

基于网格点覆盖模型的高效传感器网络节点配置算法

姚盼盼, 姚向华

(西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 节点配置问题是传感器网络研究的关键问题. 在 Dhillon S. S. 的模型化方法基础上, 完成了两种改进的高效节点配置算法. 以最少化传感器数目为目标, 通过减少局部冗余、优化整体性能以及考虑传感器检测范围的有限性, 修改算法的初始化模型等方法, 对现有的传感器节点配置算法进行了改进. 通过仿真分析, 充分验证了两种模型的可行性与性能的优越性.

关键词: 无线传感器网络; 配置问题; 传感器模型

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)12-0034-06

Efficient Sensor Placement Algorithm Based on Grid Point Coverage Model

YAO Pan-pan, YAO Xiang-hua

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Sensor placement is one of the key topics in sensor networks study. Two improved algorithms were finished for the efficient coverage in a sensor field, based on Dhillon s. s. Model method. The new method was aimed at minimizing the number of sensors, which used some algorithms such as to reduce local redundancy, optimize the overall performance, and considers the detection limitation of sensors, modified algorithm initialization model. The ultimate simulation results demonstrate the effectiveness and the excellent performance of the presented model compared with the original placement algorithms.

Key words: wireless sensor network; placement problem; sensor model

1 引言

在过去二十年中, 无线传感器网络^[1] (Wireless Sensor Networks, WSNs) 已成为多个领域的研究热点, 显示出十分广阔的应用前景. 无线传感器网络配置问题作为无线传感器网络研究的重要研究内容, 颇受国内外研究者的关注.

近年来, 国内外著名学者针对传感器配置问题提出了许多有效的解决方案. 文献[2]中, Duke 大学的 Chakrabarty 提出传感网络中传感器定位的编码理论, 这种方法有效地解决了异构传感器的配置问题. 文献[3]中荷兰学者 Berg M 以艺术走廊问题 (AGP) 为背景, 对传感器网络配置问题进行了经典

的阐述. 文献[4]中, 南加州大学洛杉矶分校的 Seapahn Megerian 分别从确定性、统计性、最坏覆盖和最好覆盖等方面考虑, 提出寻找被监测环境区域最高、最低覆盖度问题. 在文献[5]中由 Dhillon. S. 和 Chakrabarty 提出的两种传感器配置算法 Max_avg_cov 和 Max_min_cov, 主要研究了基于网格点模型的 WSNs 覆盖优化配置问题, 在严格确保 WSNs 连通性的条件下, 优化了传感器配置数目并达到覆盖要求, 二者较随机配置和均匀配置显示出良好的性能. 其中, Max_avg_cov 算法为实现平均覆盖最大化, 传感器节点被放在对全局性能影响最大的网格点上; 而 Max_min_cov 把传感器节点放在性能最差的点上, 优先完善了局部性能. 两者都没有充分考

收稿日期: 2011-03-20; 修回日期: 2011-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60972146, 60502021)

虑在冗余覆盖等其他情况下其算法的性能。

对 Max_Avg_Cov 配置算法进行分析,也可以看到有的时候,它的效果是很差的,尤其是在大规模配置的情况下。这是由于该算法实现的过程中,先放置的传感器节点对后续传感器节点的放置影响较小,在计算整体性能时,仍然考虑改善已达到设计要求的网格点,这就有可能导致性能较差的网格点迟迟得不到改善,甚至放置了冗余传感器节点,直接影响算法的性能。还有由于许多的冗余计算使得它的计算量也相对的偏大。

Max_Min_Cov 配置算法在得到 M 与 $M \times$ 矩阵后,很好地完善了 Max_Avg_Cov 配置算法的不足,先放置的传感器节点都会影响到后续传感器节点的放置。但 Max_Min_Cov 算法优先把传感器节点放在了所谓的盲点上,尽可能地改善性能最差的网格点,从局部性能出发,而忽略了整体性能,仅集中考虑改善性能最差的网格点。

