

三维水下传感网相异 k -覆盖改进虚拟力算法*

蒋昕^{1,2}, 黄海平^{1,2}, 戴晓燕², 王汝传^{1,2,3}

¹(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

²(江苏省无线传感网高技术研究重点实验室(南京邮电大学), 江苏 南京 210003)

³(宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室(南京邮电大学), 江苏 南京 210003)

通讯作者: 黄海平, E-mail: hhp@njupt.edu.cn

摘要: 水下传感器的覆盖控制研究对于合理分配网络的空间资源, 更好地完成环境感知、信息获取任务以及提高网络生存能力都具有重要的意义. 实际情况中, 水下监测区域往往需要不均匀的覆盖. 现有的研究偏重于“事件驱动”概念, 但不同区域的不同 k -覆盖需求并未得到重视. 针对 UWSNs 相异 k -覆盖需求区域的覆盖优化部署这一研究方向, 基于浮标、锚、与浮标通过有线电缆连接通信的水下传感器模型, 分析了相异 k -覆盖需求区域所需的节点数下限, 提出了一种基于相异 k -覆盖需求的改进虚拟力算法 k -ERVFA (k -equivalent radius virtual force algorithm). 仿真实验结果表明, 相比经典的虚拟力算法, 在相同最大迭代次数和相同节点数的情况下, 该算法在牺牲 1-覆盖需求区域的 1-覆盖率仅 1.21%~3.89% 的情况下, 能够同比提高相应区域的 2-、3-覆盖率分别达到 17.42%~44.3% 和 28.95%~49.53%, 取得了很好的部署效果, 说明了 k -ERVFA 算法的正确性与有效性.

关键词: 水下传感器网络; k -覆盖; 三维覆盖; 虚拟力算法; 覆盖率

中文引用格式: 蒋昕, 黄海平, 戴晓燕, 王汝传. 三维水下传感网相异 k -覆盖改进虚拟力算法. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 88-97. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13010.htm>

英文引用格式: Jiang X, Huang HP, Dai XY, Wang RC. Improved virtual-force algorithm for 3D underwater wireless sensor networks based on different k -coverage requirements. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 88-97 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13010.htm>

Improved Virtual-Force Algorithm for 3D Underwater Wireless Sensor Networks Based on Different k -Coverage Requirements

JIANG Xin^{1,2}, HUANG Hai-Ping^{1,2}, DAI Xiao-Yan², WANG Ru-Chuan^{1,2,3}

¹(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

²(Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks (Nanjing University of Posts and Telecommunications), Nanjing 210003, China)

³(Key Laboratory of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology of Ministry of Education (Nanjing University of Posts and Telecommunications), Nanjing 210003, China)

Corresponding author: HUANG Hai-Ping, E-mail: hhp@njupt.edu.cn

Abstract: The research of 3D underwater sensors' coverage-control has great significance in rational allocation of underwater space resources, environment-aware & information-acquisition and the network survivability improvement. In the real world situation, the uneven coverage is always needed in the underwater detection region. The current studies focus on the conception of “Event-Driven” without paying enough attention to the diversity of k -coverage requirements of different 3D regions. This work concentrates on the

* 基金项目: 国家自然科学基金(61170065, 61171053, 61003039, 61202355, 61373138); 江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2012183); 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA520002); 江苏省研究生创新计划(CXZZ11-0409, CXLX13_467); 南京邮电大学基金(NY212047); 江苏省博士后基金(1101011B, 2012M511753, 2013T60536); 江苏省高校优秀学科建设工程项目(yx002001).

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

optimizational deployment for Underwater Sensor Networks' (UWSNs) diverse k -coverage requirements of distinguished regions. Based on the model of "buoys, anchors, underwater sensors which are connected and communicated via a wired cable with their respective buoy", we study the low-boundary number of the sensors required by diversity of k -coverage, and develop a novel algorithm: k -ERVFA (k -Equivalent radius virtual force algorithm) as an improvement to the classic virtual-force algorithm (VFA). Compared with the VFA in our simulation, the new algorithm only loses 1.21%~3.89% of 1-coverage rate in the required 1-coverage region, but significantly improves the 2- and 3- coverage rate to 17.42%~44.3% and 28.95%~49.53% respectively in the corresponding required coverage regions. The improvement in k -coverage requirements illustrates the correctness and effectiveness of k -ERVFA.

Key words: underwater wireless sensor network; k -coverage; 3D-coverage; virtual-force algorithm; coverage-rate

水下传感器网络(*underwater sensor networks*,简称 UWSN)的研究在海洋水文数据收集、海水污染监测、海洋灾害预警等方面有广泛的应用前景^[1].优化水下传感器网络覆盖部署对于合理分配网络的空间资源,更好完成环境感知、信息获取任务以及提高网络生存能力都具有重要的意义.现有的三维水下传感器节点覆盖部署方法可分为海底(*sea-bottom*)部署和海洋(*sea-column*)部署.前者中,节点被部署在海底平面上^[2],但由于大部分应用往往需要传感器节点收集水下空间三维信息,因此,海底部署难以满足实际需求.海洋部署方法中,节点被部署在三维水下空间,以达到对监测区域的立体覆盖,它又可被划分为两类.

第1类是基于均匀覆盖需求(*uniform coverage requirement*)的节点部署方法,即传感器节点被均匀地部署在三维监测区域.Pompili等人^[3]首次对水下传感器节点的三维部署方法进行研究,提出Bottom-grid算法,即在海底三角网格节点部署的基础上,通过调节节点在水下的深度,以最少的节点无缝覆盖监测区域.Akkaya等人^[4]在上述工作的基础上提出Self-deployment算法,进一步减少了相邻节点间的重复覆盖率.但是,实际的覆盖需求往往是不均匀的.这些基于均匀覆盖的算法往往没有充分利用与目标有关的信息来优化其网络部署:如鱼群的活动与海域的联系、水质信息收集与海流的联系、船舶舰艇航行与航道的联系等.

第2类是非均匀覆盖需求(*non-uniform coverage requirement*)的节点部署方法,即根据监测目标在水下空间分布密度的差异非均匀地部署节点.目前的研究主要基于事件概念:节点布置的目的不再是均匀覆盖监测区域,而是覆盖事件,并且使节点分布密度与事件分布密度尽可能达到一致.此类节点布置方法往往更加实际有效,同时也符合水下传感器网络稀疏性的特点^[5].Aitsaadi等人^[6]在封闭式湖泊水质监测中,针对污染物质的分布特性提出了DDA(*direrentiated deployment algorithm*)算法.Koutsougeras等人^[7]采用SOM(*Self organizing maps*)方法,通过事件(监测目标)对节点的吸引作用,使节点趋向于事件密度高的区域,达到对事件的有效覆盖.Golen等人^[8]针对水声特性与区域划分,利用了博弈论的思想进行节点的优化部署.

