

# 传感器网络中的栅栏覆盖问题

李石坚

(浙江大学 计算机学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 覆盖问题是传感器网络中的基础性问题, 着重研究了一类特殊的覆盖问题——栅栏覆盖问题。从栅栏问题的定义出发, 基于对最大支撑路径的分析和实验, 得出了增量式传感器布局的启发式规则, 这些规则可以用来分析和完善已有布局中存在的弱点或漏洞。仿真实验证明了这些规则的有效性。

**关键词:** 传感器网络; 覆盖问题; 栅栏覆盖

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2008)01-0035-06

## The Barrier Coverage Problem in Sensor Networks

LiShijian

(School of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** Coverage is a basic problem in sensor networks. The barrier coverage problem is a special coverage problem and plays very important role in target tracking. According to the definition of barrier coverage problem, some heuristic rules of incremental sensor deployment are gained based on the analysis and experiment of “Maximum Support Path”, by which we could patch up some weakness of a type of established deployment. The simulation proves the efficiency of the rules.

**Key words:** sensor network; coverage problem; barrier coverage

## 0 引言

随着通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟, 具有感知能力、计算能力和通信能力的微型传感器开始在世界范围内出现。由这些微型传感器构成的传感器网络引起了人们的关注<sup>[1, 2]</sup>。覆盖问题 (Coverage Problem)<sup>[3-5]</sup>是传感器网络理论中的基础性问题之一, 主要研究的是如何合理布局传感器, 以保证对关心区域 (Region Of Interest: ROI) 充分高效的覆盖, 该问题是衡量传感器网络工作性能的重要指标之一, 也是当前传感器网络研究的热点。

覆盖问题一般有3种类型: 区域覆盖 (Area Coverage)、点覆盖 (Point Coverage)、栅栏覆盖 (barrier coverage)<sup>[6]</sup>。其中栅栏覆盖主要考察目标穿越传感器网络时被检测的情况, 它反映了给定传感器网络所能提供的感知和监测能力<sup>[7]</sup>。这类覆盖控制问题的目标

是找出连接出发位置 (记为 $S$ ) 和离开位置 (记为 $D$ ) 的一条或多条路径, 使得这样的路径能够在不同模型定义下提供对目标的不同传感/监视质量<sup>[8]</sup>。“栅栏覆盖”问题有2种常见的模型<sup>[6]</sup>: 基于最大突破路径和最大支撑路径 (Voronoi图) 的模型<sup>[4]</sup>和基于暴露 (Exposure)<sup>[9]</sup>的模型, 2种模型分别解决“最坏与最佳情况覆盖”和“暴露穿越”2类问题。本文将对这2类问题及其实现算法进行分析和讨论, 基于前者进行了增量式传感器布局实验, 并根据实验结果提出了一些增量式传感器布局的启发式规则, 用于优化现有传感器布局。

## 1 基础概念

### 1.1 最大突破路径和最大支撑路径

由于在战场环境下, 目标可能以任意路径穿越传

收稿日期: 2007-11-20

作者简介: 李石坚 (1979-), 男, 湖南益阳人, 浙江大学讲师, 博士后, 主要从事传感器网络, 无线网络方面的教学与研究。

传感器节点部署的区域。在任何传感器感知模型中,节点的感知能力都随着距离的增加而衰减。如果某条路径上的每个点与最近传感器的距离最大,则该路径称为“最大突破路径”。显然,当目标沿这样的路径穿越网络时,不被检测到的概率最大。与之对应的是,如果路径上的每个点与最近传感器的距离最小,则称该路径为“最大支撑路径”<sup>[4-10]</sup>。当目标沿这样的路径穿越网络时,被检测到的概率最大。

