

无线传感器网络路径覆盖问题研究

李磊^① 张宝贤^② 黄河清^① 刘海涛^①

^①(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 中国科学院无线传感网与通信重点实验室 上海 200050)

^②(中国科学院研究生院泛在与传感网研究中心 北京 100049)

摘要: 目标跟踪是无线传感器网络的重要应用之一。在目标跟踪过程中,用户通常更关心目标移动路径的覆盖情况,而不是整个网络部署区域的覆盖情况。学术界对路径1覆盖的问题做了详细的研究,但是并没有给出路径 $k(k>1)$ 覆盖的分析。针对这一问题,该文首先将节点随机布设的2维传感器网络中目标移动路径的覆盖问题转化为1维线段覆盖问题,并通过理论分析给出任意直线路径满足 $k(k\geq 1)$ 覆盖的概率下限。实验表明,在 k 较小时,该下限可以较好的逼近仿真结果。

关键词: 无线传感网; 入侵检测; 路径覆盖

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)10-2429-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01433

Study on Path Coverage in Wireless Sensor Networks

Li Lei^① Zhang Bao-xian^② Huang He-qing^① Liu Hai-tao^①

^①(Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

^②(Research Center of Ubiquitous Sensor Networks, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Targets tracking is one of the key applications of wireless sensor networks. In this kind of applications, the sensing process on the targets' moving paths, rather than in the whole area, is often of more concern. The path 1-coverage problem has been extensively investigated, however, the path k -coverage ($k>1$) problem receives little attention. To address this issue, in this paper, the coverage problem induced on an intrusion path by a randomly deployed two-dimensional sensor network is first transformed into a one-dimensional coverage problem, and then a theoretical lower bound to the full k -coverage probability of a randomly selected straight path is derived. Experimental results show that this lower bound is very close to the simulation results, especially when k is small.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSN); Intrusion detection; Path coverage

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一项新兴技术,被广泛应用于国防、工业、环境、健康等多个领域。在实际应用中,无线传感器网络节点通常是随机分布在目标区域,在某些应用场景下,如环境检测,往往要求区域满足 $k(k\geq 1)$ 覆盖,即区域内的每一个点至少被 k 个传感器覆盖到,这样的问题通常被称为区域覆盖(area coverage)。区域覆盖度能充分反映传感器网络对目标检测区域的覆盖情况,是无线传感器网络QoS指

标之一,文献[1-3]对区域覆盖进行了详细的分析。而在另外一些应用场景下,如入侵检测和目标跟踪,人们更加关心的是入侵目标移动路径的覆盖情况,这样的覆盖问题通常被称为路径覆盖(path coverage)。根据实际应用需求的不同,衡量路径覆盖的标准也不同,其中最常用的有以下两种:(1)路径满足 k 覆盖的平均比例,即目标沿任意路径移动时,该路径满足 k 覆盖的部分所占的比例。(2)路径满足 k 覆盖的概率,即目标沿任意路径移动时,该路径上的点全部满足 k 覆盖的概率。现有的关于路径覆盖的研究往往都是针对直线路径,这是因为在入侵者不知道网络中节点的位置信息时,往往会选择沿直线路径穿越检测区域,这样可以用最少的时间穿越检测区域,从而减小被发现的可能性。本文的研究也是基于这个假设,所以除非特殊声明,后

2009-11-06 收到,2010-06-29 改回

国家自然科学基金(60970137), 国家科技重大专项(2009ZX03006-001-02, 2009ZX03006-006)资助课题

通信作者: 李磊 simit.lilei@gmail.com

文所提到的路径覆盖都是指直线路径覆盖。针对以上两种覆盖标准,文献[4,5]分别在节点同构(Homogeneous)模型和节点异构(Heterogeneous)模型下对 2 维区域节点布设密度与路径满足 k 覆盖的平均比例之间的关系进行了分析,并给出计算表达式。文献[6]对节点布设密度与路径满足 1 覆盖的概率之间的关系进行了分析,并给出计算表达式,但是并没有给出 $k(k>1)$ 覆盖概率的分析。然而,路径 $k(k>1)$ 覆盖有着非常广泛的应用场景,比如说当网络用来进行目标跟踪时,为了达到定位的目的,往往要求 $k \geq 3$ ^[7,8]。另外文献[6]在分析时假设传感器节点的感知半径是相同的,而这一点在实际应用中是很难保证的。因此本文对节点布设密度与路径满足 $k(k \geq 1)$ 覆盖概率之间的关系进行了分析,并给出路径满足 $k(k \geq 1)$ 覆盖概率的理论下限。实验表明,在 k 值较小时,本文给出的理论下限与实际仿真结果比较接近。