然而,现有的事件驱动非均匀覆盖方法也并不能完全满足水下传感器网络应用的需求,原因在于:(1)主要针对确定的事件布置节点,即所谓的点覆盖,对于开放式水下环境中不确定事件,或是整个区域中不同子区域基于不同优先级的覆盖需求,则很少考量;(2)所谓的事件驱动所涉及的覆盖大多为1-覆盖,没有考虑到不同区域不同 k -覆盖的需求.

水下监测环境往往并不均匀,也不仅仅基于给定坐标的固定事件.例如,对于大片海域中几个需要重点观测的子区域,如特殊生物种群的活动区域,特定的洋流活动区域,均需要以不同的优先级非均匀地部署节点;而对于某些区域的目标定位,依据经典3边定位算法,需要3-覆盖^[9]而不仅仅是1-覆盖.因此,需要重点讨论一片海域中不同子区域的 k -覆盖问题.虽然已有部分研究考虑到不同目标点的相异 k -覆盖需求,但大多限于二维情况,且仅仅考虑到目标点,而未考虑目标区域,导致算法难以扩展.

1 无线传感网 k -覆盖的相关工作

对于水下无线传感网的 k -覆盖问题,现有的研究分为二维和三维两部分.二维 k -覆盖主要分为基于几何的方法^[10]和基于概率的方法^[11],前者往往假设厚的规则部署区域,如正方形或圆形,而后者需要计算二维 k -覆盖所需的最小传感器部署密度的上下界.三维情况下的 k -覆盖研究,Alam和Haas^[12]提出了一种基于三维区域截断八面体曲面细分的Voronoi图节点放置策略,Huang等人^[13]提出了一种多项式时间算法用于解决 α -球覆盖问

题.Habib等人^[14]设计了一种三维 k -覆盖保证的分布式混合转发协议,得出了所需的最小传感器节点部署密度.

但目前关于水下传感器网络(UWSN)的 k -覆盖研究并不多见,暂无人完整讨论过UWSN不同子区域相异 k -覆盖需求问题的整体解决方案.有研究者使用虚拟力模型解决无线传感网的覆盖问题,并取得了良好效果^[15,16].本文基于经典的虚拟力算法(VFA)^[17],提出了一种基于相异 k -区域覆盖需求的改进算法(k -equivalent radius virtual force algorithm,简称 k -ERVFA),该算法简单易实施,节点重部署能耗较低,为解决UWSN不同子区域相异的非均匀覆盖提供了一种解决方案.

2 水下传感网相异 k -覆盖需求模型及相关定义

2.1 三维水下传感器网络模型

本文根据Tezcan在文献^[18]中提出的三维水下传感器模型,研究由锚、水下传感器节点和浮标节点组成,并以刚性有线电缆作为水下传感器节点与浮标节点之间的通信介质这一三维水下传感器网络模型,以消除水下声学链路的损耗.其相异 k -区域覆盖问题可描述为:对整个三维水下区域,存在不同的子区域 A_i ,其各自内部的质点需要不同重数的传感器覆盖;即 A_i 对应 k_i , k_i 为子区域 A_i 内部一切质点所需要满足的覆盖重数.

实际问题背景过程如下:

(1) 初始时刻,从飞机或舰船上将大量的设备投放到目标海域,设备一入水就抛锚固定自己的位置,浮标节点与水下传感器节点间的缆绳长度是随机的.每个水下传感器通过有线电缆和其垂直上方的浮标进行通信,报告自己的深度以及相应观测的结果等.一个浮标对应一个传感器,浮标已通过海底的锚固定住,且认为有线电缆及其与浮标的连接是刚性的(较为坚硬的线缆与连接或内芯硬金属棒等),因此浮标及其对应传感器的漂移微小可忽略.浮标只能通过刚性有线电缆的放缩调节对应的水下传感器的深度.

(2) 浮标与Sink节点间通过无线方式进行通信.各个浮标设有GPS定位模块,以便于获得其自身位置信息.其将位置信息和对应节点的深度信息无线发送给Sink节点.Sink节点在收集各个浮标及其对应节点的坐标信息后,通过调用相应的节点调度算法,计算各个传感器节点的重部署位置(仅限于垂直方向),以尽最大可能完成相应 A_i 区域的 k_i -覆盖需求.计算完成后,Sink节点向各个浮标无线发送重部署信息,各个浮标收到重部署信息后,调节其水下有线电缆的长度,将其悬挂着的水下传感器调整到相应的重部署深度,完成重部署.以下为本文模型的几点假设与约定:

(1) 水下三维空间 A 定义为:位于海底的 xy 平面, z 轴正向延伸至海面的三维空间,不妨设其为立方体,边长为 L .表示为 $A=L^3$;水下传感器节点 S_i 对应的垂直上方的浮标节点记为 B_i ,其坐标为 (x_i, y_i) ;

(2) 假设不同的 k -需求覆盖区域的大小 V_i ,需求覆盖重数 k_i 为事先已知;

(3) 初次部署时,节点总部署个数为事先计算好并固定(具体见第3节).并假设浮标位置及其相连的水下传感器深度为随机均匀分布,若Sink节点发现初次投洒后浮标的 (x, y) 二维分布出现严重覆盖空洞,工作人员可考虑进行二次精准补投,向空洞区补投一定数量浮标节点,以确保水面二维分布的尽量均匀紧致.

(4) 水下传感器节点在垂直坐标轴 z 上能够根据浮标节点发来的重部署信息准确的沿着有线电缆的收放移动到指定的重部署目标位置,且有线电缆为刚性,传感器节点只限在 z 轴上移动, (x, y) 坐标不变.

2.2 相关概念及定义

定义 1(相异 k -覆盖需求区域). 设整个可监测的三维水下区域有若干子区域需要不同优先级的重点关注,不同的子区域有不同的 k -覆盖需求.定义 $A_{k,i}$ 为第 i 个 k -覆盖需求三维子区域, $i=1,2,\dots,m_k, k \in \{1,2,3,\dots\}, m_k$ 为这样的 k -覆盖需求子区域个数. $A_{k,i}$ 中的任何一个质点,希望得到 k -重覆盖. $A_{k,i}$ 和 k 的信息设为已知.

