

# 有向传感器网络覆盖预测模型与数量估计\*

刘志敏<sup>1</sup>, 贾维嘉<sup>2</sup>, 王国军<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410205)

<sup>2</sup>(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

<sup>3</sup>(广州大学 计算机科学与教育软件学院, 广东 广州 510006)

通讯作者: 王国军, E-mail: csgjwang@csu.edu.cn



**摘要:** 有向传感器网络由大量有向传感器节点组成, 不同于有着全向感知范围的全向传感器网络, 有向传感器网络的感知范围是一个扇形区域. 研究了有向传感器网络的覆盖预测模型及数量估计问题. 针对节点随机部署的应用环境, 在初始部署网络时, 为满足一定的覆盖率要求, 在充分考虑了目标区域边界效应的基础上, 提出了一种基于概率的网络覆盖预测模型. 基于该模型, 对初始部署的节点数目进行了预测. 通过仿真实验, 对结果进行了分析. 结果表明: 利用所提模型得到的理论值与实验真实值拟合较好, 且更符合实际应用需求.

**关键词:** 有向传感器网络; 网络覆盖率; 覆盖控制; 感知区域; 节点预测

**中图法分类号:** TP393

中文引用格式: 刘志敏, 贾维嘉, 王国军. 有向传感器网络覆盖预测模型与数量估计. 软件学报, 2016, 27(12): 3120-3130. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4949.htm>

英文引用格式: Liu ZM, Jia WJ, Wang GJ. Coverage prediction model and number estimation for directional sensor networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016, 27(12): 3120-3130 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4949.htm>

## Coverage Prediction Model and Number Estimation for Directional Sensor Networks

LIU Zhi-Min<sup>1</sup>, JIA Wei-Jia<sup>2</sup>, WANG Guo-Jun<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410205, China)

<sup>2</sup>(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

<sup>3</sup>(School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Recently, directional sensor networks (DSN) have received a great deal of attention due to their wide range of applications. Unlike conventional omni-directional sensors that always have an omni-angle of sensing range, a DSN is composed of many directional sensors which have a limited angle of sensing range due to technical constraints or cost considerations. This paper studies coverage prediction and number estimation model for directional sensor networks. Aiming at better guiding initial deployment of DSN, a novel probability-based networks coverage prediction model with the boundary effects named PCPMB is proposed. Simulation results show that the proposed model outperforms the previous published model without boundary effect.

**Key words:** directional sensor network; coverage; coverage control; sensing range; node prediction

随着无线传感器网络在环境监测、战场监控、农业监测等方面的广泛应用, 近几年来, 越来越多的研究者从事相关研究<sup>[1,2]</sup>. 无线传感器网络分为全向传感器网络和有向传感器网络, 全向传感器网络通过多跳通信的方式组成网络, 协作地对周边环境进行简单的数据采集(如温度、湿度等)<sup>[3]</sup>, 提供的监测能力非常有限. 而监测环境的复杂多变, 迫切需要将信息量丰富的音频、图像、视频等信息引入到以无线传感器网络为基础的环境监测活

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61272151, 61472451, 61532013)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61272151, 61472451, 61532013)

收稿时间: 2015-07-14; 修改时间: 2015-11-02; 采用时间: 2015-12-21

动中,实现精准的环境监测.具有更强通信、处理能力的有向传感器网络(视频传感器网络等)应运而生<sup>[4]</sup>.

覆盖问题是当前有向传感器网络的基本问题,反映了网络对环境的监测质量.可将其分为以下几类:区域覆盖、目标覆盖、栅栏覆盖.从覆盖质量的角度,又可分为  $K$  覆盖、全视域覆盖等<sup>[5,6]</sup>.目前,越来越多的学者从事相关研究,并取得了一定成果.Ma 等人<sup>[7]</sup>针对视频传感器网络的目标覆盖控制问题,提出了一种不可旋转的扇形感知模型.Tao 等人<sup>[8]</sup>扩展了视频传感器网络扇形感知模型,提出一种可旋转的扇形感知模型,并利用凸理论及虚拟势场理论研究网络覆盖增强问题.文献[9]提出基于重覆盖质心及有效质心的虚拟势场覆盖优化算法,并考虑了边界节点覆盖问题.文献[10]提出一种覆盖增强及节点调度算法(overlap-sense ratio coverage-enhancing algorithm,简称 OSRCEA),利用重覆盖率调整节点方向实现覆盖增强,但同样存在边界覆盖丢失问题.王晓晨等人<sup>[11]</sup>针对节点落于区域边界造成覆盖损失等问题,研究了考虑边界区域的覆盖增强算法.文献[12]针对目标覆盖问题,提出利用分布式学习自动机解决连通目标覆盖问题.文献[13]针对最小暴露路径问题,提出基于质心的 Voronoi 图算法.

