅栏

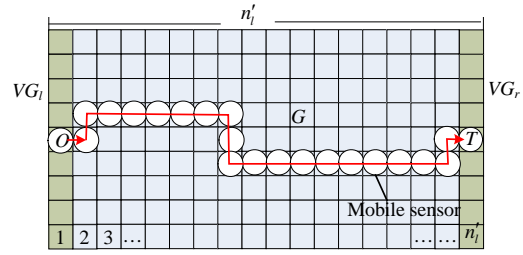


Fig. 3 Region A with virtual nodes and virtual columns  
图 3 增加虚拟节点和虚拟列之后的区域 A

形式化描述中出现的符号说明如下所示:

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| $S$ :移动传感器节点集合   | $AS:S \cup \{O, T\}$ ,包括虚拟节点的节点集合     |
| $G$ :区域 A 划分后的网格中心点集合  | $VG_l$ :左侧虚拟列网格中心点集合                  |
| $VG_r$ :右侧虚拟列网格中心点集合   | $AG:G \cup VG_l \cup VG_r$ ,所有网格中心点集合 |
| $n_l'$ : $AG$ 在长度方向上的网格数量  | $AG:G \cup VG_l \cup VG_r$ ,所有网格中心点集合 |
| $x_{ij}$ : $x_{ij}=1$ ,当且仅当第 $i$ 个传感器节点移动到第 $j$ 个网格中心;否则, $x_{ij}=0$ |                                       |

1-GBMS 问题整数线性规划形式描述:

Minimize:

$$\sum_{i \in AS} \sum_{j \in AG} d_{ij} x_{ij} \tag{4}$$

Subject to:

$$\sum_{j \in AG} x_{ij} \leq 1, \forall i \in AS \tag{5}$$

$$\sum_{i \in AS} x_{ij} \leq 1, \forall j \in AG \tag{6}$$

$$x_{1k} \leq \sum_{i \in S} x_{i(k+1)}, \forall k \in VG_l \tag{7}$$

$$x_{Mk} \leq \sum_{i \in S} x_{i(k-1)}, \forall k \in VG_r \tag{8}$$

$$\sum_{i \in AS} x_{i(j-n_l')} + \sum_{i \in AS} x_{i(j+n_l')} + \sum_{i \in AS} x_{i(j-1)} + \sum_{i \in AS} x_{i(j+1)} = 2, \text{ if } \sum_{i \in AS} x_{ij} = 1, \forall j \in G \tag{9}$$

$$d_{ik} = \begin{cases} 0, & i=1, \forall k \in VG_l \text{ or } i=M, \forall k \in VG_r, \\ d_{ij}, & \forall i \in S, \forall k \in G \\ +\infty, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{10}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 0 \text{ or } 1, & \forall i \in AS, \forall j \in AG \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11}$$

约束(4)为最终优化目标:移动距离和最小化.约束(5)表明,1 个传感器节点最多只能移动至一个网格中心处.约束(6)要求一个网格中心最多只能移进一个传感器节点.约束(7)~约束(9)保证节点移动后在区域 A 中能够形成 1 条网格栅栏,以实现 1-栅栏覆盖.可将 1 条网格栅栏看作是从节点  $O$  到节点  $T$  的一个流,即,如果节点  $O$  和一个传感器节点  $s_i$  相连,则可看作从  $O$  进入  $s_i$  的流为 1.对于  $G$  中组成网格栅栏的某个网格  $g_j$ ,由流守恒原理,进入的流为 1,离开的流也为 1,即只能与两个传感器节点相连.约束(7)保证从节点  $O$  进入  $G$  中的流为 1,即如果虚拟节点  $O$  移动到某个网格  $g_k(x_{1k}=1)$ ,则一定会有 1 个传感器节点移动到  $g_{k+1}$  ( $\sum_{i \in S} x_{i(k+1)} = 1$ ),使进入  $g_{k+1}$  的流为 1.同理,约束(8)保证到达节点  $T$  的流为 1.约束(9)保证对于  $G$  中组成网格栅栏的网格  $g_j$ ,进入和离开  $g_j$  的流均为 1.即当网格  $g_j$  移入 1 个传感器节点时( $\sum_{i \in S} x_{ij} = 1$ ),网格  $g_j$  相邻的上下左右 4 个网格中,必须有且只有 2 个网格有传感器节点移入,才能保证  $g_j$  进入的流和离开的流均为 1.约束(10)中第 1 部分说明,虚拟节点  $O, T$  分别在  $VG_l, VG_r$  中移动时,移动距离按 0 计算;第 2 部分说明,真实的传感器节点在  $G$  中移动时,移动距离是传感器节点

与网格中心间的距离.

采用上述线性规划模型可以计算出 1-GBMS 问题的最优解,最优地对移动节点重部署,实现 1-栅栏覆盖.

**定理 1.** 1-GBMS 问题是 NP-hard 的.

证明:采用限制法证明,将该问题作如下限制:1) 限制  $d_{ij}$ :对  $\forall j, k \in G, \forall i \in S$ , 令  $d_{ij} = d_{ik}$ . 即对任意的传感器节点  $i$ , 它到任意一个网格中心的距离相等.  $d_{ij}$  限制为  $d_i$ ; 2) 限制组成网格栅栏的条件:原有条件中对组成栅栏的传感器数量没有约束,现限制为组成栅栏的传感器数量不能超过  $K$ .

