

RCEA: 一种高效节能的传感器网络规则覆盖增强算法

唐 蕾¹ 周兴社¹ 张大庆² 隋玉磊¹ 马俊岩^{1,3}

(西北工业大学计算机学院 西安 710072)¹ (法国电信学院 法国 91000)²

(瑞士苏黎世联邦理工学院 瑞士)³

摘 要 解决网络在随机部署的情况下如何能有效地保证最少节点完全覆盖的优化部署问题。从覆盖优化入手,分析了具有最大覆盖效率的网络拓扑结构,提出一种基于虚拟力的规则覆盖增强算法 RCEA(regular coverage-enhancing algorithm)以实现该拓扑结构。算法以螺旋扩散优化路径为指导,通过虚拟力影响节点部署,引入能耗均衡因子,在增强整个传感器网络覆盖的同时,降低网络平均能耗。一系列仿真试验验证了该算法的有效性。

关键词 无线传感器网络,能量有效,虚拟力,覆盖增强

中图分类号 TP393 文献标识码 A

RCEA: An Energy Efficient Based Regular Coverage-enhancing Algorithm for Wireless Sensor Networks

TANG Lei¹ ZHOU Xing-she¹ ZHANG Da-qing² SUI Yu-lei¹ MA Jun-yan^{1,3}

(College of Computer Science, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)¹

(Institute TELECOM Sudparis, Evry, France 91000)² (ETH Zürich, Zurich, Switzerland)³

Abstract We addressed the issues of maintaining sensing complete coverage by keeping a minimum number of nodes. We investigated the network topology with the most coverage based on computational geometry, and a regular coverage-enhancing algorithm(RCEA) was presented. By introducing the concept of virtual force and balanced energy factor, nodes will repel each other to eliminate the sensing overlapping regions and coverage holes along spiral scanning-path. It can enhance the whole coverage performance, and realize the optimal topology. A set of simulation results were performed to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords Wireless sensor network, Energy-efficient, Virtual force, Coverage enhancement

通过在探测区域内部署大量具有感知、存储、处理及传输能力的嵌入式设备,搭建多跳自组织的“智能”网络系统,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)目前已成为实现多种应用^[1-3]的重要技术。其关键在于传感器需要从探测区域内采集有效信息,以便全方位地反映热点区域状况,为应用提供分析数据。因此,为保证整个区域都在监测范围之内,需要按照一定的算法在目标区域布置传感器,即覆盖问题^[4]。WSN的覆盖问题与多机器人系统的覆盖问题^[5]相比较,最大的区别在于特殊的应用模式与网络的动态性,这涉及了网络的初始部署和运行过程中的调整。针对工作环境复杂、节点数目众多、信息不明确的情况,大规模的随机部署是较合理的初期部署方式。然而,由于随机部署方式在概率上不能保证部署的节点完全覆盖整个监测区域,这便需要对初始部署采取覆盖增强策略,以获得理想的网络覆盖性能。

本文认为 WSN 的覆盖增强问题需要实现如下两点:(1)当节点部署完毕,监测区域中的任意一点至少能够被一个工作节点覆盖,这样可以保证无论传感器如何散布均可进行定

位;(2)节点数目应尽可能地少,这样可以减少冗余覆盖,进而减少整个网络的能量开销。

目前,国内外学者相继开展了相关研究,并取得了一定的进展。从求解最小化未覆盖区域的角度入手, Meguerdichian^[6]分别采用 Voronoi 图和 Delaunay 技术构造两类路径,以指导节点部署。该算法主要关注于对穿越网络的目标节点进行感应与追踪,可能会造成网络覆盖的不合理。与本文研究的问题及背景相似, Slijepcevic^[10]将最少节点数目问题转化为对最大独立节点覆盖集的求解,进而提出 most-constrained 和 least-constraining 算法。与其不同的是,本文将覆盖增强问题分解为研究一系列节点对监测区域的最优拓扑结构,以及如何实现这种优化拓扑的问题。采用计算几何学确定最优拓扑结构,通过建立传感器节点间的虚拟力模型来确定节点位置,以实现覆盖增强。

1 覆盖增强问题研究

本文将覆盖增强问题分解为研究一系列节点对监测区域

到稿日期:2009-11-09 返修日期:2010-01-25 本文受国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目 2009AA011903 和法国-亚洲国际合作项目资助。

唐 蕾(1983-),女,博士生,主要研究方向为普适计算、无线传感器网络,E-mail: tanglei24@gmail.com;周兴社 男,教授,CCF 会员,主要研究方向为嵌入式软件、无线传感器网络、普适计算;张大庆 男,教授,主要研究方向为普适计算;隋玉磊 男,博士生,主要研究方向为分布式计算;马俊岩 男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络。

的最优拓扑结构,以及如何实现这种优化拓扑的部署问题。因此本节主要采用计算几何学对多种拓扑结构进行分析并确定最优拓扑结构。在下节将提出一种覆盖增强策略以解决该结构的部署实现问题。

针对网络覆盖问题,国内外学者相继开展了相关应用的研究。目前解决问题的手点主要根据对环境感知信息的依赖,设计两种初始部署策略:一是面向不同应用特点的确切性部署,一般采用区域/点^[11]及路径/目标的覆盖^[12];另一种是大规模的随机部署,这在其工作环境复杂、节点数目众多、信息不明确的情况下是较合理的部署方式。因此本文对最优覆盖问题的分析基于随机初始部署方式。

1.1 初始部署模型

假设同构节点被随机部署在一个二维几何区域 Grid 中,其部署过程可以被建模为静态的二维平面 Poisson 点过程^[13]。这样,服从 Poisson 分布^[14]的节点所形成的网络覆盖率为 $P = 1 - e^{-\lambda R_s^2 \|G\|}$ (λ 表示 Poisson 分布密度, R_s 为节点覆盖半径)。由上述可知,一方面节点部署密度越大,节点提供的区域覆盖质量就越高;但是,部署密度过高将会带来感知域的过度重叠、节点的弱扩展性、高冗余以及无线信道干涉等问题,造成网络能耗过多。因此需要对初始的静态部署采取覆盖增强策略,以获得理想的网络覆盖性能。