当网络初始随机部署时,为满足确定的覆盖率要求,研究覆盖预测模型及数量估计问题是覆盖问题的基础,它可以更好地指导初始部署,从而避免存在过多冗余节点.针对全向传感器网络中的覆盖边界效应及连通问题,Xing 等人<sup>[14]</sup>研究了无线传感器网络的覆盖预测问题,将目标区域进行划分,提出基于概率的覆盖及连通估计模型.Ma 等人<sup>[7]</sup>提出了利用概率模型对网络初始部署进行预测,建立了初始覆盖率  $P_{cov}$ 、节点半径  $r$ 、节点数量  $N$ 、节点传感角度  $\alpha$ 、目标区域  $\Omega$  之间的关系(coverage prediction model without boundary effect,简称 CPMOB).

$$P_{cov} = 1 - \left(1 - \frac{\alpha r^2}{\Omega}\right)^N \quad (1)$$

由公式(1)可知:目标区域内网络覆盖率至少达到  $P_{cov}$  时,所需部署的节点数为  $N \geq \frac{\ln(1 - P_{cov})}{\ln(\Omega - \alpha r^2) - \ln \Omega}$ .

Liu 等人<sup>[15]</sup>证明了有向传感器网络在均匀随机部署中,目标区域中某个子区域被  $K$  个节点感知到的概率符合泊松分布:

$$P[N(A) = k] = e^{-\lambda \mu(s)} \times \frac{(\lambda \mu(s))^k}{k!} \quad (2)$$

其中,  $A$  表示目标区域  $\Omega$  的某个子区域,  $\lambda$  为节点密度,即单位面积内节点数目,  $\mu(s)$  为节点感知面积  $\alpha r^2$ ,  $k$  为目标区域内监测到任意一点的节点个数,此模型可用于多重覆盖中.

Zhao 等人<sup>[16]</sup>根据文献[15]的模型,研究了无线多媒体传感器网络在多种感知模型下的覆盖预测问题,并建立了目标区域中任意一点至少被 1 个节点所感知的概率模型(node density model without boundary effect,简称 NDMOB),证明了当节点感知区域远小于目标区域时,CPMOB 和 NDMOB 结果相同.文献[17]研究了异构有向传感器网络中的覆盖估计问题,提出一种异构覆盖预测模型.

以上模型均忽略了目标区域的边界问题,认为节点感知区域均在目标区域内.实际应用环境中,网络随机初始部署时,经常会出现部分节点的感知区域落在目标区域外面,从而导致 Zhao 等人<sup>[10]</sup>的模型理论值与实验真实值误差较大,节点规模预测不够准确,不能较好地指导部署.

本文针对随机部署的有向传感器网络,为满足确定初始覆盖率要求,更好地预测初始部署的网络规模,当网络随机初始部署时,充分考虑了部分节点落在边界区域的情况,创新性地提出了一种基于概率的网络覆盖预测模型(probability-based coverage prediction model with boundary effect,简称 PCPMB),并对 PCPMB, CPMOB 及 NDMOB 模型理论值及实验真实值进行比较分析.

## 1 网络感知模型与相关定义

### 1.1 有向传感器网络感知模型

本文假设所研究的有向传感器节点均具有如下特点.

**假设 1.** 网络是同构的,所有节点具有相同的传感视角及感知半径,且知道各自的位置信息及主感知方向等

信息.

**假设 2.** 节点随机部署在边长为  $L$  的正方形目标区域内,且节点位置不可移动.

与全向传感器网络不同,有向传感器网络的感知区域为可旋转的扇形区域,用五元组  $\langle S_i, \alpha, r, V_i, \beta_i \rangle$  表示感知模型,如图 1 所示.其中,  $S_i(x_i, y_i)$  表示节点  $S_i$  的位置坐标,  $r$  表示节点  $S_i$  的感知半径,  $V_i$  表示节点的感知方向,  $2\alpha$  表示节点  $S_i$  的视角,  $\alpha$  为传感角度,  $\beta_i$  表示  $V_i$  与水平  $X$  轴之间的夹角,称为方向角,  $0 \leq \beta_i \leq 2\pi$ .

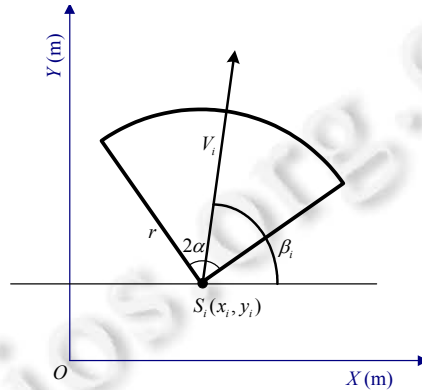


Fig.1 Directional sensing model

图 1 有向感知模型

## 1.2 相关定义

为方便描述目标区域的边界问题,定义如下.

### 1.2.1 感知区域和可能感知区域

在目标区域内,节点在某一时刻所监测到的区域即为感知区域,通过旋转节点所监测到的整个圆即为可能感知区域,如图 2 所示.

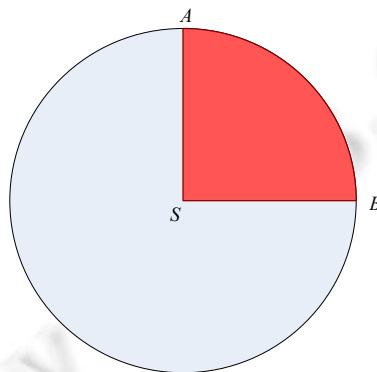


Fig.2 Sensing area and possible sensing area

图 2 感知区域与可能感知区域

### 1.2.2 内区域、边角区域与边区域

如图 3 所示.