由限制 1) 可知,传感器节点的移动距离只与节点自身位置相关,与目的位置无关.选定一个传感器节点,该节点的移动距离将确定,移动距离之和只取决于选取的传感器节点.记  $c_i$  为任意传感器节点  $i$  移动至网格中心  $g_j$  的收益,令  $c_i = 1/d_i$ , 则  $d_i$  越小,  $c_i$  越大. 1-GBMS 问题限制为:如何从传感器节点集合  $S$  中选取数量不超过  $K$  的节点,使得总收益最大.则新问题的形式化描述为

Maximize:

$$\sum_{i=1}^M c_i x_i \quad (12)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^M 1 \times x_i \leq K \quad (13)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (14)$$

$x_i = 1$ , 表明第  $i$  个传感器节点被选中.  $\sum_{i=1}^M 1 \times x_i \leq K$ , 表明被选中的传感器数量不能超过  $K$  个. 上述形式化模型即是著名的背包问题的 0/1 整数规划模型<sup>[22]</sup>. 由于背包问题是 NP-hard 的<sup>[24]</sup>, 则原有问题 1-GBMS 是 NP-hard 的.  $\square$

1-GBMS 问题是 NP-hard 的, 则随着问题规模的扩大, 求解最优解将面临巨大的时间开销. 所以, 我们需要设计该问题的多项式时间近似算法. 下面给出 1-GBMS 问题的近似算法——CBGB 算法.

#### 4 1-栅栏覆盖构建算法(CBGB)

对区域  $A$  进行网格划分, 选取与区域  $A$  上下边界平行的 1 行网格, 在此行网格中的每个网格中心处部署 1 个传感器节点. 由文献[6]可知, 这种部署方式可以用最少的传感器节点形成 1 条栅栏. 本文称按上述部署方式形成的网格栅栏为基准网格栅栏(baseline grid barrier), 则形成基准网格栅栏所需传感器数量最少.

利用移动节点的重部署形成基准网格栅栏, 需移动的传感器节点数量最少, 则对应的移动距离之和与其他重部署方式相比也会较小. CBGB 算法分为两部分: 1) 确定基准网格栅栏位置: 选取网格划分后的区域  $A$  中的 1 行网格作为基准网格栅栏位置; 2) 最优移动: 确定基准网格栅栏位置后, 将传感器节点最优地移动至选取的基准网格栅栏上, 使得移动距离之和最小.

##### 4.1 基准栅栏位置选取

本文提出了 3 种基准网格栅栏位置的选取策略——BGBS(baseline grid barrier selection)策略, 在仿真实验中对这 3 种选取策略进行了比较分析.

如果基准网格栅栏位置选取在所有传感器节点纵坐标的平均值处, 则传感器节点的平均移动距离会较小, 对应的移动距离之和也会减小. 基于这种平均的思想, 本文提出了 BGBS1 和 BGBS2 选取策略.

BGBS1: 传感器纵坐标最大值和最小值相加, 取平均值, 作为基准网格栅栏的位置:

$$\text{Barrier\_Position} = [(y_{\max} + y_{\min}) / 2] \quad (15)$$

BGBS2: 所有传感器节点的纵坐标相加, 取平均值, 作为基准网格栅栏的位置.

$$\text{Barrier\_Position} = \left[ \left( \sum_{i=1}^M y_i \right) / M \right] \quad (16)$$

其中,  $\text{Barrier\_Position}$  为所求解的基准网格栅栏位置的纵坐标,  $[y]$  为离  $y$  最近的网格中心的纵坐标.  $y_{\max}$  和  $y_{\min}$  分别是所有节点纵坐标中的最大值和最小值.

如果在选取网格栅栏位置时,能使尽量多的传感器节点在移动时都是向离其自身最近的网格移动,则整体移动距离之和会较小.利用上述思想,我们提出 BGBS3 选取策略.BGBS3 的主要思想是:首先扫描  $S$  中所有的传感器节点,对任意的节点  $s_i$ ,计算距离  $s_i$  最近的网格  $g_k$  的权值,该权值是  $g_k$  与距离其最近的传感器节点之间的距离.然后计算每行网格的权值之和,选取权值之和最小的行,作为基准网格栅栏的位置.

下面是 BGBS3 选取策略的描述. $s_i$  是第  $i$  个传感器节点, $g_k$  为距离  $s_i$  最近的网格, $distance(s_i, g_k)$  表示  $s_i$  与  $g_k$  之间的距离, $GridSensorDistance(g_k)$  记录网格  $g_k$  和距离其最近的传感器节点之间的距离. $SumRow(i)$  表示第  $i$  行上所有网格的  $GridSensorDistance$  之和, $r_{min}$  是具有最小权值之和的行的序号,见算法 1.

**算法 1.** BGBS3 algorithm.

```

1  Initialize all GridSensorDistance to  $+\infty$ 
2  for each  $s_i \in S$  /* Compute GridSensorDistance */
3       $g_k$  = the nearest grid to  $s_i$ 
4       $d = distance(s_i, g_k)$ 
5      If ( $d < GridSensorDistance(g_k)$ )
6           $GridSensorDistance(g_k) = d$ 
7      end
8  end
9  for each  $r_i \in R$  /* Compute GridSensorDistance Sum in every Row */
10      $SumRow(i) =$  sum of all GridSensorDistance in  $r_i$ 
11  end
12   $r_{min} = \min(SumRow)$  /* Find the row in which there is minimum sum of GridSensorDistance */
13   $Barrier\_Position = Location(r_{min})$  /* Get the barrier position */

```

BGBS1 策略首先从  $M$  个传感器节点中找出纵坐标最大和最小的节点,时间开销为  $O(M)$ ;计算基准网格位置开销为常数时间,则 BGBS1 的计算复杂性为  $O(M)$ .BGBS2 策略需对所有传感器节点的纵坐标相加求平均值,时间开销为  $O(M)$ .BGBS3 首先扫描每个传感器节点,生成  $GridSensorDistance$  数组,时间开销为  $O(M)$ ;接着,对每一行分别求和,时间开销  $O(N)$ , $N$  为区域  $A$  中所有网格的数量;然后求出具有最小值的行,时间开销为  $O(n_w)$ , $n_w$  为区域  $A$  中网格的行数.实际应用中  $N > M$ ,则 BGBS3 算法总的的时间开销为  $O(N)$ .BGBS3 策略与 BGBS1, BGBS2 相比复杂度最高;但从后面的仿真实验可以看出, BGBS3 的性能最优.

