

无线传感器网络启发式移动轨迹策略的研究

秦宁宁^① 张林^② 山秀明^② 徐保国^①

^①(江南大学通信与控制工程学院 无锡 214122)

^②(清华大学电子系 北京 100084)

摘要: 从进攻方的角度出发, 该文研究目标如何以尽可能低的发现概率, 消耗尽可能少的时间穿越已被传感器节点监控的区域。基于此研究目标, 提出一种兼顾安全和时效性能的 SS(Security and Speed)启发式的移动轨迹策略和相应的评价指标——综合增益 Integrated Gain (IG)。此策略无需全网拓扑信息的支持, 能动态地反映目标对安全和时效两种性能的不同需求。通过仿真试验证明, 该策略对网络中节点密度和分布有更低的敏感性; 和经典的 Voronoi 算法相比, 该策略克服 Voronoi 中存在的问题, 平均综合增益更加接近理想算法的结果, 而计算复杂度却远远低于理想算法。

关键词: 无线传感器网络; 栅栏覆盖控制; 启发式移动轨迹

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0707-05

A Heuristic Track Strategy for Wireless Sensor Networks

Qin Ning-ning^① Zhang Lin^② Shan Xiu-ming^② Xu Bao-guo^①

^①(The School of Communication and Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122, China)

^②(The Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The coverage problem has been expanded with presenting the reverse problem which has not yet been thoroughly studied, i.e., given an intrusion detecting WSN, how to design an object locomotion track with high security and fast speed. Based on this goal, a heuristic algorithm, namely, the SS (shortened Security and Speed) algorithm is introduced to build the corresponding tracks with adjusting the secure and speedy parameters under the varying application demands without the support of the global topology information. And the corresponding Integrated Gain (IG) will be posed to measure the SS ability. Simulations show that, the SS algorithm is not sensitive to the density and distribution of sensors, and solves the defects of working blind spot and track flooding. Compared with the traditional Voronoi algorithm, the proposed SS algorithm matches the results of the optimal more closely and has the smaller complexity than the optimal approach.

Key words: Wireless sensor network; Barrier coverage problem; Heuristic track

1 引言

在构建无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)时, 覆盖问题是衡量网络的 QoS 指标之一^[1]。广大的研究者通常从布撒传感器节点的角度, 来研究如何设计传感器网络可以更为有效地实现对目标的监视与跟踪。除此之外, 从进攻角度来研究覆盖问题, 尤其是针对进攻过程中的移动轨迹的研究同样具有重要的现实意义。兼顾安全和时效性能的移动轨迹不仅为目标提供一条合理的运动路线, 如战场环境下侦察兵返程轨迹的寻找, 而且该轨迹可以为追加布撒传感器节点的策略选择, 提供有益的借鉴。

关于移动轨迹的研究也被称之为栅栏覆盖(Barrier Coverage)^[2]。文献[1, 3]提出了一种基于 Voronoi 图的策略。

但这种轨迹生成策略对节点的分布条件过于敏感, 在节点数量较少或者节点分布并不均匀的情况时, 与理想轨迹相比, 平均误差高于 50%。文献[4]针对于文献[1]进行了改进, 由于仍以 Voronoi 图为基础, 所以降低的误差有限。文献[5, 6]侧重研究仅考虑安全性能的移动轨迹生成问题。文献[7]介绍了 Grid-based 算法, 该算法在本文中经改进后可以生成一条满足安全和时效性要求的近似理想轨迹, 但计算复杂度较高。

SS(Security and Speed)启发式移动轨迹策略, 它兼顾了安全性能和到达目的地的时效性能两种指标, 使得无论是在较多节点均匀分布的场景中, 还是在少量节点分布不均匀的场景中, 该策略均能够很好地工作, 并且后文将该策略与已有 2 种算法进行比较, 从仿真结果中印证了该策略在对两种性能的保证、对网络分布的透明性和计算复杂度上具有一定的优势。