- 在目标区域  $\Omega$  中,与边界距离大于节点感知半径的点构成的区域  $\Omega_1$ ,则称  $\Omega_1$  为内区域;
- 位于目标区域 4 个边角的区域  $\Omega_2$  称为边角区域;
- 除内区域及边角区域外的区域  $\Omega_3$  称为边区域.

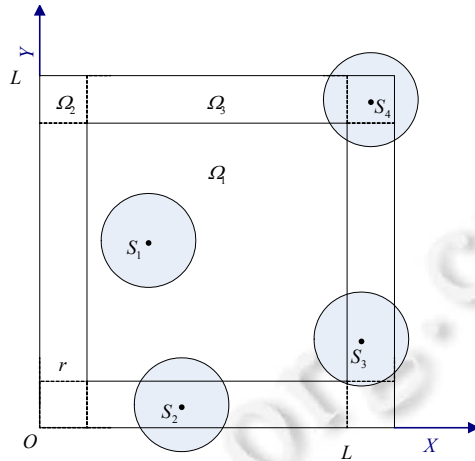


Fig.3 Dividing diagram of target area and node  
图3 目标区域与节点划分示意图

1.2.3 内节点、边角节点与边节点

当随机部署节点时,落于内区域的节点称为内节点.相应的,落于边角区域的节点称为边角节点,落于边区域的节点称为边节点,如图3所示, $S_1$ 为内节点, $S_2$ 和 $S_3$ 为边节点, $S_4$ 为边角节点.

2 基于概率的覆盖预测模型及数量估计

2.1 覆盖预测及数量估计

在均匀随机部署节点的应用场景中,目标区域中某个子区域被  $k$  个节点感知到的概率符合泊松分布<sup>[9]</sup>.因为  $\mu(A) = \alpha r^2 = \pi r^2 \times \frac{\alpha}{\pi}$ , 现设  $E(S) = \pi r^2$ , 即,节点的可能感知区域.  $P = \frac{\alpha}{\pi}$ , 即感知区域在可能感知区域中的比例. 则公式(2)可表示为

$$P[N(A) = k] = e^{-\lambda \times E(S) \times P} \times \frac{(\lambda \times E(S) \times P)^k}{k!} \tag{3}$$

针对随机部署的有向传感器网络,为满足初始覆盖率要求,更好地预测初始部署的节点规模,当随机初始部署时,充分考虑部分节点落在边界的情况,应将节点的可能感知区域落在目标区域外部的部分去掉,从而得出较为准确的覆盖预测模型.为了方便求解,将目标区域划分为内区域、边区域与边角区域,如图3所示.当随机部署网络时,部分节点将落在内区域内,部分节点位于边区域及边角区域内.根据全概公式,初始部署后网络的覆盖率为

$$E(S) = P(\Omega_1)E(\Omega_1) + P(\Omega_2)E(\Omega_2) + P(\Omega_3)E(\Omega_3) \tag{4}$$

其中, $P(\Omega_1)$ , $P(\Omega_2)$ 和 $P(\Omega_3)$ 分别表示节点落在内区域 $\Omega_1$ 、边角区域 $\Omega_2$ 和边区域 $\Omega_3$ 的概率, $E(\Omega_1)$ 表示内节点的可能感知区域面积期望值, $E(\Omega_2)$ 表示边角节点的可能感知区域面积期望值, $E(\Omega_3)$ 表示边节点的可能感知区域面积期望值.

如图3所示,由于节点是随机部署在目标区域 $\Omega$ 中,且服从均匀分布,因此可求出节点落在内区域、边角区域和边区域的概率分别为

$$P(\Omega_1) = \frac{S_{\Omega_1}}{S_{\Omega}} = \frac{(L-2r)^2}{L^2} \tag{5}$$

$$P(\Omega_2) = \frac{S_{\Omega_2}}{S_{\Omega}} = \frac{4r^2}{L^2} \tag{6}$$

$$P(\Omega_3) = \frac{S_{\Omega_3}}{S_{\Omega}} = \frac{4r(L-2r)}{L^2} \tag{7}$$

当节点位于内区域时,节点的感知区域全部落在目标区域内,将其视为无边界效应问题.可得内节点的可能感知区域面积期望值.

$$E(\Omega_1) = \pi r^2 \tag{8}$$

如图 4 所示,节点  $s(x,y)$  是边角节点,可得到此时节点  $s(x,y)$  的可能感知区域在目标区域内的面积  $C_{\Omega_2}$  为

$$C_{\Omega_2} = S_{oAsE} + S_{\Delta ABs} + S_{\Delta EDs} + S_{\widehat{BCD}} = xy + \frac{y\sqrt{r^2-y^2}}{2} + \frac{x\sqrt{r^2-x^2}}{2} + \left( \frac{\pi/2 + \arcsin(y/r) + \arcsin(x/r)}{2\pi} \right) \pi r^2 \tag{9}$$

