

## 无线传感器网络中基于虚拟半径的覆盖算法\*

李小龙<sup>1,2</sup>, 李明明<sup>1,2</sup>, 黄廷磊<sup>1,2+</sup>, 林亚平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院,广西 桂林 541004)

<sup>2</sup>(广西可信软件重点实验室,广西 桂林 541004)

<sup>3</sup>(湖南大学 软件学院,湖南 长沙 410082)

### Coverage Algorithm Based on Virtual Radius for Wireless Sensor Networks

LI Xiao-Long<sup>1,2</sup>, LI Ming-Ming<sup>1,2</sup>, HUANG Ting-Lei<sup>1,2+</sup>, LIN Ya-Ping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

<sup>2</sup>(Guangxi Key Laboratory of Trusted Software, Guilin 541004, China)

<sup>3</sup>(School of Software, Hu'nan University, Changsha 410082, China)

+ Corresponding author: E-mail: tlhuang@guet.edu.cn

**Li XL, Li MM, Huang TL, Lin YP. Coverage algorithm based on virtual radius for wireless sensor networks. Journal of Software, 2011,22(Suppl.1):149-156.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/11016.htm>

**Abstract:** When sensor networks are deployed in mission-critical applications such as target detection, data fusion technologies can significantly improve sensing coverage. Based on the probabilistic sensing model with an exponential decay factor, the paper analyzes the intrinsic relationship between data fusion and coverage performance. The paper also proposes some definitions, including node virtual radius, fusing-cover, to quantize the improvement on network coverage performance caused by data fusion. The effect of data fusion on node density, where sensor nodes are deployed virtually in the regular polygon way, is evaluated. On the base of above theoretical analysis, a virtual radius based coverage algorithm to schedule sensor nodes is designed to guarantee every interest point in the region being either covered, or fusing-covered. The theoretical analysis indicates that the number of nodes which are participated in fusion process within virtual radius must be less than six. Otherwise, data fusion does not reduce the node density, and has a negative effect on the node density. The experimental result demonstrates that the proposed method can efficiently improve the coverage performance and prolong sensor network's lifetime.

**Key words:** sensor network; data fusion; virtual radius; virtual deployment; coverage

**摘要:** 当无线传感器网络用于目标检测时,数据融合技术可以有效提高其感知服务质量.基于指数衰减的概率感知模型,分析了数据融合和覆盖性能之间的关系.提出了节点的虚拟半径、融合覆盖的概念,以量化数据融合对网络覆盖性能的改善效果.分析了当节点以正多边形方式进行规则部署时,数据融合对节点密度的影响.在上述理论基础上,设计了一种基于虚拟半径的覆盖算法来调度传感节点,使得目标区域内的每一个点都被传感节点覆盖或者融

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61063040, 61163059); 湖南省自然科学基金(09JJ6094); 桂林市科学研究与开发计划(20100104-1)

收稿时间: 2011-05-02; 定稿时间: 2011-07-29

合覆盖.理论分析表明,虚拟半径内参与融合的传感节点的个数不能超过 6,否则数据融合不但不能减小传感节点的部署密度,反而会起相反的作用.实验结果表明,算法能够有效改善传感器网络的覆盖性能,并能有效延长传感器网络的寿命.

**关键词:** 传感器网络;数据融合;虚拟半径;虚拟部署;覆盖

传感器网络是由大量可靠性差、资源有限的节点组成的一种特殊的自组织网络.网络中的节点以协同方式进行数据采集、传递和协作处理,从而保证采集到的数据的准确性和真实性.在目标监测的应用中,传感节点由于受环境干扰、组成元件不可靠等原因,节点采集到的数据可能会出现偏差,从而影响感知服务质量<sup>[1]</sup>.数据融合技术对节点感知数据偏差有较强的鲁棒性,因此数据融合技术可应用于改善传感器网络的感知服务质量.感知服务质量指标包括感知覆盖性能、节点间的通信负载和网络寿命等.当前,国内外研究学者对于传感器网络中的覆盖问题已取得了不少研究成果<sup>[2-4]</sup>,但从数据融合的角度考虑传感器网络中的覆盖问题,目前还鲜有文献涉及.

