

基于加权虚拟力的空中传感器网络分段部署算法

谭 励¹, 张 哲¹, 杨明华², 胡计鹏¹

(1. 北京工商大学 计算机与信息工程学院, 北京 100048; 2. 第二炮兵装备研究院, 北京 100091)

摘 要: 为提高空中传感器网络部署算法的适用性, 实现对复杂环境的部署, 提出一种加权虚拟力空中传感器网络分段部署算法, 并建立空中扩散模型与地表扩散模型。空中扩散模型可减少节点在部署曲面上移动的能耗, 使节点大部分的扩散过程在空中进行。地表扩散模型可减少节点暴露于空中的时间, 从而避免受环境以及突发事件的影响。仿真实验结果表明, 与三维虚拟力部署算法相比, 该算法可以实时调整部署过程, 部署时间短, 适用性强, 达到较好的部署效果。

关键词: 空中传感器网络; 三维部署; 虚拟力分解; 分段部署; 扩散模型

中文引用格式: 谭 励, 张 哲, 杨明华, 等. 基于加权虚拟力的空中传感器网络分段部署算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(10): 118-123.

英文引用格式: Tan Li, Zhang Zhe, Yang Minghua, et al. Phased Deployment Algorithm Based on Weighted Virtual Force for Airborne Sensor Network[J]. Computer Engineering, 2016, 42(10): 118-123.

Phased Deployment Algorithm Based on Weighted Virtual Force for Airborne Sensor Network

TAN Li¹, ZHANG Zhe¹, YANG Minghua², HU Jipeng¹

(1. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. The Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100091, China)

[Abstract] In order to improve the applicability of the airborne sensor network deployment algorithm and realize the deployment of complex environments, a Weighted Virtual Force Decomposition Algorithm (WVFDA) is proposed. The air diffusion model and the surface diffusion model are established. The air diffusion model can reduce the energy consumption of nodes on the surface and make most of the diffusion process are carried out in the air. The surface diffusion model can reduce the time of exposure to the air, so as to avoid the impact of the environment and unexpected events. Simulation experimental results show that compared with 3D virtual force deployment algorithm, the proposed algorithm can adjust the deployment process in real time. The deployment time is short and the applicability is strong, which has a good deployment effect.

[Key words] airborne sensor network; 3D deployment; virtual force decomposition; phased deployment; diffusion model
DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.10.021

1 概述

空中传感器网络由传感器网络发展而来, 是在传统传感器网络的基础上增加了三维的信息, 可在任意空间上实现传感器网络的部署功能^[1], 具有十分广阔的应用前景^[2-4]。在空中传感器网络技术中, 部署策略是最为核心的问题之一。因为部署策略的

优劣直接影响到了网络的部署时间、覆盖率和整个网络的生存周期, 进而决定了收集数据的完整度、精确度及实时性。无线传感器网络发展为空中无线传感器网络, 部署区域由二维变为三维, 目前很多二维部署算法不再适用, 急需在部署算法设计上有了新的处理方法和思路。

针对空中传感器网络节点部署问题, 国内外的

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61402022); 北京市自然科学基金资助项目(4132025); 北京市青年英才计划基金资助项目(YETP1448); 北京市哲学社科规划基金资助项目(14JGB033)。

作者简介: 谭 励(1980—), 女, 副教授、博士, 主研方向为无线传感器网络、智能信息处理; 张 哲, 硕士研究生; 杨明华, 高级工程师、博士后; 胡计鹏, 硕士研究生。

