



文章编号:1001-9081(2018)09-2581-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018020357

## 半径可调的无线传感器网络三维覆盖算法

党小超<sup>1,2</sup>, 邵晨光<sup>1</sup>, 郝占军<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北师范大学 计算机科学与工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省物联网研究中心, 兰州 730070)

(\*通信作者电子邮箱 haozhanjun@126.com)

**摘要:**针对三维无线传感器网络区域中节点覆盖的问题,提出一种半径可调的无线传感器网络三维覆盖算法(3D-CAAR)。该算法利用虚拟力作用实现无线传感器网络的节点均匀部署,同时结合传感器节点的半径可调覆盖机制,判断节点与被覆盖区域中目标点之间的距离。引入能耗阈值,使得节点根据自身情况调节节点感知半径,从而降低无线传感器网络的整体能耗,提高了节点利用率。最后,通过与传统基于人工势场的三维部署算法(APFA3D)、基于与未知目标精确覆盖的三维算法(ECA3D)仿真实验对比,3D-CAAR 的事件集覆盖效能明显较高,能有效解决三维无线传感器网络中对目标节点的覆盖问题。

**关键词:**无线传感器网络;三维覆盖;虚拟力;半径可调;事件集

**中图分类号:** TP393.02    **文献标志码:**A

### 3D-coverage algorithm based on adjustable radius in wireless sensor network

DANG Xiaochao<sup>1,2</sup>, SHAO Chenguang<sup>1</sup>, HAO Zhanjun<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Computer and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2. Gansu Province Internet of Things Engineering Research Center, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** For the problem of coverage in 3D Wireless Sensor Network (WSN), this paper introduced a Three-Dimensional Coverage Algorithm based on Adjustable Radius in wireless sensor network (3D-CAAR). Virtual force was used to achieve uniform distribution of nodes in WSN, at the same time, the distance between a sensor node and the target points in the covered area were determined by the radius adjustable coverage mechanism of sensor nodes. An energy consumption threshold was introduced to enable nodes to adjust their radii according to their own situations, thus reducing the overall network energy consumption and improving node utilization rate. Finally, compared with the traditional ECA3D (Exact Covering Algorithm in Three-Dimensional space) and APFA3D (Artificial Potential Field Algorithm in Three-Dimensional space) by experiments, 3D-CAAR can effectively solve the problem of target node coverage in sensor network.

**Key words:** Wireless Sensor Network (WSN); 3D-coverage; virtual force; adjustable radius; event set

### 0 引言

无线传感器网络是部署在特定监测区域由大量的微型传感器节点所组成的一个多跳的自组织网络系统<sup>[1]</sup>。无线传感器节点间相互通信,采集和处理网络覆盖区域中所需要监测对象的信息,并发送给监测者。其中节点的覆盖性能的优劣反映无线传感器网络性能的一个基本问题<sup>[2]</sup>。无线传感器网络的覆盖问题研究最开始主要集中在二维平面内,由于现实环境的复杂性,三维环境的覆盖研究很少。随着对无线传感器网络技术的研究不断成熟,以往传统的二维平面模型和圆盘感知的节点覆盖模型已不适用于现实的复杂环境<sup>[3-4]</sup>。

目前,针对三维覆盖中如何保证网络覆盖效率最大化,在减少覆盖盲区的同时增大节点的利用率和降低节点的能耗延长网络寿命,是当前覆盖相关研究的热点。早期,一些国外学者提出基于虚拟力的部署算法,但直接利用虚拟力下的作用移动传感器节点实现最大化覆盖并减少覆盖冗余的方法较为单一,同时会有部分节点因为移动能耗过大而死亡。文献

[5]中提出三维复杂地形定向传感器网络的表面覆盖算法,该算法基于节点的三维定向感知模型,采用网格划分、模拟退火和局部最优思想,通过优化节点的位置坐标和偏差角度来提高覆盖率,但是针对定向传感器部署优化,研究对象仍为节点感知半径相同的同构节点,而感知半径可调的异构节点研究更符合实际应用。文献[6]中提出在三维水下环境中的传感器节点确定性部署策略,利用布谷鸟搜索算法以找到节点的最佳位置,减少网络能耗并与随机算法进行对比;虽然有效地提高了覆盖率,但对网络能耗却没有进一步分析且算法不适用于异构网络。王昌征等<sup>[7]</sup>针对三维的有向异构的传感器网络随机部署中出现的覆盖盲区等问题,提出了一种基于粒子群优化算法并引入三维质心进行优化,改变了节点的感知方向以提高覆盖率,但该算法复杂度较高且覆盖率提高得不明显,最后网络能耗较大。文献[8]中提出基于虚拟力的三维移动无线传感器网络的重新部署,对感兴趣的区域实现网络的全覆盖以及保证网络连通,但仅仅对虚拟力算法进行改进,并没有理论分析其覆盖率和网络能耗。吴帅等<sup>[9]</sup>提出

收稿日期:2018-02-08;修回日期:2018-04-18;录用日期:2018-05-07。    基金项目:国家自然科学基金资助项目(61662070, 61762079);甘肃省科技重点研发项目(1604FKCA097, 17YF1GA015);甘肃省科技创新项目(17CX2JA037, 17CX2JA039)。

**作者简介:**党小超(1963—),男,陕西韩城人,教授,硕士,CCF 高级会员,主要研究方向:无线传感器网络; 邵晨光(1994—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络; 郝占军(1979—),男,河北邢台人,副教授,硕士,CCF 会员,主要研究方向:物联网、室内定位、位置服务。