本文在此基础上对算法进行改进和优化,按照优先考虑改善局部性能同时兼顾整体性能的思路,完成了一种高效配置算法的改进,算法的主要目的是使放置的传感器数目最少化。此外,文献[5]中的基本模型并没有考虑到实际应用中传感器检测范围的有限性等约束,本文针对此类问题,考虑传感器检测距离及视角范围对模型的影响,完成配置算法的另一种改进。两种算法在满足覆盖要求的情况下使得配置的传感器的数目最少化,达到节约资源的目的。一种改进算法思路是减少局部冗余、优化整体性能。另一种算法从传感器检测范围的有限性出发,修改算法的初始化模型。

本文介绍的两种新的配置算法是在文献[5]中的假设条件和模型基础上改进的,因此,有必要首先介绍此基本模型。

(1) 传感器网格点模型

网格点覆盖模型中,用二维的 $m \times n$ 网格点表示目标点,即是感知区域需要采集数据信息的点,也是传感器放置位置的参考点。通过配置算法将传感器节点放置在被监测环境区域中的恰当位置,它能够检测该区域中其他目标点的数据信息,数据的被检测程度与目标点距离传感器节点的距离有关。

定义 1(检测概率) 假定传感器检测目标的概率与目标和传感器之间距离呈指数变化,则目标点 i 被网格点 j 检测的概率为

$$p_{ij} = e^{-ad(i,j)} \quad (1)$$

式中,参数 a 是用来描述传感器的质量参数,同时也

描述了传感器的检测概率随距离减少的速率。 $d(i, j) = \sqrt{(i_x - i_y)^2 + (j_x - j_y)^2}$ 是网格点 i 与网格点 j 的欧几里得距离。 p_{ij} 具有对称性,即 $p_{ij} = p_{ji}$,如果 i, j 的视距直线上存在障碍物,那么设定 $p_{ij} = p_{ji} = 0$ 。

定义 2(配置算法的目标函数) 在被监测环境区域中,设置网格点 (x, y) 的满足因子 f_{xy} 给出:

$$F_{xy} = \begin{cases} 1, & \text{如果网格点}(x, y)\text{上放置传感器} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

则传感器网络节点配置算法的目标函数 $Z(x, y)$ 如式(2)所示:

$$Z(x, y) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n f_{xy} \quad (2)$$

式(2)中给出了配置算法的目标函数,又由于传感器配置问题是运用优化策略将传感器配置到网格点上,使得在满足每个网格点覆盖要求的前提下,配置的传感器数量最小。因此基本覆盖模型的最小化代价函数的数学描述为

$$\begin{aligned} \min Z(x, y) &= \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n f_{xy} \\ \text{s. t. } M_{ij} &= 1 - e^{-ad(i,j)} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \\ M_{ij} &\leq M_{\min} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \\ Z(x, y) &\leq N \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $d(i, j)$ 是欧式距离, N 是给定的传感器数目的最大值。

(2) 传感器网络障碍物模型

图 1 所示为传感器感知区域中存在障碍物的情形,给图中的网格节点标注序号,即从 1 到 16。这里假设网格点关于障碍物对称,它们使得 $p_{36}, p_{63}, p_{27}, p_{72}$ 还有其他的一些检测概率都被设为 0,这直接决定了任意两个网格节点是否受到了障碍物的影响。每个网格点对应着平面上的坐标对 (x, y) 。若障碍物的坐标满足节点 i, j 的直线方程,则概率 $p_{ij} = 0$ 。

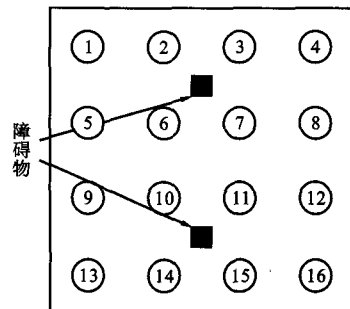


图 1 传感器网络障碍物模型

无论是带有障碍物的 Random 配置算法,还是

Max_Avg_Cov 和 Max_Min_Cov 配置算法, 本文的障碍物都是静态配置的, 且都是预先放置的, 这里假定障碍物的位置为 $obx = [x_1, y_1]$, $oby = [x_2, y_2]$, 且障碍物的半径为 r_0 . 由于引进了障碍物, 每次只需修改 M , 而对算法本身却不用有太大的修改. 且本文只需考虑以下几类情况进行修改 M 值:

① 网格点 i 与 j 重合的情况, 此时无论是否存在障碍物, $M(i, j) = 0$. 即 $i_x = j_x, i_y = j_y$, 时 $M_{ij} = 0$.