收稿日期: 2015-07-29 **修回日期:** 2015-12-02 **E-mail:** tanli@th.btbu.edu.cn

一些大学和科研机构进行了相关的研究,提出了计算几何法^[5]、启发式算法^[6]、网格部署算法^[7-8]、虚拟力算法^[9-11]以及针对部署问题的多种改进方案^[12-13]。这些方法在空中传感器网络移动节点自主部署方面都有积极的贡献,但计算几何法、启发式算法、网格法存在通信和计算开销大、能耗高等问题,不适用于能量有限的空中无线传感器网络。虚拟力算法相对计算量少,在算法实现上简洁,产生的路径也比较平滑,但存在分布不均匀、试用范围有限等问题。对于虚拟力算法的研究,文献[14]提出 ECA3D (Exact Covering Algorithm in 3D space) 算法;文献[15]提出基于虚拟力的重部署算法。但这些算法都是以一定程度上提升算法复杂度为代价,使算法能够更好地完成有针对性的探测任务,并且这些算法多没有考虑部署环境和能耗的影响。

本文提出一种基于加权虚拟力分解的空中传感器网络分段部署算法(Weighted Virtual Force Decomposition Algorithm, WVFDA),并针对部署过程中的实际条件,考虑环境因素和能源消耗,给出节点的空中扩散模型和地表扩散模型。

2 空中虚拟力分解

WVFDA 算法的虚拟力原理包括节点间的虚拟力和部署曲面的中心引力。其中,对于任何一个节点,其他节点对它的虚拟力和中心节点对它的虚拟力又都可以分解为水平方向的虚拟力和纵向的虚拟力。节点受到的合力公式为:

$$F_i = \sum_{j \in A} F_{xij} + \sum_{j \in A} F_{yij} + F_{xic} + F_{yic} + \sum_{j \in A} F_{zij} + F_{zic} \quad (1)$$

其中, A 表示 i 节点的邻接节点集; $\sum_{j \in A} F_{xij}$, $\sum_{j \in A} F_{yij}$ 表示 i 节点受邻接节点的合力在 x 轴和在 y 轴方向的分力; F_{xic} , F_{yic} 表示曲面中心对节点 x 轴、 y 轴方向的分力; $\sum_{j \in A} F_{zij}$ 表示 i 节点受邻接节点集 z 方向的合力; F_{zic} 表示节点受曲面中心 z 轴方向的力。

$$\sum_{j \in A} F_{xij} = F \times \sum_{j \in A} \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A} F_{yij} = F \times \sum_{j \in A} \frac{y_j - y_i}{d_{ij}} \quad (3)$$

$$F_{xic} = F \times \frac{x_c - x_i}{d_{ic}} \quad (4)$$

$$F_{yic} = F \times \frac{y_c - y_i}{d_{ic}} \quad (5)$$

$$F_{zi} = F_z \times \frac{z_i}{h} - F_{\min} \quad (6)$$

其中, F 表示水平方向受到虚拟力的合力; F_z 为纵向虚拟力; d_{ij} 表示节点间的三维距离; d_{ic} 表示节点距中心点的距离; z_j 表示 i 节点的所有邻接节点 z 坐标的

平均值; h 为节点初始下落高度。

3 基于加权虚拟力分解的分段部署

根据式(2)得到构成合力因素的各项数值,计算各因素在空中坐标系中的偏移位移。在默认情况下,每个因素占得权值相同,通过对各因素缩小相同的倍数得到节点的偏移位移。

节点的受力分解后,水平部署过程与纵向下落过程互不影响,为各因素偏移位移设置不同权值,如式(7)所示。

$$\Delta D = \omega_1 \times \left(\frac{\sum_{j \in A} F_{xij}}{F} + \frac{\sum_{j \in A} F_{yij}}{F} \right) + \omega_2 \times \left(\frac{F_{xic}}{F} + \frac{F_{yic}}{F} \right) + \omega_3 \times \frac{F_z + F_{zic}}{h} \quad (7)$$

其中, ΔD 为节点的偏移位移; F 为节点水平方向受到的合力; h 为节点集初始的下落高度; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为各构成因素的调节系数。将此过程称作偏移量的重分解过程。通过将合力与偏移位移的比例进行调整,实现不同需求下的部署过程。 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的约束条件为 $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ 。其中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别是节点间水平虚拟力、曲面中心对节点水平虚拟力和节点纵向虚拟力的调节系数。