## 4.2 最优移动

设利用 BGBS 算法选定第  $i$  行网格作为基准网格栅栏位置,则确定了传感器节点重部署的目的网格的位置.下一步是如何从  $M$  个移动节点中选取  $n_l$  个节点,分别移动至确定的  $n_l$  个网格处,使得移动距离之和最小.本文称此问题为最优移动问题.

**定理 2.** 最优移动问题是二部图赋权匹配问题.

证明:首先根据  $M$  个移动传感器节点和  $n_l$  个网格的位置坐标信息,构建二部图  $G(X, Y, E, C)$ . $X$  是移动节点集合, $Y$  是  $n_l$  个网格组成的节点集合, $E$  是  $X, Y$  之间的连接弧集合. $X$  中的第  $i$  个节点和  $Y$  中的第  $j$  个节点之间存在连接弧  $e_{ij}$ ,弧  $e_{ij}$  上的权重为二者之间距离的倒数,权重的集合为  $C$ .

二部图  $G$  的赋权匹配问题,是指在图  $G$  中寻找一个  $X$  和  $Y$  之间的匹配  $\Psi$ , $\Psi$  能够饱和  $Y$  中所有的节点,并且总的权重之和最大<sup>[22]</sup>.如果该匹配  $\Psi$  存在,则  $X$  中存在  $n_l$  个节点与  $Y$  中所有节点分别 1-1 对应匹配,并且匹配弧的权重之和最大.即说明存在一个调度  $\Gamma$ ,按照  $\Gamma$  可以从  $M$  个传感器节点中选择  $n_l$  个节点分别 1-1 对应地移动到  $n_l$  个网格上,使得移动距离之和最小.相反,如果存在上述的调度  $\Gamma$ ,则说明节点集合  $X$  中有  $n_l$  个节点与  $Y$  中所有节点之间存在一个 1-1 对应的匹配  $\Psi$ ,使得匹配弧权重之和最大.

综上,最优移动问题是二部图赋权匹配问题. □

最优移动问题是二部图赋权匹配问题,则可以利用二部图赋权匹配问题的求解算法,如匈牙利算法(Hungarian)<sup>[23]</sup>,对移动节点进行最优地重部署.匈牙利算法的复杂度为  $O(m^2n)$ <sup>[23]</sup>,二部图中节点数量相对较少的集合的节点数目为  $m$ ,另一个集合的节点数目为  $n$ .

### 4.3 CBGB算法描述

CBGB 算法在能够获知网络全局信息的中心节点上运行,中心节点可以通过选举等方式确定.CBGB 算法主要过程为:首先,部署在监控区域  $A$  上的传感器网络中的每个节点向执行算法的中心节点  $C$  报告自身的位置坐标信息.节点  $C$  对区域  $A$  进行网格划分,根据各节点的位置信息,利用 BGBS 算法计算基准网格栅栏位置;然后,根据基准网格栅栏上网格的位置信息和各传感器节点的位置信息构建二部图  $G$ ,在二部图  $G$  上利用匈牙利算法求解需要重部署的传感器节点子集以及重部署的目的位置;最后,向需要移动的节点发送目的位置的消息,开始重部署.

算法 2 是 CBGB 算法的描述.所有传感器节点的位置信息集合为  $SP$ (sensor position).区域  $A$  中所有网格的位置信息集合为  $GP$ (grid position). $GB$ (grid on barrier)是基准网格栅栏上的所有网格组成的节点集合. $E$  是传感器节点集合  $S$  和网格集合  $GB$  的节点之间的连接弧集合, $C$  是连接弧上权重的集合. $MS$  表示最终计算出的需要移动的传感器节点集合, $DP$ (destination position)记录这些传感器节点的最终目标位置信息.

算法 2. CBGB algorithm.

```

1  Get all sensors's position information  $SP$ 
2  Partition the monitor area  $A$  to  $N$  grid,  $N=n_l \times n_w, n_l = \lceil l/2R_s \rceil, n_w = \lceil w/2R_s \rceil$ .
   Get all grids's position information  $GP$ 
3   $Barrier\_Position = BGBS(SP, GP)$  /* Compute baseline grid barrier position */
4   $E = MakeEdge(S, GB)$  /* Compute the edge between  $S$  and  $GB$  */
5   $C = MakeCost(E, SP, GP)$  /* Compute cost on edge */
6  Construct bipartite graph  $G(S, GB, E, C)$  /* Construct bipartite graph */
7   $\Psi = Hungarian(G)$  /* Find the optimal match between  $S$  and  $GB$  */
8  Compute  $MS$  and  $DP$  with Match  $\Psi$ 
9  for each  $ms_i \in MS$ 
10     Send message to  $ms_i$  with the destination position  $(dx_i, dy_i)$ 
11 end

```

### 4.4 CBGB算法分析

#### (1) 算法复杂性

对 CBGB 算法的计算复杂度进行分析.算法 2 中第 3 步计算基准栅栏位置时,如果采用 BGBS,则计算复杂度为  $O(N)$ .第 4 步~第 6 步构建二部图的复杂度  $O(n_l M)$ .第 7 步计算最优匹配采用匈牙利算法,计算复杂度为  $O(n_l^2 M)$ <sup>[23]</sup>.由于  $n_l > n_w$ ,则  $n_l^2 > N$ ,则 CBGB 算法的计算复杂度为  $O(n_l^2 M)$ .

一旦确定了传感器网络部署的监控区域  $A$ ,则对  $A$  网格划分后,基准栅栏上的网格数目  $n_l$  将为一个确定常量.因此,对一个确定的监控区域  $A$ ,CBGB 算法的计算开销只随着传感器节点数量  $M$  的增加而线性增加.实验表明,CBGB 算法的解与最优解相接近.这说明,CBGB 算法能够用较小的开销计算出接近最优值的解.