② 任意网格点 i 和 j , 若 i 与 j 在同一竖直线上, 障碍物到此竖直线的水平距离小于 r_0 ; 若 i 与 j 在同一水平线上时, 障碍物到此水平线的距离小于 r_0 . 假定网格点 i 和 j 所在位置的传感器节点不能被互相检测数据信息, 即 $M(i, j) = 1$. 可用数学表达式表示为如下两类情况:

$i_x = j_x, i_y \neq j_y$ 时, $d_1 = |x_1 - i_x|, d_2 = |x_2 - i_x|$, 如果 $d_1 < r_0$ 或者 $d_2 < r_0$, 则 $M_{ij} = 1$.

$i_x \neq j_x, i_y = j_y$ 时, $d_1 = |y_1 - i_y|, d_2 = |y_2 - i_y|$, 如果 $d_3 < r_0$ 或者 $d_4 < r_0$, 则 $M_{ij} = 1$.

③ 障碍物到网格点 i 与 j 所在的直线的距离小于障碍物半径时, 假定 i 与 j 此时不能被互相检测数据信息, 即 $M(i, j) = 1$. 用数学表达式表示如下:

网格点 i 与 j 所在直线的斜率为

$$k = (j_y - i_y) / (j_x - i_x) \quad (4)$$

则直线方程为

$$y - k \cdot x - i_y + k \cdot i_x = 0 \quad (5)$$

于是可以得到障碍物到直线的距离为 r_1 和 r_2 :

$$r_1 = |y_1 - k \cdot x_1 - i_y + k \cdot i_x| / \sqrt{1 + k^2}$$

$$r_2 = |y_2 - k \cdot x_2 - i_y + k \cdot i_x| / \sqrt{1 + k^2}$$

如果 $r_1 \leq r_0$ 或者 $r_2 \leq r_0$, 则 $M_{ij} = 1$.

由以上假设及推导公式, 障碍物模型的数学描述如下:

$$\min Z(x, y) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n f_{xy}$$

s. t. $M_{ij} =$

$$\begin{cases} 1 - e^{-ad(i, j)} & 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \\ 0 & i_x = j_x, i_y = j_y \\ 1 & r_1 \leq r_0 \text{ 或 } r_2 \leq r_0, d_k \leq r_0, k = 1, 2, 3, 4 \end{cases}$$

(6)

$M_{ij} \leq M_{\min}$ 其他

$Z(x, y) \leq N$

(3) 优先覆盖模型

图 2 所示为优先覆盖模型, 优先覆盖区域指的是此区域具有比非优先覆盖区域更高的覆盖要求. 因此, 为了提高优先覆盖区域的检测概率, 要赋予优

先覆盖区域中的每个网格点更高的目标点检测概率值, 标记为 P_{nl} , 从而未被检测覆盖度阈值 $M_{\min} = 1 - P_{nl}$.

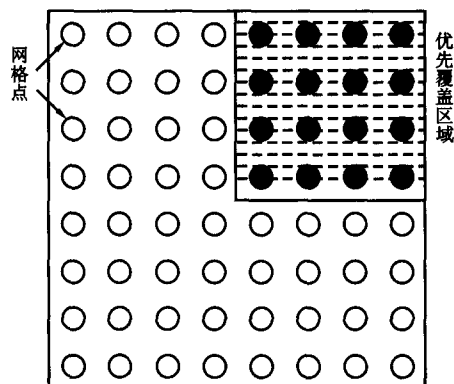


图 2 传感器网络优先覆盖模型

因此, 带有优先覆盖的配置算法只需修改算法的输入, 而不用太大改变基本算法.

