

文章编号: 1001-0920(2010)11-1625-05

## 确定性空间的无线传感器网络节点部署策略研究

张云洲<sup>1,2</sup>, 吴成东<sup>1</sup>, 程 龙<sup>1</sup>, 纪 鹏<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016)

**摘要:** 针对含障碍物的确定性区域内无线传感器网络部署问题进行研究. 首先建立节点探测模型和网络部署质量评价方式; 然后基于含误警率的概率模型提出一种新的部署方法, 即采用分水岭算法选取候选部署区域, 以Delaunay剖分算法产生新增节点的候选部署位置, 从而实现传感器节点的有序高效部署. 仿真结果表明, 与随机部署、最大平均覆盖(MAX\_MIN\_COV)和最大最小覆盖(MAX\_AVG\_COV)等算法相比, 所提出的策略能取得更好的覆盖探测概率和覆盖一致性.

**关键词:** 确定性空间; 无线传感器网络; 概率探测; 误警率; 节点部署

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Research of node deployment strategy for wireless sensor network in deterministic space

ZHANG Yun-zhou<sup>1,2</sup>, WU Cheng-dong<sup>1</sup>, CHENG Long<sup>1</sup>, JI Peng<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016, China. Correspondent: ZHANG Yun-zhou, E-mail: zhangyunzhou@gmail.com)

**Abstract:** The deployment of wireless sensor network in deterministic space with obstacles is researched. Sensor's detection models and coverage quality evaluation are set up. Based on the probabilistic detection model with false alarm rate, a new deployment method is proposed. Watershed algorithm is employed to choose the deploying sub-area. Then Delaunay triangulation is used to generate the candidate positions for new nodes. Thus, the placement of WSN nodes is realized orderly and efficiently. According to the simulation result, the proposed method can attain better detection probability and coverage uniformity compared with different methods such as random deployment, MAX\_MIN\_COV and MAX\_AVG\_COV.

**Key words:** Deterministic space; Wireless sensor networks; Probabilistic detection; False alarm rate; Node deployment

### 1 引言

无线传感器网络(WSN)能够有效覆盖被监测区域的关键在于可靠探测和充分覆盖<sup>[1]</sup>. 按照节点分布的方式, WSN 通常分为随机部署和确定性部署. 后者的特点是环境已知、网络相对固定, 预先配置节点位置, 并根据目标区域的具体情况确定网络拓扑、传感器节点密度和预定探测概率条件下的节点数量.

确定性网络部署的普遍做法是先划分网络格点, 再进行传感器节点部署. 经典算法是Dhillon等<sup>[2,3]</sup>提出的最大平均覆盖(MAX\_AVG\_COV)和最大最小覆盖算法(MAX\_MIN\_COV), 即根据当前的节点布置情况, 运用优化策略将传感器分派到网格上, 满足每个

网格点的覆盖要求, 并使传感器数量最小. 这两种算法优于随机部署和均匀部署算法, 但没有考虑传感器感知范围的局限性以及传感器和障碍物的多样性等因素. 屈玉贵等<sup>[4]</sup>提出一种整体局部覆盖算法, 研究了节点探测距离和视角范围对传感器模型的影响, 采用概率感知模型, 能够减少所需的传感器数量. Sanjay Shkakottai等<sup>[5]</sup>提出并研究了基于方形网格的部署方法, 其策略较为简便易用, 但无法避免覆盖盲区. 汪学清<sup>[6]</sup>针对确定性的区域提出了菱形网格节点部署方案, 能保证传感器区域完全无缝覆盖, 其效率优于方形网格. 但文献[5,6]的算法均未考虑存在障碍物的情况. Zou等<sup>[7]</sup>基于概率探测模型, 提出一种Min-

收稿日期: 2010-02-08; 修回日期: 2010-04-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874103); 机器人学国家重点实验室开放课题(RLO200913); 中央高校基本科研专项资金项目(N090304002).

作者简介: 张云洲(1974-), 男, 河南滎池人, 讲师, 博士, 从事无线传感器网络、建筑智能化等研究; 吴成东(1960-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 从事传感器网络、建筑智能化等研究.