在分布式检测理论中,多个传感节点的数据/决策信息基于某种融合规则组合在一起,以做出一个全局的决策.研究者在研究最优的融合算法以使系统的检测性能符合应用的需求方面进行了大量研究<sup>[5-7]</sup>. Wang, Xing 等人在文献[8-10]中研究了数据融合对传感器网络感知覆盖的影响.他们采用基于电源律衰减的概率感知模型来分析节点的协作行为,提出了能量有效的协作检测方案,并在该方案中考虑了通信覆盖和能量消耗的平衡,使得传感器网络的覆盖性能满足应用需要.但是 Wang 等人在考虑参与融合的传感节点时没有考虑传感节点相对目标的位置对感知覆盖的贡献大小的影响.大量文献已表明,传感节点距离目标位置越近,感知概率越大;反之,则感知概率越小.针对以上文献的不足,本文从使距离目标位置较近的传感节点参与融合覆盖这一目的考虑,并采用更为合适的指数衰减的概率感知模型来分析节点的协作行为,提出了基于虚拟半径的覆盖算法来调度节点,使得节点随机部署区域内的每一个点都被传感节点覆盖或者融合覆盖.

本文第 1 节介绍背景和相关的数学模型.第 2 节分析概率感知模型下的数据融合与覆盖的关系.第 3 节设计一种基于虚拟半径的覆盖算法.第 4 节进行仿真实验,并对结果进行分析.第 5 节总结全文.

## 1 数学模型描述

近年来,传感器网络越来越多地被用于目标检测.对于这一类型的应用,错误报警概率和检测概率是其两个重要指标.一般工程应用中要求检测目标的时候,错误报警概率尽可能地小、检测概率尽可能地大.我们可以采用多种方法来满足这一要求,一方面,我们可以考虑增大传感器节点的部署密度;另外一方面,我们采用多个传感节点进行数据融合的方法.大量的部署传感节点会增大工程的成本,而采用数据融合算法能够改善传感器网络的服务性能,但不会增加工程的部署成本.下面介绍本文主要用到的一些数学模型.

在目标检测中,我们通过测量目标发出的信号能量来判断目标存在与否,绝大多数物理信号的能量都是随着与目标的距离的增大而减小,这主要是信号的路径衰减和阴影效应所造成的.下面介绍一下信号的指数衰减模型.假设有  $N$  个传感器节点  $s_i \in S (i=1, \dots, N)$  部署在所监测的区域,用来监视和检测目标事件和对象,这里,  $S$  表示所有传感器节点的集合.

目标事件和对象发出的信号为  $W$ , 距离对象  $d_i$  处传感器节点  $s_i$  的信号衰减为  $u_i$ :

$$u_i = W e^{-\gamma d_i} \quad (1)$$

这里,  $\gamma$  表示衰减指数一般取 0.25~1.8 之间的数,  $d_i$  表示与目标对象之间的距离,  $W$  是一个恒定值.传感节点测量目标发出来的信号,包括背景噪声信号  $n_i$  和有用的信号  $u_i$ .假设传感节点测得的信号用  $y_i$  表示,目标实际不存在的状况用  $H_0$  表示,目标实际存在的状况用  $H_1$  表示.所以,传感节点  $s_i$  所测得的信号能量可以如下表示:

$$H_0: y_i = n_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$H_1: y_i = n_i + u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

假设背景噪声在各个节点处都不一样,且相互独立,服从正态分布.例如,节点  $s_i$  处的噪声信号为  $n_i, n_i \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $\mu$  为期望,  $\sigma^2$  为方差.

数据融合方案一般分为决策融合和值融合.目前一般都采用值融合的方式.部署区域的任何一个点  $p$ ,  $F(p)$  表示  $p$  点周围节点的集合,融合模型如下:

$$Y = \sum_{s_i \in F(p)} y_i \quad (4)$$

其中,  $Y$  表示融合后的统计值,  $k = \|F(p)\|$ ,  $t$  为阈值.当  $Y \geq t\sqrt{k}$  时,判定为检测到目标对象,即  $H_1$ ; 否则为  $H_0$ .