最大突破路径的突破权重  $Breach\_weight$  值和最大支撑路径的  $Support\_weight$  值是衡量传感器网络覆盖质量的重要评价标准。 $Breach\_weight$  对应于最大突破路径到任意传感器距离的最小值,是目标穿越传感器网络的过程中,即使尽可能地远离传感器行进(沿最大突破路径),也必须至少达到一次的离传感器节点最小的距离。而  $Support\_weight$  对应于最大支撑路径上的点到最近传感器的最大距离,是目标穿越传感器网络的过程中,即使尽可能地靠近传感器行进(沿最大支撑路径),也必须至少达到一次的离传感器节点最大的距离,图1给出了一个最大突破路径和最大支撑路径的例子。所以,  $Breach\_weight$  和  $Support\_weight$  值均可以用来指导未来传感器的布局,  $Breach\_weight$  值越大,越有利于目标沿着最大突破路径突破;  $Breach\_weight$  值越小,说明传感器网络即使在最差情形覆盖(最大突破路径)下,仍有较强的探测效果。而  $Support\_weight$  值越大,说明传感器网络即使在检测质量相对较好的区域,实际上的覆盖效果较差;  $Support\_weight$  值越小,说明传感器网络在检测质量相对较好的区域,实际上也具有较好的覆盖效果。

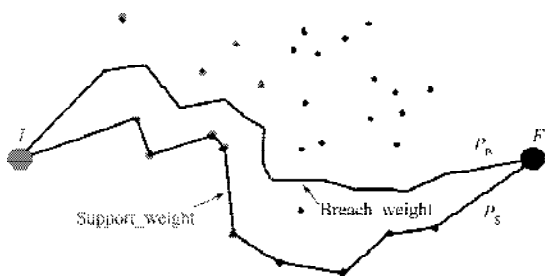


图1 最大突破路径和最大支撑路径<sup>[6]</sup>

Fig. 1 The maximal breach path and the maximal support path

通过寻找最大突破路径和最大支撑路径,用户就可以得到用  $breach\_weight$  和  $support\_weight$  描述的传感器网络的覆盖效果,发现传感器网络探测范围内的探测性较弱的(或较强的)点和区域,可以在检测概率最小的路径的周围再部署一些节点,减少  $breach\_weight$  和  $support\_weight$  值,从而改善网络的覆盖性能,并且提出更好的传感器布局建议,以提高传感器网络总体的服务质量。

目前已经在图论的基础上发展出了解决上述2种问题的方法,即为 Voronoi 方法和 Delaunay 三角形法。其中, Voronoi 图是由所有 Delaunay 三角形边上的垂直平分线形成,而 Delaunay 三角形的各顶点即为传感器节点,并满足各三角形外接圆中不含其他节点。可以利用 Voronoi 图<sup>[11]</sup>(见图2)和 Delaunay 三角形<sup>[12]</sup>(见图3)的性质来解决最好和最差情形覆盖问题。