一种面向三维无线传感器网络覆盖增强的节能算法,该算法通过优化节点位置信息使传感器节点能相对均匀地分布在所感兴趣的监测区域中,并使用集合覆盖模型算法计算出网络中的冗余节点,最后使冗余节点移动到覆盖空洞区域,提高了监测区域的覆盖程度。虽然移动冗余节点提高了覆盖率,但未对冗余节点进行剩余能量判断以及如何降低移动不必要的节点能耗进行分析,可能会导致整个传感器络的能耗过大。文献[10]中研究了三维网络的覆盖和连通问题,为实现全覆盖对冗余的传感器节点的每个子集动态选择保持活跃状态,同时利用截顶八面体细分单元减少节点数量实现 $k$ -覆盖,但此方法在三维部署中效率较低且节点的能耗大。杜晓玉等<sup>[11]</sup>针对异构的传感器网络节点在初始部署时产生的覆盖盲区问题,提出一种适用于感知半径异构的无线传感器网络覆盖优化算法使得平面覆盖得到优化。秦宁宁等<sup>[12]</sup>针对节点感知半径不相同的移动传感器网络节点的部署问题,提出一种基于VL(Voronoi Laguerre)图分割的节点自主部署算法(Autonomous Deployment Algorithm, ADA);该算法首先对目标区域作VL图划分,将目标区域的覆盖任务分配给每个传感器节点,再通过构造VL受控多边形来确定下一轮的候选目标位置,传感器节点通过逐轮更新自身位置信息,从而提高网络覆盖程度。以上两种算法都是对基于二维平面进行覆盖优化并都能提高网络的覆盖率,但不能直接用于三维现实环境的覆盖且算法的复杂度较高。谭勋等<sup>[13]</sup>针对三维空间中无线传感器网络的节点部署中出现的覆盖空洞,提出了基于虚拟力补偿的三维空间自主部署的覆盖算法,同时建立了节点模型和覆盖目标,将虚拟力算法由二维应用到三维,使节点能够根据被监测目标的信息实现均匀覆盖。最后对算法在现实环境中进行实验,提高了算法的可靠性。作者主要对覆盖空洞进行了分析研究,较好地避免节点因高度问题而出现的覆盖空洞,但未能分析算法实验的能耗及覆盖度来进一步说明实验的有效性。

本文主要研究基于半径可调的无线传感器网络的覆盖问题,其传感器节点的感知半径异构并且每个节点的初始功率不同。在之前提出的三维环境覆盖相关研究中,利用虚拟力算法VFA-3D(Virtual Force Algorithm in Three-Dimensional)<sup>[14]</sup>使得随机部署在监测环境中的节点借助虚拟场势力进行重新部署,但VFA-3D并不适用于覆盖程度不同的环境和传感器节点半径异构的无线传感器网络,因此出现节点的利用率不高和网络能量消耗过快的问题。本文主要依据感知半径可调的传感器网络异构节点在感兴趣的区域中对要检测的目标点覆盖问题提出了一种半径可调的无线传感器网络三维覆盖算法(Three-Dimensional Coverage Algorithm based on Adjustable Radius in wireless sensor network, 3D-CAAR)。该算法借助虚拟力的作用使得传感器节点初始均匀分布,同时结合节点半径可调特性以及节点能耗判断与目标点的距离,提高节点的利用率和网络生存时间。最后将本文算法与经典的基于人工势场的三维部署算法(Artificial Potential Field Algorithm in Three-Dimensional space, APFA3D)和基于与目标精确覆盖的三维覆盖算法(Exact Covering Algorithm in Three-Dimensional space, ECA3D)进行比较。这两种对比算法虽然都能使节点在三维环境中较好地分布在目标区域中同时覆盖率较高,但存在没有考虑不同程度覆盖区域的覆盖要求不一致的缺点。例如在实际监测过程中对于目标区域中所要检测目标事件密集的地方需进行更多的覆盖,而对目标事件较少的区域则不必过多覆盖。本文提出了3D-CAAR来弥补这两种算法的缺陷。

## 1 三维感知模型与相关定义

### 1.1 感知半径可调的节点感知模型

实际应用中,每个无线传感器节点自身的初始能量都存在差异,导致传感器节点的感知半径随发射功率的不同而变化。本文研究的是基于半径可调的无线传感器网络在三维环境中的目标覆盖算法,其半径为传感器节点的感知半径且感知半径可以改变,具体感知半径调整的范围步骤由第3章中的算法详细给出。在此,先假设无线传感器网络节点感知半径可调,其节点感知模型为节点为圆心、感知半径可调的球形区域,如图1所示。假设图1的(a)中黑色的圆球为节点初始的感知范围,灰色的大球为感知半径增大后的感知范围。图1(b)为球感知模型的俯视图,假设 $R_1$ 为传感器节点的初始感知半径, $R_2$ 为节点感知半径减小后的半径。

传感器节点初始时随机撒布在目标点区域,这样可能导致传感器节点分布不均匀、节点能量消耗过大以及部分目标点重复覆盖,降低了传感器节点的利用率;同时,部分目标点可能出现未被覆盖,存在遗漏问题。其中,传感器的节点的感知半径可以利用算法调整,具体调整步骤由下文随后给出。如图2目标点覆盖模型所示,节点覆盖出现了多余覆盖,为了节省节点能耗,节点根据算法与被覆盖目标之间的距离调整感知半径以降低传感器网络能耗,延长网络生存时间。