2006年-09-06收到, 2007-04-06改回

国家自然科学基金项目(60672107)和国家“863”计划项目(10A3, 10Z2)资助课题

2 SS策略理论基础

2.1 发现概率

移动目标在轨迹上的安全性能,通常表现为目标沿轨迹移动过程中,赢得尽可能高的未被发现概率。根据传感模型可得到发现概率的分布,从而进一步得到未被发现概率的分布情况。

不同传感器的传感模型有所差异,但感应能力随距离的增长而降低的这一基本特点是保持不变的^[8]。传感器节点 s 在 q 点的感应模型定义如下:

$$S(s,q) = \frac{\lambda}{\text{dis}^k(s,q)} \quad (1)$$

其中 $\text{dis}(s,q)$ 是点 s 与点 q , 在二维空间上的欧基里德距离; $\lambda > 0$ 是感应系数, $k = 1, 2$ 是距离影响系数。

受文献[8, 9]中发现概率定义的启发, 结合人对事物辨识的渐进过程, 可影射定义传感器节点 s 对某个点 q 的发现概率:

$$p(d) = \begin{cases} 0, & d \geq R \\ \frac{R^k - d^k}{R^k - r^k}, & r < d < R \\ 1, & d \leq r \end{cases} \quad (2)$$

其中 $d = \text{dis}(s,q)$, r 是感应半径, R 是通信半径。根据网络连通性的设计原则^[10], 一般设定 $R \geq 2r$ 。显然, 目标 q 对 s 的躲避概率(或称未被发现概率)为 $p_{\text{parry}}(d) = 1 - p(d)$ 。当感应区域 Ω 内有 N 个传感器节点 $s_i, i = 1, 2, \dots, N$, 对目标的距离分别为 $d_i \in d, d = d_1, d_2, \dots, d_N$ 。目标 q 对被监控区域内的所有传感器节点的躲避概率为

$$P_{\text{parry}}(d) = \prod_{i=1}^N (1 - p(d_i)) \quad (3)$$

2.2 目标暴露量

利用发现概率, 对暂态或者轨迹片断进行安全性能的衡量是一种比较直观有效的方法, 但对于长时间或者长轨迹安全性能的衡量, 则需要通过对安全性能在时间或空间上的累积来表示。根据文献[7]中目标暴露量的定义, 推导出目标在时间 $[t_1, t_2]$ 内, 沿二维轨迹 $y = y(x)$ 移动了 Γ 长度的暴露量计算公式:

$$\begin{aligned} E(y) &= \int_{t_1}^{t_2} \sum_i S(d_i) \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2} dt \\ &= \int_{x_1}^{x_2} \sum_i S(d_i) \sqrt{1 + y'^2(x)} dx = \int_{\Gamma} \sum_i S(d_i) dl \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)是一个只与轨迹移动长度有关的暴露量计算表达式, 实现了轨迹安全性能的计算与网络传感器节点拓扑信息完全解耦。其中, 存在 $x \in [x(t_1), x(t_2)] = [x_1, x_2]$, $\sum_i S(d_i)$ 是所有传感器节点对移动目标的影响之和。

2.3 有效前进距离

目标为了躲避传感器节点的探测, 将通过牺牲一定的路

程来换取不被传感器节点发现的安全性能。当目标匀速运动前进时, 对用户而言这种对路程的损失转换成对时间的损失。因此可以定义有效前进距离 $\text{Progress}(l)$ 来考量目标的时效性能。

假设目标当前在位置 A , 目的地为 D , 如图1所示。目标从位置 A 经历 dl_1 的路程到达位置 B , 轨迹 (A, B) 的有效前进距离应该是他在向量 AD 上的投影 AB' , 轨迹 (A, C) 也同理。则有效前进距离如式(5):

$$\begin{cases} \text{Progress}(A, B) = AB' = dx_1, & \text{其中 } |AB'| = dx_1, \langle AD, AB' \rangle \geq 0 \\ \text{Progress}(A, C) = AC' = -dx_2, & \text{其中 } |AC'| = dx_2, \langle AD, AC' \rangle \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