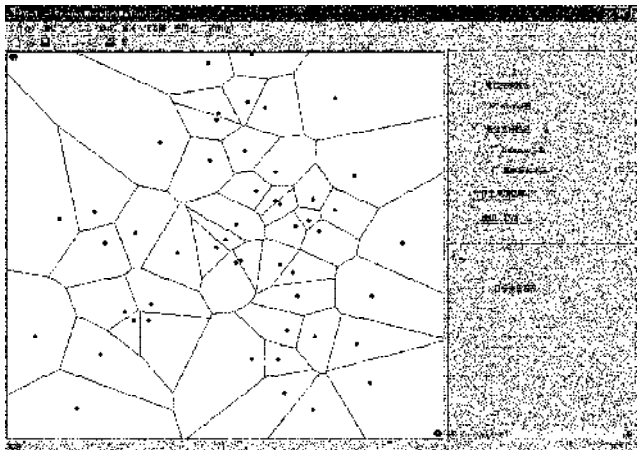


图2 Voronoi 图

Fig. 2 Voronoi graph

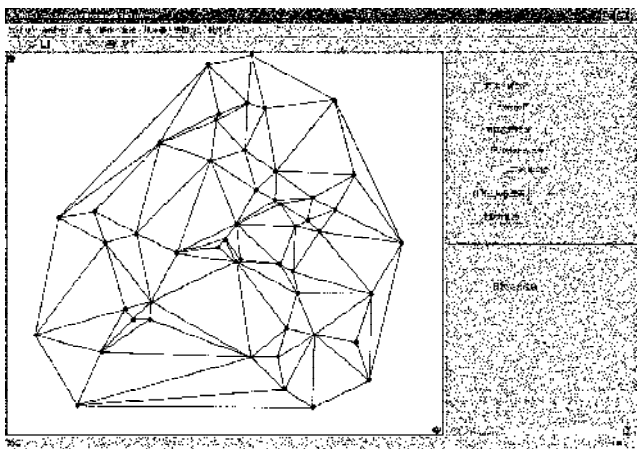


图3 Delaunay 三角形

Fig. 3 Delaunay triangle

## 1.2 暴露问题及基于暴露的最优突破路径

为了更准确地描述目标在 ROI 中移动时被传感器网络观测的程度,文献[9]定义了“暴露(Exposure)”这一概念。非正式的说,“暴露”表示传感器网络对某个目标的平均观测能力,更准确的说,暴露常被定义为一个探测函数的积分式,一般取决于从起点  $P_s$  到终点  $P_d$  的路径上的各点与传感器之间的距离。具体的探测函数的参数取决于传感器设备的特性,通常是  $d^{-K}$  的形式,  $K$  通常分布在 1~4 的范围内。

为了清楚地介绍传感域中“暴露”的概念,首先介绍文献[9]给出的基于暴露的探测模型。

$$S(s, p) = \frac{\lambda}{[d(s, p)]^K}, \quad (1)$$

式中:  $d(s, p)$  表示传感器  $s$  与点  $p$  间的欧几里德距离;

正常量  $\lambda$  和  $K$  是传感器的 2 个技术参数<sup>[9]</sup>。

基于式 (1), 文献[9]用全局传感域强度  $I_A(F, p)$  来描述区域  $F$  中所有传感器对某点  $p$  的有效测量。假设有  $n$  个活动的传感器,  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , 每个传感器都根据基于距离的传感函数  $S$  进行工作, 这样,  $I_A$  就可以表示为:

$$I_A(F, p) = \sum_{i=1}^n S(s_i, p). \quad (2)$$

假设对象  $O$  正在传感域  $F$  中从点  $p(t_1)$  移动到点  $p(t_2)$ , 运动的曲线 (轨迹) 为  $p(t)$ 。现在, 这个运动过程的“暴露”可被定义如下:

**定义** 传感域中的对象  $O$  在时间段  $\{t_1, t_2\}$  中沿着路径  $p(t)$  运动的暴露被定义为:

$$E(p(t), t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} I(F, p(t)) \left| \frac{dp(t)}{dt} \right| dt, \quad (3)$$

即暴露是路径  $p(t)$  上各点的全局传感域强度  $I_A(F, p)$  的积分。

根据最大突破路径的定义, 似乎沿着 Voronoi 图的边移动是最有利于减小暴露值的, 但这种直觉并不完全正确。例如, 最小暴露路径在图 4 中用粗线表示, 但这条路径并没有完全的与 Voronoi 图的边 (图中正方形的边) 重合。单纯从减小暴露值的角度考虑, 有时靠近传感器是有利的, 因为更短的传感时间 (更短的路径长度) 能够减小总的暴露程度。

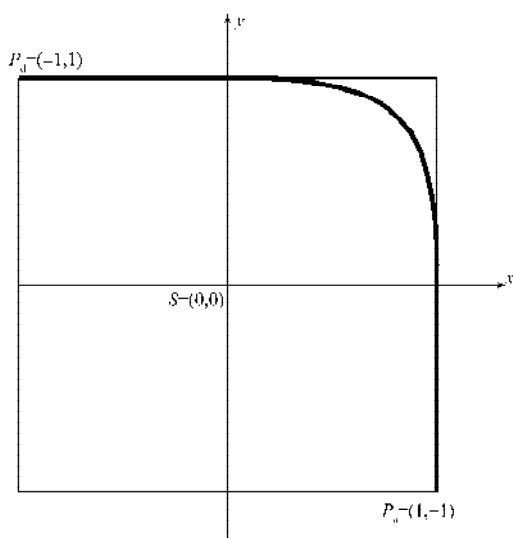


图 4 一个简单的“暴露”实例<sup>[9]</sup>

Fig. 4 A Simple example of “exposure”