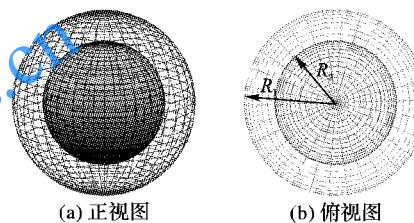


图1 球感知模型的正视图和俯视图  
Fig. 1 Front view and top view of ball perception model

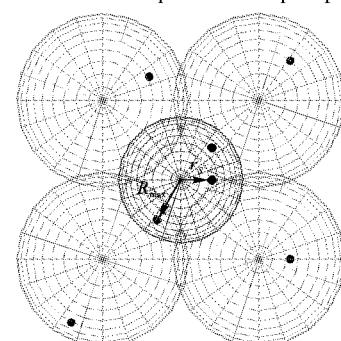


图2 目标点覆盖模型  
Fig. 2 Target node coverage model

### 1.2 相关问题的分析和定义

传统的节点覆盖模型是以节点为圆心、感知距离为半径的球形区域且每个节点的初始能量都相同;然而在实际应用中,传感器网络中的各个传感器节点由于生产工艺、自身能量的消耗不同等导致其初始能量 $E_i$ 都不相同,从而其感知半径随着发射功率的大小而改变。本文中半径可调的传感器节点的感知区域是节点感知半径可调的覆盖模型。为了减少传感器节点在覆盖过程中多余的能耗,同时提高传感器节点的利用率,使用较少的节点覆盖较多被监测的目标点事件;如图2所示中间的小球表示该节点通过算法判断出与被覆盖到的目标点之间的最大距离 $R_{\max}$ 小于自身的初始感知半径 $r_s$ ,减小 $r_s$ 到合适的覆盖距离。所以,本文主要研究如何在部分节点根据自身情况调整覆盖半径下,使该节点的能耗降低、生命周期



增长,同时使得对所监测目标事件的网络生存时间增加。

本文在基于半径可调的无线传感器网络三维覆盖算法研究之前,首先作出以下假设:

1) 传感器节点的半径异构,即节点的感知半径可调,但半径异构的传感器网络节点的初始半径相同。

2) 半径异构的传感器网络节点初始时随机部署节点,并且传感器节点可以移动。

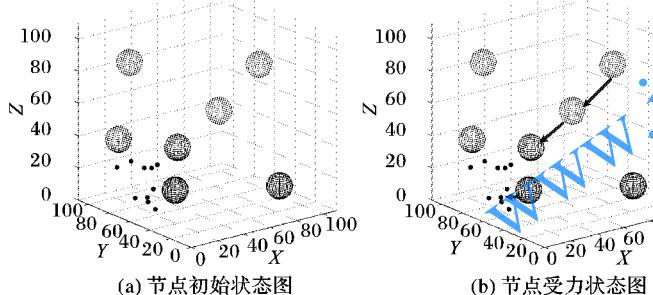
3) 传感器节点可以获知各自的位置坐标和目标点之间的距离。

相关定义如下。

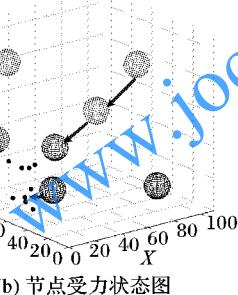
**定义1** 三维感知模型。假设传感器节点  $s_i$  位于坐标为  $(x, y, z)$  三维目标区域  $R^3$  中,并且其感知半径为  $r_s$ ,那么  $s_i$  的感知区域是一个以  $r_s$  为感知半径,球心为  $(x, y, z)$  的圆球,则将其称为  $s_i$  的感知圆球  $Sa(s_i)$ ,该感知圆球满足:  $Sa(s_i) = \{p | p \in R^3, d(s_i, p) \leq r_s\}$ ,其中  $p$  为空间中的点。

**定义2** 邻居节点。空间中传感器节点  $n_i$  的通信范围是以  $r_c$  为通信半径的感知圆球。规定,当空间中两个传感器节点间的欧氏距离小于或等于节点自身的通信半径  $r_c$  时,则称这两个节点互为邻居节点<sup>[15]</sup>。这两个节点间感知范围的球域会相切或者相交。

**定义3** 覆盖率。传感器节点在工作一段时间后,会出现能量消耗或者部分节点失效,使得空间中目标点的覆盖率下降。本文算法采用利用节点半径可调的特点结合虚拟力算法



(a) 节点初始状态图



(b) 节点受力状态图

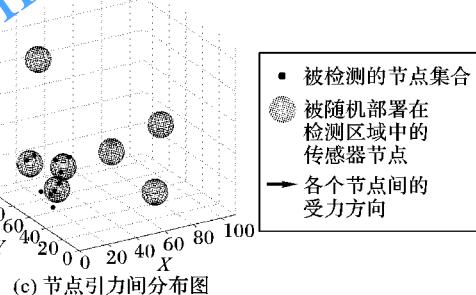
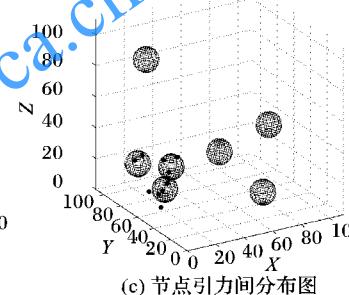


图3 节点覆盖模型

Fig. 3 Node coverage model

本文中改进后的虚拟力算法假设三维区域中受到3个作用力。在无线传感器网络算法优化的过程中,每个传感器节点随着其受到总的合力大小进行移动,进而达到节点受力平衡而对目标区域均匀覆盖。假设在监测区域中传感器节点受到的虚拟力合力为  $F_i$ ;节点间的相互作用力为  $F_{ij}$ ;目标区域对传感器节点的吸引力为  $F_a$  以及障碍物与节点之间的作用力为  $F_r$ <sup>[17]</sup>,可得出:

$$F_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{ij} + F_a + F_r \quad (5)$$

节点之间的相互作用力  $F_{ij}$  表示各个节点之间的相互引力以及相互斥力。为了进一步约束传统虚拟力下因为移动距离过大而导致节点死亡情况的出现,引入节点之间的距离阈值,并通过规定各个节点间的距离范围去分别表示节点的受力情况以及在力的作用下的移动情况。 $F_{ij}$  的计算公式为:

$$F_{ij} = \begin{cases} +\infty, & 0 < d_{ij} \leq r_{min} \\ (-k_1 m_i m_j)/d_{ij}^{a_1}, & r_{min} < d_{ij} < r_b \\ 0, & d_{ij} = r_b \\ (-k_2 m_i m_j)/d_{ij}^{a_2}, & r_b < d_{ij} \leq r_c \\ 0, & d_{ij} > r_c \end{cases} \quad (6)$$