因此,可以计算得到边角节点的可能感知区域面积期望值  $E(\Omega_2)$  为

$$E(\Omega_2) = \frac{1}{r^2} \int_0^r \int_0^r C_{\Omega_2} dx dy = \frac{1}{r^2} \int_0^r \left[ xy + \frac{y\sqrt{r^2-y^2}}{2} + \frac{x\sqrt{r^2-x^2}}{2} + \left( \frac{\pi/2 + \arcsin\left(\frac{y}{r}\right) + \arcsin\left(\frac{x}{r}\right)}{2} \right) r^2 \right] dx dy \tag{10}$$

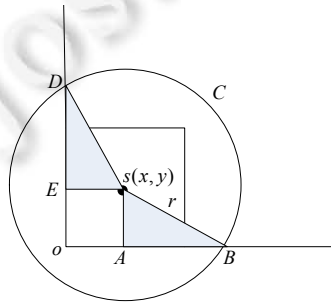


Fig.4 Possible sensing area of corner node

图 4 边角节点可能感知区域

如图 5 所示,  $s_1(x,y)$  和  $s_2(x,y)$  均为边节点,当边节点落于边区域且与边区域左右边界距离小于  $r$  时,如图 5 中边节点  $s_1(x,y)$ .可得到此时节点  $s_1(x,y)$  的可能感知区域在目标区域内的面积  $C_{\Omega_3}^1$  为

$$\begin{aligned} C_{\Omega_3}^1 &= S_{\Delta_4 B_1 s_1} + S_{\Delta E_1 D_1 s_1} + S_{\widehat{A_1 s_1 E_1}} + S_{\widehat{B_1 C_1 D_1}} \\ &= y\sqrt{r^2-y^2} + x\sqrt{r^2-x^2} + \left( \frac{2\pi - 2\arccos(y/r) - 2\arccos(x/r)}{2\pi} \right) \pi r^2 \\ &= y\sqrt{r^2-y^2} + x\sqrt{r^2-x^2} + (\pi - \arccos(y/r) - \arccos(x/r)) r^2 \end{aligned} \tag{11}$$

当边节点落于边区域且与边区域左右边界距离大于等于  $r$  时,如图 5 中边节点  $s_2(x,y)$ .可得此时节点  $s_2(x,y)$  的可能感知区域在目标区域内的面积  $C_{\Omega_3}^2$  :

$$C_{\Omega_3}^2 = \pi r^2 - (S_{\widehat{s_2 A_2 B_2 C_2}} - S_{\Delta A_2 s_2 C_2}) = \frac{1}{2} r^2 (2\pi - 2\arccos(y/r) + \sin(2\arccos(y/r))) \tag{12}$$

因此,可以计算得到边节点的可能感知区域面积期望值  $E(\Omega_3)$  为

$$E(\Omega_3) = \frac{1}{(L-2r)r} \left( 2 \int_0^r \int_0^r C_{\Omega_3}^1 dx dy + \int_r^{L-3r} \int_r^{L-3r} C_{\Omega_3}^2 dx dy \right) \tag{13}$$

根据以上推理,当节点随机部署在目标区域内时,考虑到边界效应影响,目标区域中某个子区域被  $k$  个节点感知到的概率为

$$P[N(\Omega) = k] = e^{-\lambda \times E(S) \times P} \times \frac{(\lambda \times E(S) \times P)^k}{k!} \tag{14}$$

其中,  $E(S)=P(\Omega_1)E(\Omega_1)+P(\Omega_2)E(\Omega_2)+P(\Omega_3)E(\Omega_3)$ ,  $P=\frac{\alpha}{\pi}$ ;  $\lambda$  为节点密度, 即单位面积内节点数目;  $k$  为目标区域内监测到任意一点的节点个数. 与 NDMOB 模型一样, 此模型可用于多重覆盖问题. 现以一重覆盖为例, 得出覆盖预测及数量估计公式. 已知考虑边界效应的节点可能感知区域面积期望值为  $E(S)$ , 求目标区域  $\Omega$  中任意一点至少被 1 个节点感知的概率为

$$P_{cov}=P[N(\Omega)\geq 1]=1-P[N(\Omega)=0]=1-e^{-\lambda\times E(S)\times P} \tag{15}$$

$$\lambda = -\frac{\ln(1-P_{cov})}{E(S)\times P} \tag{16}$$

由式(15)、式(16)可知: 当要求目标区域内网络覆盖率至少达到  $P_{cov}$  时, 所需部署的节点数为

$$N=\Omega\lambda \tag{17}$$

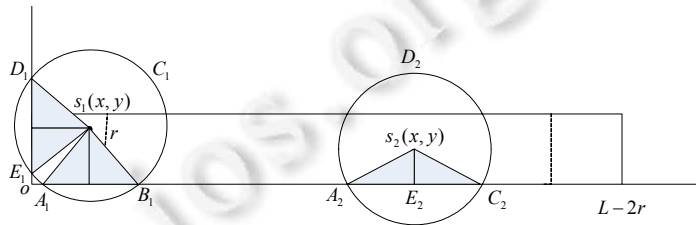


Fig.5 Possible sensing area of side node  
图 5 边节点可能感知区域

### 2.2 模型概率属性

**命题 1.**  $P_{cov}=1-e^{-\lambda\times E(S)\times P}$  满足概率属性

证明: 当没有节点落在目标区域时, 即  $\lambda\rightarrow 0$ , 于是可得:

$$\lim_{\lambda\rightarrow 0} P_{cov} = \lim_{\lambda\rightarrow 0} (1 - e^{-\lambda\times E(S)\times P}) = 0.$$