Miss 迭代部署策略, 通过定义 Over-Miss 概率向量对覆盖增益进行了评价, 然后将新节点部署到使增益最小的位置上. Aitsaadi 等<sup>[8]</sup>基于图像处理 and 3D 建模的网格表述, 提出了一种差分部署算法, 取网格作为基本要素来逼近曲面, 采用非结构化的三角网格来表征目标区域; 在网格分割过程中, 每次网格细分对应于部署一个新节点.

目前, 无线传感器网络的研究中主要使用 0/1 感知模型和概率感知模型<sup>[9]</sup>. 由于误警率是 WSN 监测系统需要考察的重要指标, 本文采用更贴近实际情况的基于误警率的感知模型, 以实现传感器节点的有序高效部署.

## 2 WSN 节点感知模型与覆盖评价指标

### 2.1 基于误警率的感知模型

假定传感器网络的工作环境具有高斯白噪声, 信号以固定的传播因子衰减; 所有节点均具有相同的性能, 在距离  $r$  米时各节点所接收到的信号强度一致; 所有参与目标探测的节点均具有相同的能量  $e_{tr}$ . 信号传播损耗与  $1/r^\gamma$  成比例关系, 其中  $\gamma$  为传播损耗因子, 取决于环境因素. 在室内自由传播时,  $\gamma$  通常取为 2 或 4. 对于节点  $i$ , 从目标所接收的能量为

$$y_i = \begin{cases} \frac{\beta}{R_{ti}^{\gamma/2}}, & H_1; \\ n_i, & H_0. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $H_1$  和  $H_0$  分别表示目标在位和目标缺失的情形;  $n_i$  是零均值、方差为  $\sigma^2$  的高斯噪声;  $R_{ti}$  为目标  $(x_t, y_t)$  与传感器  $(x_i, y_i)$  间的距离;  $\beta$  定义为

$$\beta = \sqrt{\frac{e_{tr}}{2^\gamma}}. \quad (2)$$

在时间  $t$  内, 目标在  $H_1$  状态下穿越的行程  $d = 2R_{ti}$ . 对于传感器  $i$ ,  $H_1$  和  $H_0$  状态下的探测概率分别为

$$Pr(y_i | H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left(y_i - \frac{\beta}{R_{ti}^{\gamma/2}}\right)^2\right\}, \quad (3)$$

$$Pr(y_i | H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{y_i^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (4)$$

根据 Neyman-Pearson 准则, 假定可接受的误警率为  $P_F = \alpha$ , 则有

$$P_D = 1 - \Phi\left(\Phi^{-1}(1 - \alpha) - \frac{\beta}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{R_{ti}^\gamma}}\right). \quad (5)$$

其中:  $P_D$  为可接受误警率  $\alpha$  水平下的目标探测概率,  $\Phi(\cdot)$  为标准高斯累积分布函数. 式 (5) 即为支持误报率的 Neyman-Pearson 概率探测模型. 实际上, 通过适当的参数调整, 指数模型即可包容 Neyman-Pearson 模型.

### 2.2 联合探测概率

多个 WSN 节点同时工作时, 一个目标被有效探测的概率是多个 WSN 节点协同工作的结果. 设  $m(i, j)$  为目标探测的丢失概率, 当且仅当  $m_e(j) < m_{th}(j)$  时 ( $m_{th}(j)$  为目标点  $j$  处的丢失概率阈值), 目标点  $j$  可以被有效探测. 点  $P_j$  被整个网络感知到的概率  $C(P_j)$  可定义为

$$C(P_j) = 1 - m_e(j) = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - p(i, j)). \quad (6)$$

式中:  $K$  为覆盖点  $j$  周围的传感器节点个数,  $p(i, j)$  为传感器节点  $S_i$  对点  $j$  的探测概率. 根据式 (6), 可以计算区域  $R$  中任一点的探测概率分布. 显然, 若能部署足够的节点, 则有可能使探测区域内的任一点探测概率均大于所设定的阈值. 但考虑到节点成本, 实际节点数不可能无限制地增加, 这也是评价部署算法的重要因素之一.