其中: $k_1, k_2, a_1, a_2$  表示增益系数; $m_i, m_j$  表示节点质量因子(通

优化,使节点均匀分布提高整体覆盖率。覆盖率定义为:

$$S(p) = \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} s_i(p) \quad (1)$$

其中: $S(p)$  为传感器网络的整体覆盖率; $p$  为区域中的任意一个监测点; $n$  为待测点数。

$$s_i(p) = 1 - \prod_{1 \leq i \leq n} (1 - s_i(p)) \quad (2)$$

其中: $i$  为正常工作的节点个数, $s_i(p)$  表示节点对待测点  $p$  的覆盖率。

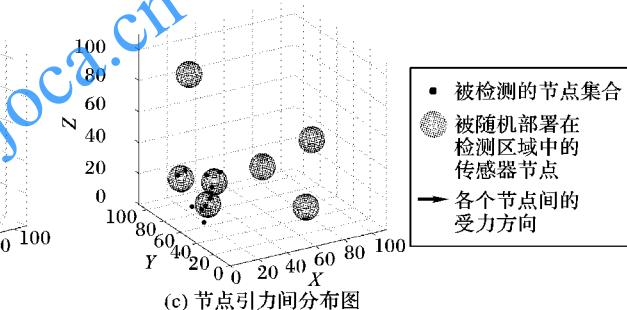
$$s_i(p) = \begin{cases} 1, & d(s_i, p) \leq r_i \\ 0, & d(s_i, p) \geq r_i \end{cases} \quad (3)$$

其中  $d(s_i, p)$  表示点  $p$  到节点  $s_i$  的距离。由式(4) 可计算表示为:

$$d(s_i, p) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (4)$$

## 2 虚拟力相关模型

为了进一步直观理解无线传感器网络中虚拟力的作用,设计出图3 所示的虚拟力下的节点覆盖模型。图3 (a) 表示传感器节点初始状态下随机分布在监测点的周围,此时节点未能理想地覆盖所需要监测的目标事件集<sup>[16]</sup>。图3 (b) 中表示节点受到各事件之间的相互作用力开始移动。图3 (c) 显示传感器节点在力的作用下移动到所要覆盖的目标事件中。



常取单位1);  $d_{ij}$  表示节点和节点之间的欧氏距离; $r_{min}$  表示节点间的最小安全距离, $r_b$  表示传感器节点之间的平衡距离即所受合力为零的位置。当节点之间的距离在  $r_{min}$  和  $r_b$  之间时,节点之间相互排斥;当节点之间的距离等于平衡距离  $r_b$  时,则节点不受到作用力;当节点之间的距离在  $r_b$  与  $r_c$  之间时,节点相互吸引;当节点之间的距离大于  $r_c$  时,节点间的作用力将会消失。

## 3 3D-CAAR 描述

在三维空间区域中部署传感器节点,本文算法中节点首先判断此时自身的位置信息和能量状态,同时计算出与邻居节点的位置关系,进而判断传感器节点是否需要根据当前的位置信息进行调整。此时该节点在虚拟力合力的作用下,移动自身位置重新部署最后达到理想的覆盖。通过上述的分析和说明,本文提出一种半径可调的无线传感器网络算法(3D-CAAR)。首先进行算法的假设:

- 1) 传感器节点的感知模型是其初始感知半径  $r_s$  都相同的球体;
- 2)  $n$  个传感器节点具有感知、通信以及可移动能力;
- 3) 为了保证节点间的相互连通性,其通信半径为 2 倍的感知半径且通信半径随感知半径变换而变化, $r_c = 2r_s$ ;



- 4) 节点的最大感知半径范围为  $[R_{\max}, R_{\min}]$ ;
- 5) 节点的最大移动步长为  $dir_{\max}$ ;
- 6) 每个节点初始能量  $E_i$  都不相同, 其最大有效时间剩余能量为  $E_{i,\max}$ 。

本文创新性地将传感器节点半径可调的特性与改进后的虚拟力算法结合起来。为了更加有效地提高算法的有效性, 规定变化后的节点感知半径的最大距离为  $R_{\max}$ , 增大节点的初始感知半径  $r_s$  范围为  $R_m$ , 则  $R_m = r_s + R_k$ , 其中  $R_k$  为实际增大距离, 所以节点增大后的范围  $r_s < r_s + R_k \leq R_{\max}$ 。传感器节点中心到被覆盖范围内的目标点之间的最大距离为  $C_{\max}$ 。在实验过程中传感器节点会根据改进后的本文算法和自身的信息进行调整和移动。

其次根据以上提出的虚拟力相关模型和理论分析以及上述算法的假设, 主要实现传感器节点在感知半径可调的特性下提高节点的利用率和降低节点在覆盖过程中节点的移动能耗。本文提出的3D-CAAR算法的设计流程和步骤如下:

步骤1 在需要监测的区域  $D$  中随机部署  $n$  个传感器节点, 每个节点判断各自的位置和初始能量并在虚拟力合力的作用下移动。

步骤2 针对传统VFA可能出现的覆盖问题, 将其分为两种情况: 第一种情况, 覆盖过程中存在目标点遗漏以及目标点位于节点的感知边界; 第二种情况, 不存在目标点位于边界上且节点覆盖到多个目标点。

步骤3 传感器节点根据被覆盖的目标点到节点中心的距离  $r_i = r_s$  判断是否存在边界目标点: 是, 执行步骤4; 否则执行步骤6。

步骤4 判断此刻节点能量  $E_i$  是否小于  $E_{i,\max}$ : 如果否, 不作变化; 如果是, 增大该节点  $i$  的初始感知半径  $r_s$  为  $R_{\max}$ 。执行步骤5。