当整个目标区域布满节点时, 即  $\lambda\rightarrow\infty$ , 可得:

$$\lim_{\lambda\rightarrow\infty} P_{cov} = \lim_{\lambda\rightarrow\infty} (1 - e^{-\lambda\times E(S)\times P}) = 1.$$

由于  $e^{-\lambda\mu(s)}$  是  $\lambda$  的单调减函数, 于是,  $P_{cov}=1-e^{-\lambda\times E(S)\times P}$  是  $\lambda$  的单调增函数, 因此可得:  $0\leq P_{cov}\leq 1$ . □

**命题 2.** 当节点感知区域远小于目标区域时, 即, 近似目标区域不存在边界效应, 则 PCPMB 与 NDMOB 的结果相同.

证明: PCPMB 与 NDMOB 的比值为:  $f = \frac{1 - e^{-\lambda\times E(S)\times P}}{1 - e^{-\lambda\mu(S)}}$ .

由于  $\mu(S) = \alpha r^2 = \pi r^2 \times \frac{\alpha}{\pi}$ , 现设  $E(S') = \pi r^2$ , 即, 节点的可能感知区域;  $P = \frac{\alpha}{\pi}$ , 即, 感知区域在可能感知区域中

的比例, 与 PCPMB 模型中的  $P$  相同. 即  $f$  表示为:  $f = \frac{1 - e^{-\lambda\times E(S)\times P}}{1 - e^{-\lambda\mu(S)}} = \frac{1 - e^{-\lambda\times E(S)\times P}}{1 - e^{-\lambda\times E(S')\times P}}$ .

当节点感知区域远小于目标区域时, 近似目标区域不存在边界效应. 边节点、节角节点的可能感知区域面积期望值与内节点的可能感知区域面积期望值近似相等, 即:  $E(\Omega_1)\sim E(\Omega_2)\sim E(\Omega_3)=\pi r^2$ .

可知:

$$E(S) = P(\Omega_1)E(\Omega_1) + P(\Omega_2)E(\Omega_2) + P(\Omega_3)E(\Omega_3) \cong \frac{(L-2r)^2}{L^2} \times \pi r^2 + \frac{4r^2}{L^2} \times \pi r^2 + \frac{4r(L-2r)}{L^2} \times \pi r^2 = \pi r^2.$$

于是可得:

$$f = \frac{1 - e^{-\lambda\times E(S)\times P}}{1 - e^{-\lambda\times E(S')\times P}} \sim 1.$$

即证明了命题 2 成立. □

实验验证如图 6 所示,横坐标表示目标区域边长  $L$  与节点感知半径  $r$  的比值,纵坐标表示 PCPMB 与 NDMOB 所得覆盖率比值.

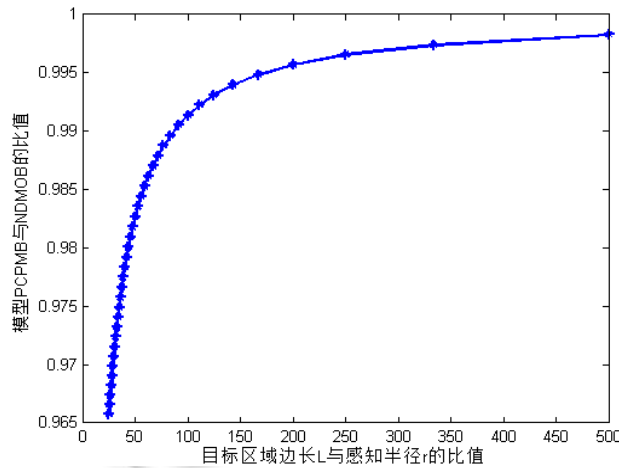


Fig.6 Comparison between PCPMB and NDMOB

图 6 PCPMB 和 NDMOB 近似比较

### 3 模型性能分析与评价

本实验在 Windows 7 环境下,利用 matlab 7.0 进行仿真,并分析了 CPMOB,NDMOB 及 PCPMB 之间的性能,验证了 PCPMB 跟实际部署情况更加符合,准确性更好.实验仿真参数见表 1.

Table 1 Experimental parameters

表 1 实验参数

参数名称	参数取值
目标区域边长 $L$	500m, 600m, 700m
区域覆盖率 $P$	[0,1]
节点数量 $N$	[50,280]
感知半径 $r$	[30,100]
传感角度 $\alpha$	[30°,60°]

#### 3.1 覆盖预测分析

通过一系列仿真实验来说明 3 个主要参数对 CPMOB,NDMOB 及 PCPMB 的影响,分别是:节点规模、感知半径、节点传感角度.针对此 3 个参数,本节将对模型所得理论覆盖率进行比较,并与实验真实覆盖率进行比较,以此判断模型的准确性.