#### (2) 通信开销

CBGB 算法的通信开销包括两部分:1) 网络中各节点向中心节点报告位置信息的通信开销;2) 中心节点向需要移动的节点发送目的位置信息的通信开销.各节点传送自身位置信息的开销为  $O(M)$ ;经过计算后,传感器网络中将有  $n_l$  个节点需要移动,中心节点发送目的位置信息的开销为  $O(n_l)$ .由于  $n_l < M$ ,则整个传感器网络通信开销  $O(M)$ .

## 5 基于分治策略的 $k$ -栅栏覆盖构建算法

为保证能够对移动目标进行可靠检测,一些应用中需要传感器网络在监控区域  $A$  内形成  $k$ -栅栏覆盖.由文献[6]可知,传感器网络无法根据邻居节点信息判定整个区域中是否形成  $k$ -栅栏覆盖,则移动传感器网络重部署后,需要获取网络的全局信息来判定监控区域  $A$  中是否已经形成  $k$ -栅栏覆盖.对于大规模的网络,传感器节点数量众多,这种方式将会产生大量的通信和计算开销.因此,如何避免获知整个网络的全局信息,降低通信和计算开销,能量高效地构建  $k$ -栅栏覆盖是个难点.

本文提出了一种基于分治策略的  $k$ -栅栏覆盖构建算法,其主要思想如下:



- 1) 将区域  $A$  分成  $k \times v$  个相同大小的子矩形区域,子区域的长度  $l_s=l/v$ ,子区域的宽度  $w_s=w/k$ ;
- 2) 每个子矩形区域内分别独立运行相同的栅栏覆盖构建算法——CBIGB(constructing baseline and isolation grid barrier)算法.
- 3) 所有子区域执行完成 CBIGB 算法后,重部署的传感器网络将在整个区域  $A$  中形成  $k$ -栅栏覆盖.

### 5.1 CBIGB算法

CBIGB 算法基于 CBGB 算法作了部分改进,除构建基准网格栅栏外,还选取子区域最右侧垂直 1 列的网格构建隔离网格栅栏(isolation grid barrier).由于水平相邻的两个子区域的基准栅栏可能不在同一水平线上,而导致在两子区域临界处可能存在空隙,使得移动目标能够不被检测地通过.在两个子区域间增加隔离网格栅栏,将消除上述现象.

CBIGB 算法与 CBGB 算法的区别是:在确定基准网格栅栏的位置后,CBGB 算法中只使用基准网格栅栏上的网格节点集合  $GB$  与传感器节点  $S$  一起构建二部图  $G$ ,见算法 2 的第 6 步;在 CBIGB 算法中,将子区域最右侧垂直 1 列的网格组成的隔离网格栅栏集合  $G_r$  与节点集合  $GB$  合并一起,得到新的节点集合  $NewGB$ , CBIGB 算法使用  $NewGB$  与传感器节点  $S$  一同构建二部图  $G'$ .利用新的二部图  $G'$  进行求解.图 4 是各子区域执行完成 CBIGB 算法后,在监控区域  $A$  所形成的 3-栅栏覆盖的示意图.

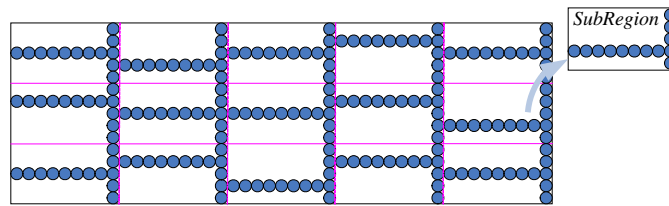


Fig.4 3-Barrier coverage after executing CBIGB in every subregion

图 4 执行分治算法后形成的 3-栅栏覆盖示意图

### 5.2 子区域划分

分治算法按照长为  $l_s=l/v$ 、宽为  $w_s=w/k$ ,将监控区域划分为多个子矩形区域,子区域长度  $l_s$  和宽度  $w_s$  取决于  $v$  和  $k$ .下面对  $v$  和  $k$  的选取进行讨论.

假设传感器节点按照密度为  $\lambda$  的 Poisson 点过程随机部署在监控区域  $A$  中.由于部署的随机性,即使每次部署的密度相同,相同区域中每次随机部署的传感器数量将是变化的,因而利用监控区域中部署的节点数量的期望来讨论相关参数更恰当.由 Poisson 点过程的性质可知,区域  $A$  内随机部署的节点数量  $m$  的期望为  $E(m)=\lambda|A|$ ,  $|A|$  为区域  $A$  的面积.

当需要在监控区域  $A$  中实现  $k$ -栅栏覆盖时,划分的子区域宽度确定为  $w_s=w/k$ ,则子区域的面积将只随着长度  $l_s$  的增加而增长,子区域中节点数量也随之增加.节点数量的增加将导致传感器网络的通信和计算开销增加,消耗大量能量,因此需要限制子区域中的节点数量.令满足限制的最大节点数量为  $M_{max}$ ,则有  $\lambda l_s w_s \leq M_{max}$ ,即

$$l_s \leq \frac{M_{max}}{\lambda w_s}. \text{ 由 } l_s=l/v, w_s=w/k \text{ 可推导出:}$$

$$v \geq \frac{\lambda l w}{k M_{max}} \tag{17}$$

由 CBIGB 算法可知,每个子区域内部将形成如图 5(a)所示的栅栏覆盖,则形成上述栅栏覆盖所需的最少节点数量  $M_{min}$  为

$$M_{min} = n_{l_s} + n_{w_s} - 1 = \left\lceil \frac{l_s}{2R_s} \right\rceil + \left\lceil \frac{w_s}{2R_s} \right\rceil - 1 \approx \frac{l_s + w_s}{2R_s} - 1 \tag{18}$$

子区域内的节点数量必须大于  $M_{min}$  才能够在子区域内形成图 5(a)所示的栅栏覆盖,则有  $\lambda l_s w_s \geq M_{min}$ .由公

式(18)和  $l_s=l/v, w_s=w/k$ , 可得

$$v \leq \frac{l(2\lambda w R_s - k)}{w - 2k R_s} \quad (19)$$

由公式(17)和公式(19)可得  $v$  的取值范围  $\frac{\lambda l w}{k M_{\max}} \leq v \leq \frac{l(2\lambda w R_s - k)}{w - 2k R_s}$ . 在实际应用中, 可根据传感器节点的通信和计算能力确定  $M_{\max}$ , 从而选取合适的  $v$  值对监控区域进行划分.