步骤5 判断是否覆盖到漏洞节点: 是, 维持此刻状态; 否, 减小  $R_{\max}$  至  $r_s$ 。

步骤6 计算传感器节点  $C_{ij\max}$ , 将该节点半径降低到  $C_{ij\max} - k$ , 其中  $k$  可调。

步骤7 如节点没有覆盖到任何目标点, 则关闭节点使其睡眠。

步骤8 根据合力重新部署节点。

## 4 算法分析

### 4.1 覆盖度分析

目标点集  $p$  被节点  $s_i$  所覆盖的概率由下式求得:

$$p(s_i, p) = \begin{cases} 1, & d(s_i, p) < r_s \\ e^{-ad\lambda}, & R_{\min} \leq d(s_i, p) \leq R_{\max} \\ 0, & d(s_i, p) > R_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $\lambda$  是节点的物理特性, 表示时间的感知衰减因子;  $r_s$  表示传感器节点的初始感知半径;  $R_{\max}$  为节点的最大确定的感知范围。事件集  $P$  的覆盖度由下式计算得到:

$$C(P) = \sum_{s_i \in P} \sum_{j \in S} p(s_i, j) \quad (8)$$

其中  $\sum_{j \in S} p(s_i, j)$  表示事件  $s_i$  的覆盖度。

假设在三维无线传感器网络中事件  $s_i(X_i, Y_i, Z_i)$  与被监测区域中任意一个传感器节点  $j(X_j, Y_j, Z_j)$  的欧氏距离是不受虚拟力时的距离, 其计算公式为:

$$d(s_i, j) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (9)$$

但节点在虚拟力的作用下, 节点受到合力的大小和方向开始移动, 从而导致目标事件与节点的欧氏距离和之前的距离存在一定差值, 则改变后的距离可由下式计算:

$$d'(s_i, j) = d(s_i, j) + dir_j \quad (10)$$

由式(10)减去式(9)得到:

$$d'(s_i, j) - d(s_i, j) = dir_j = \arctan(F_j) \times \frac{2}{\pi} \times dir_{\max} \quad (11)$$

其中  $\arctan(F_j) \times \frac{2}{\pi} \times dir_{\max}$  是一个小于零的数<sup>[18]</sup>, 进而可以推导出  $d'(s_i, j) < d(s_i, j)$ , 因此  $d'(s_i, j)$  小于  $r_s$  的概率会更大, 从而说明传感器节点在虚拟力的作用下对目标集的覆盖度会更高, 则从理论验证上得出本文算法覆盖度上的准确性和有效性。

### 4.2 能耗分析

本文中在虚拟力下的无线传感器中的节点的能耗主要有三个方面: 单个节点在任意方向移动单位距离的能耗  $e_{im}$ , 节点根据自身信息调整发射功率能耗  $e_r$ , 单个节点的通信能耗  $e_c$ ; 因此, 整个网络节点的移动能耗、节点调整感知半径总能耗及节点间的总通信能耗分别为  $E_{im}$ 、 $E_r$ 、 $E_c$ , 则本文算法中网络的总能耗  $E$  为:

$$E = E_{im} + E_r + E_c = \sum_{i=1}^N \sum_{\forall dir} |e_{im} \times dir_i| + (e_r \times |l_{(i)}|) \sum_{i=1}^S N_{(i)} + \sum_{i=1}^N |e_c \times d^2| \quad (12)$$

其中:  $N$  表示网络中的工作节点数;  $\sum_{\forall dir} |dir_i|$  表示节点  $i$  在任意移动方向的移动距离总和; 其中  $dir_i = e_{im} \times \arctan F_i \times \frac{2}{\pi} \times dir_{\max}$ ;  $l_{(i)}$  表示  $i$  个节点中感知半径改变节点的距离大小;  $S$  表示网络中传感器节点根据算法半径调整后的总节点数;  $N_{(i)}$  表示发射功率调整的第  $i$  个节点;  $d$  表示传感器网络中各节点相互通信间的距离。

假设网络中总的传感器节点数  $P_{(A)}$  不变, 基于虚拟力的三维覆盖算法不采用本文的节点调度算法, 工作中的总节点数仍为  $N$  即节点对目标点的覆盖总数不变, 传感器节点的初始能量也相同, 则其原有的总的能耗  $E'$  计算应为:

$$E' = E_{im}' + E_r' + E_c = \sum_{i=1}^N \sum_{\forall dir} |e_{im} \times dir_i'| + (e_r \times |l_{(i)}|) \sum_{i=1}^N N_{(i)} + \sum_{i=1}^N |e_c \times d^2| \quad (13)$$

将本文算法下传感器网络的总能耗  $E$  和原有直接在VFA-3D下的网络节点能耗相比较, 用式(12)减去式(13)可以得出:

$$E - E' = (E_{im} + E_r + E_c) - (E_{im}' + E_r' + E_c) = \sum_{i=1}^N \sum_{\forall dir} |e_{im} \times dir_i| - \sum_{i=1}^N \sum_{\forall dir} |e_{im} \times dir_i'| + (e_r \times |l_{(i)}|) \left[ \sum_{i=1}^S N_{(i)} - \sum_{i=1}^N N_{(i)} \right] \quad (14)$$

由式(14)可以得出  $E - E' < 0$ , 因为在本文3D-CAAR的算法调度机制下首先节点间的无效移动距离相比于直接在VFA-3D的作用下会明显减少, 即  $dir_i < dir_i'$ ; 本文算法下半径调整的后的总的节点数小于网络中的工作节点数, 即  $S < N$ ; 所以可得:  $E < E'$ , 即本文算法能耗较低, 从而理论证明本文算法能耗的准确性。



## 5 仿真实验与算法分析

### 5.1 仿真实验

本文采用 Matlab(2015b)环境进行仿真实验。为了验证本文算法的实验结果和性能,利用 Matlab 将本文算法与经典的 APFA3D<sup>[14]</sup>以及 ECA3D<sup>[14]</sup>进行仿真比较。假设无线传感器网络部署在  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  的立方体监测空间中,在此区域中对随机部署的目标点进行监测实验。仿真参数如表 1 所示。