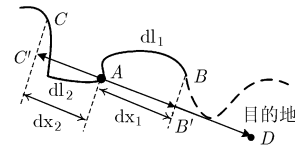


图1 有效前进距离

3 SS移动轨迹策略

3.1 模型的建立

不失一般性地假设被监控区域 Ω 内随机布撒 N 个传感器节点, 且具有完全一致的物理特性, 移动目标配有 RSSI(Received Signal Strength Indicator)技术的收发机, 实现对传感器节点距离 d 的估计计算。移动目标从源地以均匀速度穿过感应区域向目的地 D 前进, 拟寻找一条源地到目的地 D 的移动轨迹 track , 使得在此轨迹上移动的目标被发现的概率尽可能的低(或者目标的暴露量尽可能的降低), 并且行进的路程尽可能的短, 即同时实现安全性能与时效性能, 如下图2(a)与式(6)所示。其中, L 是源点到目的地点的直线。

$$\left. \begin{aligned} & \max P_{\text{parry}}(\text{track}) \text{ 或 } \min E(\text{track}) \\ & \min T_{\text{elapsed}}(\text{track}) \\ & \text{S.T. } \text{track} \subset \Omega \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} & \max P_{\text{parry}}(\text{track}) \text{ 或 } \min E(\text{track}) \\ & \min \frac{|\text{track}|}{L} \\ & \text{S.T. } \text{track} \subset \Omega \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3.2 模型的分解

将图2(a)微观化, 对目标进行单步分析, 如图2(b)所示。设目标当前行进到轨迹的某一点 O , 准备以步长 dl 前进到 O' , 且 $\angle O'OD = \theta$ 。式(6)的目标可以等价于: 目标每一步朝着躲避概率最大且消耗时间最小的方向 θ 前进。

目标前进到位置 O' 时, 相对于 Ω 内所有 N 个传感器的躲避概率为 $P_{\text{parry}}(d)$ 。由于目标匀速运动, 时效性能直接反映为目标的有效前进距离, 通过增大有效前进距离 $\text{Progress}(dl)$ 实现时效性能, 即消耗时间的减小。存在

$\text{Progress}(dl) = dl \cdot \cos(\theta)$, 可见 $\text{Progress}(dl)$ 是关于 θ 的函数; O' 与传感器的距离 d , 显然是关于 θ 的函数, 因此 $P_{\text{parry}}(d)$ 是 θ 的函数。优化式(6), 可重新改写为单步的优化方程如式(7)。

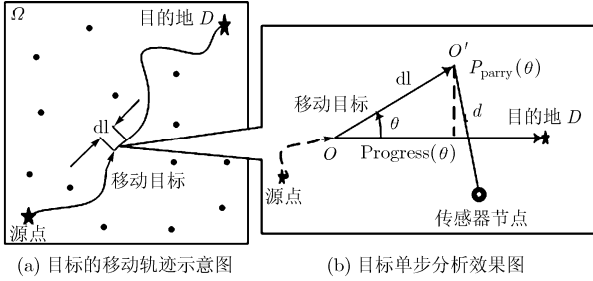


图 2 目标轨迹分析

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & A(\theta) = \alpha \cdot P_{\text{parry}}(\theta) + \beta \cdot \text{Progress}(\theta) \\ \text{S.T.} \quad & -\pi \leq \theta \leq \pi, \quad \alpha, \beta \in (0, 1); \quad \alpha + \beta = 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)将移动轨迹的生成问题转化为对每一步求使表达式 $A(\theta)$ 最大化的 θ 值的问题, 其中 α, β 分别为安全性能和时效性能的权重参数, 它们反映了用户对两种性能关切的程度。 α 值增大, 目标对安全性能的要求提高, 同时 β 减小, 时效性能要求自动降低。