为更加清晰地比较模型理论结果与实验真实覆盖率之间的近似程度,本实验定义覆盖误差率(coverage error rate,简称 CER)的概念,即

$$CER = \frac{\text{TheoreticalResults} - \text{ExperimentalResults}}{\text{ExperimentalResults}}$$

通过反复对随机部署的有向传感器网络进行仿真,并计算其覆盖率,本实验中所得的实验真实覆盖率为 30 次仿真的平均值.

如图 7(a)变化曲线可以看出:当  $r$  和  $\alpha$  一定时,网络覆盖率随着节点规模  $N$  的不断增加而扩大,且增加速度较快.当节点规模非常大时,4 条曲线趋向一致.这是由于当节点规模非常大时,整个目标区域将被完全覆盖,即覆盖

率 1.同时,在相同的节点规模下,PCPMB 的理论覆盖率为实验真实覆盖率误差非常小,拟合度好.从图 7(b)中曲线可知:本文所提模型与实验真实值之间的覆盖误差率基本都保持在 1%之内,最大误差率小于 2.5%.其他两种模型的覆盖误差率最小值大于 3%,最高误差率接近 10%.

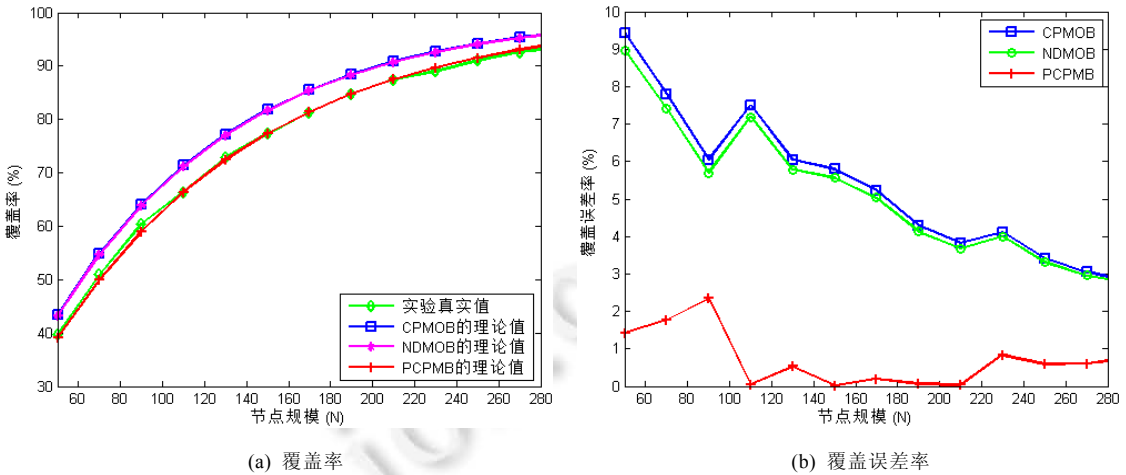


Fig.7 Effect of sensing node scale, other parameters:  $r=60m$ ,  $\alpha=\pi/4$

图 7 节点规模的影响,其他参数: $r=60m$ , $\alpha=\pi/4$

感知半径  $r$  对 CPMOB,NDMOB,PCPMB 和实验真实覆盖率的影响也类似.当节点规模一定时,节点感知半径越大,说明节点可感知面积越大,从而覆盖率会随之不断上升.由图 8(a)可知:PCPMB 的理论覆盖率为实验真实覆盖率误差非常小,拟合度好.从图 8(b)中曲线可知:本文所提模型理论值与实验真实值之间的覆盖误差率基本都保持在 1.3%之内,最大误差率小于 2%.其他两种模型的覆盖误差率最小值大于 4.1%,最高误差率接近 8%.

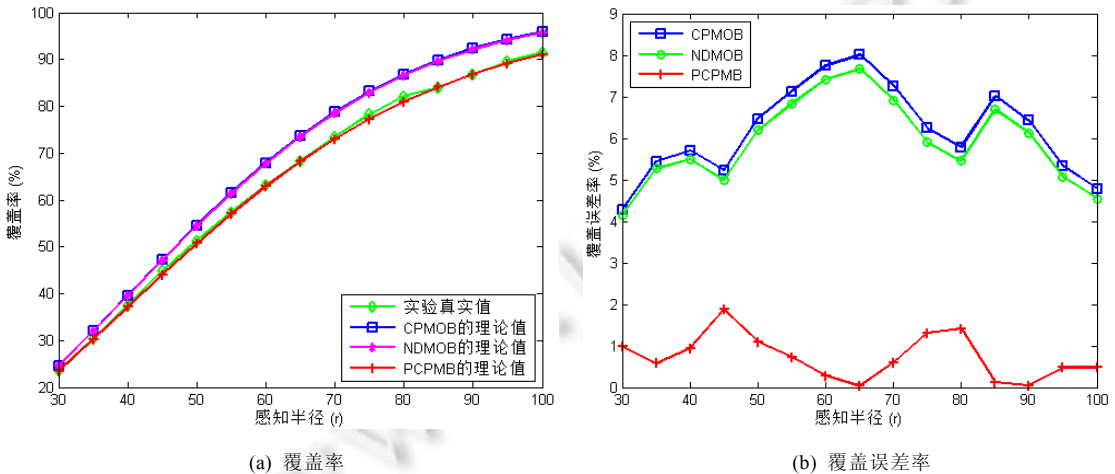


Fig.8 Effect of sensing node scale, other parameters:  $N=100$ ,  $\alpha=\pi/4$

图 8 感知半径的影响,其他参数: $N=100$ , $\alpha=\pi/4$

同样地,传感角度  $\alpha$ 对 CPMOB,NDMOB,PCPMB 和实验真实覆盖率的影响也类似.当节点规模一定时,传感角度越大,说明节点可感知面积越大,覆盖率会不断上升.由图 9(b)可知:本文所提模型理论值与实验真实值之间的覆盖误差率基本都保持在 1.5%之内,最大误差率小于 1.8%.其他两种模型的覆盖误差率最小值大于 5%,最高



大于 9%的误差.