表 1 参数设置  
Tab. 1 Parameter settings

参数名称	参数值
仿真区域 $D$	$100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$
总目标点数 $m$	23
节点数目 $n$	7
节点通信半径 $r_c$	6 m
初始节点感知半径 $r_s$	12 m
节点移动单位距离的能量耗	30 J
$R_{\min}$	10 m
$R_{\max}$	15 m
$\alpha$	0.5
$\beta$	0.5

在实验中,选取 23 个所需要监测目标点呈线性部署在  $100 \text{ m}^3$  空间区域中,同时将 7 个传感器节点随机散布在上述

目标区域中。为了验证本文算法的准确性和有效性同时较为明显地分析对比,三种算法的仿真实验结果如图 4 所示。

在图 4(a)中可以看出:APFA3D 在虚拟力的作用下,虽然对目标点区域分布密集的地方进行了覆盖,但仍有部分区域中被监测的目标点没有被覆盖,存在部分覆盖漏洞,导致出现了节点的浪费,网络节点的整体利用率不高。图 4(b)中的 ECA3D 较 APFA3D 的覆盖程度有所提高,传感器节点覆盖所要检测的目标点事件的分布得较为均匀,但是仍没有对目标点密集的地方进行均匀覆盖且节点的利用率不高,移动距离较大。本文 3D-CAAR 算法仿真实验结果如图 4(c)(d)所示,由图 4(d)可以得出 3D-CAAR 算法下节点有更高的覆盖率,图中有两个传感器节点感知范围大于其余的节点是因为,它们在 3D-CAAR 算法下依据自身的位置信息和对边界节点的判断机制,从而使得整个网络的节点利用率较高,避免了节点的多余无效移动的能量消耗。如图 4(d)所示,对于多余的无效覆盖的传感器节点,在本文算法判断后进行关闭睡眠,降低节点的浪费。

由上述理论分析和仿真验证可以得出,本文提出的半径可调 3D-CAAR 算法在虚拟力的作用下使得节点均匀分布,同时利用算法根据每个节点的当前能量属性计算出节点和目标点之间的位置关系调节节点半径,减小了移动能耗,提高了节点利用率。因此本文算法有更高的覆盖率,并能使传感器节点和监测点的分布密度相匹配。

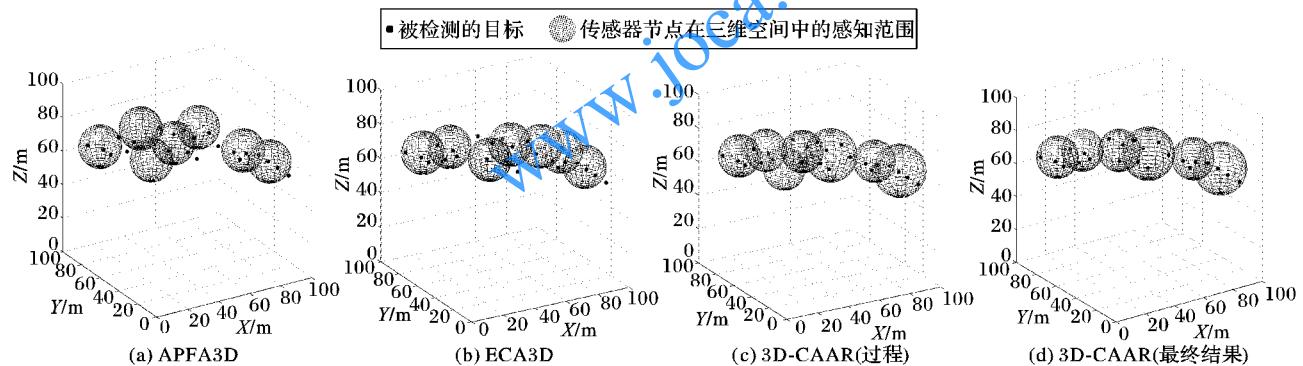


Fig. 4 Simulation diagrams of different algorithms

### 5.2 算法分析

本文用参考文献[16]中提出的事件覆盖效能  $\eta(p)$  进行 3D-CAAR 算法的性能评价,如图 5 所示。在节点随机分布在监测区域部署实验中对比三种算法实验仿真的覆盖效能,本文算法在迭代次数 23 代以前较 ECA3D 有较优的覆盖效能收敛速度有较为明显的提高。在迭代 23 次以前,APFA3D 比本文算法和 ECA3D 的收敛速度快,但从第 24 次迭代后 3D-CAAR 算法的覆盖效能超过 ECA3D 和 APFA3D,表现出较为明显的优势。同时,在之前的覆盖效能的理论分析中可知因为改变后的移动距离相比未移动之前的距离减少,说明在本文算法下的作用传感器节点的覆盖效能会降低,而在实验图中也可以得出 3D-CAAR 算法在 24 代后的优势更加明显。因此,可以得出本文算法相比 ECA3D 和 APFA3D 有较快的收敛速度和较高的目标事件集的  $\eta(P)$ 。

如图 6 所示,为了验证网络中传感器节点总的剩余能量与运行时间的变化,将本文算法与 APFA3D 和 ECA3D 作对比。仿真实验表明,在刚开始的 16 s 之前,三种算法的网络能耗明

显下降,APFA3D 下的传感器节点移动距离较大,所以网络需要更长的运行时间才能达到较为稳定的状态;因此,APFA3D 相比 ECA3D 的移动能耗较大,网络剩余能量较小。而本文 3D-CAAR 算法相比其他两种算法节点的无效移动更小,网络能耗降低,所以传感器网络的生存时间也明显提高。