3.3 模型多步有效性分析

假设目标从源地前进了有限的 Num 步到达目的地 D , $0 < \text{Num} < \infty$, 且在第 i 步满足式(7)的目标前进角度为 ξ_i , $-\pi \leq \xi_i \leq \pi$; 则显然下式成立:

$$\begin{aligned} & \sum_i^{\text{Num}} \left[\alpha \cdot P_{\text{parry}}(\theta_i) + \beta \cdot \text{Progress}(\theta_i) \right]_{\max} \\ & = \sum_i^{\text{Num}} \left[\alpha \cdot P_{\text{parry}}(\xi_i) + \beta \cdot \text{Progress}(\xi_i) \right], \quad -\pi \leq \theta_i \leq \pi \end{aligned} \quad (8)$$

可见, 如果目标每一步均能实现良好的安全和时效性能, 则整条轨迹也将满足安全和实效的性能的需求。

SS 策略的算法伪代码如图 3 所示, 目标前进了有限 Num 次查找过程最终将抵达目的地 D 。其中变量 $P_{\text{parry}}(\theta)$ 和 $\text{Progress}(\theta)$ 必须进行相应的归一化处理, 详细实现步骤在本文中不作详解。本算法复杂度为 $O(|\theta|)$, 其中 $|\theta| = \frac{2\pi}{d\theta}$ 是单步可选角度数量, $d\theta$ 为可选角度间隔。多次实验表明, 算法生成的轨迹对可选角度的数量并不十分的敏感, 因此 $|\theta|$ 的数量在应用设计时可进行调控, 以降低算法的复杂度。

3.4 轨迹的分析指标

鉴于目标的移动轨迹是一个过程量, 直接利用暂态的发现概率或者轨迹消耗时间来考察轨迹的性能显然不够充分; 并且生成的轨迹应能兼顾安全和时效两种性能, 需要一个能对两种性能进行同时衡量的整体标准。目前, 已有的安全和时效性能因为量纲不同, 不能直接取和作为整体的衡量指标。因此, 引用本文作者曾提出的轨迹的性能评价指标^[11]

如下: 通过选定直线 L 为参照轨迹, 利用安全和时效性能的增量比, 分别定义无量纲的安全增益和时效增益, 再通过加权相加确定综合增益。

设 L 的暴露量为 $E(L)$, 长度为 $\text{dis}(L)$; 另设目标的运动轨迹为 track , 长度为 $\text{length}(\text{track})$, 计算 track 的暴露量为 $E(\text{track})$ 。那么安全增益为 $\text{SG} = \frac{E(L) - E(\text{track})}{E(L)}$, 时效增益为

$$\text{LG} = \frac{\text{dis}(L) - \text{length}(\text{track})}{\text{dis}(L)}$$

综合增益为 $\text{IG} = \alpha \cdot \text{SG} + \beta \cdot \text{LG}$, 其中 α, β 与式(7)中的权重参数意义相同。由于, 直线段 L 是源点与目的地之间的最短距离, 因此任何轨迹长度都不可能小于 L , 因此时效增益值均不大于 0。

```

Procedure SS_Algorithm ( object,  $\Omega$  )
{
  初始化  $\alpha, \beta, dl, \text{object}' = \text{object}$ 
  while ( object  $\neq D$  )
  {
    max = 0,  $\xi = 0$ 
    for each  $\theta$  in  $[-\pi, \pi]$ 
    {
      归一化  $P_{\text{parry}}(\theta), \text{Progress}(\theta)$ 
      If max <  $(\alpha \cdot P_{\text{parry}}(\theta) + \beta \cdot \text{Progress}(\theta))$ 
      {
        max =  $\alpha \cdot P_{\text{parry}}(\theta) + \beta \cdot \text{Progress}(\theta)$ 
         $\xi = \theta$ 
      }
      object'.x = object.x + dl · cos( $\xi$ )
      object'.y = object.y + dl · sin( $\xi$ )
      绘出线段 (object, object')
      object = object'( $\xi$ )
    }
  }
}
    
```