对于已部署的静态网络,一种广泛使用的增强策略是:在满足覆盖要求的情况下,通过启发式的节点唤醒和休眠机制^[7-9],减少能量消耗。然而,由于随机部署方式在概率上不能保证部署的节点可以完全覆盖整个监测区域,因此如何保证节能且不产生感知盲区是比较困难的。

对于动态网络,可利用节点的移动能力进行重部署,实现区域覆盖增强。虚拟势场方法是一种重要的重部署方法。其基本思想是把网络中每个传感器节点都看作一个虚拟的电荷,各节点受到其他节点的虚拟力作用,向目标区域中的其他区域扩散,直至达到平衡状态,实现目标区域的充分覆盖^[15]。

以提出的覆盖增强问题为应用背景,本文借鉴虚拟力思想并考虑到能耗影响,设计了一种高效的覆盖增强算法来实现特定的网络拓扑结构,以满足高覆盖率和连通度。其设计及实现将在本文第 3 节中描述。

1.2 最优拓扑结构及理论分析

1.2.1 评价标准

在研究节点重部署之前,需要确定满足最优覆盖的 WSN 拓扑结构。结合网络系统特性和本应用需求的特点,我们认为评价网络拓扑结构的性能,主要考虑以下 2 个指标。

(1) 有效覆盖率

Gage^[6]提出以所有节点覆盖的总面积与目标区域总面积的比值作为标准定义。为评估网络拓扑结构的有效覆盖率,本文将待测区域栅格化,对节点感知域进行边缘检测分析,计算有效总覆盖面积。

(2) 覆盖均匀度

覆盖均匀度能够表征网络平衡能量负载能力,反映网络冗余情况。本文采用文献[4]给出的定义,即采用节点间距离的标准差来表征覆盖均匀度。标准差的值越小,则覆盖均匀度就越好,感知重叠区域就越少。

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^{K_i} (d_{i,j} - \bar{d}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中, U 表示均匀度, K_i 表示第 i 个节点的邻居节点个数, $d_{i,j}$ 表示第 i 个节点与第 j 个节点之间的距离, \bar{d}_i 表示第 i 个节

点与其传感范围相交的所有节点的距离的平均值。下面推导具有最优覆盖均匀度的网络拓扑结构。

推论 1 当传感范围相交的所有节点之间距离相同时,整个网络的覆盖均匀度最高。

证明:由以上定义可知,寻找高均匀度等价于计算节点 i 的距离方差函数 $F_i = \min(\sum_{j=1}^{K_i} (d_{i,j} - \bar{d}_i)^2)$ 。进而,当 $N > 2$

时, $F_i = \min(\sum_{j \neq i}^{K_i} \left[\frac{(K_i - 1)d_{i,j} - \sum_{m \neq j}^{K_i} d_{i,m}}{K_i} \right]^2)$, 令 $F_i = 0$, 则 $(K_i - 1)d_{i,j} - \sum_{m \neq j}^{K_i} d_{i,m} = 0$, 整理后得到 $d_{i,j} = d_{i,m}$ ($m = 1, 2, \dots, K_i, m \neq i, j$), 其中 $d_{i,m}$ 表示第 i 个节点与其邻居节点中第 m 个节点之间的距离。

因此,若节点之间距离相同,即节点部署为正多边形模式,则整个网络拓扑结构具备最优覆盖均匀度。这样放置的节点构成规则的拓扑结构,称为规则模式部署(Regular Pattern),如图 1 所示。

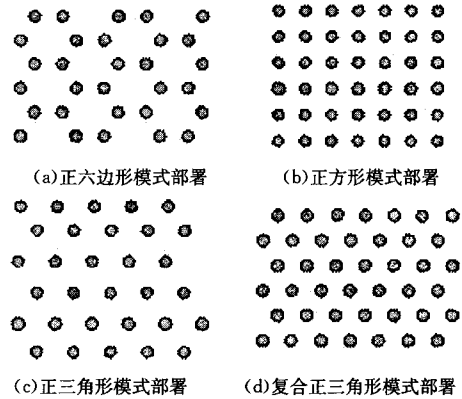


图 1 4 类规则模式部署^[18]

这样,追求以最少节点数目实现完全覆盖的覆盖增强问题,便转化为寻找与构造具有最大覆盖率的规则网络拓扑结构。

1.2.2 最优覆盖拓扑结构

本文引入空间密度(SP, spatial density)用于量化表征规则拓扑结构的覆盖率,同时避免无穷节点数目所带来的不确定性。令 OPT 表示以最小 SP(用 d_{OPT} 表征)覆盖二维平面的最理想覆盖连通拓扑结构,因此一类拓扑结构 A 若满足 $\min \|SP_A - d_{OPT}\|$, 则便是本文 1.2.1 节提出的最优规则结构。