假设优先覆盖区域四个顶点为 x_1, x_2, x_3, x_4 , 则优先覆盖模型可以描述如下:

$$\begin{aligned} \min Z(x, y) &= \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n f_{xy} \\ \text{s. t. } M_{ij} &= 1 - e^{-ad(i, j)} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \\ M_{ij} &\leq 1 - p_{nl} \quad x_2(1) \leq i_x, j_x \leq x_4(1), \\ &\quad x_1(2) \leq i_y, j_y \leq x_3(2) \\ M_{ij} &\leq M_{\min} \quad \text{其他} \\ Z(x, y) &\leq N \end{aligned} \quad (7)$$

定理 1 假设传感器感知方向是全向性的, 且不限其检测半径. 设某一网格点 p_1 和处于位置 p_2 的传感器之间的距离是 d , 相邻网格点之间的距离 d' , 如图 3 所示. 用数值 $d + d' / \sqrt{2}$ 来表示位于 p_2 的传感器节点对网格点 p_1 的覆盖, 而且可用的传感器数目足够多, 那么当配置算法终止时, 所有非网格点的未被检测的概率小于区域未被检测概率极限 $M_{\min}$, 即非网格点亦满足覆盖要求.

证明: 如图 3 中的传感器位置放置点 p_2 和 4 个网格点.

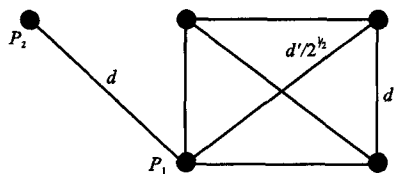


图 3 定理 1 的说明图

4 个网格点与正方形的中心的距离为 $d' / \sqrt{2}$, 而每个其他非网格点距离 4 个网格点中至少有一个的距离小于 $d' / \sqrt{2}$, 因此, 用传感器配置算法中的数值

$d+d'/\sqrt{2}$ 来确定覆盖,可保证所有非网格点的未被检测的概率也小于极限 $M_{\min}$.

由此可见,非网格点的覆盖情况依赖于距离它最近的网格点,即如果网格点区域中的某一点的数据信息能够被传感器节点检测到信息,那么依赖于该网格点的任意非网格点区域的数据信息也能被传感器检测.

2 改进的高效配置算法

2.1 算法描述

在网格点覆盖模型及以上假设条件下,首先进行模型初始化,并给出配置算法最优化的等价条件,从而完成算法改进工作.

首先进行初始化工作,知道了传感器节点检测概率 p_{ij} ,不难推出未被检测概率 $m_{ij} = 1 - p_{ij}$,未被检测概率矩阵 $M = [m_{ij}]N \times N$. 以上未被检测概率矩阵和区域未被检测概率矢量均具备可计算性.

在配置算法的开始, M 被初始化为全1矢量,即在未放置传感器时所有节点都不能被发现.此外,还须给出节点未被检测概率极限 $M_{\min}$,即感知区域满足的覆盖要求.

为了完成网格点覆盖模型传感器节点配置算法的改进工作,以下给出网格点覆盖模型配置算法最优化的等价条件:被监测环境区域用网格点模型描述,满足覆盖极限所需传感器数目最少化与如下公式最小化等价^[6].

$$Z = \sum_{i=1}^N \max[M_i^* * M(j, i), M_{\min}(i)] \quad (8)$$

设第 i 个网格点的有效覆盖为 M_i^* 有效,则整个传感器网络的有效覆盖如下:

$$M_{\text{有效}} = \sum_{i=1}^N \max[M_i^*, M_{\min}(i)]$$

当迭代算法终止时:

$$M_{\text{有效}} = \sum_{i=1}^N M_{\min}(i)$$

这里将每步迭代得到的 $M_{\text{有效}}$ 看成一个序列 $M_{\text{有效}}(n)$,那么迭代使 $M_{\text{有效}}(n)$ 下降最快时配置算法收敛最快,所需传感器数目就最少.

又 $M_{\text{有效}}(n+1)$ 是传感器 j 对 $M_{\text{有效}}(n)$ 的影响,因此

$$M_{\text{有效}}(n+1) = \sum_{i=1}^N \max[M_i^* * M(j, i), M_{\min}(i)]$$

由此可见,在满足覆盖极限的情况下,所需传感器数目最少化与式(8)最小化等价.

基于以上论述,本文完成了一种高效配置算法的改进工作.其思路是把传感器放在能够使网络整体有效覆盖性能改变最大的点上,减少局部冗余,优化整体性能.