图 3 SS 策略的伪代码实现

4 两种经典算法

4.1 Grid-based 方法及其改进

文献[7]给出了一种生成最小暴露量轨迹的实现方法——Grid-based 方法。Grid-based 方法首先将感应区域 Ω 进行划分, 分割区域 Ω 的边及其边的交点被影射成图 G 中的边和点, 每条边的权重由这条边上的暴露量决定, 以此生成权重图, 最后利用任意一种路由算法得到暴露量最小的轨迹。当区域的划分参数 $m, n \rightarrow \infty$ 时, 这种划分生成的轨迹是在仅考虑安全性能的情况下, 目标从源点移动到目的地的最佳路线。这种划分策略虽然计算量大, 但能给出一种有效的在传感器网络中寻找满足不同性能指标的理想轨迹的生成方法。

为了保证算法之间比较的公平性, 本文改进 Grid-based 方法生成的图, 使其成为也受参数 α, β 影响的权重图。图中每一条边的权重定义为

$$\text{weight}(e_j) = \alpha \cdot P_{\text{parry}}(e_j) + \beta \cdot \text{Progress}(e_j) \quad (9)$$

其中 $e_j \in E, G' = (E, V)$ 。

改进型 Grid-based 算法的复杂度 $O(|V_G|^3)$ (其中 $|V_G| = 2mn^2 + 2mn + n - 1$ 为被监控区域的划分交点数, 一般为 10^3 数量级), 远远大于 SS 算法的复杂程度。

4.2 基于 Voronoi 图的策略

基于 Voronoi 图的轨迹策略首先将感应区域进行划分, 即: 在感应区域 Ω 中, 以随机布撒的 N 个传感器节点为基点, 利用 Voronoi 图可将区域 Ω 划为 N 个子区域, 每个子区域内有且仅有一个传感器基点, 在子区域中的任何点到该区域基点的距离都不大于到其他传感器基点的距离。该策略认为: 移动目标从源点出发至目的地, 沿 Voronoi 图的划分线段移动, 得到的轨迹暴露量最小。

该策略比较简洁, 但其应用必须以全局拓扑信息为基础, 并且 Voronoi 图要求节点分布不存在四点共圆, 这一要求使得该策略在均匀网格分布的传感器网络中无法工作。由于基于 Voronoi 图的轨迹策略是定性描述感应区域内的暴露程度最小的轨迹, 因此与理想轨迹相比, 误差较大。

生成 Voronoi 图的复杂度为 $O(N_{\text{inter}} \lg(N_{\text{inter}}))$, N_{inter} 为 Voronoi 划分的交点数; 利用二分法在 Voronoi 图的划分线段中查找轨迹的复杂度为 $O(N_{\text{inter}})$ 。可见, 基于 Voronoi 图的轨迹策略的复杂度为 $O(N_{\text{inter}} \lg(N_{\text{inter}}))$ 。

5 仿真分析

仿真工具选用 Matlab。初始仿真场景及相关参数设定如下: 二维平面 $\Omega = 100\text{m} \times 100\text{m}$, $r = 3\text{m}$, $R = 15\text{m}$, $\lambda = 1$, $k = 2$, $m = 4$, $n = 16$, $d\theta = 0.01\pi$, $dl = 1\text{m}$ 。移动目标匀速移动 $v = 1\text{m/s}$ 。

5.1 SS 算法的性能分析

试验 1 比较同一场景下, 在用户对安全性能与时效性能要求不同时, SS 算法生成的移动轨迹实现自发调整的情况。本场景中, $N = 30$ 个传感器节点等概率随机布撒。安全与时效的权重比 α/β 从 0.3/0.7, 以 0.1/-0.1 的步长升高至 0.8/0.2, 该比值的变化的变化表现出安全性能的要求逐渐提高, 时效性能逐渐降低的趋势。表 1 中给出了权重比每次变化时, SS 轨迹的 3 种增益 SG, LG, IG 的变化情况。由表 1 可见, SS 轨迹安全增益能随着安全权重的增大而逐渐提升, 同时时效增益相应下降。