本文的组织结构如下:第 2 节给出系统模型和本文所要解决的问题,第 3 节将 2 维区域的路径覆盖问题转化为 1 维线段覆盖问题,第 4 节给出 1 维直线段满足 k 覆盖的概率分析,第 5 节给出在 2 维区域内判定直线路径是否满足 k 覆盖的方法,第 6 节给出仿真结果,第 7 节总结全文。

2 系统模型和问题描述

本节首先给出系统模型,然后定义所要解决的问题。本文中“传感器节点”与“节点”含义相同。本文研究的无线传感器网络系统模型基于如下假设:

(1)无线传感器节点按泊松分布随机散布在面积为 A 的正方形监测区域。令 λ 表示节点的布设密度, N 表示监测区域的节点数。显然, N 服从以 λA 为期望的泊松分布。

(2)无线传感器节点为同构节点,节点的感知模型采用 0/1 模型,即:节点以概率 1 检测以其为中心、以 r 为半径的圆形检测区域(不包括圆上的点),这样的感知模型通常被称为泊松布尔模型(Poisson Boolean model)。

(3)本文用 $x_i(0 < i \leq N)$ 表示区域内的节点,其感知范围用 r_i 表示, r_i 的取值范围为 $(0, R]$, 概率密度函数用 $f(r_i)$ 表示,期望值用 β 表示。

本文研究的第 1 个问题表述如下:

问题 1 目标沿某直线路径 L 移动一段距离 s (假设 $s \gg R$, 且 $s < \sqrt{A}$), 求该路径满足 k 覆盖的概率。

3 问题转化

本节将路径覆盖问题转化为普通的 1 维线段覆盖问题。由于本文采用的是 0/1 感知模型,任意节点 $x_i(0 < i \leq N)$ 与路径 L 的距离小于其感知范围 r_i 时,都可以在 L 上覆盖一定区域,本文用 l_i 表示该区域的长度(见图 1, 不失一般性,假设 L 位于坐标系的横轴上),文献[5]给出了 l_i 的概率分布函数:

$$g(l) = \begin{cases} \frac{l}{4\beta} \int_{l/2}^R \frac{f(r)}{\sqrt{r^2 - (l/2)^2}} dr, & 0 \leq l \leq 2R \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

另外,所有与 L 的距离小于其感知范围 r_i 的节点 x_i 都在 L 上有一个映射点 y_i (如图 1 所示),文献[5]通过证明给出“ y_i 所形成的点过程是以 $2\lambda\beta$ 为期望值的泊松点过程(Poisson point process)”。这样,图 1 所示入侵路径问题可以转化为如下 1 维线覆盖问题:

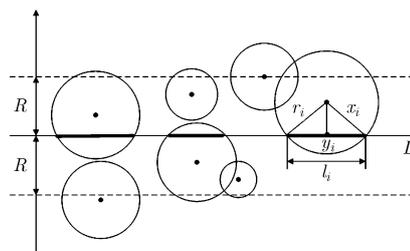


图 1 一条直线路径在 2 维无线传感器网络中的覆盖情况

问题 2 在已知线段 L 上以密度 $\lambda' = 2\lambda\beta$ 布设节点,节点的感知直径 l 的概率密度函数为 $g(l)$, 求该线段满足 k 覆盖的概率(见图 2)。

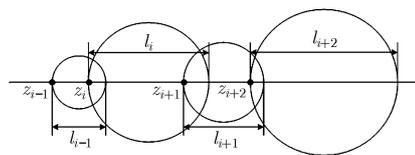


图 2 问题 2 给出的 1 维线覆盖示意图

由于问题 2 和问题 1 是等价的,所以问题 2 的解答显然适用于问题 1, 另外由于问题 2 也是一个普通的 1 维线覆盖问题,因此问题 2 的解答也适用于其它的 1 维线 k 覆盖问题,比如说弱栅栏覆盖(weak barrier coverage)^[9,10]。弱栅栏覆盖是指入侵者沿垂直于入侵边界的路线穿越带状检测区域时所引发的覆盖问题,由于该覆盖问题只与节点在水平方向的位置有关,因此同样可以转化为普通的 1 维线覆盖问题。