定义 2(k -等效半径). 设传感器的覆盖半径为 r ,规定其 k -等效半径为

$$r_k = r/k, k=1,2,3 \quad (1)$$

定义 3(k -冲突半径). 三维水下传感器网络中,基于普通虚拟力算法的理论,欧氏距离小于2倍节点感知半径 r 的两个节点被认为是相互冲突的.这里,规定欧氏距离小于2倍节点 k -等效半径 r_k 的两个节点为相互“ k -冲

突”的 k -冲突半径定义为

$$r_{conf,k}=2r_k \tag{2}$$

定义 4(k -等效半径小球). 球半径为 $r_k=r/k, k=1,2,\dots$ 实际物理覆盖半径为 r 的三维小球,称为 k -等效半径小球.

3 基于相异 k -覆盖需求区域的节点部署密度分析

定理 1(三维 k -覆盖最小体密度定理). 三维环境下达到 $\geq 89\%$ k -覆盖率所需的最小均匀覆盖体密度 ρ_{kmin} 为 $3\sqrt{3}/8r^3, k=1$ 时; $3/\pi r^3, k=2$ 时; $9/2\pi r^3, k=3$ 时. r 为无线传感器物理覆盖半径.

证明:首先,将三维水下区域划分为如图 1 所示的立方体网格,假设立方体网格的边长为 L ,每个传感器放置在该立方体网格的中心,其覆盖半径为 r .当 r 不足以覆盖所在其所在立方体网格的 8 个角时,该网格的 8 个角将永远不会被覆盖(别的网格内的传感器也不会覆盖此 8 个角),推广到一般情况,三维水下区域中所有的立方体网格均存在此种覆盖死角.即当 r 相对于 L 不够大时,整个三维区域存在一定比例的覆盖死角.当 r 增加到如图 2 所示情况时,此时 $r=\sqrt{3}L/2$,每个传感器节点刚好能够覆盖其所在立方体网格的 8 个角,此时每个立方体网格均被完全覆盖,整个三维水下区域覆盖无死角.所以,为保证覆盖率为 100%, $r_{min}=\sqrt{3}L/2$,即 $r \geq r_{min}=\sqrt{3}L/2$.假设该立方体网格边长 $L=2r/(m\sqrt[3]{k})$,其中 k 为该给定区域所需的覆盖重数.由上述讨论,需要 $r \geq r_{min}=\sqrt{3}L/2=\sqrt{3}/2 \cdot 2r/(m\sqrt[3]{k})=\sqrt{3}r/(m\sqrt[3]{k})$,即有 $m \geq \sqrt{3}/\sqrt[3]{k}$.

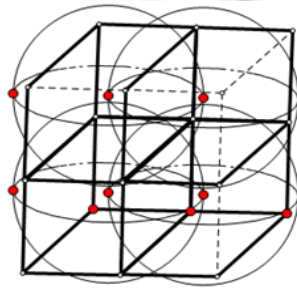


Fig.1 Coverage blind angles(8 cube angles)
图 1 覆盖存在死角的情况(立方体 8 个顶角)

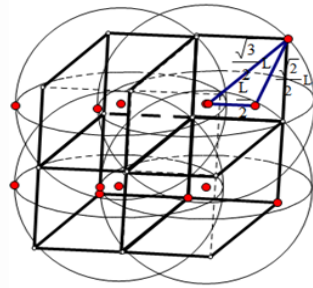


Fig.2 The critical situation without blind angles
图 2 覆盖无死角的临界情况

另一方面,我们考虑整个三维水下区域传感器均匀部署的情况,传感器的部署体密度为

$$\rho=1/V_{cube}=1/L^3=1/(2r/m\sqrt[3]{k})^3=m^3k/8r^3.$$

每个传感器可以覆盖到的传感球域体积为 $4\pi r^3/3$,则平均每个传感球域将含 $n=4\pi r^3\rho/3=m^3\pi k/6$ 个传感器节点.为满足 k -覆盖的需求,其必要条件为 $n \geq k$,即 $m^3\pi k/6 \geq k$,得到 $m \geq \sqrt[3]{6/\pi}=1.2407$.

注意到,上述分析基于平均体积中传感器节点个数 $\geq k$,实际情况中 100%的 k -覆盖要求往往不能满足.

举例而言,如图 3 所示的平面图,五角星代表传感器节点,球 1 和球 2 的体积相同,但是球 1 中包含 2 个传感器节点,即球 1 中的所有质点均可被 2-覆盖;但球 2 中只包含了 1 个传感器节点,即球 2 内除去球 1 部分外的质点只能被 1-覆盖.因此上述 $m^3\pi k/6 \geq k$ 条件需加强,改为 $m^3\pi k/6 \geq \theta k$,即有: $m \geq \sqrt[3]{6\theta/\pi}, \theta > 1$.这样保证了节点部署的一定的冗余性,以确保较高概率的 k -覆盖.我们以 θ 取值从 1.0~2.5 作了传感器部署的仿真模拟,并计算整个区域的 2-和 3-覆盖率(以 $k=1,2,3$ 为例.多于 4 的 k 在实际应用中很少用到,大量冗余节点带来的能耗等问题不容忽视^[19]),模拟结果如图 4 所示.可见,当 $\theta=1$ 时,即为不含参数 θ 的情况.此时的 2-覆盖率为 53.47%,3-覆盖率仅有 38.52%,可见 θ 参数的重要性.当 $\theta=2$ 时,2-、3-覆盖区域均能满足 89%以上的覆盖达标率,同时 θ 要尽可能取小以节省传感器的部署密度.为方便起见,不妨统一取 $\theta=2$.