表 1 增益变化表

α/β	SG	LG	IG
0.3/0.7	-0.0028	-0.0370	-0.0399
0.4/0.6	0.0806	-0.0370	0.0436
0.5/0.5	0.3757	-0.0292	0.3465
0.6/0.4	0.5318	-0.0606	0.4712
0.7/0.3	0.6180	-0.0763	0.5417
0.8/0.2	0.6339	-0.1234	0.5105

试验 2 如图 4 中所示, 传感器节点均匀网格分布的场景中, 改进 Grid-based 方法和 SS 算法可以正常工作 ($\alpha/\beta = 0.5/0.5$)。由于 Voronoi 图本身对划分基点分布的限制(即基点分布不存在四点共圆), 使得 Voronoi 算法在该分布场景中无法工作。图 5 是 3 种算法在 $N = 30, \alpha/\beta = 0.5/0.5$ 的场景下生成的轨迹。由于 Voronoi 算法仅在划分线段的集合中寻找轨迹, 会出现轨迹溢出监控区域的情况, 如图 5 右侧的三角边。本文根据监控区域的有界性, 对 Voronoi 溢出的部分沿区域边界进行切割处理^[1]。

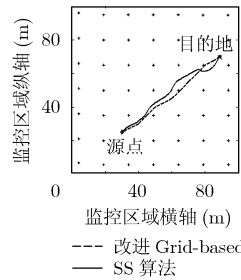


图 4 传感器节点均匀网格分布的监控区内, Voronoi 算法出现工作盲区

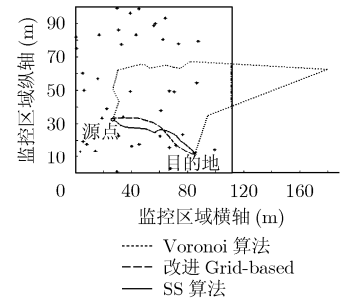


图 5 3 种算法相同场景下生成轨迹

5.2 3 种算法的比较分析

试验 3 3 种轨迹生成算法的比较。将 Voronoi 算法、改进型 Grid-based 方法和本文所设计的 SS 算法, 按照初始设定的场景, 随机实验 20 次, 源点、目的地位置和拓扑结构随机设定。从综合增益 IG 衡量, SS 算法轨迹优于 Voronoi 图生成的轨迹增益, 并且和理想轨迹即改进型 Grid-based 方法生成的轨迹之间的误差较小, 见图 6。Voronoi, 改进型 Grid-based 和 SS 3 种算法的平均综合增益分别为: -0.23239, 0.198997, 0.19916。由于 Voronoi 算法以长时间代价换取安全性能, 因此严重拉低算法的综合增益。提高传感器节点的布撒密度, 即调整 $N = 40$, 其他条件不变的情况下, 测试 SS 算法对密度的敏感程度。试验表明 SS 算法的平均综合增益为 0.072727, 依旧大于 Voronoi 算法的平均综合增益 -0.16727。可见, SS 算法对区域内节点分布密度的敏感程度较低, 提高了算法的通用性。

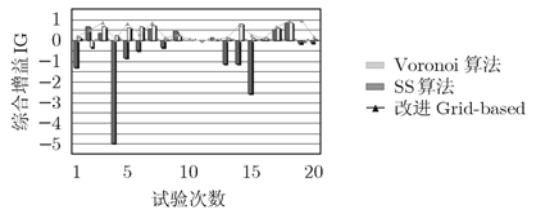


图 6 3 种算法综合性能比较 ($N=15, \alpha/\beta=0.5/0.5$)

试验 4 本试验中将考察在随机试验中, 随着 α/β 的变

化, SS 和 Voronoi 算法平均综合增益的变化, 如图 7 所示。 α/β 的值由 0.3/0.7 变化到 0.7/0.3 的过程中, SS 算法的平均综合增益值始终高于 Voronoi 算法的平均综合增益。 $\alpha/\beta = 0.3/0.7$ 时, 即安全性能的要求最低, 时效性能要求最高时, Voronoi 算法的平均综合增益远远低于 SS 的结果, 随着 α/β 的增大, 安全性能的要求逐渐增大, Voronoi 算法的平均综合增益呈上升态, 两个算法的平均增益差值也逐渐缩小。这是由于 Voronoi 算法本身就是仅侧重于安全性能的算法, α/β 值越大, SS 算法的轨迹需求越接近于 Voronoi 的算法需求, 得到的增益也越接近, 因此平均综合增益差值在图中表现为下降趋势。