## 2 数据融合与覆盖的关系

传感节点的感知本质上是随机的,因为传感器的测量值中存在噪声信号.传感节点感知目标对象的概率一般随着距离的增加而减小,我们用两个指标来衡量的传感节点的感知性能,分别是错误报警概率  $P_{f_i}$  和检测概率  $P_{d_i}$ .  $P_{f_i}$  表示当目标对象不存在时,节点  $s_i$  错误地判定目标对象存在的概率;  $P_{d_i}$  表示当目标对象存在时,节点  $s_i$  正确地判定目标对象存在的概率.对于部署区域中的一点  $p$ ,我们用  $P_D(p)$  表示多个节点的信号协作融合后成功检测到目标对象存在于点  $k = \|F(p)\|$  的概率,称作全局检测概率,用  $P_F(p)$  表示错误报警概率,称作全局错误报警概率.若  $P_F(p) \leq \alpha, P_D(p) \geq \beta$ , 则称点  $p$  是  $(\alpha, \beta)$  覆盖的;若部署区域内的任何一点都是  $(\alpha, \beta)$  覆盖的,则称整个区域为  $(\alpha, \beta)$  覆盖的<sup>[10]</sup>.一般取  $0 \leq \alpha \leq 0.5, 0.5 \leq \beta \leq 1$ .

### 2.1 单个传感节点的概率感知覆盖

对于单个节点来说,其  $(\alpha, \beta)$  覆盖可以表述如下:给定一个阈值  $t$ ,有

$$y_i \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} t \quad (5)$$

即

$$p_{f_i} = P\{n_i > t | H_0\} = Q\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \leq \alpha \quad (6)$$

$$p_{d_i} = P\{(n_i + W e^{-\gamma d_i}) \geq t | H_1\} = Q\left(\frac{t - \mu - W e^{-\gamma d_i}}{\sigma}\right) \geq \beta \quad (7)$$

其中,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$ ,  $p_{d_i}$  是  $p_{f_i}$  的非减函数,也就是当  $p_{f_i}$  取值为  $\alpha$  时,  $p_{d_i}$  取最大值,于是有:

$$d_i \leq \frac{1}{r} \ln \left[ \frac{\sigma}{W} (Q^{-1}(\alpha) - Q^{-1}(\beta)) \right]^{-1} \quad (8)$$

因此,我们定义  $d_i$  的上限为该节点  $(\alpha, \beta)$  覆盖的感知半径  $r_s$ .在节点感知半径  $r_s$  内对目标检测的错误报警概率  $p_{f_i} \leq \alpha$ , 检测概率  $p_{d_i} \geq \beta$ .

举例计算  $r_s$ , 我们假设  $\alpha = 0.05, \beta = 0.95, \gamma = 0.25, \delta = W/\sigma = 50, \delta$  表示环境的信噪比,根据式(8),可求得  $r_s = 10.872$ .

### 2.2 多个传感节点基于融合的概率感知覆盖

假设部署区域内点  $p$  周围参与融合传感节点数目为  $N(p)$ , 当目标对象位于点  $p$  时,融合该  $N(p)$  个节点的快照读数,然后根据某种规则判断目标是否存在.假定采用第1节所述的值融合模型,即

$$\sum_{s_i \in F(p)} y_i \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \sqrt{k} t \quad (9)$$

假设噪声的期望值  $\mu = 0$ , 而方差为  $\sigma^2$ , 即有:

$$H_0 : Y = \sum_{s_i \in F(p)} n_i \sim N(0, \sigma^2 N(p)) \quad (10)$$

$$H_1: Y = \sum_{s_i \in F(p)} n_i + u_i \sim N\left(\sum_{s_i \in F(p)} u_i, \sigma^2 N(p)\right) \quad (11)$$