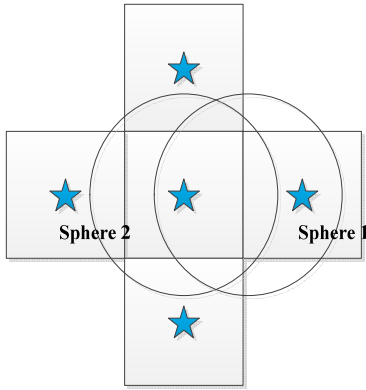


Fig.3 A counter-example of the “average volume”

图3 “平均体积”的一种反例

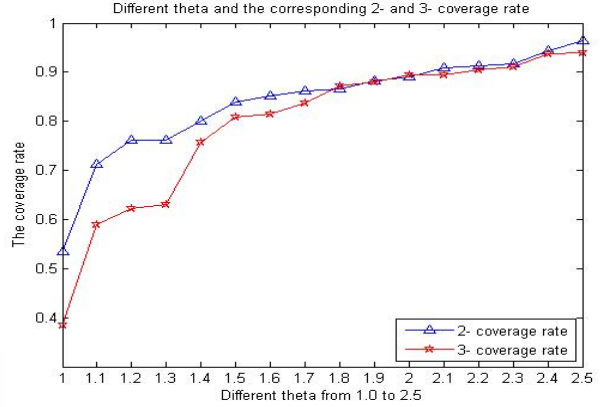


Fig.4 The corresponding 2- & 3-coverage rate with different θ

图4 不同的 θ 值对应的 2-、3-覆盖率

综上,为满足该覆盖区域被较高概率 k -覆盖,即要求 m 同时满足上述 $m \geq \sqrt{3}/\sqrt[3]{k}$, $m \geq \sqrt[3]{6\theta/\pi}$, $\theta > 1$ 两类要求.另外, m 越大, $L=2r/(m\sqrt[3]{k})$ 越小,传感器部署体密度 ρ 越大.在保证 k -覆盖的前提下,应尽量减少部署传感器的个数以节约成本.亦即 m 越小越好.即:

$$\min m \begin{cases} m \geq \sqrt{3}/\sqrt[3]{k} \\ m \geq \sqrt[3]{6\theta/\pi}, \theta = 2 \\ k \geq 1 \text{且} k \in \mathbb{N}^+ \end{cases} \text{得到 } m_{k\min} = \begin{cases} \sqrt{3}, & k=1 \\ \sqrt[3]{12/\pi}, & k=2 \\ \sqrt[3]{12/\pi}, & k=3 \end{cases}, \rho_{k\min} = \begin{cases} 3\sqrt{3}/8r^3, & k=1 \\ 3/\pi r^3, & k=2 \\ 9/2\pi r^3, & k=3 \end{cases} \quad (3)$$

其中 $\rho_{k\min}$ 为以较高概率保证 k -覆盖的最小部署体密度,有 $\rho_{3\min} > \rho_{2\min} > \rho_{1\min}$,这显然也与实际相符.

关于 $\rho_{k\min}$,文献[14]中提出并粗略证明了三维空间中保证 k -覆盖的最小体密度为

$$\lambda(r,k) = 9k/\pi r^3, k > 1 \quad (4)$$

与这里的 $\rho_{k\min}$ 相比,在 $k=2, k=3$ 时,明显地 $\lambda(r,k)$ 是 $\rho_{k\min}$ 的数倍.而本文中的 $\rho_{k\min}$ 由前述仿真图 4 已经看到可以保证至少 89% 以上的所在区域 k -覆盖率,可见 $\rho_{k\min}$ 相比 $\lambda(r,k)$,就部署成本和所达到的覆盖效果来看有更高的性价比.当 $k=1$ 时,可以想象,显然实际上已达到 100% 的 1-覆盖率.

4 相异 k -覆盖需求区域的改进虚拟力算法 k -ERVFA

4.1 基于库伦定律的 k -冲突节点间斥力

模拟物理学中的库伦定律,我们定义两个传感器节点 j 对节点 i 的 k -斥力:

$$\overline{F}_{ji} = \begin{cases} K_{conf} / d_{ij}^2 \cdot \overline{e}_{ji}, & d_{ij} \leq r_{conf,k} \\ 0, & d_{ij} > r_{conf,k} \end{cases}, i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

n 为传感器节点个数, $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ 为 i, j 传感器节点的三维欧氏距离, $r_{conf,k}$ 为第 3.2 节定义的 k -冲突半径, \overline{e}_{ji} 为 \overline{j} 方向的单位向量,由 S_j 指向 S_i , K_{conf} 为节点之间的库伦斥力系数.

4.2 基于万有引力定律的 k -覆盖需求区域的 k -吸引力

为了保证初始随机覆盖带来的覆盖空洞能被覆盖,以及 k -覆盖需求区域达到覆盖要求,需要考虑 k -覆盖需求区域对节点的引力.定义,对某个 k ,第 j 个 k -覆盖需求区域对传感器 S_i 的 k -吸引力如下:

$$\overline{F}_{attr,ikj} = \begin{cases} K_{attr,k} / d_{ikj}^2 \cdot \overline{e}_{ikj}, & \text{if } S_i \text{ is outside of } A_{k,j} \\ 0, & \text{if } S_i \text{ is inside of } A_{k,j} \end{cases}, k \geq 2 \quad (6)$$

$K_{attr,k}$ 为 k -覆盖需求区域对节点的吸引力系数,随 k 不同而不同。 d_{ikj} 为传感器 S_i 与 k -覆盖需求区域 $A_{k,j}$ (固定的 k ,第 j 个 k -覆盖区域)之间的等效距离,方向为单位向量 $\overline{e_{ikj}}$,由 S_i 指向 $A_{k,j}$ 的质心 $P_{k,j}(x_{k,j}, y_{k,j}, z_{k,j})$,注意到 1-覆盖需求即为一般的覆盖需求,这里暂不考虑其质心的概念。

$$d_{ikj} = \sqrt{(x_i - x_{k,j})^2 + (y_i - y_{k,j})^2 + (z_i - z_{k,j})^2} \quad (7)$$

关于 $K_{attr,k}$ 的大小,我们取 $K_{attr,k_1} / K_{attr,k_2} = k_1 / k_2$,满足 k -覆盖需求区域的需求覆盖重数越大,吸引力因子 $K_{attr,k}$ 越大.而与 K_{conf} 的大小关系方面,我们将通过第 6 节的仿真实验结果予以说明。

4.3 已固定 k -覆盖需求区域的障碍物 k -斥力

对照第 4.5 节 k -ERVFA 算法,对于后续 k'_i -覆盖需求区域的部署,需要将之前已部署完的 k'_i -覆盖需求区域视为障碍物,以避免本身在该区域外部的节点再次进入该区域而造成浪费与不均.设区域 $A_{k'_i,j}$ 的障碍物区域 $Ob_{k'_i,j}$ 为该 $A_{k'_i,j}$ 的外围边界加上一层圆心位于边界面的 k'_i -等效半径小球所形成的三维闭区域:

$$Ob_{k'_i,j} = \{p \mid d_{ob}(p, o_{k'_i,j}) \leq d(p, o_{k'_i,j}) + r_{k'_i}, \forall p \in bond_{k'_i,j}\} \quad (8)$$