为方便后文的表述, 定义节点 y_i 的覆盖区域的左边界为起始点(starting point), y_i 的覆盖区域的右边界为结束点(ending point), 并用 z_i 表示节点 y_i 的覆盖区域的左边界(见图 2), 很显然, 这些起始点同样组成以 $2\lambda\beta$ 为期望的泊松点过程。

4 1 维线段满足 k 覆盖的概率建模分析

为了保证 1 维直线段满足 k 覆盖, 则要求该线段上的任意点都被至少 k 个节点覆盖, 一条线段上有无数个点, 因此 1 维线全覆盖的问题是一个连续域的问题, 为了计算 1 维直线段满足 k 覆盖的概率, 首先需要将该问题从连续域转换到离散域。

本文同文献[4,5]一样假设 $s \gg R$, 从而忽略掉路径边界效应对结果的影响。为了将该问题转换到离散域以便于计算, 首先给出如下定理:

定理 1 直线段 L 满足 k 覆盖的充分必要条件是 该线段上的所有起始点都至少被 k 个节点覆盖。

证明 必要性是很显然的, 如果该线段满足 k 覆盖, 那么这条线上所有的点都满足 k 覆盖, 当然也包括所有的起始点。

然后证明充分性。在 1 维线段上任取一点 u , 如果能够证明 u 为 k 覆盖, 则该线段满足 k 覆盖。假设 v 是 u 右边距离 u 最近的一个起始点, 为了保证点 v 为 k 覆盖, 则至少有 k 个覆盖区域的起始点处于 v 的左边, 且其结束点处于 v 的右方, 而 u 与 v 之间不存在起始点, 所以能够覆盖 v 的覆盖区域均能覆盖点 u , 因此点 u 满足 k 覆盖。这里, 一个“覆盖区域”是指一个节点在目标直线上的覆盖区域。

综合以上两点, 该定理得以证明。 证毕

假设 2 维区域内共有 n 个节点与路径 L 的距离小于其感知半径, 根据第 2 节的系统模型, n 服从以 $\lambda s = 2\lambda\beta s$ 为期望的泊松分布, 在 s 足够大的情况下, n 近似取值 $2\lambda\beta s$ 。如果用 $A_k(i)$ 表示第 i 个起始点 $z_i (1 \leq i \leq n)$ 被至少 k 个节点覆盖到这一事件, 则根据定理 1, L 满足 k 覆盖的概率可以用下式表示:

$$P_r[\bigcap_{i=1}^n \{z_i \text{ is at least } k\text{-covered}\}] = P_r[\bigcap_{i=1}^n A_k(i)] \quad (2)$$
 其中 $P_r[T]$ 表示事件 T 发生的概率。在起始点所形成的泊松点过程下, 任一起始点满足 k 覆盖的概率 $P_r[A_k(i)]$ 可以用下式表示:

$$P_r[A_k(i)] = 1 - \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda'a)^j}{j!} e^{-\lambda'a} \quad (3)$$

其中 $a = E(l)$, 式(3)的推导可以参见文献[1]。尽管可以得出某一个点满足 k 覆盖的概率, 但是很显然 $A_k(i), 1 \leq i \leq n$, 之间并不一定具有相互独立的性质, 因此很难为式(2)求得一个准确的计算形式。本文利用 FKG 不等式^[1]来计算式(2)的下限, FKG 不等式

是指在泊松布尔模型下, 如果有事件 B_1 和 B_2 随着节点密度的增加都是增函数或都是减函数, 则有如下性质:

$$P_r[B_1 \cap B_2] \geq P_r[B_1]P_r[B_2] \quad (4)$$

由式(3)可以看出, $A_k(i), 1 \leq i \leq n$, 是节点密度的增函数, 则利用 FKG 不等式有

$$\begin{aligned} P_r[\bigcap_{i=1}^n A_k(i)] &\geq \prod_{i=1}^n P_r[A_k(i)] \\ &= \left(1 - \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda'a)^j}{j!} e^{-\lambda'a}\right)^n \\ &\approx \left(1 - \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(2\lambda\beta a)^j}{j!} e^{-2\lambda\beta a}\right)^{2\lambda\beta s} \end{aligned} \quad (5)$$