基于最大突破路径和最大支撑路径 (Voronoi 图) 的模型和基于暴露的模型各有特点。基于 Voronoi 图的模型主要考虑路径上单个点被探测到的概率。如对于

进攻方而言, 要求最大突破路径上单个点被探测到的概率尽可能低, 对于防守方而言, 则要求最大突破路径上单个点被探测到的概率尽可能高, 而基本上不考虑时间的积累; 而基于 Exposure 的模型考虑了传感时间 (暴露) 的问题, 传感时间越长, 探测效果越好, 但是却没有完全考虑总暴露值较低, 但单个点的被探测概率很高的情况。所以, 虽然基于 Exposure 模型得到的最小暴露路径的暴露值一般要比基于 Voronoi 图模型得到的最大突破路径的暴露值低一些, 但最小暴露路径上有可能存在一些被探测概率比较高的点, 目标在这些点上容易被发现。所以, 2 种模型各有特点, 各有其适合的应用环境。

## 2 关键算法

### 2.1 最差情形覆盖和最大突破路径算法

基于应用的实际情况, 下面主要分析基于最大突破路径和最大支撑路径的栅栏覆盖方法, 这 2 个方法是文献[4]中提出的。

最差情形、基于最大突破的覆盖问题算法可以描述如下:

**已知** 一个拥有传感器组  $S$  的区域  $A$ , 对于每一个  $S_i$ , 坐标  $(X_i, Y_i)$  已知; 区域  $I$  和区域  $F$  对应于一个传感器的位置 initial ( $I$ ) 和 final ( $F$ )。

**问题** 找到在  $S$  中的最大突破路径  $P_B$ ,  $P_B$  开始于  $I$ , 结束在  $F$ 。

在这个例子中,  $P_B$  是一条穿越区域  $A$  的路径, 端点是  $I$  和  $F$ , 路径  $P_B$  上的任意点  $p$  到最近的传感器的距离是最大,  $P_B$  就叫作最大突破路径。

根据传感器节点的分布, 可以很容易的得到 Voronoi 图, 而最佳突破路径一定落在 Voronoi 图的边界上。

以下 3 步描绘了寻找最大突破路径  $P_B$  的算法:

- 1) 为  $S$  产生一个 Voronoi 图;
- 2) 使用图论算法, 把 Voronoi 图转化为带权图;
- 3) 使用二分检索和宽度优先搜索寻找路径  $P_B$ 。

算法的第一部分得到该传感器网络布局相应的 Voronoi 图。在这个带权的无向图中, 每一个传感器节点对应 Voronoi 图中的一个点, 每一条边对应 Voronoi 图中的一条边, 而每条边的权重则是这条边到最近传感器的最小距离。

接着是一个循环过程, 程序通过在最小的和最大的边权重之间进行二分检索。在每一步中, 宽度优先搜索被用来检查是否存在一条从  $I$  到  $F$  的路径, 仅仅使用权重大于突破权值 (搜索标准) Breach\_weight 的边。如果路径存在, 就增大 Breach\_weight, 从而在下一次的搜索中更加严格的限制边的条件; 如果路径不存在, 就减小 Breach\_weight, 从而放宽搜索的条件。完

成之后,就找出了从 $I$ 到 $F$ 的用权重尽可能大的边构成的最大突破路径。

## 2.2 最好情形覆盖和最大支撑路径算法

与最差情形覆盖类似,最好情形、基于支撑的覆盖问题可以描述如下:

**已知** 拥有传感器组 $S$ 的区域 $A$ ,对于每一个 $S_i$ ,坐标 $(X_i, Y_i)$ 是已知的;区域 $I$ 和区域 $F$ 相应于传感器的起始位置( $I$ )和终点位置( $F$ )。

**问题** 确定 $S$ 中的最大支撑路径 $P_S$ ,  $P_S$ 开始于 $I$ ,结束在 $F$ 。

既然Delaunay三角形产生最短的边长度,那么最大支撑路径一定是落在Delaunay三角形的边上。

类似于寻找最大突破路径的算法只需稍作修改,就可以实现寻找最大支撑路径的算法,主要变化如下:

1) 在几何结构中, Voronoi 图被 Delaunay 三角形所替换;

2) 图 $G$ 的每条边的权值被赋为 Delaunay 三角形中的相应线段到最近传感器的最大距离(即 Delaunay 三角形中相应线段的长度);

3) 搜索参数 Breach\_weight 被 Support\_weight 所替代,且进行搜索时 Support\_weight 的值是逐渐减小的。

在这种情况下,最大支撑路径同样可能不是唯一的。然而,算法中二分检索所得到的 Support\_weight 就可以表示网络的最好情形覆盖。这里, Support\_weight 值是目标行进在穿过传感域 $A$ (从 $I$ 到 $F$ )的任意路径上所必须遇到至少一次的与最近传感器之间的最大距离。如果增加传感器或者现有的传感器移动之后, Support\_weight 减小了,那么最好情形的覆盖就得到了改善。

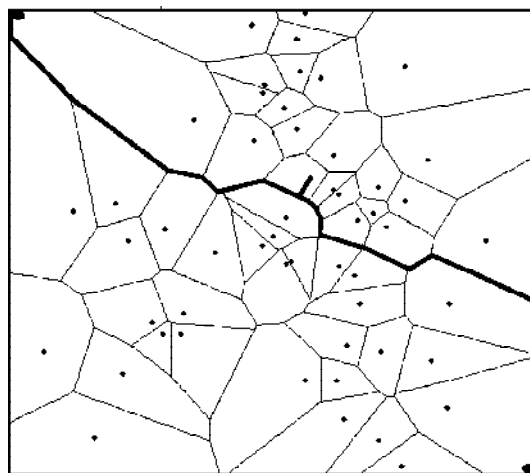
## 3 启发式配置传感器实验

本文实现了一个仿真计算平台,基于算法进行传感器网络中的支撑路径、突破路径的实验,从这些实验中得到了一些经验性结论。

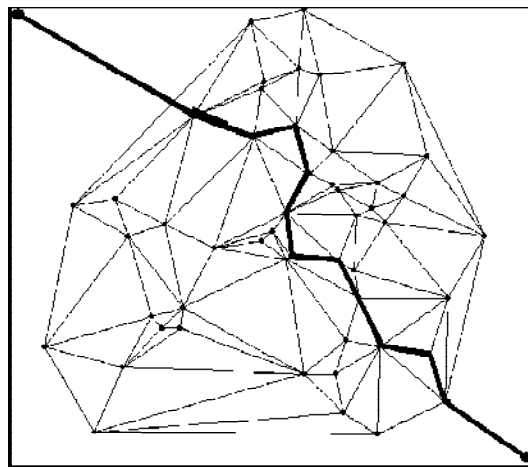
作为后续实验的基础,首先寻找到针对现有传感器布局的最大突破路径和最大支撑路径,得到 Breach\_weight 和 Support\_weight 的值,之后将分别针对突破路径和支撑路径进行启发式实验。

### Case1:

在“栅栏覆盖”问题的最差情形覆盖研究中,可以用最大突破路径的 Breach\_weight 值来衡量传感器网络的覆盖质量。因此,在不同覆盖情况下,通过在最大突破路径上的权重等于 Breach\_weight 的边的附近部署新的传感器(如图6),来实验、研究、验证该算法下传感器启发式配置对改善最差情形覆盖的效果。