其中, p 为三维空间质点, $d_{ob}(p, o_{k'_i,j})$ 为 p 到三维已固定区域 $A_{k'_i,j}$ 质心 $o_{k'_i,j}$ 的距离, $bond_{k'_i,j}$ 为区域 $A_{k'_i,j}$ 的边界曲面.障碍物区域 $Ob_{k'_i,j}$ 带来的斥力:

$$\overline{F_{ob,jki}} = \begin{cases} K_{ob,k} / d_{ikj}^2 \cdot \overline{e_{jki}}, & \text{if } S_i \text{ is inside of } Ob_{k,j} \text{ \& } S_i \notin A_{k,j}, k \geq 2 \\ 0, & \text{if } S_i \text{ is outside of } Ob_{k,j} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\overline{F_{ob,jki}}$ 为节点 S_i 与障碍物区域 $Ob_{k,j}$ 之间的斥力,方向为区域 $A_{k,j}$ 质心 $O_{k,j}$ 指向 S_i . d_{ikj} 为 $O_{k,j}$ 与 S_i 两者之间的距离, $K_{ob,k}$ 为 k -覆盖需求区域所形成的障碍物区域 $Ob_{k,j}$ 的斥力系数,取值详见第 5 节。

4.4 节点所受 k -合力及运动距离与方向

节点所受的 k -合力为其所受 k -斥力和 k -吸引力的矢量和.即:

$$\overline{F}_i = \sum_j \overline{F}_{ji} + \sum_{k,j} \overline{F}_{attr,ikj} + \sum_{k,j} \overline{F}_{ob,jki} \quad (10)$$

\overline{F}_i 为节点 S_i 所受的 k -合力.由第 3 节模型假设,每个水下传感器节点 S_i 只能在垂直方向(z 轴)进行上下运动.设 $\overline{F}_i = (F_{ix}, F_{iy}, F_{iz})$,分力 \overline{F}_{iz} 的大小和方向决定每轮 S_i 沿 z 轴上下运动的距离.设每个传感器节点 S_i 每轮调整可移动的最大距离为 ΔL_{\max} (z 轴方向),为使得算法尽快收敛且避免震荡, ΔL_{\max} 需取一个中间大小的合适值,详见第 5 节仿真.根据得到的所有 F_{iz} 计算出所有节点的 $\max\{|F_{iz}|\}$.为体现每轮中节点受力大小及其移动距离的相关性,设定每个节点 S_i 每轮需调整的距离为

$$\Delta z_i = F_{iz} / \max\{|F_{iz}|\} \cdot \Delta L_{\max} \quad (11)$$

4.5 基于 k -等效半径的 k -覆盖需求区域节点重部署策略(k -ERVFA 算法)

为了满足相异 k -覆盖需求区域的 k -覆盖需求,我们设计 k -ERVFA 算法(k -equivalent radius virtual force algorithm),其基本思想是用 k -等效半径小球覆盖相应的 k -覆盖需求区域.如下:

(1) 首先,将需要研究的 $\{k_1, k_2, \dots, k_m\} \in \{1, 2, 3, \dots\}$, $k_i \neq k_j$ (k_i 为不同的 k_i -覆盖需求区域所需的覆盖重数)按大到小排序,得到 $\{k'_1, k'_2, \dots, k'_m\}$,其中 $\{k'_1 > k'_2 > \dots > k'_m\}$.计算 k'_i -等效半径: $r_{k'_i} = r / k'_i, i=1$;

(2) 首先记下此步的已循环轮数 $N_{already}$.若有 $N_{already} > N_{\max}$ (N_{\max} 为人为设定的每步最大迭代步数),则跳出此步循环;否则,将 $r_{k'_i}$ 带入式(5)~式(11)中,求取所有状态 D_j 不为 $fixed$ 的(见第 4.6 节)传感器节点 S_i 所受的 k'_i -合力 \overline{F}_i 、 z 轴分力 \overline{F}_{iz} ,本轮的移动距离 Δz_i 以及新位置: $z_i = z_i + \Delta z_i$ ($sink$ 节点只计算,并非发出命令重部署),判断是否超过 L^3 的边界,并根据理想碰撞模型(反射定律)计算超出边界的节点的新位置 z'_i .计算此时所有的 $A_{k'_i,j}, j = \{1, 2, \dots, m_{k'_i}\}$ 区域的 k'_i -覆盖率 $C_{k'_i,j}$.若 $N_{already} \leq N_{\max}$,且所有的 $A_{k'_i,j}$ 均满足 $C_{k'_i,j} > \delta$, δ 为预先设置的参数(如取 90%),则跳出第(2)步循环;否则 $N_{already}++$;继续循环执行第(2)步。

(3) 调用 4.6 节中的 *fix&even* 区域节点固定和均匀调整算法,使得已经在 $A_{k_i^*}$ 中的节点 S_i 不至于在下一轮调整中运动出去,使得其在区域内部均匀分散,以达到更高的 k_i^* -覆盖率。

(4) 令 $i=i+1$,如果 $i \leq m$,则返回第(2)步继续执行($N_{already}$ 清零);否则,该算法停止.得到所有 k_i^* -覆盖需求区域 $A_{k_i^*}$ ($i=1,2,3,\dots,m$)的优化部署.此时,*sink* 节点已得到所有节点 S_i 的最终重部署位置 z_i ,其向各个浮标节点 B_i 发送消息:将 S_i 沿 z 轴方向由初始位置 z_{i0} 调整至此时的 z_i ,完成所有水下传感器节点的重部署。

4.6 fix&even k-覆盖需求区域内部节点固定-均匀化重部署算法

为了避免 *k-ERVFA* 算法对某个 i 的一轮部署结束后,已运动至某 $A_{k_i^*,j}$ 内的节点在 $i=i+1$ 时又被吸引至该区域之外,需要使用 *fix* 操作对已经在区域内部的节点进行固定;另一方面,该区域内部的节点因区域质心的吸引可能过度集中覆盖不均,需要使用 *even* 操作来均匀化区域内部的节点部署.现叙述 *fix&even* 算法如下:

(1) 该算法的输入参数为 k_i^* .首先对于所有已经在 $A_{k_i^*,j}$ 的内部节点 S_i ,设置其状态 D_i 为 *fixed*.