当子区域宽度  $w_s$  较小时, 如图 5(b)所示, 利用 CBIGB 算法在子区域内部将无需形成隔离栅栏, 则

$$M_{\min} = n_{i_s} \approx \frac{l_s}{2R_s}.$$

由  $\lambda l_s w_s \geq M_{\min}$  和  $w_s = w/k$  可推导出:

$$k \leq 2\lambda w R_s \quad (20)$$

公式(20)说明, 在给定部署密度的情况下,  $k$ -栅栏覆盖的  $k$  有最大值限制, 否则会由于子区域宽度过小, 导致子区域中无足够数量的节点以形成栅栏覆盖.

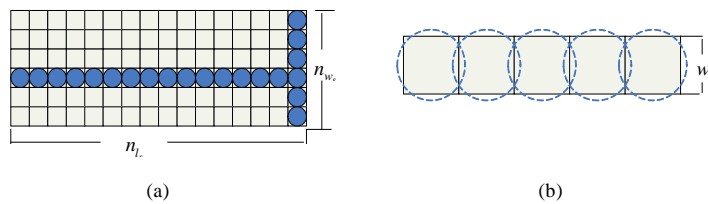


Fig.5 Possible barrier coverage in a SubRegion

图 5 子区域中可能形成的栅栏覆盖示意图

### 5.3 计算与通信开销

首先对在各子区域中独立执行的 CBIGB 算法进行分析. 在子区域  $SubR_i$  中, CBIGB 算法的计算时间开销为  $O(n_i^2 M_i)$ , 通信开销为  $O(M_i)$ . 其中,  $n_i$  为  $SubR_i$  中网格节点集合  $NewGB$  的节点数量,  $M_i$  为子区域  $SubR_i$  中传感器节点的数量. 由集合  $NewGB$  的构成方法可知,  $n_i$  取决于子区域  $SubR_i$  的面积大小, 则 CBIGB 算法的计算和通信开销取决于子区域的面积大小和传感器节点数量.

该分治算法将监控区域  $A$  划分为多个子区域, 每个子区域与监控区域  $A$  相比, 面积为区域  $A$  面积的  $\frac{1}{k \times v}$ , 传感器节点数量的期望为  $E(M_i) = \frac{M}{k \times v}$ , 即每个子区域内的传感器节点数量约为全部节点的  $\frac{1}{k \times v}$ . 每个子区域内独立执行的 CBIGB 算法只需利用各子区域内的局部网络信息构建栅栏覆盖, 而无需监控区域  $A$  的全局网络信息. 因此与全局算法相比, 该分治算法的通信和计算开销大幅减少.

在传感器网络节点的部署密度不变的情况下, 当区域  $A$  的面积增加时, 只需保持各子区域大小不变, 增加划分的子区域数量. 由于各子区域的大小和传感器网络的部署密度不变, 每个子区域中传感器节点的数量将基本无变化. 由上述讨论可知, 当区域  $A$  的面积增加时, 各子区域中 CBIGB 算法的计算和通信开销将基本不变. 因此, 提出的基于分治策略的  $k$ -栅栏覆盖构建算法适用于大面积应用的场景. 仿真实验验证了该算法的可扩展性.

### 5.4 狭长带状区域

本文前述内容针对矩形监控区域提出了基于分治策略的栅栏覆盖构建算法. 在实际应用中, 监控区域可能为其他形状, 如狭长的带状区域. 本节将说明该构建算法可以适用于狭长带状区域.

首先定义狭长带状区域. 令  $d(x, L)$  为二维平面上的一点  $x$  到一条曲线  $L$  的距离, 即  $d(x, L) = \min\{d(x, y) : y \in L\}$ . 两条曲线  $L_1$  和  $L_2$  被称为并行且相距为  $w$ , 当且仅当对  $\forall x \in L_1, \forall y \in L_2$ , 有  $d(x, L_1) = d(x, L_2) = w$ , 则宽度为  $w$ 、长度为  $l$

的带状区域是指平行且相距为  $w$  的两条曲线  $L_1$  和  $L_2$  之间所夹区域,  $L_1$  与  $L_2$  长度相等均为  $l$ . 狭长带状区域如图 6(a) 所示.

将狭长带状区域转化为一组矩形和平行四边形区域的组合, 如图 6(b) 所示. 记其中一个平行四边形区域边长分别为  $l_p, w_p$ , 对平行四边形区域进行网格划分, 如图 7 所示, 令  $n_{l_p} = \lceil l_p / 2R_s \rceil, n_{w_p} = \lceil w_p / 2R_s \rceil$ . 显然, 针对矩形区域设计的栅栏覆盖构建算法可以无需修改地应用于平行四边形区域, 图 7 为 1-栅栏覆盖执行结果示意图.