由式(6)和式(7)可知,单个传感节点的错误报警概率为  $p_{f_i}$ , 检测概率为  $p_{d_i}$ , 当  $\mu=0$  时,可得:

$$p_{f_i} = Q\left(\frac{t}{\sigma}\right), \quad p_{d_i} = Q\left(\frac{t - We^{-\gamma d_i}}{\sigma}\right) \quad (12)$$

**定义 1.** 点  $p$  处多个传感节点协作数据融合以检测目标,此时,覆盖性能的改善被量化描述成参与融合的节点的感知半径  $r_s$  的扩大所造成的效果.扩大后感知半径称为虚拟半径,用  $r_{vs}$  来表示.

**定义 2.** 将参与融合的传感节点部署在其虚拟半径圆内外的部署方式就叫传感节点的虚拟部署.如果参与融合的传感节点以虚拟半径圆内以正多边形的形式部署,则称为规则虚拟部署;如果参与融合的传感节点以随机的方式部署在虚拟半径圆的半径内外,则称为随机虚拟部署.

**定理 1.** 传感节点采用数据融合的方式协作检测点  $p$  处的目标对象.此时,数据融合对传感器网络的覆盖性能的改善可用虚拟半径  $r_{vs}$  来量化表示,  $r_{vs} = r_s + \frac{1}{2\gamma} \ln k$ , 其中,  $r_s$  为感知半径,  $k$  为参与覆盖任务的节点个数,  $\gamma$  为衰减指数.

证明:传感节点采用数据融合的方式协作检测在点  $p$  处目标对象,在  $H_1$  情况下  $Y = \sum_{i \in F(p)} n_i + u_i$ , 假设点  $p$  处周围有  $k$  个传感节点参与融合,由于

$$P_F(p) = P\left(\sum_{i=1}^k n_i \geq t\sqrt{k}\right) = Q\left(\frac{t\sqrt{k}}{\sigma\sqrt{k}}\right) = Q\left(\frac{t}{\sigma}\right) = p_{f_i} \leq \alpha,$$

且当  $\sum_{i=1}^k We^{-\gamma d_i} \geq \sqrt{k}We^{-\gamma r_s}$ , 即  $\min_{i=1}^k d_i \leq r_s + \frac{1}{2\gamma} \ln k$  时,

$$P_D(p) = P\left(\sum_{i=1}^k n_i + u_i > \sqrt{kt}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{kt} - \sum_{i=1}^k u_i}{\sigma\sqrt{k}}\right) = Q\left(\frac{\sqrt{kt} - \sum_{i=1}^k We^{-\gamma d_i}}{\sigma\sqrt{k}}\right) \geq Q\left(\frac{\sqrt{kt} - \sqrt{k}We^{-\gamma r_s}}{\sqrt{k}\sigma}\right) \geq \beta,$$

因此,

$$r_{vs} = r_s + \frac{1}{2\gamma} \ln k \quad (13)$$

**定义 3.** 如果该点周围的传感节点采用数据融合算法来协作检测,那么该点能够被周围传感节点覆盖  $p$ ; 如果该点周围的传感节点不采用数据融合算法来协作检测,则该点不能被周围传感节点覆盖,称点  $p$  被融合覆盖.

**定义 4.** 多个传感节点在点  $p$  处协作数据融合以检测目标,此时参与融合的节点的覆盖区域  $c$  满足  $\sum_{i=1}^k e^{-\gamma d_i} \geq \sqrt{k}e^{-\gamma r_s}$ , 并且该区域是  $(\alpha, \beta)$  覆盖.

由定义 4 可知,在实际中采用该表示式来研究覆盖区域  $c$  是比较复杂的,所以我们用  $r_{vs}$  用来分析多个节点在点  $p$  处进行协作数据融合后的覆盖区域  $c$ . 下面我们来介绍覆盖区域  $c$  的近似计算方法.