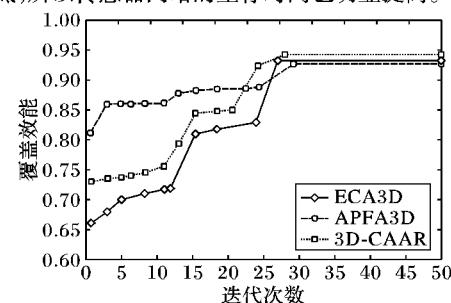


Fig. 5 Performance comparison of algorithm simulation

同时,为进一步验证网络中被监测的目标点事件和节点能耗的关系,本文对 3D-CAAR 算法与 APFA3D、ECA3D 作出



如图7的实验比对。由图7可以直观看出,三种算法下的监测区域中的目标点覆盖率都随着节点的能耗增加而增大,但本文3D-CAAR算法在覆盖率相同的情况下节点消耗的能量更低且使用较少的能耗达到了较高的覆盖率。因此,本文算法相比其他两种算法有着能耗较低、覆盖率较高的优势。

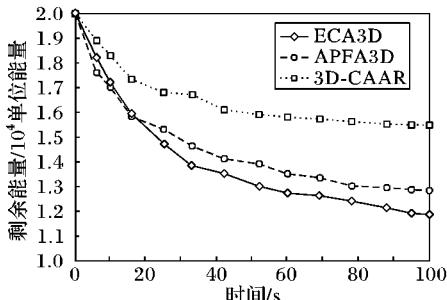


图6 网络剩余能量与运行时间关系

Fig. 6 Relationship between network residual energy and running time

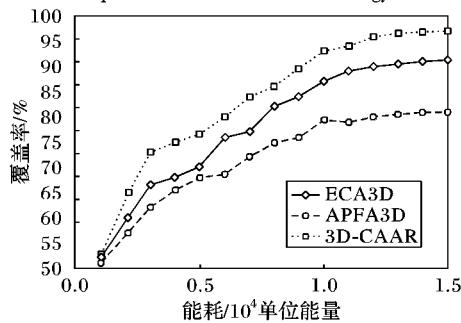


图7 目标事件覆盖率与节点能耗的关系

Fig. 7 Relationship between target event coverage and node energy consumption

深入分析可知,由于3D-CAAR算法根据传感器半径可调的覆盖特性引入覆盖范围的判别机制同时算法根据网络剩余能量对节点进行分类,将剩余能量较少且未覆盖到目标事件的节点进行关闭,理论上整个网络的覆盖率和网络生存时间都会进一步地提高和延长。因此,首先对算法进行理论分析证明其有效性和优劣性,得出3D-CAAR算法在覆盖率和能耗上都优于传统的虚拟力的算法作用。最后,通过实验仿真再次验证了本文算法的可行性,进一步说明实验结果和理论的对比和相差之处。

为进一步分析本文算法的时间开销,如图8所示。

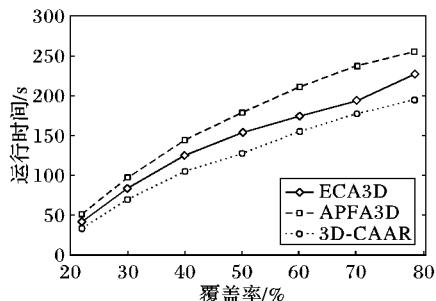


图8 算法运行时间比较

Fig. 8 Algorithm runtime comparison

从图中可以看出,本文提出的算法相比其他两种算法,在达到相同覆盖率的情况下算法所运行的时间明显减少。如三种算法在图中覆盖率达到80%的同时,APFA3D和ECA3D的时间开销都超过200 s。主要原因是本文算法在部署过程中有效地避免在虚拟力的作用下节点的无效和过大移动,使节

点能快速达到稳定状态同时提高节点的覆盖程度。

从上述实验的算法分析和比较得出,本文3D-CAAR算法较APFA3D、ECA3D在后期相同迭代次数下的网络覆盖效能有较明显的提高;在相同时间下的传感器剩余能量以及同一能耗下目标事件的覆盖率有着较大的提升。因此,从理论和仿真实验同时证明了本文3D-CAAR算法的准确性和可靠性。

## 6 结语

本文研究了无线传感器网络中的目标事件覆盖问题,针对三维环境中节点的随机覆盖需求,提出3D-CAAR算法并应用在半径可调的无线传感器网络中实现三维覆盖优化。本文首先对无线传感器网络节点进行受力分析,根据现实环境中节点的异构特性,提出改进后的虚拟力算法,提高了网络的整体覆盖率和传感器节点的利用率;同时将本文算法和经典的APFA3D和ECA3D进行分析比较,验证了本文算法的可行性和较高的覆盖性能。作为下一步工作,将研究本文算法的复杂度和能量消耗问题并在实际环境中进行相应测试。

### 参考文献 (References)

- [1] 神显豪,李军,奈何.感知受限的移动传感器节点扫描覆盖优化算法[J].计算机应用,2017,37(1): 60–64. (SHEN X H, LI J, NAI H. Sweep coverage optimization algorithm for mobile sensor node with limited sensing [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(1): 60–64.)
- [2] 李彩丽,冯海林,侯楠.能量有效的三维无线传感器网络覆盖算法[J].计算机应用,2010,30(7): 1719–1721. (LI C L, FENG H L, HOU N. Energy-efficient coverage algorithm in 3D wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(7): 1719–1721.)
- [3] 衣晓,薛兴亮,高玉章.基于概率感知模型的边界区域分布式多重覆盖算法[J].传感技术学报,2013,26(11): 1579–1583. (YI X, XUE X L, GAO Y Z. Distributed multiple coverage study against boundary region based on probability perceptual model [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(11): 1579–1583.)
- [4] 杨白薇,于宏毅,李宏.基于协作的无线传感器网络休眠调度算法[J].计算机应用研究,2008,25(3): 677–680. (YANG B W, YU H Y, LI H. Coverage-preserving density control algorithm based on cooperation in wireless sensor networks [J]. Application Research of Computers, 2008, 25(3): 677–680.)
- [5] XIAO F, YANG X, YANG M, et al. Surface coverage algorithm in directional sensor networks for three-dimensional complex terrains [J]. Tsinghua Science and Technology, 2016, 21(4): 397–406.
- [6] ARIVUDAINAMBI D, BALAJI S, POORANI T S. Sensor deployment for target coverage in underwater wireless sensor network [C]// Proceedings of the 2017 International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1–6.
- [7] 王昌征,毛剑琳,付丽霞,等.面向三维的有向异构传感器网络覆盖优化算法[J].计算机应用,2016,36(9): 2362–2366. (WANG C Z, MAO J L, FU L X, et al. Coverage optimization algorithm for three-dimensional directional heterogeneous sensor network [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(9): 2362–2366.)
- [8] BOUFARES N, KHOUFI I, MINET P, et al. Three dimensional mobile wireless sensor networks redeployment based on virtual forces [C]// Proceedings of the 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 563–568.