在网络结构 OPT 中,当节点感知半径 R_s 与连通半径 R_c 相同时,文献[19]给出其 SP 为:

$$d_{OPT} \geq \frac{0.522}{r^2}$$

然而,在通常情况下 $R_s \neq R_c$ 。对此,文献[19]并没有给出相应的结论。本文通过分段考虑 R_s 和 R_c , 得出以下结论。

定理 1 当 $R_c \neq R_s$ 时, $d_{OPT} \geq \frac{0.338}{R_c^2}$

证明:假设在一个面积为 $D \times D$ 的二维感知域上部署了 n 个节点,节点之间保持相互连通。以无向连通图 G 表示节点的分布情况,采用广度优先搜索策略建立节点之间的路由。由于存在感知域的重叠,有效路径上的节点可能被重复遍历。因此,最优结构 OPT 的设计理念在于保证区域在完全覆盖的同时,满足节点利用率最高,即重叠感知域面积 S 最小。

$$(1) R_c \geq \sqrt{3}R_s$$

令节点 O_1, O_2, O_3 的传感范围两两相交于 A 点,可以得到当 $R_c = \sqrt{3}R_s$ 时,节点间相互重叠的面积 S 相等且最小(见图 2(a)),即 $S = (\frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2})R_s^2$ 。为满足区域完全覆盖和高覆盖率的要求,考虑再次部署 N 个同构节点,使其传感范围两两相交于 A 点(如图中虚线所示),此时新增的有效覆盖区域面积 S_i 最大,为 $(\frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2})R_s^2$ 。这样,目标区域面积 $D^2 \leq \pi R_s^2 + (n-1)(\frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2})R_s^2$ 。整理后,

$$d_{OPT} = \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{n}{D^2} \geq \frac{1}{2.960R_s^2} \geq \frac{0.338}{R_s^2};$$

(2) $R_c < \sqrt{3}R_s$, 如图 2(b)所示,随着 R_c 减小,弧 AB 将移向弧 $A'B'$,重叠域也将随之增加。

因此,在 $R_s \neq R_c$ 的状态下, $d_{OPT} \geq \frac{0.338}{R_s^2}$, 此时网络的覆盖效率最高,节点利用率最大,冗余最少。

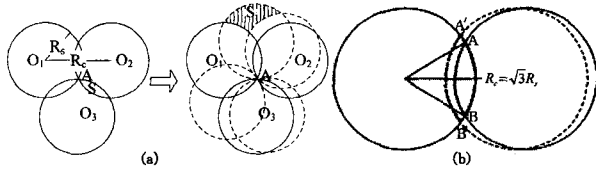


图 2 定理证明的图形化描述

推论 2 边长为 δ 的正三角形拓扑结构 RTT (Regular Triangular Topology) 的空间密度 SP(用 d_{TR} 表征)为: $d_{TR} = \frac{0.385}{R_s^2}$ 。

证明:如图 1(c)所示,由于拓扑结构 RTT 可以被看作是由一组节点所在的水平带组成,相邻带间距为 $\frac{\sqrt{3}}{2}\delta$ 。在 $D \times D$ 的感知域内的节点数为 $\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{D^2}{\delta^2}$ 。因此,为保证全网连通性,

$$\begin{cases} \frac{n}{D^2} = d_{TR} = \frac{1.155}{\delta^2} \\ \delta = \min\{R_c, \sqrt{3}R_s\} \end{cases}$$

整理后,

$$d_{TR} = \begin{cases} \frac{0.385}{R_s^2}, & \delta = \sqrt{3}R_s, \frac{R_c}{R_s} > \sqrt{3} \\ \frac{1.155}{R_c^2} > \frac{0.385}{R_s^2}, & \delta = R_c, \frac{R_c}{R_s} < \sqrt{3} \end{cases}$$

其中,满足覆盖连通条件的 RTT 结构的密度 $d_{TR} \geq \frac{0.385}{R_s^2}$ 。图 3 定性描述了当 $R_c < \sqrt{3}R_s$ 时网络结构的变化。为保证全网连通,需增加节点(图 3 中黑色节点),从而导致空间密度增加。

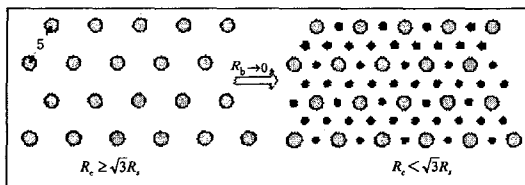


图 3 RTT 拓扑结构的部署变化

推论 3 带状拓扑结构 ST (Strip-based Topology) 的空间密度 SP(用 d_{ST} 表征)为:

$$\begin{cases} d_{ST} \geq \frac{0.385}{R_s^2}, & R_c \geq \sqrt{3}R_s \\ d_{ST} > \frac{0.366}{R_s^2}, & R_c < \sqrt{3}R_s \end{cases}$$

证明:当 $R_c \geq \sqrt{3}R_s$ 时,在移除垂直带后,ST 仍能保持后网络连通,此时其转化为 RTT 结构, $d_{ST} = d_{TR} = \frac{0.385}{R_s^2}$ 。反之,水平带上的节点相距 R_c , 因此每个水平带上拥有 (D/R_c) 个节点,令 β 表示相邻带间距,则 $D \times D$ 的感知域内拥有 $\frac{D^2}{\beta \cdot R_c}$ 个节点。考虑到垂直带上节点个数与 D 的取值成比例,在 $D \rightarrow \infty$ 时,该影响可以忽略,所以

$$\begin{cases} \lim_{D \rightarrow \infty} d_{ST} = \frac{1}{\beta \cdot R_c} \\ \beta = R_c + \sqrt{R_c^2 - \frac{R_s^2}{4}} \end{cases}$$

整理后,

$$\begin{cases} d_{ST} = d_{TR} = \frac{0.385}{R_s^2}, & R_c \geq \sqrt{3}R_s \\ \frac{0.385}{R_s^2} < d_{ST} = \frac{1}{R_c^2} \frac{1}{(\frac{R_c}{R_s})(1 + \sqrt{1 - \frac{1}{4}(\frac{R_c}{R_s})^2})} < d_{TR}, & R_c < \sqrt{3}R_s \end{cases}$$

当 $R_c < \sqrt{3}R_s$ 时,为保证连通,只需在相邻水平带间部署节点,以及增加水平带上节点数目(见图 4),而无须改变带间的距离,因此 $\lim_{R_c \rightarrow 0} d_{ST} \rightarrow d_{TR}$ 。