完成初始化工作后,调用改进的高效传感器节点配置算法.算法的原理是通过不断的迭代,修正,不断按照某种规则放置传感器节点,当网格点域中所有网格点被检测信息的程度都满足给定的最低覆盖要求时,或者放置的传感器的数量已经达到了一个预先设置的数目,结束传感器节点配置过程,配置算法终止.每次迭代运算中,找寻使整体有效覆盖性能改变最大的网格点.

2.2 算法仿真与分析

用 Matlab 完成的算法的仿真工作,在以上模型和假设条件下调用改进的配置算法 globaloptimizecov 和文献[5]中的两个算法 maxavgcov 和 maxmincov,分别在障碍物模型和优先覆盖模型的情况下比较它们的性能.

试验 1: 网格节点域 8×8 , $a=0.5$, 两个障碍物 $(2.5, 3.5)$, $(5.5, 5.5)$, 不考虑优先覆盖的情况. 如图 4 所示.

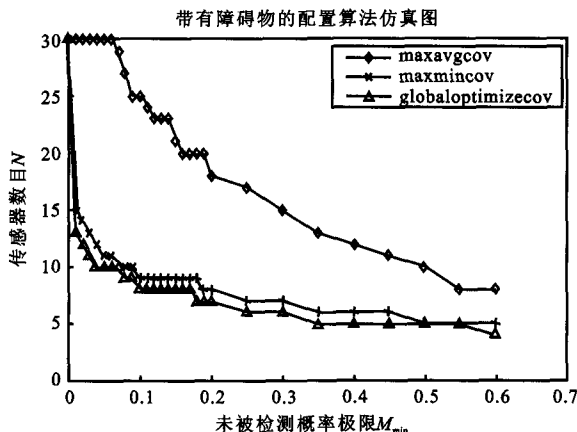


图 4 8×8 障碍物模型仿真结果

试验 2: 网格节点域 16×16 , $a=0.5$, 考虑优先覆盖, 优先覆盖区域是在 $x_1 = (5.5, 5.5)$, $x_2 = (5.5, 2.5)$, $x_3 = (7, 2.5)$, $x_4 = (7, 5.5)$ 此处没有考虑障碍物的情况. 如图 5 所示.

2.3 改进的配置算法性能分析

仿真结果表明改进算法的性能改善了 Max_Avg_Cov 和 Max_Min_Cov 的算法性能. 它比 Max_Avg_Cov 算法节约近六成的传感器节点, 比 Max_Min_Cov 节约近一成的传感器节点, 所需放置的传感器数目减少, 达到了节约资源的目的.

值得指出的是: 本文完成的改进配置算法性能

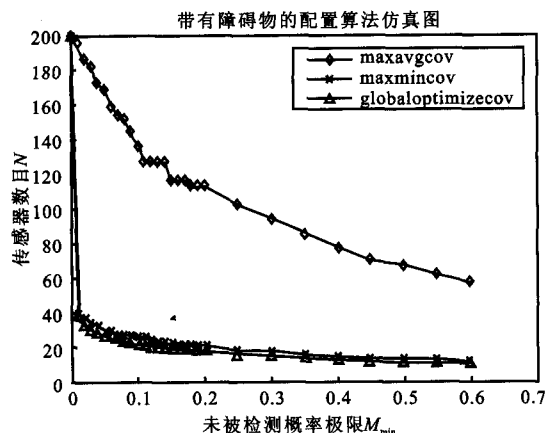


图5 16×16 优先覆盖模型仿真结果比较

得到改善,却有着较高的算法复杂度.考虑初始化时,Max_avg_cov 和 Max_min_cov 算法复杂度为 $O(KN^2)$ (K 为障碍物个数).而改进的配置算法的算法复杂度是 $O(N^3 + KN^2)$.虽然如此,随 k 的增大,改进配置算法与原配置算法复杂度近似.

3 另一种改进配置算法

3.1 模型改进

网格点覆盖模型传感器节点配置算法并没有考虑到实际应用中传感器检测范围的有限性,因此可以对网格点覆盖模型传感器配置算法进行新的改进,考虑传感器的检测范围的有限性,如视角有限性、距离有限性等,使得改进的算法模型能够更好地适用于实际.