(下转第2615页)



- [6] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOMEROGLU H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86–92.
- [7] TSAI A H, WANG L C, HUANG J H, et al. Intelligent resource management for Device-to-Device (D2D) communications in heterogeneous networks [C]// Proceedings of the 2012 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 75–79.
- [8] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. Reducing the complexity of resource allocation for underlaying device-to-device communications [C]// Proceedings of the 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 61–66.
- [9] PENG B, PENG T, LIU Z, et al. Cluster-based multicast transmission for Device-to-Device (D2D) communication [C]// Proceedings of the 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1–5.
- [10] ZHOU Z, DONG M, OTA K, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in Device-to-Device (D2D) communications [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(5): 485–488.
- [11] CHEN X, HU R Q, JEON J, et al. Energy efficient resource allocation for D2D communication underlaying cellular networks [C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 2943–2948.
- [12] HOANG T D, LONG B L, LE-NGOC T. Radio resource management for optimizing energy efficiency of D2D communications in cellular networks [C]// Proceedings of the 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1190–1194.
- [13] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. A stable matching algorithm for resource allocation for underlaying device-to-device communications [C]// Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–6.
- [14] CHANG W, JAU Y T, SU S L, et al. Gale-Shapley-algorithm based resource allocation scheme for device-to-device communications underlaying downlink cellular networks [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–6.
- [15] 3GPP. Selection procedures for the choices of radio transmission technologies of the UMTS [S]. Valbonne: European Telecommunications Standards Institute, 1998: 3.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61379028, 61671483), the Natural Science Foundation of Hubei Province (2016CFA089).

**LI Zhongjie**, born in 1974, Ph. D., associate professor. His research interests include heterogeneous cellular networks, millimeter wave communication.

**XIE Dongpeng**, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include D2D communication.

(上接第2586页)

- [9] 吴帅, 孙力娟, 肖甫, 等. 面向三维的无线传感器网络覆盖增强算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(Suppl): 106–110. (WU S, SUN L J, XIAO F, et al. A coverage-enhancing algorithm for the three-dimensional wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(Suppl): 106–110.)
- [10] NAZRUL ALAM S M, HAAS Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 34(C): 157–169.
- [11] 杜晓玉, 孙力娟, 郭剑, 等. 异构无线传感器网络覆盖优化算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 696–702. (DU X Y, SUN L J, GUO J, et al. Coverage optimization algorithm for heterogeneous WSNs [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(3): 696–702.)
- [12] 秦宁宁, 余颖华, 吴德恩. 移动混合传感网中的节点自主部署算法 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1838–1842. (QIN N N, YU Y H, WU D E. Autonomous deployment algorithm in mobile heterogeneous networks [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(7): 1838–1842.)
- [13] 谭励, 王云会, 杨明华, 等. 一种基于虚拟力补偿的三维空间自主部署算法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2570–2578. (TAN L, WANG Y H, YANG M H, et al. Three-dimensional space self-deployment algorithm based on virtual force compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2570–2578.)
- [14] 李享. 基于空中传感网的三维部署研究[D]. 太原: 中北大学, 2013: 5–54. (LI X. Three-dimensional disposition algorithm in aerial sensor network research [D]. Taiyuan: North University of China, 2013: 5–54.)
- [15] 周浦城, 崔逊学, 王书敏, 等. 基于虚拟力的无线传感器网络覆盖增强算法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1416–1419. (ZHOU P C, CUI X X, WANG S M, et al. Virtual force-based wireless sensor network coverage-enhancing algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5): 1416–1419.)
- [16] 夏娜, 王长生, 郑榕, 等. 鱼群启发的水下传感器节点布置 [J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 295–302. (XIA N, WANG C S, ZHENG R, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 295–302.)
- [17] 魏连锁, 蔡绍滨, 潘实. 基于加权虚拟力模型的锚节点移动策略的研究 [J]. 通信学报, 2017, 38(6): 97–107. (WEI L S, CAI S B, PAN S. Research on mobile strategy of anchor node based on weighted virtual force model [J]. Journal on Communications, 2017, 38(6): 97–107.)
- [18] 刘慧, 柴志杰, 杜军朝, 等. 基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究 [J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 713–723. (LIU H, CHAI Z J, DU J Z, et al. Sensor redeployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6): 713–723.)

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61662070, 61762079), the Key Science and Technology Research Project of Gansu Province (1604FKCA097, 17YF1GA015), the Science and Technology Innovation Project of Gansu Province (17CX2JA037, 17CX2JA039).

**DANG Xiaochao**, born in 1963, M. S., professor. His research interests include wireless sensor network.

**SHAO Chenguang**, born in 1994, M. S. candidate. His research interests include wireless sensor network.

**HAO Zhanjun**, born in 1979, M. S., associate professor. His research interests include Internet of things, indoor positioning, location services.