3.1 模型描述

考虑到不同的环境以及能量的限制,可以将部署过程分为 2 类:空中扩散模型和地表扩散模型。在模型中,细化节点合力的构成因素通过调整不同因素的权值比例,分别实现相应的部署过程。

空中扩散模型是以在空中节点的扩散为主。在空中,节点受到的水平虚拟力的权值大于纵向的虚拟力的权值,能够使节点在空中较快地进行扩散调整;当存在节点部署到曲面上时,改变节点的受力,使节点受到的纵向虚拟力的权值大于节点水平虚拟力的权值,减少节点在空中停留的时间,避免遇到空中障碍物的影响,减少节点落在曲面上进行移动的能量损耗。

地表扩散模型是以地表扩散为主。在空中,节点受到的纵向虚拟力的权值大于节点水平虚拟力的权值,减少节点空中受到的阻力限制或空中障碍物的影响;当存在节点部署到曲面上时,改变节点的受力,使节点受到的水平虚拟力的权值大于纵向的虚拟力的权值,使节点在曲面上快速地扩散到目标位置,防止恶劣的环境下对节点位置的大幅度波动,影响最终的网络部署结果。

3.2 算法描述

算法的伪代码描述如下:

1. 初始化节点数量 num 、节点质量 m 、最小半径 R_m 、平衡半径 R_k 、通信半径 R_c ;
2. 初始化部署目标空间的坐标范围和目标的曲面参数方程;

```

3. for i = 1 to num
4.     初始化节点 i 的质量 m 和坐标向量 [xi yi zi];
5.     初始化节点 i 的最小半径 Rm、感知半径 Rc 和平衡半径 Rk;
6. end for
7. 计算部署目标空间的中心点坐标;
8. 根据公式计算出  $\sum_{j \in A} F_{xij}$ ,  $\sum_{j \in A} F_{yij}$ ,  $F_{xic}$ ,  $F_{yic}$ ,  $F_{zic}$  的大小;
9. 确定二维部署区域 {xmin xmax ymin ymax} ;
10. 确定分段过程;
11. 根据分段过程确定  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  值;
12. for i = 1 to num
13.     xi = xi +  $\omega_1 \times \sum_{j \in A} F_{xij} + \omega_2 \times F_{xic}$ 
14.     yi = yi +  $\omega_1 \times \sum_{j \in A} F_{yij} + \omega_2 \times F_{yic}$ 
15.     根据部署曲面方程 计算 (xi, yi) 对应的 zi 坐标
16.     if zi = Z && xmin < x < xmax && ymin < y < ymax
17.         Do
18.             zi = z;
19.         else
20.             zi = zi -  $\omega_3 \times F_{zic} / h$ ;
21.         i = i + 1;
22.     end for

```

对于空中扩散模型,算法实现步骤如下:

(1) 首先确定空中扩散模型算法实现的时间域,第 1 个时间域节点部署过程主要表现为扩散过程,第 2 个时间域节点部署过程主要表现为下落过程。

(2) 在时间域内,用基于加权虚拟力分解的空中传感器网络部署算法求出 6 个分量的大小。

(3) 为每个分量确定相应的 ω 值。 ω 的大小能够反映出各分量在合力中占得权重, ω 越大,对应的分量的大小占合力的比重越大,那么在相应的方向就会有显著的移动效果。在第 1 个阶段将 ω_1, ω_2 的值设置的偏大, ω_3 的值偏小,使节点能够在缓慢的下落过程中显著扩散开。当节点处于第 2 时间段需要将 ω_1, ω_2 的值设置调小, ω_3 的值调大。此时由于节点距离曲面中心的距离很小,曲面中心对节点的引力很小,那么就需要大幅度的调整 ω_3 的值,使节点部署过程以下落过程为主。

对于地表扩散模型,算法实现与空中扩散模型算法实现相似,实现步骤如下:

(1) 确定地表扩散模型算法实现的时间域。将整个时间域分为 2 个阶段;第 1 个阶段节点部署过程主要表现为下落过程;第 2 个阶段节点部署过程主要表现为扩散过程。

(2) 在时间域内,用加权虚拟力分解的空中传感器网络部署算法求出 2 个分量的大小。

(3) 为每个分量确定相应的 ω 值。在第 1 个阶段,需要将 ω_1, ω_2 的值设置偏小, ω_3 的值设置偏大,使节点在相应时间里能够快速的下落。由于在第 1 个过程中,一般表现为节点的初始下落过程,所有节点距离曲面中心最远,曲面中心对节点的引

力最大,因此值仍不宜太大,使节点快速降落到部署曲面上。在第 2 个时间段需要将 ω_1, ω_2 的值设置调大, ω_3 的值调小。此时由于节点距离曲面中心的距离很小,曲面中心对节点的引力很小, ω_3 的值不宜设置过小,使节点部署下落位移太小。

4 实验结果与分析

4.1 实验环境

本文的实验平台选用 Inter (R) Core (TM) i5-3230M CPU;4 GB 内存计算机;MATLAB R2012a 实验平台。本文采用 Matlab 平台进行仿真实验,首先建立一个空中曲面,此空中形体用来模拟理论中的目标部署区域。然后将一组节点从目标部署区域正上方的中心区域下落,通过调整自身位置向曲面移动,从而模拟物理节点从空中下落的过程。最后节点运动同时受到整个网络的约束,根据节点受到的合力,逐渐调整自身的位置信息,最终形成一个部署均匀的无线传感网络。

4.2 参数的确定

在一个真实具体的部署环境中,可以根据需要给定调节系数一组固定的数值。在为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 设置值时,首先,设置 ω_3 的取值,由于 ω_3 控制由曲面中心对节点的纵向虚拟力,纵向虚拟力本身就会随节点距离曲面的距离而变化,节点由远到近,引力由大逐渐变小。当 ω_3 设置过小时,节点距离曲面近时的纵向下落位移会非常缓慢;当 ω_3 设置过大,节点会快速下落,来不及扩散开。因此, ω_3 值的确定尤为重要。其次,可以根据节点的扩散速度为 ω_1, ω_2 设置相应的取值。由于节点间的虚拟力通常大于曲面中心对节点的水平虚拟力,当希望扩散能快速进行时,可设 $\omega_1 \geq \omega_2$;否则,可以设置 $\omega_1 < \omega_2$ 。

通过以上参数的设定,即可根据不同的部署需求,通过调整合力中所有构成元素的权值来设置合力的方向,为每个节点在 x 轴、y 轴和 z 轴上分配新的合力,从而改变节点的移动位移,进而有针对性地对目标部署区域进行部署。

4.3 空中扩散模型仿真实验

采用基于加权虚拟力分解的空中传感器网络分段部署算法进行仿真实验,将 100 个随机生成到覆盖目标上空的传感器节点均匀部署到一个曲面上。节点的初始高度距离曲面中心的单位距离为 6 m,曲面方程为: $Z = (\sin X^2 + \cos Y^2) \times 2 - 2$, 曲面 x 和 y 的取值范围为 $[-4, 4]$ 。实验将整个部署过程分成 2 个部分,第 1 部分为 1 帧 ~ 80 帧,主要表现为节点在空中的扩散。第 2 部分为 81 帧到 n 帧,主要表现为节点的下落 (n 帧的值大于部署算法完成的最小帧数)。

在 1 帧 ~ 80 帧中,设置 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的值分别为 0.4, 0.4, 0.2。81 帧到 n 帧,设置 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的值分

别为0.1,0.1,0.8。这里选取第80帧作为2个阶段的边界,在第80帧时存在节点的 z 坐标小于等于部署曲面的高度,所有节点的部署过程变为下落过程为主。节点部署过程中40帧时的状态如图1所示,80帧的状态如图2所示,120帧的状态如图3所示,最终部署的结果如图4所示。