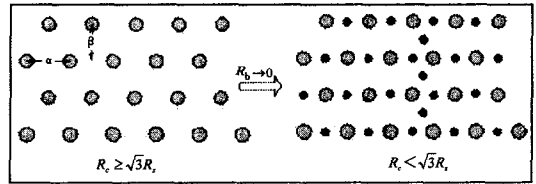


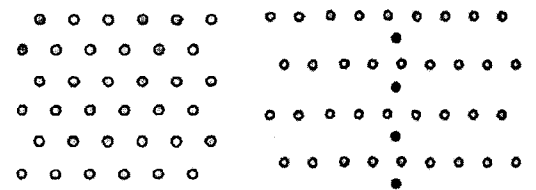
图 4 ST 拓扑结构的部署变化

推论 4 边长为 d 的网格 GT (Square-Grid based Topology) 和正六边形 HT (Hexagonal-based Topology) 的空间密度 SP(用 d_{SQ}, d_{HEX} 表征)为 $d_{SQ} = \frac{0.5}{R_s^2}, d_{HEX} = \frac{0.577}{R_s^2}$ 。

证明:根据推论 3,可以容易地得到 $d_{SQ} = \frac{1}{d^2}$ 。考虑到需要满足完全覆盖的约束,则最优边长 $d = \sqrt{2}R_s$ 。因此当 $R_c \geq \sqrt{2}R_s, d_{SQ} = \frac{0.5}{R_s^2}$ 满足覆盖和网络连通条件。同理可以得到 $d_{HEX} = \frac{1}{\sqrt{3}d^2} = \frac{0.577}{d^2} = \frac{0.577}{R_s^2}, R_c \geq R_s$ 。

通过比较定理及推论 2, 3, 4 的结论,可以得到在满足连通和完全覆盖两个约束条件下,带状 ST 拓扑结构具有至多 13.9% 的冗余度,而其他结构至少具有 47.9% 的冗余度。

基于以上分析,本文所寻找的满足覆盖增强问题需求的同构节点拓扑结构如图 5 所示。



(a) 正三角形 RTT 结构 ($R_c \geq \sqrt{3}R_s$); (b) 带状 ST 结构 ($R_c < \sqrt{3}R_s$)。

图 5 最优规则部署拓扑结构

2 规则覆盖增强算法

上一节对节点位置的优化连通覆盖拓扑结构进行了分析,但如何在某个监测域中合理布局,使之形成规则优化覆盖,仍需进行繁琐的定位计算。特别是当区域面积很大、形状不规则且节点数目很多的情况下,计算难度更大。本节将在现有虚拟力算法的基础上,讨论如何设计覆盖增强算法,部署实现该优化拓扑。

2.1 相关虚拟力算法

目前动态网络布局的典型策略主要是基于虚拟力^[20]方法。通过继承 A. Howard^[21]等人提出的势力场,建立节点间虚拟力模型,利用相关的物理定律做指导,自动完善网络覆盖性能,以均匀网络覆盖并保证网络覆盖范围最大化。Y. Zou^[22]最早提出了虚拟力算法 VFA,由于没有限制节点的移动距离,节点直接行走至目的地,将会花费很长时间和消耗很多电能,甚至导致其中途死亡,这对于能量有限的网络来讲是一个很大的缺陷。此外,当节点数目发生改变,该算法需要进行整个区域的重新部署,这无疑会增加计算开销。文献[23]提出的 CDA 算法用虚拟力的概念解决了无线传感器网络中的限制覆盖问题,但它局限于对称网络,算法的前提是每个传感器至少需要具有 K 个邻居节点,这无疑对网络覆盖本身和算法的普适性增加了限制。

总体上,现有的虚拟力布局方法存在如下不足之处:节点的自由移动很难保证较高的网络覆盖均匀性,同时传感器网络耗能不平衡,会导致过早出现失效节点。对节点移动距离的限制过于简单,这在大规模网络部署中无法避免节点在远距离移动过程中出现中断。

2.2 受力分析

在研究覆盖增强算法之前,需要做以下必要假设:

- (1) 所有传感器节点具有相似的结构和能力(数据处理和传输)。
- (2) 当节点初始部署完毕后(任意两个节点不在同一位置),每个节点都能够确定自身及其邻居节点(相对距离 $\leq R_c$)的距离和方位。
- (3) 节点可以朝任何方向自由移动,且耗能少,足够运行相当长一段时间。

与传统采用虚拟力算法部署不同,本文的研究工作在于实现特定的网络拓扑结构,来满足高覆盖率和连通度。在实际应用中,假设部署的所有传感器节点不受边界影响而自由移动是不现实的,这极易引起部分节点因远距离移动而失效,进而造成整个网络拓扑发生变化。在这种情况下,直接利用虚拟势力场方法来解决该问题将遇到困难。为提高算法效率,减少节点重复移动的概率,本文在文献[23]的基础上,采用由区域中心向周围扩展的螺旋型优化路径,对节点进行遍历并部署。下面将分别给出传感器节点所受虚拟力的计算方法。

(1) 传感器与区域中心 O 间的作用力

式(1)是本文提出的 O 点对传感器节点 i 的引力模型。其中, w_o 表示传感器与 O 点之间的虚拟力系数; $d_{i,o}$ 表示两者间的直线距离; $\hat{\theta}_o$ 为单位向量,指示虚拟引力方向,由节点 i 指向 O 点; D_{\max} 是在此情况下设定的传感器可移动的最大距离。式中 $(d_{i,o} - R_s)^{-2} \cdot \hat{\theta}_o$ 定义了虚拟力的表达式,其物理意义是向 $\hat{\theta}_o$ 方向移动 $(d_{i,o} - R_s)^{-2}$ 距离长度。

$$F_{s,o} (i=0,1,\dots,n) =$$

$$\begin{cases} 0, & \text{if } d_{i,o} = 0 \\ (w_o \times (d_o - D_{\max})(d_{i,o} - R_s)^{-2} \cdot \hat{\theta}_o), & \text{if } 0 < d_{i,o} \leq R_s \\ 0, & \text{if } d_{i,o} > R_s \end{cases} \quad (1)$$