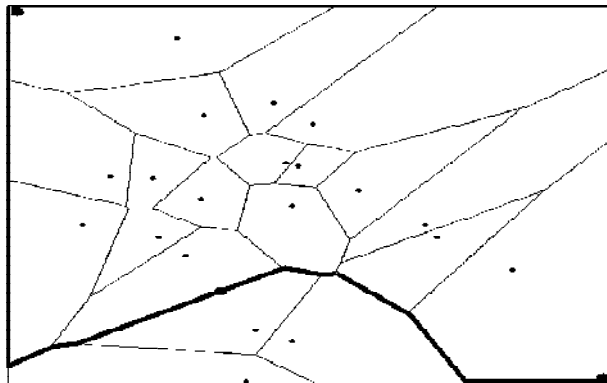
a) 最大突破路径和Breach\_weight值



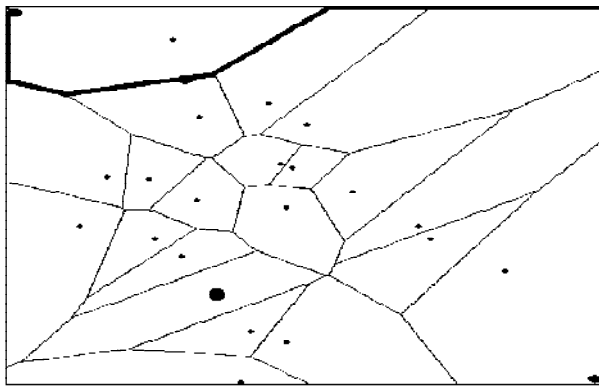
b) 最大支撑路径和Support\_weight值

图5 最大突破路径和最大支撑路径

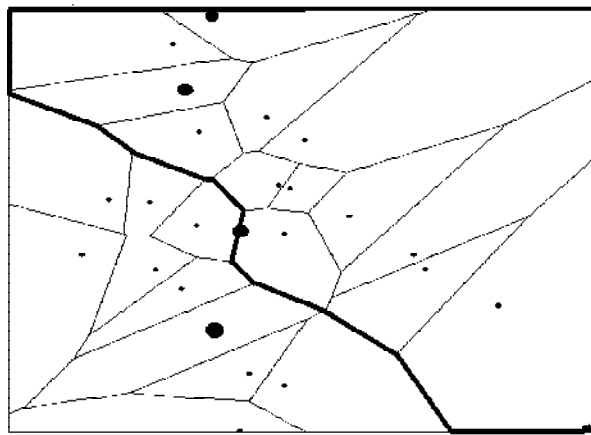
Fig. 5 The maximal breach path and the maximal support path



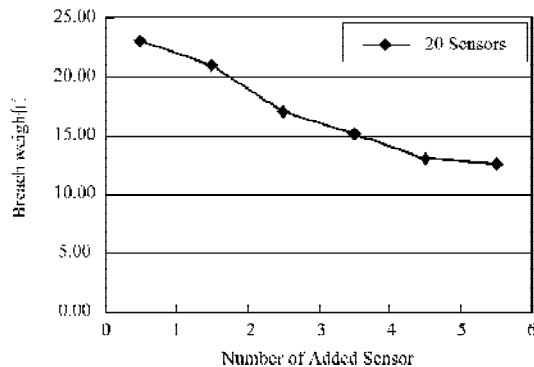
a) 添加传感器前



b) 添加一个传感器后



c) 添加3个传感器后



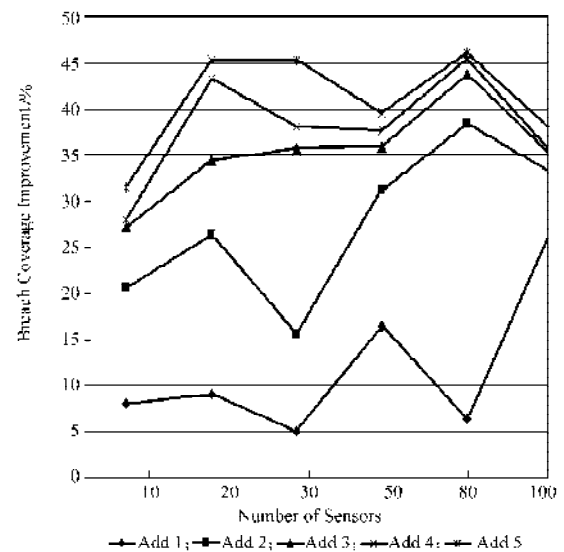
d) Breach\_weight值的变化

图6 在最大突破路径 Breach\_weight 值处  
增加新的传感器Fig. 6 Adding new sensor at the path  
section of Breach\_weight