(2) 对所有 $A_{k_i^*,j}$,设置其边界为内部所有节点 S_i 的最大运动范围,运用第 4.1~第 4.3 节的内容,计算 S_i 所受的 k_i^* -合力、重部署调节距离 Δz_i 以及对所有 $z_i + \Delta z_i$ 超出 $A_{k_i^*,j}$ 边界的节点 S_i ,根据理想碰撞模型(反射定律)计算其基于 $A_{k_i^*,j}$ 边界碰撞后的新位置 z_i' .即区域内部的 *even* 均匀部署.循环往复第(2)步,直至达到最大迭代步数 N_{max} ,或者 $A_{k_i^*,j}$ 的 k_i^* -覆盖率 $C_{k_i^*,j} > \delta$.此时 *fix&even* 算法结束。

5 仿真实验及分析

对于本文中提出的 *k-ERVFA* 算法,选用 MATLAB R2012a 软件进行仿真.我们设定 $100m \times 100m \times 100m$ 的三维水下覆盖研究区域,并设定 1 个 $30m \times 30m \times 30m$ 的 3-覆盖需求区域,区域质心为 $(25m, 25m, 25m)$; 1 个 $40m \times 40m \times 40m$ 的 2-覆盖要求区域,区域质心为 $(70m, 70m, 70m)$.剩余为 1-覆盖需求区域.初始时刻节点三维分布为随机分布.取 $K_{conf}:K_{attr,2}:K_{attr,3}:K_{ob,2}:K_{ob,3}=1:2:3:2:3$,是经过数次仿真后得到的较满意的比例关系,可在 $N_{max}=100$ 的最大迭代次数内得到很高比例的 1-、2-、3-区域覆盖率,如图 5~图 7 所示.具体仿真参数见表 1.对于仿真参数 $r=10m$,代入式(3),得到 3 个区域的以高概率满足各自覆盖重数需求的平均所需节点数为 $A_{1,1}:591$ 个; $A_{2,1}:62$ 个; $A_{3,1}:39$ 个;总共:692 个.本仿真选取最多 650 个初始节点,通过 *k-ERVFA* 算法的动态调整,即有望达到较高的覆盖率,仿真结果也印证了这一点.从 400~650 个节点,每隔 50 个节点进行一次仿真,对比 *k-ERVFA* 算法与普通虚拟力算法(VFA)^[17]以及初始随机部署(random deploy,简称 RD)在满足相异 *k-覆盖需求区域*的 k 重覆盖需求下的算法性能。

Table 1 experiment parameters
表 1 仿真参数

Target region	100×100×100m ³
k_3 -sub region $A_{3,1}$	$k_3=3, center_3:(25,25,25), volume_3=30 \times 30 \times 30m^3$
k_2 -sub region $A_{2,1}$	$k_2=2, center_2:(70,70,70), volume_2=40 \times 40 \times 40m^3$
k_1 -sub region $A_{1,1}$	$k_1=1, volume_1=$ all of the rest target volume
Distribution mode	Random distribution
Number of nodes n	400~650, every experiment adds 50 nodes
Sensory radius r	10m
Max once moving distance Δl_{max}	5m
Algorithm/Contrast algorithm	<i>k-ERVFA/VFA</i> and <i>RD</i> ^[17]
Max iteration times N_{max}	100(same as the <i>VFA</i>)
$K_{conf}, K_{attr,k}$ and $K_{ob,k}$	$K_{conf}:K_{attr,2}:K_{attr,3}:K_{ob,2}:K_{ob,3}=1:2:3:2:3$

如图 5~图 7 所示,横坐标表示在 $100m \times 100m \times 100m$ 的三维水下目标区域中部署的水下传感器节点个数,纵坐标分别为 3-覆盖需求子区域 $A_{3,1}$ 的实际 3-覆盖率、2-覆盖需求子区域 $A_{2,1}$ 的实际 2-覆盖率,以及剩余目标区域 $A_{1,1}$ 的 1-覆盖率.如图 5 所示,对 2-覆盖需求子区域 $A_{2,1}$,在节点数 $n=450$ 时,RD 的 $A_{2,1}$ 的 2-覆盖率为 45.32%,经过 VFA 重部署后为 56.65%,而经过本文 *k-ERVFA* 算法重部署后达到了 86.44%;如图 6 所示, $n=450$ 时 R

D 在 $A_{3,1}$ 的 3-覆盖率仅为 23.43%,经 VFA 重部署后为 32.92%,而经过 k -ERVFA 重部署后达到了 82.45%。可见 k -ERVFA 算法在节点数仅有 450 个时(其余 $n=450\sim 600$ 的情况可类似得到), k -ERVFA 算法在 $A_{2,1}$ 和 $A_{3,1}$ 的 2-、3-覆盖率上,相较 VFA 均有显著的提高。