(2) 传感器节点 i 与节点 j 间作用力

式(2)将在监测区域内实现 RTT 部署,保证在完全覆盖的前提下,实现节点利用率最大化。其他参量的含义同上。

$$\begin{cases} F_{R_{ij}} = (K_r \times d_{i,j}^{-2} \cdot \hat{\theta}_{ij}), F_{A_{ij}} = (K_a \times (\eta \delta - d_{i,j})^{-2} \cdot \hat{\theta}_{ij} + \pi) \\ F_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{if } d_{i,j} = \delta \\ \| F_{R_{ij}} + F_{A_{ij}} \|, & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

通过该作用合力 F_{ij} ($F_{R_{ij}}$ 为节点间斥力, $F_{A_{ij}}$ 为引力), 节点 i 将在 $d_{i,j} = \delta$ 达到静止。 K_r, K_a 表示节点之间的虚拟力系数,它的选取通过式(3) ($K_a = 1$)。 η 为引力的主要参数,目的是吸引节点使得相距为 δ , 通常 η 取值区间为 $(1, \sqrt{3}]$ 。

$$\begin{cases} d_{ij} = \delta & \| F_R + F_A \| = 0 \\ d_{ij} = 2R_s & \| F_R \| \approx 0 \\ d_{ij} = 0 & \| F_A \| \approx 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} K_r = \frac{K_a}{(\eta - 1)^2} \\ \sqrt{3}R_s \leq \delta \leq \sqrt{\sqrt{3} + 2}R_s \end{cases} \quad (3)$$

根据定理及推论 2, 推论 3, 当 $R_c < \sqrt{3}R_s$ 时, 需要将 RTT 部署进行调整, 以满足网络的连接性和最优覆盖。式(4)便是本文提出的实现 ST 部署的合力 F_{ij} 模型。由于处于不同的水平带, 节点受力不同, 需要分段进行受力分析。令 K 对以 O 点所在带为轴对称的水平带进行标号。情况 b) 只进行第 1 次的受力分析, 之后的计算与情况 a) 相同。其他参量的含义同上。

a) $K = 2t (t=0, 1, 2, \dots)$

$$\begin{cases} F_{R_{i(i-1)}} = (K_r \times d_{i,i-1}^{-2} \cdot \pi), \\ F_{A_{i(i-1)}} = (K_a \times (M - d_{i,i-1})^{-2} \cdot 0) \\ M = \begin{cases} \sqrt{3}R_s, & \text{第 1 次计算} \\ 2\sqrt{3}R_s - R_c, & \text{otherwise} \end{cases} \\ F_{ij} = F_{i(i-1)} = \begin{cases} 0, & \text{if } d_{i,j} = R_c \\ \| F_{R_{i(i-1)}} + F_{A_{i(i-1)}} \| \end{cases} \end{cases}$$

K_r, K_a 的选取:

$$d_{i,j} = R_c$$

$$\| F_R + F_A \| = 0 \Rightarrow K_r = K_a \frac{R_c^2}{(M - R_c)^2}$$

b) $K = 2t + 1 (t=0, 1, 2, \dots)$

$$\begin{cases} F_{R_{11}} = (K_r \times d_{1,1}^{-2} \cdot \pi) \\ F_{A_{11}} = (K_a \times (\sqrt{3}R_s - d_{1,1})^{-2} \cdot 0) \\ F_{11} = \begin{cases} 0, & \text{if } d_{i,j} = R_c \\ \| F_{R_{11}} + F_{A_{11}} \|, & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

K_r, K_a 的选取:

$$d_{i,j} = R_c \quad \| F_R + F_A \| = 0 \Rightarrow K_r = K_a \frac{R_c^2}{(\sqrt{3}R_s - R_c)^2}$$

式(5)是本文给出的传感器综合受力模型公式, 式中系数 λ_1, λ_2 可根据应用需求进行调整。通过该作用合力 F_i , 将最终得到本文第 1.2.2 节提出的最优规则部署拓扑结构。

$$F_i = \lambda_1 \times F_{s,o} + \lambda_2 \times \sum_{j=1}^n F_{ij} \quad (5)$$

2.3 控制规则

式(1)~式(5)完全建立在虚拟物理系统之上, 因此需要

引入控制规则将其映射到现实系统。考虑到现实节点的非自由态以及节点运动方向的等概率性,本文忽略其所受的运动学约束,重点讨论动力学约束。

本运动模型中的动力学约束主要体现在速度、加速度与移动距离之间的关系。基于文献[21]提出的控制规则,考虑到能耗问题,本文利用虚拟力移动传感器节点的微调方法,即节点的运动速度受限于最大速度矢量 V_{max} ,这样可以保证算法的快速收敛达到最优解。以节点平均移动距离 \bar{L} 作为能耗的衡量标准,设置距离阈值 τ ,当移动距离(计算方法如式(6)) $\Delta d_i \in [(1-\tau)\bar{L}, (\tau+1)\bar{L}]$ 时,区域 $\text{Grid}[\text{width}, \text{height}]$ 中的节点 $s_i(x, y)$ 才可以移动。

经过数个时间步长 Δt 后,当所有节点停止移动,整个传感器网络即达到稳定状态。但由于节点以固定位移限制最大移动距离,它可能无法精准地移动到理想位置上,从而出现振荡。为避免这种情况,一般的方法是力设置门限值 ϵ ,即当 $\|F_i\| \leq \epsilon$ 时,认为节点已达到稳定状态。

$$\Delta d_i = \begin{cases} 0, & \text{if } \|F_i - \epsilon\| = 0 \\ \frac{\|V\| \cdot \Delta t}{F_i - \epsilon} \times [(F_i - \epsilon)_x^2 + (F_i - \epsilon)_y^2]^{1/2}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\|V\| = \min\{\|V_{max}\|, \sqrt{(\text{width} - x)^2 + (\text{height} - y)^2} / \Delta t\}$$