在建立新的传感器网络网格点覆盖模型时,可以考虑将传感器的检测区域分段,如图6所示.①定义完全影响半径 d_1 ,在距离传感器节点 d_1 内的目标点可以完全被检测,即被检测到的概率为1.②定义完全无影响半径 d_2 ,距离传感器节点超过 d_2 的目标点不能够被检测,即被检测到的概率为0.其中 d_1 , d_2 可以是已知的,也可以通过文献[7]中的方法求得.

于是目标点检测概率 p_{ij} 修改为:当目标点 i 在位于位置 j 的传感器节点的视角范围外时, $p_{ij} = 0$.当 i 位于 j 的视角范围内时:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq d_1 \\ e^{-\alpha(d_{ij}-d_1)}, & d_1 < d_{ij} \leq d_2 \\ 0, & d_{ij} > d_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, d_{ij} 为传感器和目标点的欧式距离.当 d_1 为零, d_2 无穷大,且传感器检测方向全向性时,即视角范围为 2π 时,改进传感器模型即为网格点基本模型.可见改进模型是基本模型的扩展,包含了基本模型.

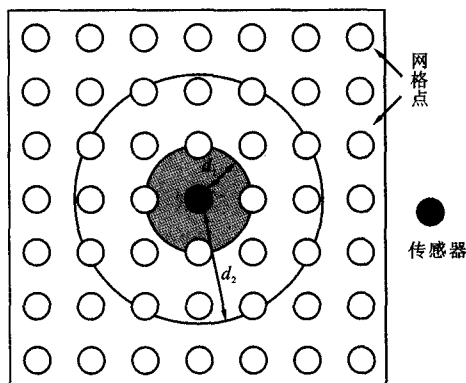


图6 传感器的影响区域

由以上分析可知,此改进模型的数学描述如式(10)所示,其中 p_{ij} 由式(9)给出.

$$\begin{aligned} \min Z(x, y) &= \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n f_{xy} \\ M_{ij} &= 1 - p_{ij} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \\ \text{s. t. } M_{ij} &\leq M_{\min} \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n \\ Z(x, y) &\leq N \end{aligned} \quad (10)$$

因为引入了新元素——视角范围的有限性,放在传感器放置的过程中,传感器的放置位置与角度都要确定,在得到未被检测概率矩阵 M 的数值过程中确定传感器放置角度.

(1) 设视角范围是 $(-\pi, \pi]$, 其初始角度是在此区间内进行均匀的抽样,抽样间隔的大小由设定的精度确定.

(2) 对每一个抽样值都计算未被检测概率矩阵 M 的第 i 行,找出这样的抽样值作为真正的初始角度,它使得第 i 行的元素的总和最小.

在网格点覆盖基本模型下,定理1证明了网格点域中的非网格点也能被传感器检测数据信息,它的覆盖情况依赖于距离其最近的网格点.在本节中由于新的网格点覆盖模型引入了视角范围的有限性,当网格点 i 能被该区域内的传感器 j 检测时,不会出现这样一种情况,依赖于此网格点 i 的某些非网格点不在该传感器 j 的视角范围内,导致这些非网格点不能达到覆盖要求.下面给出定理1的延伸定理2,依据定理2计算 p_{ij} 使得在新的网格点覆盖模型情况下能够确保非网格点也能达到覆盖要求.

定理2 设传感器的放置位置 i 和一个网格点 j 之间的距离是 d , 网格点之间的单位距离是 d' . 当传感器 i 的视角范围包含网格点 j 周围的4个网格的中心点时,用 $d + d'/\sqrt{2}$ 的值来计算位于点 i 的传感

器对网格点 j 的覆盖. 否则, 位于网格点 j 的目标点被位于网格点 i 的传感器检测到的概率设为 0. 于是得到结论: 在传感器的数目足够的条件下, 配置算法终止时, 能够确保区域内的非网格点的未被检测概率小于给定的概率极限 $M_{\min}$ [8]. 如图 7 所示.