### 2.3 覆盖区域 $c$ 的近似计算

根据定义 4,多个节点在点  $p$  处进行协作数据融合后的覆盖区域  $c$  满足  $\sum_{i=1}^k e^{-\gamma d_i} \geq \sqrt{k}e^{-\gamma r_s}$ . 由定理 1,必存在 1 个或者多个节点位于以点  $p$  为圆心、 $r_{vs}$  为半径的圆内.这个以点  $p$  为圆心、 $|r_{vs}|$  为半径的圆的区域就是多个传感节点协作数据融合后的融合覆盖区域.因此,我们可以认为这相当于在点  $p$  放置了一个传感节点,该节点的感知半径为  $|r_{vs}|$ , 这个半径范围内的区域也是被其周围的传感节点所融合覆盖的区域.

参与融合传感节点的个数受很多因素的影响,比如通信负载和节点能源等.一方面,我们要保证所期望的覆盖性能,就需要更多传感节点参与融合;另一方面,因为我们采用的融合方法是值融合方法,因而要限制参与融

合的节点的个数.参与融合的传感节点的个数与虚拟半径密切相关. $k$  和  $r_{vs}$  之间数值关系如下:将传感器的感知半径单位化为 1,则虚拟半径也单位化为  $\tau_{vs}$ .

$$\tau_{vs} = \frac{r_{vs}}{r_s} = \frac{r_s + \frac{1}{2\gamma} \ln k}{\frac{1}{\gamma} \ln \left[ \frac{\sigma}{W} (Q^{-1}(\alpha) - Q^{-1}(\beta)) \right]^{-1}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{\ln k}{\ln \left[ \frac{Q^{-1}(\alpha) - Q^{-1}(\beta)}{\delta} \right]^{-1}} \quad (14)$$

由上式可知,  $\tau_{vs}$  与  $k, \alpha, \beta, \delta$  相关,  $\delta$  表示信噪比,而与  $\gamma$  无关.假设  $\alpha=0.05, \beta=0.95, \gamma=0.25, \delta=50$ ,当  $k=2$  时,根据式(14),  $\tau_{vs}=1.12$ .

当有  $k$  个传感节点在点  $p$  处协作数据融合以监测目标时,此  $k$  个传感节点的覆盖区域  $c$  可采用如下方式近似:

$$c \cong A^r(s_i) \cup A^r(s_{i+1}) \cup \dots \cup A^r(s_{i+k}) \cup A^{r_{vs}}(p) \quad (15)$$

其中,  $A^r(s_i)$  表示以  $s_i$  为圆心、 $r_s$  为半径的圆形覆盖区域,  $A^{r_{vs}}(p)$  表示以  $p$  为圆心、虚拟半径  $r_{vs}$  为半径的圆形融合覆盖区域.式(15)表示  $c$  是由  $k$  个半径为  $r_s$  的圆和一个半径为  $r_{vs}$  的圆的覆盖区域的并集所组成.

### 3 基于虚拟半径的覆盖算法

本节我们将首先分析节点融合覆盖对节点规则虚拟部署密度的影响,然后设计一种基于虚拟半径的覆盖算法来调度传感节点,使得节点随机部署区域的每一个点都被一个节点感知覆盖或者被多个节点融合覆盖.

#### 3.1 数据融合对传感节点部署密度影响

当传感器按照单位网格的对角线形式来部署时,也就是说,两个传感节点之间的距离为  $\sqrt{2}$ ,此时,覆盖每个网格需要  $1/2$  个传感器节点,那么当节点采用基于正多边形的规则虚拟部署时,数据融合对传感节点部署密度的影响如定理 2 所述.