令 V 表示节点在 t 时刻的速度, ΔV 表示速度变化量,其方向与合力 F_i 保持一致。式(7)简单地描述了本运动模型的控制规则。

$$\Delta V \leftarrow 2 \left(\frac{\Delta d}{\Delta t} - V \right)$$

$$V \leftarrow V + \Delta V$$

2.4 RCEA 算法描述

基于上述分析,本文提出了基于虚拟力的网络规则覆盖增强算法 RCEA。算法描述如下:

RCEA 算法

输入: 节点 $s_i(R_c, R_s)$ 及其邻居节点的位置, 个数(Degree)和传感方向信息, $(\text{width}, \text{height})_{\text{Grid}}$;

输出: 最优网络拓扑结构(RTT&ST)

1. Loops \leftarrow 0;
2. While(loops $<$ MAX_LOOPS)
3. For $s_i(x, y) \in \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$
4. If $(x^2/\text{width}^2 + y^2/\text{height}^2 = 1)$
Break; // 边界控制
5. $\lambda_2 \leftarrow$ 0;
6. 计算 s_i 当前合力 F_i , 确定其移动距离并调整至目标位置 $s_i(x, y)_{\text{new}}$;
7. If $(s_i(x, y)_{\text{new}} = O(x, y))$ Break;
8. Degree \leftarrow 6;
9. CDA algorithm(s_i , Degree);
10. For $j \in \{1, 2, \dots, \text{Degree}\}$
11. $\lambda_1 \leftarrow$ 0; $i \leftrightarrow j$;
12. Return Step 7;
13. While(1) // 开始 TT 部署
14. 螺旋遍历节点, Degree \leftarrow 2;
15. Step 9-12;
16. Sleep(Δt);
17. If $(R_c \geq \sqrt{3}R_s)$ Break;
18. While(1) // 开始 ST 部署
19. $i \leftarrow$ ID [s_i];

20. For $k \in \{0, 1, \dots, \text{MAX_LINE}\}$
 21. 遍历第 k 行节点, 计算节点 $s_{(i-1)}(x, y)$ 对 s_i 的合力 F_i , 并移动节点 s_i ;
 22. 节点移动后, 重新标号 $\text{ID}[s_{(x=x \pm 2\sqrt{3}R_s - R_c)}] \leftarrow i$; // ID 表示节点标号
 23. $\text{ID}[s_i] \leftarrow i-1$;
 24. Sleep(Δt);
 25. Loops \leftarrow Loops + 1;
- END

3 算法仿真及性能分析

本节通过仿真实验对 RCEA 算法进行验证和分析。实验主要考察在一个面积为 400×400 的 ROI 平面中部署 50 个无线传感节点的覆盖问题。实验中参数的取值如表 1 所列。

表 1 实验参数

节点感知/通信半径 R_s, R_c	受力门限 ϵ	距离门限 τ	最大速度矢量 $\ V_{max}\ $
40, 20	$10e-4$	0~1	1 /ms

初始化随机部署后传感器节点位置如图 6 所示, 其节点对 ROI 区域的覆盖程度为 45%。图 7 和图 8 是采用 VFA 和 RCEA 算法得到的仿真结果。直观看来, 节点在虚拟力作用下进行扩散运动, 逐步消除网络中感知重叠区和盲区, 节点基本分布在 ROI 区域内部, 所以覆盖程度有较大的提高, 在 25 次时已基本实现 RTT 部署(见图 7(a)), 其覆盖程度达到 97% 以上。图 8 是在节点通信半径 $R_c < \sqrt{3}R_s$ 的条件下, 为保证网络连通而实现的 ST 部署, 其覆盖程度达到 82% 以上。

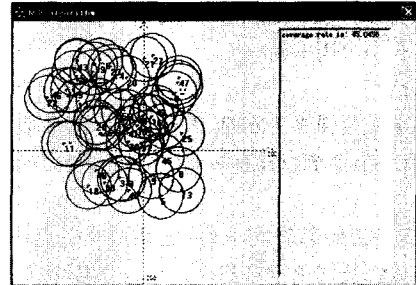
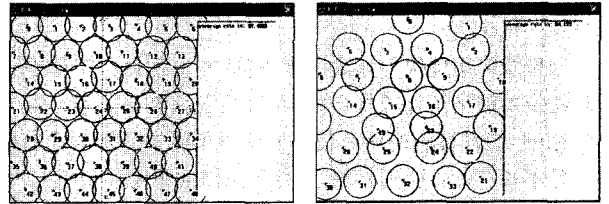


图 6 随机部署



(a) RTT 部署 $\delta=70$ (b) VFA 算法部署

图 7

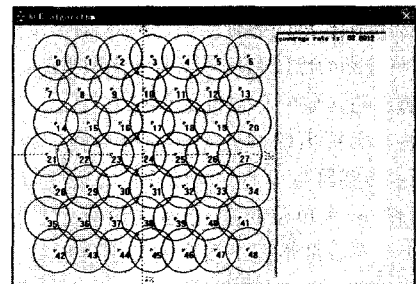


图 8 基于 RTT 的 ST 部署

由于没有边界的限制,节点在 VFA 虚拟力的作用下(见图 7(b))有分离的趋势,甚至出现一些节点移至 ROI 区域外。算法尽管能够保证一定的覆盖均匀度,但可能造成某些区域的覆盖出现严重漏洞。

由图 7 和图 9 可以看出,在节点数目一致的条件下,RCEA 算法的优化效果优于 VFA 算法。这一方面是由于 RCEA 是以最优覆盖部署模型为算法的设计基础,它能够保证节点均匀分布的同时,使节点对 ROI 区域的覆盖程度最大化。另一方面由于在 VFA 中部分节点相互排斥而移出 ROI,这会导致其覆盖均匀程度和覆盖效率不佳。