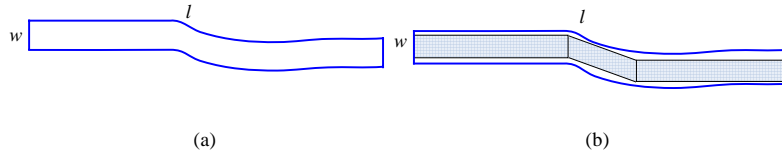


Fig.6 An illustration of the thin and long strip

图 6 狭长带状区域

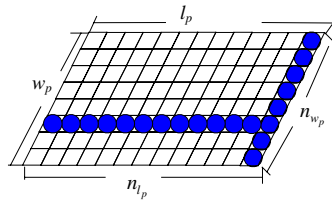


Fig.7 Parallelogram region

图 7 平行四边形区域

因此, 针对狭长带状区域中的应用, 我们可将该区域转化为一组矩形和平行四边形区域的组合, 在每个矩形或平行四边形子区域中, 执行  $k$ -栅栏覆盖构建算法. 各区域执行完成后, 整个带状区域将形成  $k$ -栅栏覆盖. 矩形和平行四边形的具体组合形式可根据实际部署区域的形状进行划分.

## 6 性能评估

本文使用 Matlab7.0 对 1-栅栏覆盖构建算法和  $k$ -栅栏覆盖构建算法进行仿真模拟与分析. 仿真实验环境设置: 移动传感器节点采用二元圆形感知模型, 感知半径 2.5m, 最大移动距离限制 10m, 初始部署的网络是连通的. 传感器节点按照 Poisson 点过程随机部署于矩形监控区域中. 在实验中, 通过改变传感器网络的部署密度和部署区域的长度等参数, 考察传感器网络移动距离之和与平均移动距离的变化情况. 下文的实验结果是 50 次随机实验的平均值.

### 6.1 1-栅栏覆盖形成概率

本节考察在传感器节点的部署密度逐渐增加的情况下, 移动传感器网络和静态传感器网络中能够成功形成 1-栅栏覆盖的概率变化情况. 传感器按照 Poisson 分布随机部署于  $15\text{m} \times 500\text{m}$  的矩形区域内, 节点部署密度从 0.005 变化到 0.1. 每个密度下随机生成 100 个拓扑, 1-栅栏覆盖的成功概率为 100 个拓扑中能形成 1-栅栏覆盖的拓扑数目与 100 的比值. 由图 8 可知, 当节点部署密度大于 0.04 小于 0.1 时, 静态传感器网络随机部署后不能保证一定能够形成 1-栅栏覆盖, 形成栅栏覆盖的概率随着密度的增加而增长; 当节点部署密度大于 0.018 小于 0.04 时, 随机部署的静态传感器网络由于节点过于稀疏, 一定不能够形成 1-栅栏覆盖, 此时, 只有通过移动节点的重部署才能形成栅栏覆盖; 当节点部署密度小于 0.018 时, 移动传感器网络也无法形成 1-栅栏覆盖. 因此, 本文后续实验重点对传感器节点的部署密度在 0.02~0.1 之间变化时的情况进行性能评估.

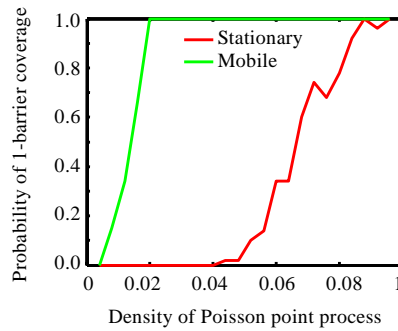


Fig.8 Probability of 1-barrier coverage vs. density

图 8 1-栅栏覆盖形成概率 vs. 节点部署密度

## 6.2 1-栅栏覆盖构建算法

### (1) CBGB 算法与最优算法比较

利用 1-GBMS 问题的整数线性规划模型可以求出该问题的最优解,对传感器网络进行最优地重部署,实现 1-栅栏覆盖.本文称利用上述整数线性规划模型求解的算法为最优算法.但由于 1-GBMS 问题是 NP-hard 的,本文提出了该问题的近似算法——CBGB 算法.下面对 CBGB 算法与最优算法进行了性能比较.

图 9 是在 15m×500m 的狭长矩形区域内,传感器节点部署密度从 0.02 增加至 0.1 时移动距离之和的变化情况.可以看出,CBGB 算法中如果采用 BGS3 选取策略,随着传感器节点密度的增加,CBGB 算法与最优算法的移动距离和越来越接近.当部署密度为 0.02 时,二者相差约 6%;当部署密度增加到 0.04 时,二者只相差 4%.由前文讨论可知,形成基准栅栏所需传感器数量最少,移动距离和相对较小.随着节点部署密度的增加,利用最优算法对传感器网络重部署后,形成基准栅栏的可能性增加.所以,CBGB 算法的性能随着部署密度的增加与最优算法性能越来越接近.可以看出,BGS3 选取策略的性能优于 BGS1 和 BGS2.虽然 BGS3 选取策略的计算复杂度高于 BGS1 和 BGS2,但由于采用 BGS3 能使移动距离和大幅减小,BGS3 策略更优.

### (2) CBGB 算法与 CBarrier 算法比较

图 10 显示了 CBGB 算法与文献[20]中的 1-栅栏覆盖构建算法——CBarrier 算法的性能比较.图 10 实验参数设置与图 9 相同,CBGB 算法中使用的是 BGS3 选取策略.从图 10 可以看出,采用 CBarrier 算法产生的移动距离之和随着传感器节点的部署密度的增加而快速增长,而 CBGB 算法产生的移动距离和则随部署密度的增加而减小.因为利用 CBarrier 算法形成 1-栅栏覆盖,需要区域中部署的所有传感器节点全部移动,而 CBGB 算法随着节点部署密度的增加,可供选择移动的节点数量也随之增加,则能够做出更优的选择.这说明与 CBarrier 算法相比,CBGB 算法性能更优.