在10、20、30、50、80、100个传感器覆盖条件下,通过在最大突破路径上的权重等于 Breach\_weight 的边的附近分别添加1、2、3、4、5个传感器,来进行实验,实验数据如图7(均为10次实验的平均值)。

从实验数据中可以看出:在最差情形覆盖中,通过寻找最大突破路径,计算 Breach\_weight 值,启发式的智能化添加新的传感器,能够显著地减小最差情形覆盖(最大突破路径)的 Breach\_weight 值,即能够显

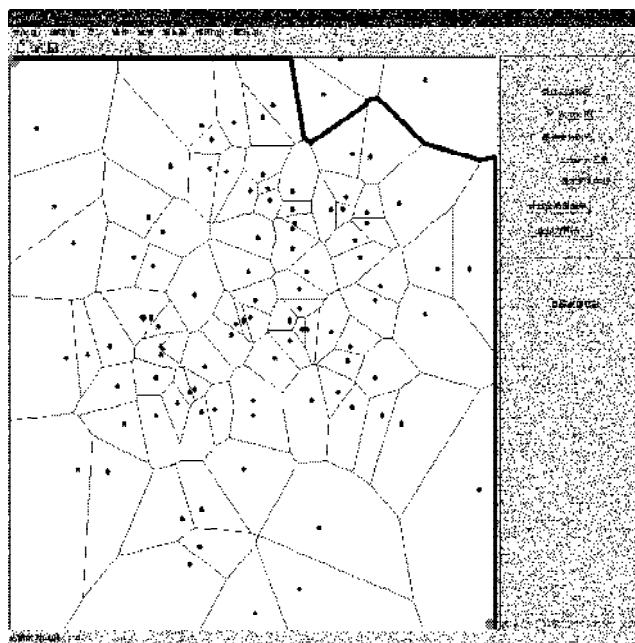
著减小目标沿着最大突破路径行进时到任意传感器的最小距离。通过这种启发式、智能化的方法部署传感器,对已有布局的改进效果如下:在不同覆盖条件,增加1个新的传感器,传感器网络最大突破路径的 Breach\_weight 值能减小7%~28%;增加5个新的传感器,传感器网络最大突破路径的 Breach\_weight 值能减小32%~46%。这表明通过此算法启发式的部署传感器,能够有效地增强传感器网络中感知能力较弱区域(最大突破路径)内的相对最强区域,从而提高目标穿越传感器网络时被检测到的概率。

图7 启发式的添加不同数目的传感器后,  
Breach\_weight 的改进Fig. 7 The improvement of the Breach\_weight  
after adding sensors heuristically

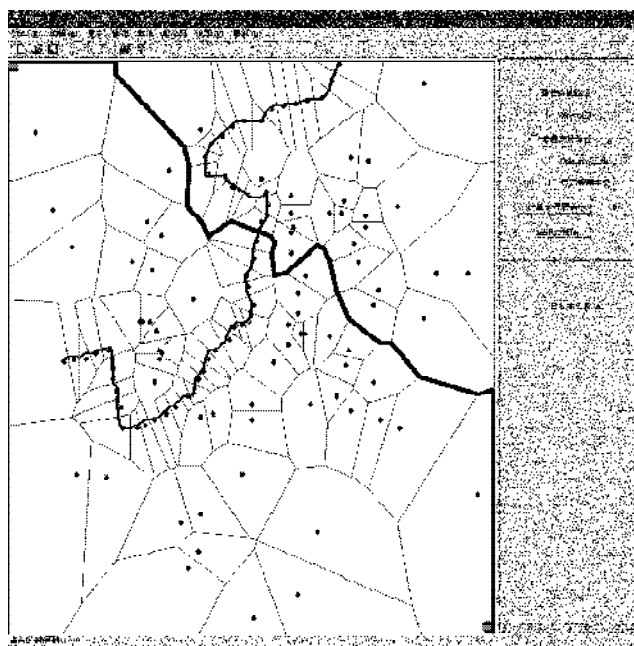
类似地,在最好情形覆盖中,通过寻找最大支撑路径,计算 Support\_weight 值,启发式的智能化添加新的传感器,能够进一步增强传感器网络中感知能力较强区域(最大支撑路径)内的相对最弱区域,把传感器网络对最大支撑路径上的各点的探测概率维持在一个比较高的数值上。