### 2.3 网络部署的评价指标

在 WSN 的确定性部署中, 需要建立合理的评价指标, 以根据当前部署的效果确定节点的后续部署位置. 本文采用覆盖场强一致性和覆盖率<sup>[10]</sup>作为部署质量的评价指标. 目标区域  $F$  中的任一点  $q$  的传感器覆盖场强  $I(F)$  定义为, 区域内所有传感器在  $q$  处的有效探测度量之和. 假定区域被划分为  $N$  个格点, 所要求的联合探测概率为  $P_{req}$ . 显然, 最佳结果是所有格点上的探测概率均等于  $P_{req}$ , 因此可将整个区域的覆盖场强一致性定义为

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |p_i - P_{req}| \times F_{acum}}{N \times P_{req}}. \quad (7)$$

式中  $F_{acum}$  为逻辑变量, 若网格点满足探测概率要求, 则  $F_{acum}$  取值为 1; 否则为 0. 由于传感器部署中存在节点探测区域重叠的情况, 其覆盖区域并集的几何形状很不规则, 并集概念的实用性较差. 本文将探测区域均匀采样, 抽取若干有效网格点的探测概率作为覆盖率的评价因素. 定义网络有效覆盖探测率为

$$p = \frac{\sum_{k=1}^N \text{GridNum}(k)}{N}, \quad (8)$$

式中  $\text{GridNum}(k)$  表征第  $k$  个网格点满足探测概率要求的程度. 若满足要求, 则为 1; 否则为 0.

### 3 基于几何剖分的确定性部署策略

本文采用分水岭算法 (WTS) 进行部署区域选择, 再通过 Delaunay 三角剖分在目标区域中形成部署候选位置. 这种算法称为分水岭-Delaunay 算法 (WTS-Delaunay).

### 3.1 Delaunay 三角剖分

对于特定的平面多边形轮廓三角剖分问题, 引入 Delaunay 三角剖分可以保证剖分质量<sup>[11]</sup>.

Delaunay 三角剖分能满足“最小内角之和为最大”准则, 确保所生成的三角形尽量均匀, 从而避免了狭长三角形的出现. Delaunay 三角形具有如下特性: 1) 空圆特性: Delaunay 三角网是唯一的(任意 4 点不能共圆), 其中任意三角形的外接圆内不会有其他点存在; 2) 最大化最小角特性: 在散点集可能形成的三角剖分中, Delaunay 剖分所形成的三角形的最小角最大, 即在两个相邻的三角形构成凸四边形的对角线相互交换之后, 6 个内角的最小角不再增大. 这些特性能够有效改善剖分的均匀性.

### 3.2 确定性区域边沿的覆盖处理

为实现完全覆盖, 边沿和障碍物都需要认真考虑. 文献[12]证明: 当传感器具有一致的探测半径时,  $\sqrt{3}r_s$  等边三角形覆盖冗余最小. 为消除接近边沿和障碍物的覆盖缝隙, 本文采用文献[13]提出的 WSN 节点部署等高线的概念, 按照最小覆盖冗余的要求, 将沿探测区域边沿的传感器节点部署位置间距取为  $\sqrt{3}r_s$ , 则距离探测区域边沿的垂直距离  $h$  的计算公式为

$$h = \sqrt{r_s^2 - (\sqrt{3}r_s/2)^2} = \frac{1}{2}r_s, \quad (9)$$

式中  $r_s$  为传感器的探测半径. 由于采用传感器概率感知模型, 式(9)中的  $r_s$  不是确定数值, 而是随着系统的覆盖探测要求而发生改变. 经分析可知, 联合探测概率的低谷位于两个节点位置连线的垂直平分线上,  $r_s$  的取值应满足所要求的最低探测概率  $P_{\min}$ , 即

$$P_D = 1 - \left[ \Phi \left( \Phi^{-1}(1 - \alpha) - \frac{\beta}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{R_{ti}^2}} \right) \right]^2 \geq P_{\min}. \quad (10)$$

确定传感器探测半径之后, 可沿着探测区域的边沿生成一系列等高线点. 如果等高线点在障碍物之外, 则将其位置加入待部署区域集合. 然后, 沿着障碍物的边沿, 按照距边沿直线距离为  $h$  布置等高线点. 于是, 探测区域和障碍物边沿的传感器节点位置, 便