可以利用式(5)计算长度为 s 的直线段满足 k 覆盖的概率下限, 特别地, 当 $k=1$ 时, 有如下表达式:

$$\begin{aligned} P_r[\bigcap_{i=1}^n A_1(i)] &\geq (1 - e^{-\lambda'a})^n \\ &= [(1 - e^{-\lambda'a})^{\exp(\lambda'a)}]^{n \cdot \exp(-\lambda'a)} \approx \exp(-\lambda'se^{-\lambda'a}) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)的最后一步推导是根据 $\lim_{t \rightarrow 0} (1-t)^{1/t} = e^{-1}$ 而来的, a 为某一特定大小的常数, 所以当 λ' 足够大时, $e^{-\lambda'a}$ 趋向于 0, 所以有 $(1 - e^{-\lambda'a})^{\exp(-\lambda'a)} \approx e^{-1}$ 。其中, 式(6)所推导出的结果与文献[1]给出的结果相同, 而且本文所使用的方法可以很容易地推广到 $k > 1$ 的情况。

5 路径 k 覆盖的判定方法

在给出仿真结果之前, 首先对如何在 2 维区域判定一条直线路径是否满足 k 覆盖的方法做一些说明。由于直线路径在 2 维坐标系中可以是任意走向的, 因此, 为了简化计算的复杂度, 本文首先将其映射到横轴, 然后通过判定映射后的线段是否满足 k 覆盖的方法来判定目标路径能否满足 k 覆盖。具体流程如下:

首先以正方形布设区域的左下角为原点建立坐标系, 假设直线路径的两个端点的坐标分别为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$, 不失一般性, 假设 $X_1 < X_2$ 。为方便描述, 本节用 $[\alpha, \varphi]$ 表示点 $(\alpha, 0)$ 与点 $(\varphi, 0)$ 之间的线段。则线段 $[X_1, X_2]$ 就是目标路径在横轴的投影。

然后找出所有与目标路径距离小于其感知半径的节点, 假设共有 Num 个, 并计算这些节点在目标路径上的覆盖区域的两个端点的坐标值, 分别记这两个端点的横坐标为 $LP_i, RP_i, 1 \leq i \leq \text{Num}$ 。不失一般性, 同样假设 $LP_i < RP_i$, 如果 $LP_i < X_1$, 则 $LP_i = X_1$, 如果 $RP_i > X_2$, 则 $RP_i = X_2$ 。则 $[LP_i, RP_i], \forall 1 \leq i \leq \text{Num}$, 就是节点在目标路径上的覆盖区域在横轴上的投影, 显然, 如果 $[LP_i, RP_i], \forall 1 \leq i \leq \text{Num}$, 可以 k 覆盖线段 $[X_1, X_2]$, 则目标路径满足 k 覆盖, 否则目标路径不满足 k 覆盖(如图 3 所示)。

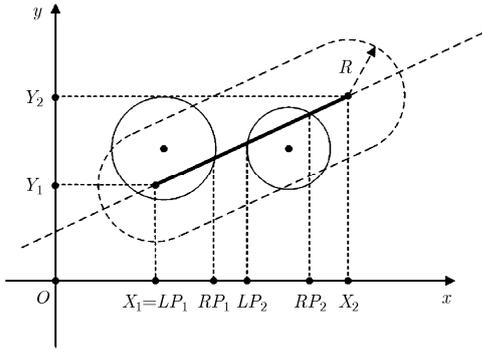


图 3 路径覆盖度判定方法示意图

判定 $[X_1, X_2]$ 是否满足 k 覆盖的具体方法如下：因为点 $(LP_i, 0)$ ， $(RP_i, 0)$ ， $\forall 1 \leq i \leq \text{Num}$ ，和端点 $(X_1, 0)$ ， $(X_2, 0)$ 将线段 $[X_1, X_2]$ 分成 $2 \times \text{Num} + 1$ 个小线段(包括长度为 0 的小线段)，如果这些小线段全部满足 k 覆盖，则 $[X_1, X_2]$ 满足 k 覆盖。因此定义变量 Cov_degree 记录当前小线段的覆盖度，并将其初始值设为 0。从 X_1 开始检测每个小线段的覆盖度，如果当前小线段的右端点属于集合 $\{LP_i, 1 \leq i \leq \text{Num}\}$ ，则下一小段的 Cov_degree 加 1，否则减 1。一旦出现 $\text{Cov_degree} < k$ ，并且当前段的长度不为 0，则说明 $[X_1, X_2]$ 不满足 k 覆盖。