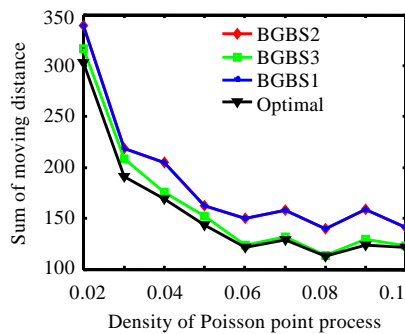


Fig.9 Sum of moving distance vs. density

图 9 节点部署密度 vs. 移动距离

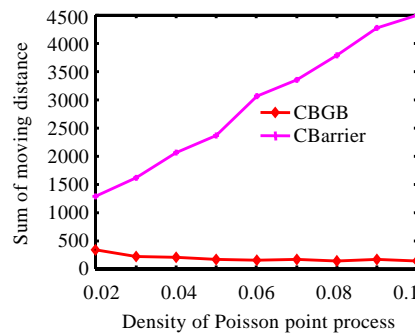


Fig.10 CBGB vs. CBarrier

图 10 CBGB 算法 vs. CBarrier 算法

### 6.3 $k$ -栅栏覆盖构建算法

#### (1) 算法有效性

图 11 和图 12 分别直观地显示了传感器网络随机部署后的初始分布情况,以及运行  $k$ -栅栏覆盖构建算法后的各节点分布情况.图 11 是在  $60\text{m}\times 160\text{m}$  矩形区域上,按照密度 0.02 的 Poisson 点过程进行随机部署的传感器节点的分布示意图.图 12 是将该区域划分成  $3\times 4$  个子矩形区域,在每个子区域中运行 CBIGB 算法,形成 3-栅栏覆盖后的传感器节点分布示意图.

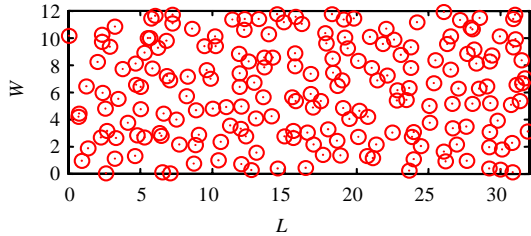


Fig.11 Initial deployment of sensor networks

图 11 传感器网络初始部署图

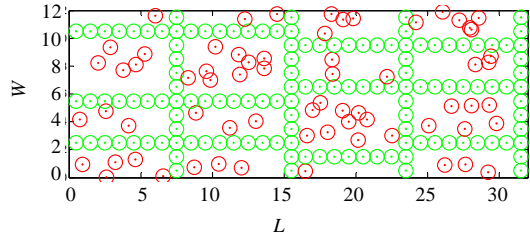


Fig.12 3-Barrier coverage

图 12 3-栅栏覆盖部署图

#### (2) 平均移动距离变化

初始时,传感器网络按照密度为 0.02 的 Poisson 点过程部署在  $60\text{m}\times 400\text{m}$  的细长矩形区域上,执行栅栏覆盖构建算法要在区域中形成 4-栅栏覆盖.图 13 是传感器节点部署密度不变的情况下,区域长度从 400m 增加至 2000m 时,平均移动距离变化情况.从图 13 可以看出,随着区域长度的不断增大,传感器网络规模的扩大,整个网络的平均移动距离基本变化不大.

图 14 显示的是平均移动距离随着  $k$ -栅栏覆盖的  $k$  值的变化情况.图 14 参数设置与图 13 初始配置相同,从图 13 中可以看出,平均移动距离基本在 1.4 和 1.5 之间变化,变化不大.

平均移动距离不随网络规模和需要形成的栅栏覆盖的  $k$  值的增加而增加,说明  $k$ -栅栏覆盖构建算法的可扩展性较好,能够适用于大规模的传感器网络应用场景.

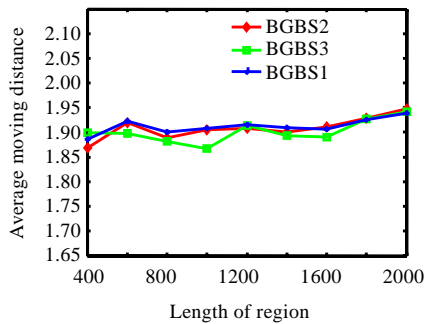


Fig.13 Average moving distance vs. length of region

图 13 平均移动距离 vs.区域长度

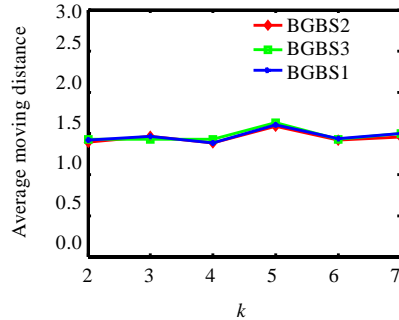


Fig.14 Average moving distance vs.  $k$

图 14 平均移动距离 vs.  $k$  值

## 7 结 论

栅栏覆盖是面向狭长区域内移动目标检测应用的一种更适合的覆盖模型.已有研究工作主要对静态传感器网络中的栅栏覆盖相关问题进行研究,本文则研究随机部署的移动传感器网络在监控区域中如何能量高效地实现  $k$ -栅栏覆盖的问题.首先提出了 1-BCMS 问题,在网格划分模型下,将 1-BCMS 问题近似为 1-GBMS 问题;然后提出了构建 1-栅栏覆盖的 CBGB 算法,仿真实验表明,CBGB 算法的解与最优解接近;最后提出一种基于分

治策略的  $k$ -栅栏覆盖构建算法,该算法可以在随机部署的大规模移动传感器网络中构建  $k$ -栅栏覆盖,并且通信和计算开销大幅降低.仿真实验证明了该算法的有效性和可扩展性.本文研究基于全部节点具有移动能力的传感器网络,后续研究工作将针对移动节点与静态节点混合的传感器网络中如何能量高效地形成栅栏覆盖进行研究.