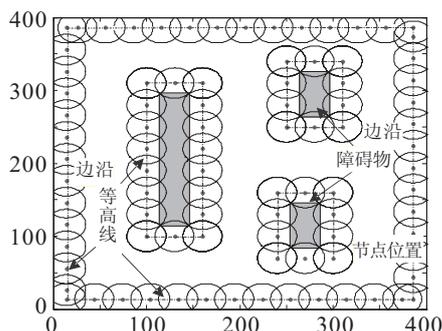


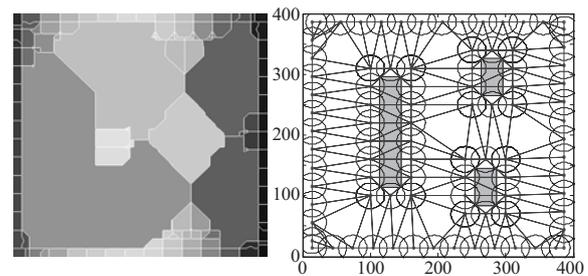
图 1 沿目标区域边沿的节点部署

组成了初始部署的节点位置集合. 图 1 给出了探测区域、障碍物和等高线位置的关系示意, 以及区域边沿部署的节点位置分布情形, 其中传感器节点覆盖圆的等效探测半径由式(10)计算获得.

### 3.3 节点部署位置生成与选择

本文对当前部署的区域生成联合探测概率图形, 采用分水岭算法将探测概率较低的区域分割为集水盆, 并选取其中面积最大者作为部署热点区域. 由于节点的探测概率呈近似指数形式, 各个位置的探测概率是连续的, 将形成连续图像. 考虑二维图像, 则区域网格点的探测概率可映射为像素的灰度, 因此可运用图像算法进行处理. 将分水岭算法用于确定等高线. 所形成的峡谷就是低探测概率的点. 探测概率最高的格点位于已部署传感器节点的临近区域.

在初始部署的基础上, 依据联合探测概率能够形成对应的分水岭, 其所包围形成的区域即为集水盆, 而面积最大的集水盆所对应的正是传感器节点分布最为稀疏的区域. 初始部署节点后所形成的分水岭如图 2(a) 所示. 在此基础上, 采用文献[14]所提出的 Delaunay 三角算法在集水盆中生成节点部署候选位置. 图 2(b) 显示了对初始部署节点集合进行 Delaunay 三角剖分的结果.



(a) 初始部署形成的分水岭 (b) 初始部署的 Delaunay 剖分

图 2 初始部署点的 Delaunay 三角剖分

由于 Delaunay 剖分的空圆特性, 使所生成的 Delaunay 三角形外接圆中, 有部分圆不包含已有的节点. 这些圆心将是新增节点的候选部署位置. 除了落在障碍物内的位置, 这些圆心将按照外接圆半径的大小降序排列, 并加入候选位置列表.

文献[13]提出了一种简单的候选位置评价机制, 主要考虑 Delaunay 三角形外接圆半径的大小以决定候选位置的优先次序. 本文给出一种净增覆盖的方式, 即对候选位置进行评价时, 考虑可用覆盖面积、相邻节点的覆盖区域重叠面积、与探测区域边沿和障碍物所形成的重叠区域面积等因素, 按照所计算出的净增覆盖确定候选位置的优先级. 具体的算法步骤如下:

- 1) 生成探测区域和障碍物多边形的转折点向量

表, 连接线段构成区域封闭图形.

2) 按照给定的探测概率计算传感器节点的感知半径.

3) 沿着探测区域和障碍物边沿生成节点初始部署点集.

4) 从已部署的节点集构造 Delaunay 三角形的顶点集  $V_{DT}$ .

5) 运用分水岭算法, 分割当前的联合探测概率图形, 寻找最大的集水盆  $W_{max}$ .

6) 对集水盆  $W_{max}$  中的 Delaunay 三角形求取外接圆, 并按圆半径的大小对  $V_{DT}$  排序得到  $V_{Candidate}$ .

7) 对  $V_{Candidate}$  中的所有点  $P_i$  进行计算净增覆盖值.

8) 在具有最大净增覆盖值的候选位置上部署节点, 并修改已部署的节点集.

9) 若节点数已达到限值, 或覆盖率满足要求, 则停止; 否则, 返回步骤 4) 继续执行.