**定理 2.** 当传感节点采用正多边形的规则虚拟部署时,其虚拟半径的圆内最多能够部署 6 个传感节点,以达到减小传感节点的部署密度的目的.

证明:当  $k=2$  时,传感节点的虚拟部署如图 1(a)所示.根据勾股定理可求得  $\theta_1=1.1080, \theta_2=0.9255$ .用  $A_1$  表示由弧  $\widehat{As_1B}$  和直线  $\overline{AB}$  组成的扇形的面积,用  $A_2$  表示由弧  $\widehat{ApB}$  和直线  $\overline{AB}$  组成的扇形的面积,用  $A'$  表示由这两个扇形所组成的图形的面积,用  $A''$  表示节点  $S_1, S_2$  的感知区域分别与以点  $p$  为圆心、 $r_{vs}$  为半径的虚拟圆的相交面积之和,用  $\rho_f, \rho_g$  分别表示规则虚拟部署时、基于单位网格的规则部署时,用  $\xi$  表示规则虚拟部署时的密度增益.由鲁洛三角形面积计算公式  $A_1 = \frac{1}{2} r_{vs}^2 (2\theta_2 - \sin 2\theta_2), A_2 = \frac{1}{2} r_{vs}^2 (2\theta_2 - \sin 2\theta_2)$  及  $A', A''$  等面积计算公式  $A' = A_1 + A_2, A'' = 2A', A_s^{r_s} = \pi r_s^2, A^{r_{vs}}(p) = \pi r_{vs}^2$  可得,  $\rho_f = \frac{A''}{A_s^{r_s} \times A^{r_{vs}}(p)} = 0.2046$ .由前面的分析,  $\rho_g = 0.5, \xi_{k=2} = \frac{\rho_g - \rho_f}{\rho_g} \times$

$100\% = 59.08\%$ .按照上述方法,当  $k$  等于 3,4,5,6,7 时,传感器网络的节点密度分别可以减小 45.64%,32.58%,21.44%,8.28%以及-2.22%.  $\xi_{k=7} < 0$ ,这意味着当  $k=7$  时,传感节点在规则虚拟部署下不能改善传感器网络的密度,反而会增大节点的部署密度,所以虚拟半径的圆内最多虚拟部署 6 个传感节点,才能达到减小传感节点的部署密度的目的.  $\square$

由定理 2 可知,当传感节点以正多边形规则虚拟部署的方式来协作监测目标时,其虚拟半径的圆内最多部署 6 个传感节点,才能达到减小传感节点的部署密度的目的.

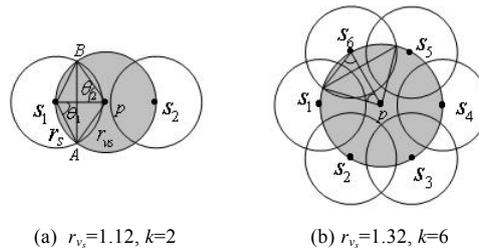


Fig.1 A scenario of nodes' regular virtual deployment

图 1 节点规则虚拟部署的示意图

### 3.2 基于虚拟半径的覆盖算法

本节主要介绍我们所设计的基于虚拟半径的覆盖算法.为了延长网络的生存时间,我们将覆盖问题转化为时间优化问题,设计了基于虚拟坐标的覆盖算法以求解不相交覆盖集(任意一个覆盖集均能覆盖或者融合覆盖部署区域的每一个点)的最大个数.在已求解出不相交覆盖集的基础上,依次调度各个覆盖集中的节点工作,执行监测任务.显然,覆盖集的个数越多,网络的生存时间越长.

我们用  $S$  表示部署到目标区域内的传感节点集,用  $N$  表示传感节点的个数,用  $G$  表示把目标区域以网格形式划分后网格点的集合,用  $N$  表示网格点的个数.当  $S$  中的剩余节点还能形成一个最小覆盖集来覆盖部署区域内的每一个网格点时,我们开始下一轮迭代计算,直到集合  $S$  中剩余传感节点不能再形成一个最小覆盖集为止.下面是伪代码描述的基于虚拟半径的覆盖算法.

1. Let  $i$  denote the number of coverage set.  $i=0$ .
2. Judge whether the node set  $S$  can cover or fusing-cover every grid point in  $G$ .
3. If it can not do that, Then end.
4. Else Let  $i=i+1$ , the  $i$ th coverage set  $C_i=\emptyset$ .
5. For the grid point  $g_1$  to  $g_N$ .
6. If  $C_i$  can cover or fusion-cover  $g_j$  and  $j=N$  Then
7. endfor and goto line 2.
8. Else If  $C_i$  can cover or fusion-cover  $g_j$  and  $j\neq N$  Then Next
9. Else Select a node  $s$  in  $S$  which stands in the circle,  
centered at  $g_j$ , with the radius  $r_{vs}$ , and meet the condition that  $s$  and  $C_i$  can fusion-cover  $g_j$ .
10.  $C_i=C_i\cup s$ ,  $S=S-s$ ; goto line 6.
11. End if; End for; goto line 2.