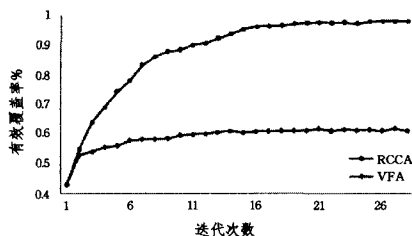


图 9 两种算法的收敛速度比较

图 10 反映了 RCEA 算法能够显著地降低网络部署开销。假设预期网络覆盖率为 90%,传统算法至少需要部署 $\frac{\ln(1-p)}{\ln(1-\frac{\pi R_s^2}{|A|})} = 72$ 个节点,VFA 算法需要部署 35 个节点,而

RCEA 在仅仅部署 20 个节点的情况下便能达到 90% 的网络覆盖率,这极大地降低了网络部署成本。

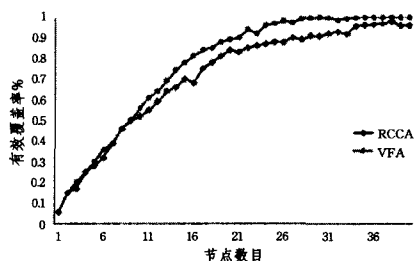


图 10 两种算法的网络部署效率比较

由于节点移动消耗的能量远远大于通信和信息采集时消耗的能量,为降低网络的能量消耗,算法中应尽量减少节点的移动距离。图 11 对不同节点数目下 VFA 和 RCEA 算法达到完全覆盖后节点的平均移动距离进行了跟踪,其结果表明,RCEA 算法的平均移动距离远低于 VFA 算法。这是因为 RCEA 算法考虑到边界控制和距离限制,修正后的节点 $S(x, y)$ 的移动距离为 $(1-\tau)V_{\max} \cdot \Delta t \leq d \leq (1+\tau)V_{\max} \cdot \Delta t$ ($\tau=0.3$)。因此与 VFA 算法相比,RCEA 算法能够在保证网络覆盖质量的同时节约网络能量。

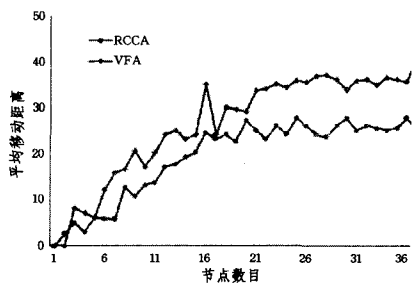


图 11 两种算法的移动距离比较

结束语 本文研究了无线传感器网络覆盖优化问题,通

过理论上对规则覆盖模型的分析,考虑边界、节点无效移动和最佳移动距离的因素设计了高效率的算法(RCEA)。实验表明,RCEA 与 VFA 算法相比耗时少,收敛速度快,能够以较小的网络部署成本获得较为理想的网络覆盖性能。从节约能量方面,RCEA 算法中节点的平均移动距离低于 VFA 算法,有利于延长网络寿命。

本文的贡献主要体现在:(1)所提出的规则覆盖增强算法,与以节点等距为假设的 CDA 算法相比,能够有效地解决大规模随机部署所带来的定位不精准、感知域重叠和缺失等问题。(2)算法是在对多种网络拓扑结构优化分析的基础上提出的,因此具有很强的理论基础,即算法能够保证以最少节点数目来实现完全覆盖和网络连通。(3)采用适当手段对节点的能量消耗和剩余能量分布的均衡性进行调整;考虑边界、节点无效移动和最佳移动距离因素,引入能耗均衡因子,在增强整个传感器网络覆盖的同时,降低平均能耗。

参考文献

- [1] Ratnasamy S, Karp B, Shenker S, et al. Data-Centric Storage in Sensornets with GHT[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2003, 8(4): 427-442
- [2] Shin J, So A, Guibas L. Supporting Group Communication among Interacting Agents in Wireless Sensor Networks[C]// *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. New Orleans, USA: IEEE Press, 2005
- [3] Szewczyk R, Osterweil E, Polastre J, et al. Habitat Monitoring with Sensor Networks[J]. *Communications of the ACM*, 2004, 47(6): 34-40
- [4] 刘丽萍,王智,孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1752-1757
- [5] Gage D W. Command control for many-robot systems [C]// *Proc. of the 19th Annual Technical Symp on Heterogeneous Autonomous Undersea Vehicles*. Huntsville AL: ACM, 1992: 22-24
- [6] Meguerdichian S, Koushanfar F, Potkonjak M. Coverage problems in wireless ad-hoc sensor network[C]// *Proc. of the IEEE INFOCOM 2001*. Anchorage, Alaska, USA: IEEE Press, 2001: 1380-1387
- [7] Tian D, Georganas N D. A node scheduling scheme for energy conservation in large wireless sensor networks[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003, 3(2): 271-290
- [8] Ye F, Zhong G, Cheng J, et al. PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks[C]// *Proc. of the Int Conf on Distributed Computing Systems*. Rhode Island, USA: IEEE Press, 2003: 28-37
- [9] Cardei M, Du D Z. Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization [J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(3): 333-340
- [10] Slijepcevic S, Potkonjak M. Power efficient organization of wireless sensor networks[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*. Helsinki, Finland, 2001
- [11] Zhang H, Hou J C. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks[J]. *Ad Hoc and Sensor Wireless Networks*, 2005, 1(1): 89-123
- [12] Gupta H, Das S, Gu Q. Connected sensor cover: Self-organization of sensor networks for efficient query execution[C]// *Proc. of the 4th ACM Int Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Annapolis, MD, USA: ACM Press, 2003