下面以图 3 为例对上述方法进行说明， $[X_1, X_2]$ 在图 3 中被分成了 5 段，分别是 $[X_1, LP_1]$ ， $[LP_1, RP_1]$ ， $[RP_1, LP_2]$ ， $[LP_2, RP_2]$ ， $[RP_2, X_2]$ 。 Cov_degree 的初始值设置为 0，所以 $[X_1, LP_1]$ 的覆盖度为 0，但是由于 $[X_1, LP_1]$ 的长度为 0，所以不影响路径覆盖度的判定。线段 $[X_1, LP_1]$ 的右端点 LP_1 属于集合 $\{LP_i, 1 \leq i \leq 2\}$ ，所以 $[LP_1, RP_1]$ 的覆盖度为 1，同理可以求得其余各小段的覆盖度。显然，由于 $[RP_1, LP_2]$ 和 $[RP_2, X_2]$ 的覆盖度为 0，图 3 的目标路径不满足 1 覆盖。本文提出的映射检测法可以使路径覆盖度的判定摆脱 2 维坐标系的影响，从而简化计算的复杂度，同理也可以把路径映射到纵轴进行判定。

6 仿真结果

为了验证式(5)的正确性，本文采用 MATLAB 进行仿真，并将实验统计结果与理论分析结果进行比较。在仿真实验中， λ 以 0.2 为步长由 0 变化到 6，在每次实验中，节点按泊松分布随机布设在 $A=100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的正方形区域，然后在其中随机地选择长度 $s=30 \text{ m}$ 的直线路径，并检测其是否满足 k 覆盖。仿真过程中，为了避免区域边界效应的影响，在选择直线路径的两个端点时使它们与边界的距离大于 R 。针对每个 λ ，该实验重复 300 次，并按下式计算

路径满足 k 覆盖的概率：

$$P_r[k\text{-coverage}] = \frac{\text{Number of times achieving } k\text{-coverage}}{300} \quad (7)$$

下面分别给出节点感知半径服从不同概率分布时对第 4 节推导的理论分析结果的仿真实验。

6.1 节点感知半径相等

假设所有节点的感知半径都相等，即：感知半径都是 R ，这种感知模型也是覆盖问题的理论分析中使用最广泛的一种。根据第 2 节的定义有 $\beta=R$ ， l_i 服从如下概率分布：

$$g(l) = \frac{l}{4R\sqrt{R^2 - (l/2)^2}}, \quad 0 \leq l \leq 2R \quad (8)$$

可以很容易地求得 $a=E(l)=\pi R/2$ ，将 β 和 a 的值代入式(5)得到如下式子

$$P_r[\bigcap_{i=1}^n A_k(i)] \geq \left(1 - \sum_{j=0}^{k-1} \frac{(\lambda\pi R^2)^j}{j!} e^{-\lambda\pi R^2} \right)^{2\lambda s R} \quad (9)$$

图 4 给出 $R=1 \text{ m}$ 时路径满足 k 覆盖的概率随 λ 的变化趋势。

6.2 节点感知半径服从均匀分布

假设节点的感知半径在 $[R/2, R]$ 的区间内服从均匀分布，则有 $\beta=3R/4$ ， l_i 服从概率分布：

$$g(l) = \begin{cases} \frac{2l}{3R^2} \ln \frac{2R + \sqrt{(2R)^2 - l^2}}{R + \sqrt{R^2 - l^2}}, & 0 \leq l \leq R \\ \frac{2l}{3R^2} \ln \frac{2R + \sqrt{(2R)^2 - l^2}}{l}, & R < l \leq 2R \end{cases}$$

$a=E(l)$ 的具体数值可以用数值计算方法得到，图 4 给出 $R=1.5 \text{ m}$ 时路径满足 k 覆盖的概率随 λ 的变化趋势。

从图 4 和图 5 可以看出，在 k 值较小的时候，本文所给出的理论下界与实际仿真结果的差距较小。但是随着 k 值变大，理论值与实际仿真值的差距变大，这是因为随着 k 的变大，相邻 $A_k(i), 1 \leq i \leq n$ 的相关性也在变大，使用 FKG 不等式所带来的误差也随之变大。另外，随着覆盖概率的变大，理论值与仿真值之间的差距呈现变小的趋势，考虑到在实际布设情况下，往往要求较高的 k 覆盖概率，且 k 值的设置不会很大，本文给出的分析结果对实际网络布设有较为重要的指导意义。

图 4 和图 5 中分析结果与仿真结果偶尔有交叉，尤其是在 $k=1$ 和 $k=2$ 时，这是由实验样本的随机性及样本空间有限引起的，随着 k 的变大，由 FKG 不等式所带来的误差也随之变大，交叉也越来越少。