在本算法中,当传感节点集合  $S$  中的剩余节点还能形成一个最小覆盖集来覆盖部署区域内的网格点时,就开始我们的最小覆盖集的搜索计算:首先,对于未被覆盖的点,先考虑其是否被  $C_i$  中的虚拟半径内的传感节点所融合覆盖,如果不能被  $C_i$  中的虚拟半径内传感节点所融合覆盖,则要在剩下的未使用的传感节点中寻找一个节点  $s$ ,与  $C_i$  中的传感节点一起融合覆盖未被覆盖的点.

## 4 实验仿真

为了评估算法性能,我们设计了基于虚拟半径的覆盖算法的仿真程序,并分规则虚拟部署和随机虚拟部署两种部署情况分别进行仿真.在仿真实验中,我们从以下方面比较了本文提出的方案与文献[8]中的方案:在规则虚拟部署和随机虚拟部署的情况下,获得覆盖集中平均的节点个数及不相交覆盖集的数量,以判断本方案的优劣性.我们将 300~1 200 个节点部署在  $10\times 10\text{m}^2$  的正方形区域上,传感节点的位置服从泊松分布,传感节点的感知半径为单位长度,虚拟半径为根据公式(14)计算出的长度.我们取  $\gamma=0.250$ ,  $\sigma^2=1$ ,  $W=50$ .

图 2 描述的是分别采用规则虚拟部署方法 RVD(regular virtual deployment)和文献[8]中的算法得到的不相交覆盖集的平均节点数.在图 2 中,当  $k$  等于 2 或 3 时,根据规则虚拟部署方法得到不相交覆盖集的平均节点数要小于文献[8]的算法;当  $k=4$  时,两种方法得到的不相交覆盖集的平均节点数基本相等.当  $k$  的取值不超过 6 时,上述两种方法得到的不相交覆盖集的平均节点数都小于不采用数据融合技术的算法 non-co(non-cooperative coverage)<sup>[11]</sup>,这印证了数据融合所起的积极作用.

在图 3 中,当  $k=2$  时,在随机虚拟部署情况下采用本文算法 RAVD(random virtual deployment)得到的不相交覆盖集的个数要稍微大于采用文献[8]中的算法、小于规则虚拟部署方法;当  $k=3$  时的实验结果类似于  $k=2$ ;当  $k=4$  时,当部署的传感节点数小于 700 时,规则虚拟部署情况下所能调度的不相交覆盖集数要大于文献[8]中所能调度的不相交覆盖集数,但是当部署的传感节点数大于 700 时,情况则恰好相反.当  $k=4$  时,在随机虚拟部署情况下所能调度的不相交覆盖集数要分别大于文献[8]的相应结果和规则虚拟部署方法.