- [13] Bartlett F. The homogeneous poisson point process [M]. Case Studies in Spatial Point Process Modeling. New York : Springer Verlag;153-167
- [14] Liu B, Towsley D. A study of the coverage of large-scale sensor networks[C]//Proc. of the 1st IEEE Int Conf on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. Fort Lauderdale, FL: IEEE Press, 2004: 475-483
- [15] 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[J]. 软件学报, 2007, 18(05): 1152-1163
- [16] Kershner R. The Number of Circles Covering a Set[J]. American Journal of Mathematics, 1939, 61: 665-671
- [17] 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(03): 422-433
- [18] Bai X, Kumer S, Xuan D, et al. Deploying wireless sensors to achieve both coverage and connectivity[C]//Proc. of ACM Annual International Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing. Florence, Italy, ACM, 2006: 131-142
- [19] Iyengar R, Kar K, Banerjee S. Low-coordination Topologies for Redundancy in Sensor Networks[C]//Proc. of the 6th ACM Annual Int Symp on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing. Urbana-Champaign, Illinois, USA: ACM, 2005: 332-342
- [20] Wang X, Wang S, Ma J. Dynamic deployment optimization in wireless sensor networks[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2006, 344: 182-187
- [21] Howard A, Mataric M J, Sukhatme G S. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem[C]//Proc. of the 6th Int Symp on Distributed Autonomous Robotic Systems. Japan: Springer-Verlag, 2002: 299-308
- [22] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor deployment and target localization based on virtual forces[C]//Proc. of the IEEE INFOCOM. Sun Francisco, USA: IEEE Press, 2003: 1293-1303
- [23] Poduri S, Suklatme G S. Constrained Coverage for Mobile Sensor Networks[C]//Proc. of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. New Orleans, LA, USA: IEEE Press, 2004, 1(1): 165-171

(上接第 26 页)

- [16] 万树平. 对方案有偏好的最小最大偏差多属性决策方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 195-197
- [17] 柳玉鹏, 李军. 基于决策者偏好信息的合作伙伴选择决策模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 602-605
- [18] Lee K S, Park K S, Eum Y S, et al. Extended methods for identifying dominance and potential optimality in multi-criteria analysis with imprecise information[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 134(3): 557-563
- [19] 王晓玲. 不完全信息下对方案有偏好信息的多指标决策[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(4): 136-140
- [20] Pan Jiuping, Rahmans T Y. An interval based MADM approach to the identification of candidate alternatives in strategic resource planing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1441-1446
- [21] 樊治平, 龙天慧, 张尧. 属性权重信息不完全的区间数多属性决策方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2005, 26(8): 798-800
- [22] 卫贵武. 权重信息不完全的区间数多属性决策 GRA 方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(12): 1834-1836
- [23] 刘德峰. 求解信息不完全多目标问题的两种决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 1998, 21(12): 59-61
- [24] 许叶军, 达庆利. 不确定型多属性决策的权系数确定及其应用[J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14(5): 434-437
- [25] 宋慈勇, 赵新宇, 孙吉刚, 等. 基于离差平方集对分析评标模型[J]. 中国水运, 2009, 9(3): 78-79
- [26] 杨静, 邱苑华. 基于投影技术的三角模糊数型多属性决策方法研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 637-640
- [27] 姚炳学, 张方伟. 一种基于模糊语言评估的多属性决策方法[J]. 模糊系统与数学, 2008, 22(4): 120-123
- [28] 姚敏, 张森. 模糊一致矩阵及其在软科学中的应用[J]. 系统工程, 1997, 15(2): 54-57
- [29] Chang D Y. Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP[J]. European Journal of Operational Research, 1996 (3): 649-655
- [30] Xu R N, Zhai X Y. Fuzzy Logarithmic Least Squares Ranking Method in Analytic Hierarechy Process[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 92(2): 175-190
- [31] Kwifisielewicz Z M. A Note on the Fuzzv Extension of Satty's Priority Theory [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 98(2): 161-172
- [32] Leung L C, Cao D. On Consistency and Ranking of Alternatives in Fuzzy AHP [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 116(1): 102-113
- [33] Chein C J, Tsai H H. Using Fuzzy Numbers to Evaluate Perceived Service Quality[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 117(2): 289-300
- [34] Chen C T. Extensions of the TOPSTS for Group Decision Making under Fuzzy Environment [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 116(1): 1-9
- [35] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的最小方差法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(10): 93-96
- [36] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001, 16(4): 311-314
- [37] 樊治平, 姜艳萍. 一种三角模糊数互补判断矩阵的排序方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(7): 34-36
- [38] 姜艳萍, 樊治平. 三角模糊数互补判断矩阵排序的一种实用方法[J]. 系统工程, 2002, 20(2): 89-92
- [39] 牟琼, 杨春德. 一种基于梯形模糊数互补判断矩阵确定权重的方法[J]. 重庆邮电学院学报: 自然科学版, 2006, 18(6): 809-812
- [40] 万树平. 基于多维偏好分析的三角模糊数型多属性决策方法[J]. 统计与决策, 2009(1): 42-44
- [41] 马淑兰, 刘宣会. 投资决策中有方案偏好的模糊多属性决策方法[J]. 唐山师范学院学报, 2009, 31(2): 39-41
- [42] Yanger R R. Families of OWA operators [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 59(1): 125-148
- [43] Xu Z S, Da Q L. An overview of operators for aggregating information[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2003, 18(9): 953-969
- [44] Yanger R R. Induced ordered weighted averaging operators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics; Part B, 1999, 29(2): 141-150
- [45] Mitchell H B, Schaefer P A. Multiple priorities in an induced ordered weighted averaging operator[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2000, 15(4): 317-327
- [46] Xu Z S, Da Q L. The uncertain OWA operators[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002, 17(6): 569-575
- [47] Herrera F, Herrera V E, Verdegay J L. Direct approach processes in group decision making using linguistic OWA operators [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(2): 175-190
- [48] 汪新凡, 杨小娟. 基于 FV-OWA 算子的不确定多属性决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 380-383
- [49] 龚艳冰, 梁雪春. 基于模糊 C OWA 算子的模糊多属性决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1478-1480