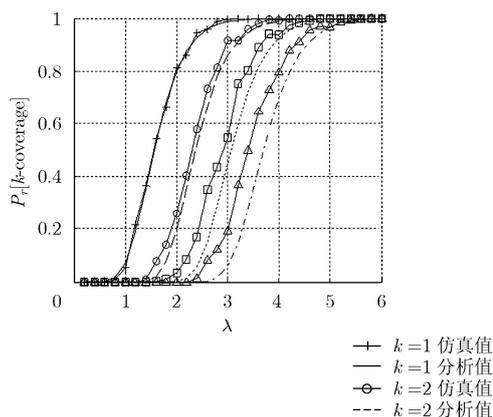


图 4 节点的感知半径相等时路径满足 k 覆盖的概率随 λ 的变化趋势

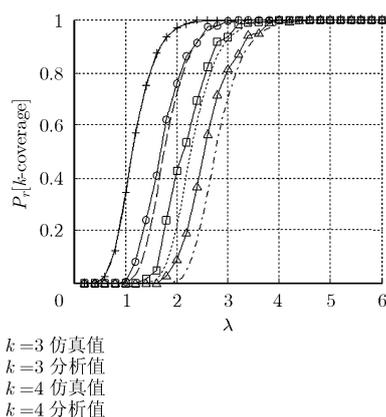


图 5 节点的感知半径服从均匀分布时路径满足 k 覆盖的概率随 λ 的变化趋势

7 结论

本文对 2 维无线传感器网络中直线路径满足 k 覆盖的概率进行了建模分析, 并给出其理论下界。给定路径满足 k 覆盖所需要的概率, 由该下界求得的节点密度可以保证路径以不低于给定的概率满足 k 覆盖, 而且从仿真结果中可以看出, 在 k 值较小时, 由该下界求得的节点密度与使路径以给定概率满足 k 覆盖所需的最小节点密度非常接近, 因此本文的结果对网络规模的设置有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Hall P. Introduction to the Theory of Coverage Processes[M]. New York: John Wiley & Sons, 1988: 79-119.
- [2] Shakkottai S, Srikant R, and Shroff N. Unreliable sensor grids: coverage, connectivity and diameter[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM'03, San Francisco, CA, USA, Mar. 30-Apr. 3, 2003: 1073-1083.
- [3] Kumar S, Lai T H, and Balogh J. On k -coverage in a mostly sleeping sensor network[C]. Proceedings of ACM MOBICOM'04, Philadelphia, PA, USA, Sept. 26 - Oct. 1, 2004: 144-158.
- [4] Ram S S, Manjunath D, Iyer S K, and Yogeshwaran D. On the path coverage properties of random sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(5): 494-506.
- [5] Manohar P, Ram S S, and Manjunath D. Path coverage by a sensor field: the nonhomogeneous case[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2009, 5(2): 1-26.
- [6] Harada J, Shioda S, and Saito H. Path coverage property of randomly deployed sensor networks with finite communication ranges[C]. Proceedings of IEEE ICC'08, Beijing, China, May 19-23, 2008: 2221-2227.
- [7] Goldenberg D K, Bihler P, and Cao M, et al. Localization in sparse networks using sweeps[C]. Proceedings of ACM MOBICOM'06, Los Angeles, CA, USA, Sep. 23-29, 2006: 110-121.
- [8] Sheu J, Hu W, and Lin J. Distributed localization scheme for mobile sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4): 516-526.
- [9] Kumar S, Lai T H, and Arora A. Barrier coverage with wireless sensors[C]. Proceedings of ACM MOBICOM'05, Cologne, Germany, Aug. 28-Sept. 2, 2005: 284-298.
- [10] Saipulla A, Westphal C, Liu B, and Wang J. Barrier coverage of line-based deployed wireless sensor networks[C]. Proceedings of IEEE INFOCOM'09, Rio de Janeiro, Brazil, Apr. 19-25, 2009: 127-135.
- [11] Meester R and Roy R. Continuum Percolation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 31-34.

李 磊: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络。

张宝贤: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线自组织与传感器网络、计算机网络协议设计与分析等。

黄河清: 男, 1981 年生, 助理研究员, 研究方向为无线传感器网络。

刘海涛: 男, 1968 年生, 博士生导师, 研究员, 研究方向为无线传感器网络、信号处理、小卫星通信技术等。