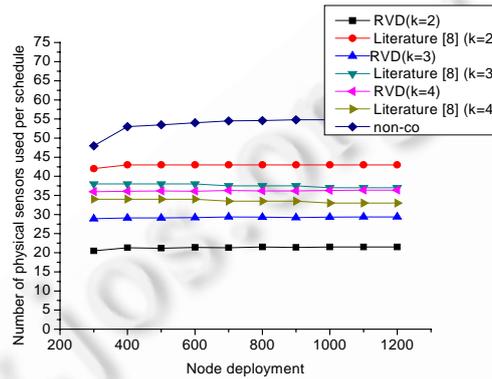


Fig.2 Average number of sensor nodes in coverage sets

图 2 覆盖集的平均节点的个数

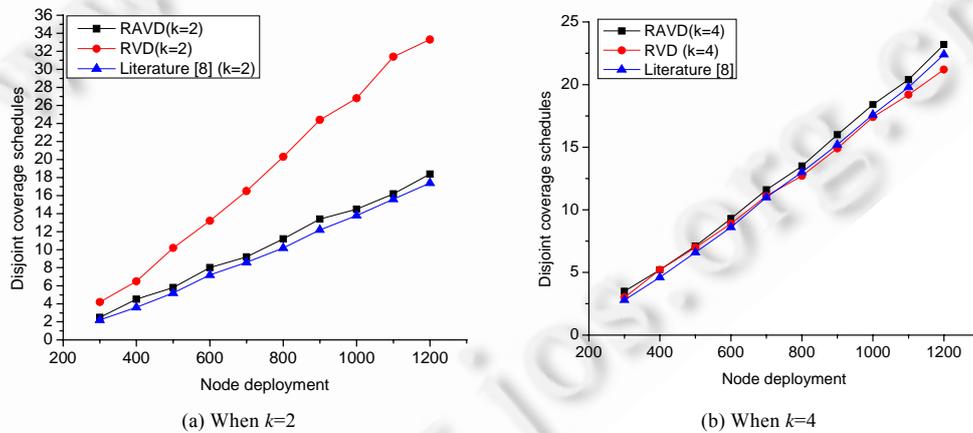


图 3 Number of coverage sets for two different approaches

图 3 两种不同方案下覆盖集的个数

## 5 结论

数据融合技术应用到基于传感器网络的事件检测中,可以提高对目标的检测概率,改善网络的覆盖特性,延长网络的服务寿命.本文采用基于指数衰减的概率感知模型来研究数据融合技术对传感器网络的服务质量的影响作用.提出了虚拟半径和虚拟部署等概念,从理论上分析了数据融合对虚拟部署的节点部署密度的影响,设

计了一种基于虚拟半径的覆盖算法来调度传感节点,使得部署区域内的每一个点都被传感节点覆盖或者融合覆盖,最后通过实验验证了该算法的有效性.

**致谢** 在此,我们向曾经对本文提出宝贵建议的审稿专家表示衷心的感谢.

#### References:

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008,52(12):2292–2330.
- [2] Ghosha A, Dasb SK. Coverage and connectivity issues in wireless sensor networks: A survey. *Pervasive and Mobile Computing*, 2008,4(3):303–334.
- [3] Younis M, Akkaya K. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 2008,6(4):621–655.
- [4] Wen J, Jiang J, Fang L, Ban DS, Dou WH. Maintaining relay connectivity and coverage in heterogeneous wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(9):2304–2319 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3623.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03623]
- [5] Ammari HM, Das SK. Fault tolerance measures for large scale wireless sensor networks. *ACM Trans. on. Autonomous on Adaptive Systems*, 2009,4(1):1–26.
- [6] Luo XW, Dong M, Huang YL. On distributed fault tolerant detection in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Computers*, 2006, 55(1):58–70.
- [7] Yu LG, Yuan L, Ephremides A. Energy driven detection scheme with guaranteed accuracy. In: *Proc. of the IPSN*. Nashville: ACM Press, 2006. 284–291.
- [8] Wang W, Srinivasan V, Chua KC, Wang B. Energy efficient coverage for target detection in wireless sensor networks. In: *Proc. of the IPSN*. Cambridge: ACM Press, 2007. 25–27.
- [9] Wang B, Wang W, Srinivasan V, Chua KC. Information coverage for wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2005,9(11):967–969.
- [10] Xing GL, Tan R, Liu BY, Wang JP, Jia XH, Yi CW. Data fusion improves the coverage of wireless sensor networks. In: *Proc. of MobiCom*. Beijing: ACM Press, 2009. 157–168.
- [11] Tian D, Georganas ND. A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In: *Proc. of the ACM WSNA*. Atlanta: ACM Press, 2002. 32–41.

#### 附中文参考文献:

- [4] 温俊,蒋杰,方力,班冬松,窦文华.异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法. *软件学报*,2010,21(9):2304–2319. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3623.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03623]



李小龙(1981—),男,湖南常德人,博士,副教授,主要研究领域为传感器网络,无线 MESH 网.



黄廷磊(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为传感器网络,无线 MESH 网.



李明明(1983—),男,硕士生,主要研究领域为传感器网络.



林亚平(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络,机器学习.