## 4 仿真实验

### 4.1 传感器节点部署仿真

为评估算法性能, 在边长分别为  $400 \times 400$  单位的平面区域内进行传感器节点部署实验. 目标区域和障碍物如前文图 1 所示, 设定障碍物内的探测概率为 100%. 有少数候选位置会落在障碍物中, 可通过软件判断加以屏蔽. 采用支持误警率的概率模型, 传感器节点在式 (4) 中的参数分别为: 误报率  $\alpha = 2\%$ , 参数  $\beta = 20, \sigma = 1, \gamma = 2$ , 并设最低探测概率为 95%. 假设所有位置具有同等重要性. 图 3 为部署 170 个节点时的联合探测概率分布图, 大部分区域的联合探测概率接近 100%, 仅有少数区域接近 95%.

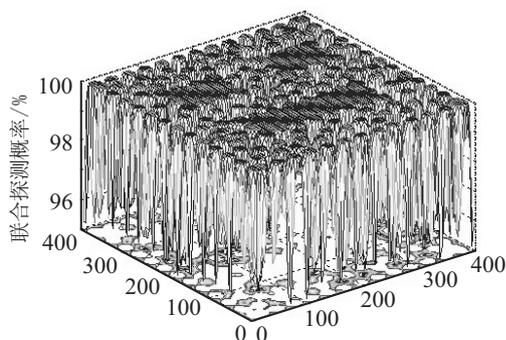


图 3 部署 170 个节点的联合探测概率分布

图 3 中, 为评价覆盖率所产生的格点间距为部署区域边长的 1% (4 个单位), 使待检测的网络格点足够密集. 可以看出, 联合探测概率较低的区域主要分布于障碍物周围和距离节点位置较远的区域. 沿区域边沿分布的凹陷, 是初始部署后相邻节点间重叠覆盖最薄弱的区域.

### 4.2 性能数据评估与分析

本文将所提出的 WTS-Delaunay 部署策略与随机部署, MAX\_MIN\_COV 和 MAX\_AVG\_COV 等算法进行比较. 对比内容包括: 1) 节点数量与覆盖率, 同样覆盖率下使用节点数目越少越好; 2) 覆盖场强的一致性, 整个区域的探测概率应尽可能均匀分布. 对于 MAX\_MIN\_COV 算法, 分别设置格点间距为 10 个单位和 20 个单位, 记为 MaxMinCov10 和 MaxMinCov20. 相应地, 10 个单位和 20 个单位间距的 MAX\_AVG\_COV 算法记为 MaxAvgCov10 和 MaxAvgCov20. 随机部署时, 对于边沿和障碍物的处理采用与 Delaunay 部署相同的方法, 由程序对障碍物和边沿区域进行检测, 有效区域的部署位置则随机产生. 所设定的部署区域和传感器参数与 4.1 节的设置相同. 对于部署效果的评价, 分别采用式 (7) 和式 (8) 计算所定义的覆盖场强和覆盖率.

图 4 给出了覆盖率随节点数变化的各种算法效果对比. 可见, 与 MAX\_MIN\_COV 和 MAX\_AVG\_COV 等算法相比, 本文的 WTS-Delaunay 算法能以较少的节点实现指定区域的完全覆盖; 但在节点数较少时覆盖率低于 MAX\_MIN\_COV 算法, 原因是 WTS-Delaunay 算法在初始部署时首先考虑边沿和障碍物周围覆盖, 所部署的节点对覆盖率的贡献被忽略了. 通过曲线变化可以看出, MAX\_MIN\_COV 算法容易受到格点密度的影响; MaxMinCov20 由于所造成的重叠区域较少, 能够很快达到饱和, 但始终无法实现 100% 覆盖; MAX\_AVG\_COV 算法的覆盖率随节点数的变化较为缓慢; 而随机部署策略的性能则明显不如其他算法.

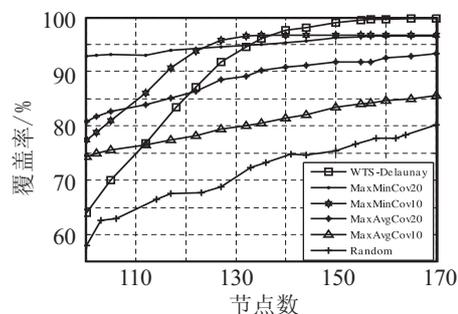


图 4 覆盖率随节点个数增加的变化

根据图 4 中曲线变化可以看出, WTS-Delaunay 算法的特点是: 随着节点的增加, 探测区域内覆盖率逐渐增加, 但在 135 个节点之后, 覆盖率增大的趋势明显变缓, 表明新添加的节点与已部署节点的探测区域开始发生重叠.