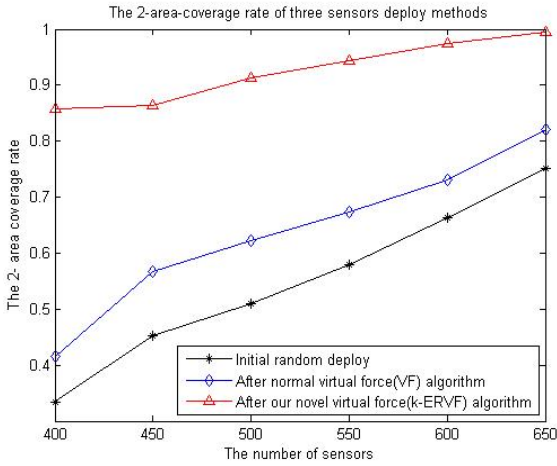


Fig.5 The 2-coverage rate by 3 algorithms with different nodes number

图 5 3 种算法,不同节点数下的 2-覆盖率

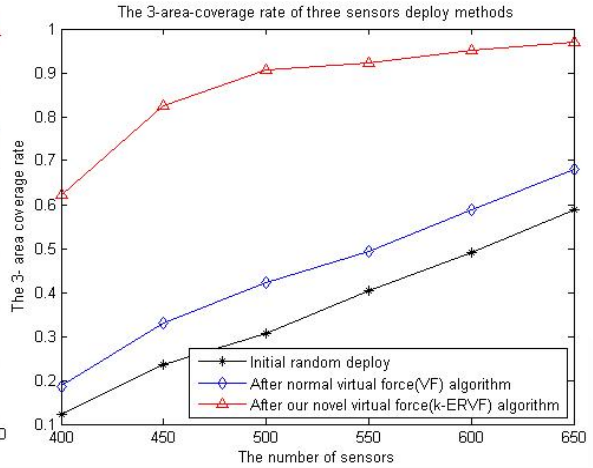


Fig.6 The corresponding 3-coverage rate

图 6 相应的 3-覆盖率

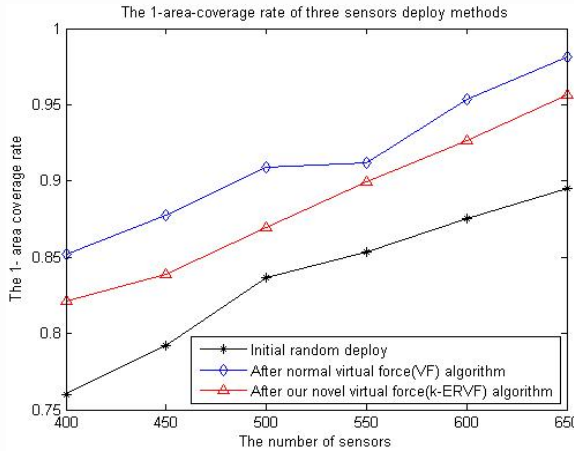


Fig.7 The corresponding 1-coverage rate

图 7 相应的 1-覆盖率

而对于 $A_{1,1}$ 的 1-覆盖率,由图 7 可以看到 VFA 重部署后 $A_{1,1}$ 的 1-覆盖率是最高的, k -ERVFA 算法紧随其后,在 $n=450\sim 600$ 时两者的 1-覆盖率相差在 1%~3%。两者 1-覆盖性能接近,VFA 稍强。这是由于 VFA 会均匀地在这个区域内重部署节点,而 k -ERVFA 算法则有针对性地按照 k 值从大到小先从高需求的 k -覆盖需求区域覆盖起。因为往往大 k 值的 k -覆盖需求区域所需覆盖的优先级更高, k -ERVFA 算法更能满足实际中的 k -覆盖需求。在 $n=550$ 时 k -ERVFA 算法就达到 $A_{2,1}, A_{3,1}, A_{1,1}$ 的 94.39%,92.22%,89.96%的 2-、3-、1-覆盖率;而 VFA 除了在 $A_{1,1}$ 的 1-覆盖率为 91.17%(比 k -ERVFA 高 1.21%)之外,其 $A_{2,1}, A_{3,1}$ 的 2-、3-覆盖率仅为 67.36%,49.39%,和 k -ERVFA 相比相去甚远。 $n=650$ 时, $A_{2,1}, A_{3,1}$ 和 $A_{1,1}$ 的 2-、3-、1-覆盖率均达到了可观的 99.41%,96.87%与 95.66%,与式(3)计算得到的 $n=692$ 可达到 100%的 1-覆盖率及 89%以上的 2-、3-覆盖率相比, k -ERVFA 基于 k -虚拟力的动态调整,将 100%1-覆盖率的 $A_{1,1}$ 中的节点匀至 $A_{2,1}$ 和 $A_{3,1}$ 中,使得三者各自 k -覆盖率均得以较好提高。

图8~图10为基于表1参数设置, $n=600$ 情况下三维水下节点部署情况.图8为初始时刻随机部署(RD)的情况,小球为处在 $A_{3,1}$ 中的传感器节点,三角形为处在 $A_{2,1}$ 中的节点.可见 RD 下,节点分布不均,位于 $A_{3,1}$ 和 $A_{2,1}$ 中的节点数较少.图9为 k -ERVFA 算法经过第1轮 $k'_1=3$ 后的运行情况,即以 $r'_1=r/3$ 的3-等效半径小球部署过后的情况,为了首先满足 $A_{3,1}$ 的3-覆盖率.同时 $A_{2,1}$ 因其区域质心引力的作用,节点也会一定程度聚集,亦会达到一定的2-覆盖率.图9中可见节点向 $A_{3,1}$ 和 $A_{2,1}$ 聚集,两者节点均有明显增多,但 $A_{1,1}$ 中的节点分布仍然不均.图10中为最终覆盖情况,包括在图9的基础上以2-,1-等效半径小球分别部署过,以分别满足 $A_{2,1}$ 和 $A_{1,1}$ 的覆盖需求.注意到2-等效半径小球较3-等效半径小球要大,因此图9中节点在 $A_{2,1}$ 的聚集有一定程度的浪费,以2-等效半径小球部署过后, $A_{2,1}$ 中的节点数较图9中的情况会有所减少,但其恰好够用,避免了浪费.同时,图10中 k -ERVFA 算法也分别在 $A_{3,1}$ 和 $A_{2,1}$ 中运行了第4.6节中 *fix&even* 均匀化重部署算法,使得二者区域内的3-,2-覆盖率更好.另, $A_{1,1}$ 内部的均匀化算法实际上与 $A_{1,1}$ 中1-等效半径小球的虚拟力重部署算法相同,此处不再重复使用.图10中 $A_{3,1}$ $A_{2,1}$ 中的节点分布更加均匀且相较图8中明显增多;同时, $A_{1,1}$ 区域的节点分布也更加均匀,在 $n=600$ 时达到了 97.54%,95.22%和 92.67%的 $A_{2,1}$, $A_{3,1}$ 和 $A_{1,1}$ 的2-,3-,1-覆盖率.