#### Case2:

此外,通过实验发现:当运用最大突破路径算法对现有传感器网络的传感器分布多次启发式的智能化添加传感器节点后,可以看到:在传感器区域中会明显的出现一条“栅栏线”(图8),对目标从起点到终点、穿越传感器网络的任意路径,形成了一条探测能力非常强的封锁线。在这条栅栏线上,网络可对试图穿越 ROI 的目标进行高感知概率的探测。由此可见,基于最大突破路径算法的启发式添加传感器,实际上就是根据现有传感器网络的节点分布,通过最小的代价,生成一条探测能力很强的栅栏线。



a) Before creating a barrier line



b) The barrier line created by our algorithm

图 8 通过启发式算法生成的栅栏线

Fig. 8 The barrier line created by our heuristic algorithm

## 4 总结与展望

当需要改善传感器网络感知能力而增量式部署传感器时,根据上述实验结果,提出如下几个增量式传感器布局的启发式规则:1)可在最大突破路径上的权重等于  $Breach\_weight$  的边的附近部署新的传感器;2)可在最大支撑路径上的权重等于  $Support\_weight$  的边的附近部署新的传感器;3)反复应用规则1),可通过最小的代价生成一条探测能力很强的栅栏线。因此,

基于最大突破路径和最大支撑路径的概念,可以从分析传感器网络的区域覆盖能力着眼,用较小的代价改进传感器网络的布局,使传感器网络根据应用要求提供符合需要的感知能力。事实上,这一结果可与某些布局方法结合起来。首先,利用布局方法生成一种特定的传感器布局,接着用本文提出的增量式布局规则,改善已有布局,并根据应用需求加以完善。依这种方式,可以得到更符合应用需求的传感器布局。

### 参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su, Sankarasubramaniam, et al. A survey on sensor networks[J]. Communications Magazine, IEEE, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] 李建中, 李金宝, 石胜飞. 传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J]. 软件学报, 2003(10): 1717-1727.
- [3] Nojeong H, Varshney P K. An intelligent deployment and clustering algorithm for a distributed mobile sensor network [C]//IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Washington: IEEE Press, 2003: 4576-4581.
- [4] Meguerdichian S K, Potkonjak F M, Srivastava M B. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks[C]// In Proceeding of the IEEE INFOCOM. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2001: 1380-1387.
- [5] Huang C F, Tseng Y C. A survey of solutions to the coverage problems in wireless sensor networks[J]. Journal of Internet Technology, 2005, 6(1): 1-8.
- [6] Cardei, Wu. Coverage in Wireless Sensor Networks, in Handbook of Sensor Networks, I.M.M. Ilyas[M]. West Palm Beach, FL: CRC Press, 2004.
- [7] Kumar, Lai, Arora. Barrier coverage with wireless sensors [C]//in International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom'2005. Cologne: ACM Press, 2005: 284-298.
- [8] 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[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 422-433.
- [9] Meguerdichian, Koushanfar, Qu, et al. Exposure in wireless Ad-Hoc sensor networks[C]//in Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. Rome: ACM Press, 2001: 139-150.
- [10] Megerian, Koushanfar, Potkonjak, et al. Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2005, 4(1): 84-92.
- [11] Aurenhammer F. Voronoi diagrams-a survey of a fundamental geometric data structure[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1991, 23(3): 345-405.
- [12] Mulmuley K. Computational Geometry: An Introduction Through Randomized Algorithms[M]. New York: Prentice Hall, 1994.

(责任编辑: 张亦静)