图 5 给出了采用各种算法时覆盖场强一致性随节点数变化的曲线. 其中, MaxMinCov20 和本文的 WTS-Delaunay 算法所形成的覆盖场强一致性较好.

随着节点逐渐增多, WTS-Delaunay 算法的覆盖一致性逐渐逼近 100%, 但 MaxMinCov20 却趋于饱和, 最终稳定在 98.5% 附近.

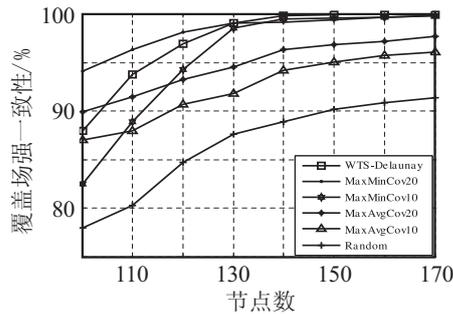


图 5 覆盖场强一致性随节点数的变化

## 5 结 论

考虑到 WSN 传感器节点不可避免的误报警和故障情况, 本文建立了基于误警率的传感器探测模型和合理的网络部署质量评价指标. 由于节点探测模型所形成的探测覆盖曲线是连续的, 能以图形化的方式表达, 本文先采用分水岭算法选择部署子区域, 以有效缩减运算和判断选择的时间; 再采用 Delaunay 三角剖分的方法产生节点部署的候选位置, 从而实现了合理的传感器节点有序高效添加. 与无线传感器网络中常用的随机部署, MAX\_MIN\_COV 和 MAX\_AVG\_COV 等算法相比, 本文所提出的部署策略考虑了目标区域中存在障碍物的情况, 在节点数有限的情况下, 能够实现更合理的节点部署.

## 参考文献(References)

- [1] Xue Wang, Jun-Jie Ma, Sheng Wang, et al. Distributed particle swarm optimization and simulated annealing for energy-efficient coverage in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2007, 7(5): 628-648.
- [2] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks[C]. *Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conf. New Orleans*, 2003: 1609-1614.
- [3] Dhillon S S, Chakrabarty K, Iyengar S S. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections[C]. *Proc of the Int Conf on Information Fusion. Annapolis*, 2002: 1581-1587.
- [4] 屈玉贵, 翟羽佳, 蔺智挺. 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): 1-6. (Qu Y G, Zhai Y J, Lin Z T. A novel sensor placement model in wireless sensor network[J]. *J of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2004, 27(6): 1-6.)
- [5] Sanjay Shkakottai, Srikant R, Ness B Shorff. Unreliable sensor grids: Coverage, connectivity and diameter[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(6): 702-716.
- [6] 汪学清. 无线传感网络中连通与覆盖问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006. (Wang X Q. Research on connectivity and coverage problems in wireless sensor networks[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.)
- [7] Zou Y, Chakrabarty K. Uncertainty-aware and coverage-oriented deployment for sensor networks[J]. *J of Parallel Distributed Computing*, 2004, 64(7): 788-798.
- [8] Aitsaadi N, Achir N, Boussetta K, et al. Differentiated underwater sensor network deployment[C]. *OCEANS 2007. Aberdeen*, 2007: 1439-1444.
- [9] Onur E, Ersoy C, Delic H. How many sensors for an acceptable breach probability level[J]. *Computer Communications*, 2006, 29(2): 172-182.
- [10] Gage D W. Command control for many robot system[J]. *Unmanned Systems Magazine*, 1992, 10(4): 28-34.
- [11] Bleau A, Leon L J. Watershed-based segmentation and region merging[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 77(3): 317-370.
- [12] Zhang Honghai, Jennifer C Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. *Wireless Ad-hoc and Sensor Networks*, 2005, 1(1/2): 89-124.
- [13] Chun-Hsien Wu, Kuo-Chuan Lee, Yeh-Ching Chung. A delaunay triangulation based method for wireless sensor network deployment[J]. *Computer Communications*, 2007, 30(14): 2744-2752.
- [14] Devillers O. Improved incremental randomized delaunay triangulation[C]. *Proc of the 14th Annual Symposium on Computational Geometry. Minneapolis: ACM Press*, 1998: 106-115.