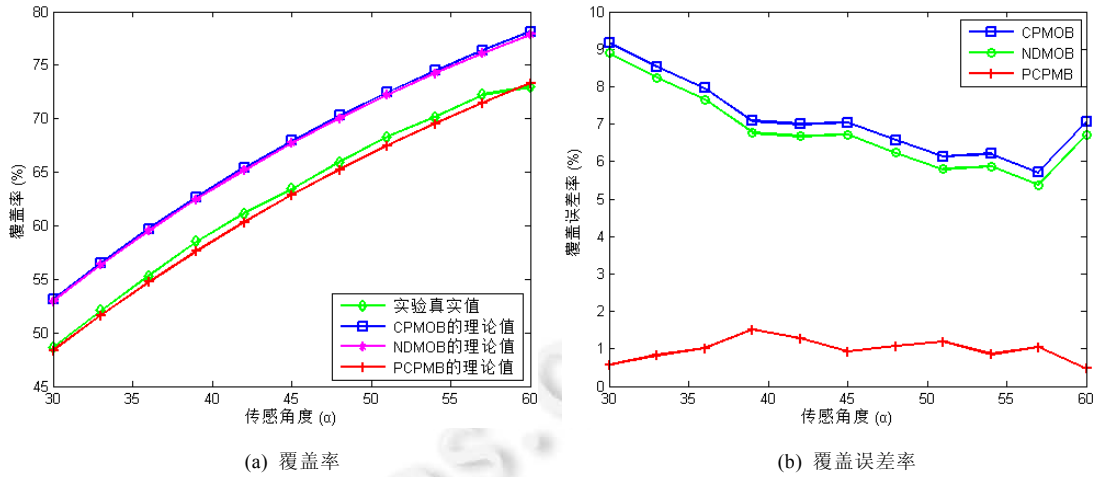


Fig.9 Effect of sensing offset angle, other parameters:  $N=100, r=60m$

图 9 传感角度的影响,其他参数: $N=100, r=60m$

综合上述 3 组对比实验得知:PCPMB 模型准确度更好,对初始部署时网络覆盖率的预测更加准确.说明其在覆盖率预测等方面有着更优的性能,与实际情况更加吻合.

### 3.2 节点规模数量分析

图 10(a)表示 PCPMB 模型节点数量估计理论值在不同目标区域不同覆盖率情况下的变化曲线.由图 10(a)的曲线可知:随着网络覆盖率的提高,初始随机部署时所需的节点数量增长速度大致呈指数级的增加;随着覆盖率要求的不断提高,初始部署时所需节点数量也不断增加;同时,随着目标区域的增大,实现相同覆盖率所需部署的节点数量也会快速增加.

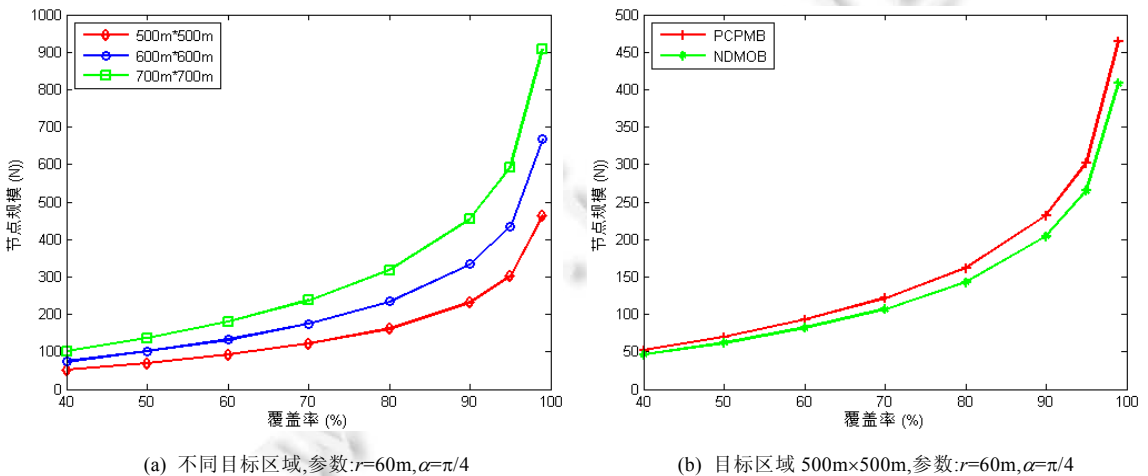


Fig.10 Effect of coverage probability on node scale

图 10 覆盖率对节点规模的影响

从图 10(b)可以看出:随着网络覆盖率的提高,目标区域中所需部署的节点数量也相应增加,且增加速度较快;当初始网络覆盖率较低时,边界效应对网络影响较小,两条曲线趋向一致;在相同网络覆盖率时,PCPMB 对部