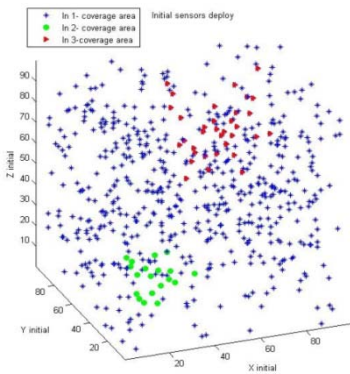


Fig.8 Initial sensors deploy
图8 初始部署

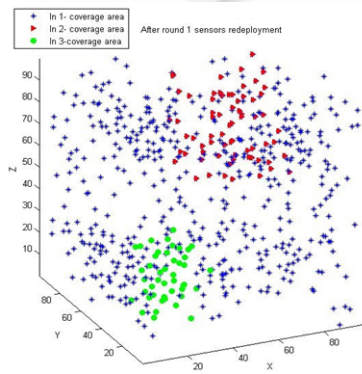


Fig.9 After round 1 sensors redeployment
图9 第1轮 k -ERVFA 重部署后

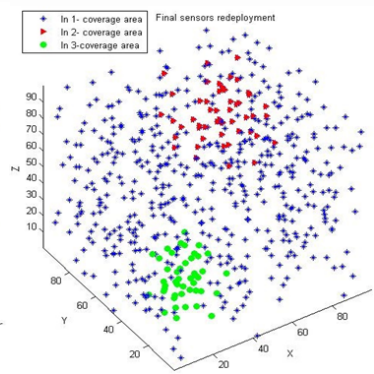


Fig.10 Final redeployment
图10 最终部署

6 结 语

三维水下传感器网络的覆盖控制技术已经成为传感器网络系统的一个研究热点.本文针对三维水下传感器网络相异 k -覆盖需求,基于浮标、锚、与浮标通过有线电缆连接通信的水下传感器模型,以新的方法研究了三维空间中保证 k -覆盖所需的最小传感器部署密度,达到了比以往更好的结果;论文的主要贡献在于提出了新的改进虚拟力算法 k -ERVFA,基于 k -等效半径小球按照 k -值从大到小的顺序动态部署传感器节点.仿真结果显示,相比经典的 VFA 算法, k -ERVFA 算法在略微牺牲 1-覆盖率的前提下,达到了较好的相异 k -覆盖需求区域重部署效果.由于本文模型基于通过刚性垂直电缆通信的 z 轴固定的 UWSN 模型,下一步工作的重点应该进一步研究节点可全向移动的水下移动传感器网络覆盖控制模型.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是江苏省无线传感网高技术研究重点实验室的各位老师和同学表示感谢.

References:

[1] Partan J, Kurose J, Levine BN. A survey of practical issues in underwater networks. SIGMOBILE Mob. Compute. Common Rev., 2007,11(4):23-33.
 [2] Huang Y, Liang W, Yu HB. A deployment strategy for effective coverage in underwater sensor networks. Journal of Electronics and Information Technology, 2009,31(5):1035-1039 (in Chinese with English abstract).
 [3] Pompili D, Melodia T, Akyildiz I F. Three-Dimensional and two-dimensional deployment analysis for underwater acoustic sensor networks. Ad Hoc Networks, 2009,7(4):778-790.

- [4] Akkaya K, Newell A. Self-Deployment of sensors for maximized coverage in underwater acoustic sensor networks. *Computer Communications*, 2009,32(7-10):1233–1244. [doi:10.1016/j.comcom.2009.04.002]
- [5] Xia N, Wang CS, Zheng R, Jiang JG. Fish swarm inspired underwater sensor deployment. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2012, 38(2):295–302 (in Chinese with English abstract).
- [6] Aitsaadi N, Achirt N, Boussetat K, Pujolle G. Differentiated underwater sensor network deployment. In: *Proc. of the IEEE Europe Oceans*. 2007. 1–6.
- [7] Koutsougeras C, Liu Y, Zheng R. Event-Driven sensor deployment using self-organizing maps. *Int'l Journal of Sensor Networks*, 2008,3(3):142–151. [doi: 10.1504/IJSNET.2008.018474]
- [8] Golen EF, Mishra S, Shenoy N. An underwater sensor allocation scheme for a range dependent environment. *Computer Networks*, 2010,54(3):404–415.
- [9] Zhu J, Zhao H, Xu JQ, Li DZ. Localization model in wireless sensor networks. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2011,22(7): 1612–1625 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3836.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03836]
- [10] Huang CF, Tseng YC, Wu HL. Distributed protocols for ensuring both coverage and connectivity of a wireless sensor network. *ACM TOSN*, 2007,3(1):1–24.
- [11] Wan PJ, Yi CW. Coverage by randomly deployed wireless sensor networks. *IEEE TIT*, 2006,52(6):2658–2669.
- [12] Alam S, Haas Z. Coverage and connectivity in three-dimensional networks. In: *Proc. of the 12th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. Los Angeles: ACM, 2006. 346–357.
- [13] Huang CF, Tseng YC, Lo L. The coverage problem in three-dimensional wireless sensor networks. In: *Proc. of the Global Telecommunications Conf. Dallas: IEEE Communication Society*, 2004. 115–121.
- [14] Ammari HM, Das SK. Joint k -coverage and hybrid forwarding in duty-cycled three-dimensional wireless sensor networks. In: *Proc. of the IEEE SECON*. IEEE Communication Society, 2008. 170–178.
- [15] Huang HP, Sun LJ, Wang RC, Li J. A novel coverage enhancement algorithm for image sensor networks. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012,11. [doi: 10.1155/2012/370935]
- [16] Huang JJ, Huang HP, *et al.* Probability model based coverage-enhancing algorithm for wsns of nodes' adjustable movement pattern. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012. [doi:10.1155/2012/570643]
- [17] Liu H, Chai ZJ, Du JZ, Wu B. Sensor redeployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space. *ACTA AUTOMATICA SINICA*, 2011,37(6):713–723 (in Chinese with English abstract).
- [18] Tezcan H, Cayirci E, Coskun V. A distributed scheme for 3D space coverage in tactical underwater sensor networks. In: *Proc. of the Military Communications Conf. Monterey*. IEEE Communication Society, 2004. 697–703.
- [19] Xie JR, Liu CX, Hu YM, Liu L. Deployment in wireless sensor networks. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007,26(1): 4–7 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [2] 黄艳,梁驊,于海斌.一种高效覆盖的水下传感器网络部署策略. *电子与信息学报*,2009,31(5):1035–1039.
- [5] 夏娜,王长生,郑榕,蒋建国.鱼群启发的水下传感器节点布置. *自动化学报*,2012,38(2):295–302.
- [9] 朱剑,赵海,徐久强,李大舟.无线传感器网络中的定位模型. *软件学报*,2011,22(7):1612–1625. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3836.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2011.03836]
- [17] 刘惠,柴志杰,杜军朝,武波.基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究. *自动化学报*,2011,37(6):713–723.
- [19] 谢洁锐,刘才兴,胡月明,刘兰.无线传感器网络的部署. *传感器与微系统*,2007,26(1):4–7.



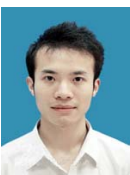
蒋昕(1988—),男,江苏南京人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络,网络覆盖技术.

E-mail: 29223330@qq.com



戴晓燕(1987—),女,工程师,主要研究领域为计算机通信网络,网络覆盖技术.

E-mail: xiaquanpo1987@126.com



黄海平(1981—),男,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,分布式计算与信息安全.

E-mail: hhp@njupt.edu.cn



王汝传(1943—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,普适计算,分布式计算技术.

E-mail: wangrc@njupt.edu.cn