证明: 图 7 所示为部分网格点域, 中心实心点 (实线交叉点) 是网格点 j . 4 个网格的中心是 j 点周围的空心点 (图中虚线交叉点), 也是确定 j 点的有效性时所依赖的点. 依定理 1, 由图中 4 个空心点为顶点的正方形域内的所有非网格点的检测情况都依赖于网格点 j . 图 7 中给出了传感器节点 i 和 i' 的 2 种视角范围, 分别用实线和虚线表示. 显然只有当网格点 j 附近的 4 个网格的中心 (4 个空心点) 都在 i 的视角范围内时, 如图 7 中传感器 i 所示的视角范围, j 才相对于 i 有效. 所以只要以此结论来判断网格点的有效性, 在增加新的元素视角范围后, 依然能够使非网格点的达到覆盖要求.

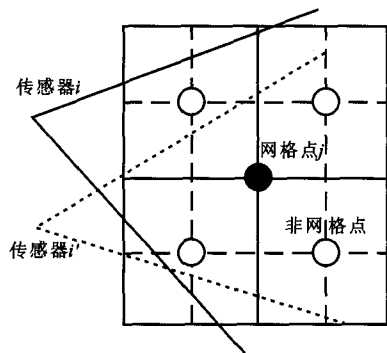


图 7 定理 2 的说明图解

3.2 改进算法仿真

算法的实现及仿真工作是用 Matlab 完成的, 在本节建立的模型和假设条件下修改配置算法, 然后分别调用此改进的配置算法和文献 [5] 中的两个算法 Max_Avg_Cov 和 Max_Min_Cov, 针对障碍物模型和优先覆盖模型的各种情况比较三者的性能.

试验: 网格节点域 8×8 , $a = 0.5$, 考虑优先覆盖, 优先覆盖区域是在 $x_1 = (5.5, 5.5)$, $x_2 = (5.5, 2.5)$, $x_3 = (7, 2.5)$, $x_4 = (7, 5.5)$, 同时考虑障碍物, 其位置是 $(2.5, 3.5)$, $(5.5, 5.5)$. 如图 8 所示.

3.3 改进算法性能分析

本节在文献 [5] 中提出的网格点覆盖模型的基础上, 针对传感器检测范围的有限性, 利用影响半径和视角范围等进行模型改进, 完成了两种高效传感器节点配置算法的改进工作, 使得研究在实际应用中更有可取性.

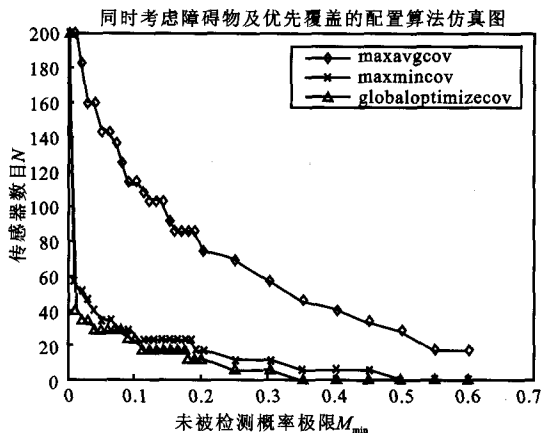


图 8 带有障碍物及优先覆盖的仿真图

结果表明改进算法较 Max_avg_cov 算法减少近六成的传感器节点, 比 Max_min_cov 算法减少近一成传感器节点. 显现了改进算法的优越性与新模型的可行性.

4 结束语

传感器的配置与最佳配置研究, 很多工作需要进一步深入, 未来研究工作建议朝以下几个方向努力: (传感器和障碍物的移动性; (在三维空间中布置传感网络; (将传感器节点配置算法应用于实际. 这些将成为未来工作中具有挑战性的研究内容.

参考文献:

- [1] 唐宏, 谢静, 鲁玉芳, 等. 无线传感器网络原理及应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 9-10.
- [2] Chakrabarty K, Iyengar S S, Qi H, et al. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2002 (51): 1448-1453.
- [3] Clouqueur T, Phipatanasuphorn V, Ramanathan P, et al. Sensor deployment strategy for target detection [C]// WSN. USA: Atlanta, 2002.
- [4] Seapahn Megerian, Farinaz Koushanfar, Miodrag Potkonjak, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(1): 84-92.
- [5] Santpal Singh Dhillion, Krishnendu Chakrabarty. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks[J]. Wireless Communications and Networking, 2003, 3(3): 1609-1614.
- [6] 蔺智挺, 屈玉贵, 翟羽佳, 等. 一种高效覆盖的节点放置算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2005, 35(3): 412-413.