署节点数量的预测更加准确。

#### 4 结束语

本文针对有向传感器网络随机部署节点环境下的网络覆盖及节点规模预测问题,提出了一种基于概率的覆盖预测模型,该模型反映了节点密度、节点感知半径、传感角度与覆盖率之间的数学关系.最后,通过一系列仿真实验,说明本文所提出的模型在预测性能上有较大提升.由于充分考虑了目标区域边界效应,与实际随机部署环境更加符合,当初始随机部署需要满足确定覆盖率时,通过该模型准确的预测节点数量来指导部署.

#### References:

- [1] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8):102–114. [doi: 10.1109/MCOM.2002.1024422]
- [2] Szweczyk R, Mainwaring A, Polastre J, Anderson J, Culler D. An analysis of a large scale habitat monitoring application. In: *Proc. of the ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*. 2004. 214–226. [doi: 10.1145/1031495.1031521]
- [3] Akyildiz IF, Su WL, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [4] Ma HD, Tao D. Multimedia sensor network and its research progresses. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,17(9): 2013–2028 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm> [doi: 10.1360/jos172013]
- [5] Liu L, Ma HD, Zhang X. On directional  $K$ -coverage analysis of randomly deployed camera sensor networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC)*. 2008. 2707–2711. [doi: 10.1109/ICC.2008.511]
- [6] Wang Y, Cao G. On full-view coverage in camera sensor networks. *IEEE INFOCOM*, 2011,10(6):1781–1789. [doi: 10.1109/INFOCOM.2011.5934977]
- [7] Ma HD, Li YH. On coverage problems of directional sensor networks. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005,3794:721–731. [doi: 10.1007/11599463\_70]
- [8] Tao D, Ma HD, Liu L. A virtual potential field based coverage-enhancing algorithm for directional sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2007,18(5):1152–1163 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm> [doi: 10.1360/jos181152]
- [9] Dai N, Mao JL, Fu LX. Virtual potential field based coverage optimization algorithm for directional sensor networks. *Application Research of Computers*, 2014,31(3):905–907 (in Chinese with English abstract).
- [10] Chen J, Lu Z, Kuo YH. Coverage-Enhancing algorithm based on overlap-sense ratio in wireless multimedia sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2013,13(6):2077–2083. [doi: 10.1109/JSEN.2013.2248144]
- [11] Wang XC, Feng XF, Feng XY. Study of mixed virtual potential field coverage algorithm in WMSN. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2013,24:1–6 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13001.htm>
- [12] Mohamadi H, Ismail AS, Salleh S. Utilizing distributed learning automata to solve the connected target coverage problem in directional sensor networks. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013,198(16):21–30. [doi: 10.1016/j.sna.2013.03.034]
- [13] Liu L, Zhang X, Ma HD. Minimal exposure path algorithms for directional sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2014,14(10):979–994. [doi: 10.1002/wcm.2250]
- [14] Xing XF, Wang GJ, Wu J, Li J. Square region-based coverage and connectivity probability model in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing*. 2009. 1–8. [doi: 10.4108/ICST.COLLABORATECOM2009.8335]
- [15] Liu L, Zhang X, Ma HD. Localization-Oriented coverage in wireless camera sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2011,10(2):484–494. [doi: 10.1109/TWC.2010.01.080956]
- [16] Zhao J, Zeng JC. Sense model and number estimation of wireless multimedia sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2012,23(8):2104–2114 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4159.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04159]

- [17] Attar AM, Yarahmadian S, Samavi S. Coverage estimation in heterogenous floorplan visual sensor networks. Sensors, IEEE, 2013,28(1):1-4. [doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688426]

#### 附中文参考文献:

- [4] 马华东,陶丹.多媒体传感器网络及其研究进展.软件学报,2006,17(9):2013-2028. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2013.htm>
- [8] 陶丹,马华东,刘亮.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖增强算法.软件学报,2007,18(5):1152-1163. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1152.htm>
- [9] 戴宁,毛剑琳,付丽霞,段绍米,乔冠华.基于虚拟势场的有向传感器网络覆盖优化算法.计算机应用研究,2014,31(3):905-907.
- [11] 王晓晨,冯秀芳,冯晓媛.无线多媒体传感器网络混合虚拟势场覆盖研究.软件学报,2013,24:1-6. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13001.htm>
- [16] 赵静,曾建潮.无线多媒体传感器网络感知模型与数量估计.软件学报,2012,23(8):2104-2114. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4159> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2012.04159]



刘志敏(1983-),男,湖南郴州人,博士生,主要研究领域为无线多媒体传感器网络, ad hoc 网络.



王国军(1970-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 杰出会员,主要研究领域为透明计算,移动计算,云计算,可信计算,软件工程.



贾维嘉(1957-),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为组播,路由,无线宽带网络,移动多媒体通信,分布式系统.