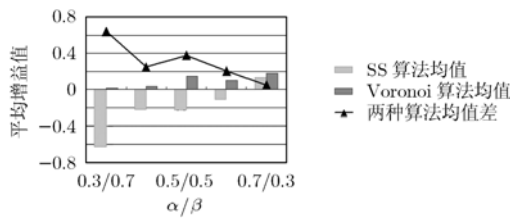


图 7 SS 和 Voronoi 算法平均综合增益比较($N=15$, α/β 变化)

6 结束语

在传感器网络中, 栅栏覆盖已成为覆盖研究的一个重要分支, 其研究的目标在本文中转化为移动轨迹的生成问题。在本文中, 一种启发式的轨迹算法—SS 算法被给出。该算法可通过调整安全和时效性能参数, 满足不同的应用场合中对安全和时效的不同需求。通过多次随机仿真分析可知, 从增益指标上衡量, 该启发式算法比以往的 Voronoi 算法更加接近于理想算法的结果(包括增益值和轨迹曲线结果); 从算法的复杂程度上比较可知, Voronoi 算法最小, 理想算法最大, 该算法的复杂程度介于两者之间; 从算法的计算形式上比较, Voronoi 和理想算法均需全局拓扑信息的支持, 而 SS 算法则是一种本地化策略, 仅需要与传感器节点之间距离 d 的信息。

参考文献

- [1] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, and Srivastava M B. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks [C]. Proc. IEEE Inforcom 2001, Anchorage, USA, Apr. 2001, vol 3: 1380-1387.
- [2] Kumar S, Lai T H, and Arora A. Barrier coverage with

- wireless sensors [C]. MobiCom'05, 2005, Cologne, Germany. 2005: 284-298.
- [3] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M, and Srivastava M B. Worst and best-case coverage in sensor networks [J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2005, 4(1): 84-92.
- [4] Veltri G, Huang Q, Qu G, and Potkonjak M. Minimal and maximal exposure path algorithms for wireless embedded sensor networks [C]. Proc. ACM Int'l SENSYS, L.A., Calif., USA, Nov. 2003: 40-50.
- [5] Corts J, Martnez S, Karatas T, and Bull F. Coverage control for mobile sensing networks [C]. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2004, 20(2): 243-255.
- [6] Li X Y, Wan P J, and Frieder O. Coverage in wireless ad hoc sensor networks [C]. *IEEE Trans. on Computers*, 2003, 52(6): 115-121.
- [7] Meguerdichian S, Koushanfar F, Qu G, and Potkonjak M. Exposure in wireless ad hoc sensor networks [C]. Proc. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Rome, Italy, Jul. 2001: 139-150.
- [8] Adlakha S and Srivastava M. Critical density thresholds for coverage in wireless sensor networks [C]. Proc. IEEE WCNC'2003, New Orleans, La., USA, Mar. 2003, vol.3: 1615-1620.
- [9] Zhang H and Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks [J]. *Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, 2005, 1(1/2): 89-124.
- [10] Tian D and Georganas N D. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks [J]. *Ad Hoc network Journal*, 2005, 3(5): 744-761.
- [11] Qin N N and Xu B G. An attacking track in wireless sensor network [C]. ChianCOM' 2006, Beijing, China, 2006: 1-5.

- 秦宁宁: 女, 1980年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、覆盖控制。
- 张林: 男, 1975年生, 博士, 讲师, 研究方向为无线传感器网络、多传感器信息融合。
- 山秀明: 男, 1944年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统控制。
- 徐保国: 男, 1950年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为通信控制理论、智能控制理论。