(下转第 45 页)

4.2 误差分析

从图 7(a)可以看出,一维解析解能够很好的拟合二维仿真中激增电流部分,但是在 2.2 节提到的 t_1 部分拟合存在差异,这可能是由于饱和电压的不同造成的.如式(3)所述,三极管饱和电压亦由集电极电阻和发射区电阻决定,这可能是由于提取的电阻值过小.而“尾部”的电流拟合存在差异,这是由于(1)在子电路模型中引入了 R_{leak} , (2)基区传输时间是经验公式,没有考虑大电流系数引入误差,但是这些误差正好和前面饱和区电流误差相抵消,最终输出节点收集电荷误差为 0.75%.

而 LET 阈值的误差为 10.46%,这是由于在 3、4 两节中,无论是提参还是一维模型的建立,都仅考虑了大电流情况,而在粒子能量小时,电子空穴对的浓度就不大于基区平均掺杂浓度,引入较大误差.本文将进一步工作证实此 SPICE 模型对于预测 SEU 实验结果的实用性.

对于同一台主频为 2 GHz, 1.93 GB 内存双核电脑,二维混合仿真需要 21 个小时,而 SPICE 只需要 15 s.本文工作在可接受的误差范围中,用精度换来了工程速度极大地提升.

5 结束语

本文通过介绍单粒子翻转过程中电荷淀积过程以及电荷收集过程,主要对 PDSOI MOSFET 二维器件的单粒子效应模拟,讨论了二维混合仿真 TCAD Dessis 中采用的物理模型及其意义,对单粒子翻转的物理过程进行阐述.

根据二维混合仿真的电子分布建立数学模型,得出激增电流部分的解析解,搭建子电路模型,并对 PDSOI MOSFET 进行寄生三极管的参数提取.利用电流源描述漏端激增电流部分,引入 R_{leak} 和 R_b 分

别描述过量空穴通过源区和体电阻放电的过程,引入三极管描述电流“尾部”放电过程.

本文提出 SPICE 模型全部基于物理机制,而非非曲线拟合.从结果来看,SPICE 模型与二维混合仿真模型有很好的切合度,可用于电路级预测单粒子翻转效应,为抗单粒子集成电路设计提供仿真平台.

参考文献:

- [1] 王佩,李磊.一种基于 Weibull 函数的单粒子注入脉冲模型[J].微电子学与计算机,2010,27(9):61-64.
- [2] Dodd P E. Basic mechanisms for single-event effects [C]// IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course. Norfolk, Virginia, 1999: II-2.
- [3] Fulkerson D E, Liu H. A charge-control SPICE engineering model for the parasitic bipolar transistor action in SOI CMOS SEU[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, 51(1):275.
- [4] Kobayashi D, Aimi M, Saito H, et al. Time-domain component analysis of heavy-ion-induced transient currents in fully-depleted SOI MOSFETs[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2006, 53(6):3372.
- [5] Rainvill E D. Elementary differential equations[M]. 3rd ed. New York: the Macmillan Company, 1964:415.
- [6] 李玉红,赵元富,岳素阁,等.基于 DICE 结构的抗辐射 SRAM 设计[J].微电子学与计算机,2007,24(12):107-110.

作者简介:

范紫菡 女,(1986-),硕士研究生.研究方向为硅器件与集成技术.

毕津顺 男,(1979-),博士.研究方向为硅器件与集成技术.

罗家俊 男,(1973-),博士.研究方向为硅器件与集成技术.

(上接第 39 页)

- [7] Adlakha S, Srivastava M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks[J]. Wireless Communications and Networking, IEEE, 2003:16-20/1615-1620.
- [8] 屈玉贵,翟羽佳,蔺智挺,等.一种新的无线传感器网络传

感器放置模型[J].北京邮电大学学报,2004,27(6):3-4.

作者简介:

姚盼盼 女,(1983-),硕士.研究方向为无线传感器网络与物联网应用技术.