#### References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [2] Ren FY, Huang HN, Lin C. Wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(7):1282–1291 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [3] Sun LM, Li JZ, Chen Y, Zhu HS. *Wireless Sensor Network*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [4] Chen AI, Kumar S, Lai TH. Designing localized algorithms for barrier coverage. In: Kranakis E, ed. *Proc. of the 13th Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*. New York: ACM Press, 2007. 63–74. [doi: 10.1145/1287853.1287862]
- [5] Gage DW. Command control for many-robot systems. *Unmanned Systems*, 1992,10(4):28–34.
- [6] Kumar S, Lai TH, Arora A. Barrier coverage with wireless sensors. In: La Porta TF, ed. *Proc. of the 11th Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*. Cologne: ACM Press, 2005. 284–298. [doi: 10.1007/s11276-006-9856-0]
- [7] Ren Y, Zhang SD, Zhang HK. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2006, 17(3):422–433 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [8] Liu BY, Dousse O, Wang J, Saipulla A. Strong barrier coverage of wireless sensor networks. In: Jia XH, ed. *Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*. New York: ACM Press, 2008. 411–420. [doi: 10.1145/1374618.1374673]
- [9] Balister P, Bollobas B, Sarkar A, Kumar S. Reliable density estimates for coverage and connectivity in thin strips of finite length. In: Kranakis E, ed. *Proc. of the 13th Annual ACM Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom)*. New York: ACM Press, 2007. 75–86. [doi: 10.1145/1287853.1287863]
- [10] Wang W, Srinivasan V, Chua KC. Coverage in hybrid mobile sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2008,7(11): 1374–1387. [doi: 10.1109/TMC.2008.68]
- [11] Chellappan S, Bai X, Ma B, Xuan D. Sensor networks deployment using flip-based sensors. In: *Proc. of the 2nd IEEE Int'l Conf. Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS)*. New Jersey: IEEE Press, 2005. 291–298. [doi: 10.1109/MAHSS.2005.1542812]
- [12] Wang GL, Cao GH, La Porta T, Zhang WS. Sensor relocation in mobile sensor networks. In: *Proc. of the 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. New Jersey: IEEE Press, 2005. 2302–2312. [doi: 10.1109/INFOCOM.2005.1498517]
- [13] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, Srivastava MB. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks. In: *Proc. of the 20th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies*. New Jersey: IEEE Press, 2001. 1380–1387. [doi: 10.1109/INFOCOM.2001.916633]
- [14] Chen A, Lai TH, Xuan D. Measuring and guaranteeing quality of barrier-coverage in wireless sensor networks. In: Jia XH, ed. *Proc. of the 9th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2008. 421–430. [doi: 10.1145/1374618.1374674]
- [15] Jiang CD, Chen GL. Double barrier coverage in dense sensor networks. *Journal of Computer Science and Technology*, 2008, 23(1):154–165. [doi: 10.1007/s11390-008-9113-3]
- [16] Saipulla A, Westphal C, Liu BY, Wang J. Barrier coverage of line-based deployed wireless sensor networks. In: *Proc. of the 28th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM)*. New Jersey: IEEE Press, 2009. 127–135.
- [17] Bhattacharya B, Burmester B, Hu Y, Kranakis E, Shi Q, Wiese A. Optimal movement of mobile sensors for barrier coverage of a planar region. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Combinatorial Optimization and Applications (COCOA)*. LNCS 5165, Springer-Verlag, 2008. 103–115. [doi: 10.1007/978-3-540-85097-7\_10]

- [18] Kloder S, Hutchinson S. Barrier coverage for variable bounded-range line-of-sight guards. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA). New Jersey: IEEE Press, 2007. 391–396. [doi: 10.1109/ROBOT.2007.363818]
- [19] Yang GQ, Zhou W, Qiao DJ. Defending against barrier intrusions with mobile sensors. In: Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA). New Jersey: IEEE Press, 2007. 113–120. [doi: 10.1109/WASA.2007.149]
- [20] Shen CX, Cheng WF, Liao XK, Peng SL. Barrier coverage with mobile sensor. In: Proc. of the Int'l Symp. on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks (I-SPAN). New Jersey: IEEE Press, 2008. 99–104. [doi: 10.1109/I-SPAN.2008.8]
- [21] Chakrabarty K, Iyengar SS, Qi HR, Cho E. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. IEEE Trans. on Computers, 2002,51(12):1448–1453. [doi: 10.1109/TC.2002.1146711]
- [22] Xie JX, Xing WX. Network Optimization. Beijing: Tsinghua University Press, 2005 (in Chinese).
- [23] Lawler EL. Combinatorial Optimization: Networks and Matroids. New York: Holt, Rinehart and Winston Press, 1976.
- [24] Gu XF, Sun SX, Lu GH. Computational Complexity Theory. Beijing: China Machine Press, 2005 (in Chinese).

#### 附中文参考文献:

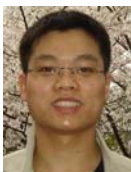
- [2] 任丰原,黄海宁,林闯.无线传感器网络.软件学报,2003,14(7):1282–1291. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1282.htm>
- [3] 孙利民,李建中,陈渝,朱红松.无线传感器网络.北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 任彦,张思东,张宏科.无线传感器网络中覆盖控制理论与算法.软件学报,2006,17(3):422–433. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/422.htm> [doi: 10.1360/jos170422]
- [22] 谢金星,邢文训.网络优化.北京:清华大学出版社,2000.
- [24] 顾小丰,孙世新,卢光辉.计算复杂性.北京:机械工业出版社,2005.



班冬松(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士生,CCF会员,主要研究领域为无线传感器网络.



蒋杰(1976—),男,博士,副研究员,主要研究领域为无线传感器网络 Ad-Hoc 网络.



温俊(1979—),男,博士,工程师,主要研究领域为无线传感器网络.



窦文华(1946—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为高级计算机网络.