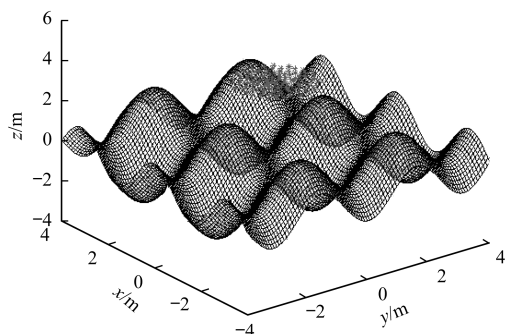


图1 第40帧时的部署状态

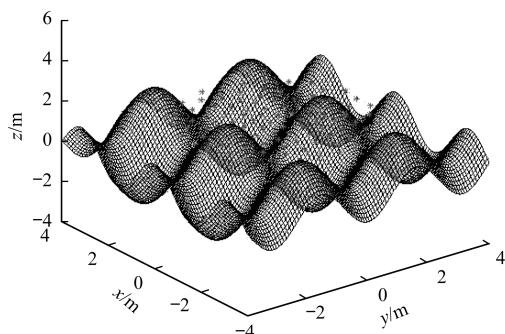


图2 第80帧时的部署状态

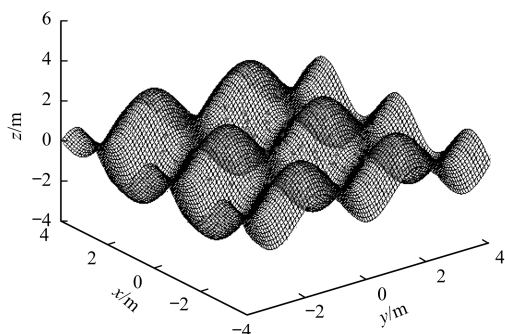


图3 第120帧时的部署状态

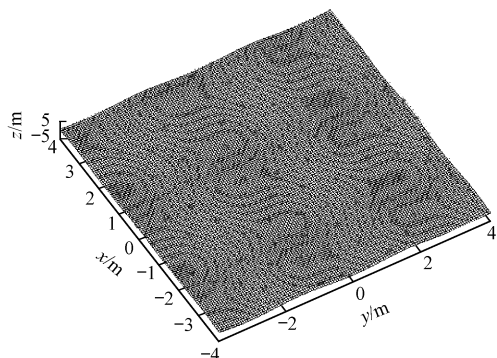


图4 节点最终的部署状态(俯视图)

图1属于部署阶段的第1个阶段,从图2可以看出,节点在空中的移动主要以向两侧移动为主,所有节点扩散效果十分显著。如图2所示,节点在第1个阶段扩散到图示的位置,这时存在一个节点,使得节点的纵坐标值小于等于部署曲面的最大高度,此时应该改变节点的移动方式,使所有节点以下落为主,并根据曲面方程调整节点的纵向坐标。若仍采用空中扩散模型中第一阶段分量的权值比重,会使得节点扩散到部署区域的外部,浪费节点资源,降低部署结果的覆盖率。

比较图2、图3,在部署过程的第2个阶段,可以看出节点的移动以下落为主,所有节点在10帧的间隔内下降距离为0.9刻度,在水平方向扩散距离为0.1刻度,下落趋势显著。

根据空中扩散模型算法,得到了如图4所示的节点部署的最终结果。此算法可以在第1阶段将节点快速分散开,降低节点在部署曲面上移动消耗的能量。在第2阶段中,节点扩散阶段基本完成,通过调整中心引力在 z 轴方向的权值大小,使节点快速下落,从而避免在空中停留过久带来不必要的隐患。该算法的仿真结果与基于虚拟力分解的空中传感器网络部署改进算法仿真结果有着相近的覆盖率和均匀度,并且此算法可减少部署时间,降低应用中的能源问题。

4.4 地表扩散模型仿真实验

采用加权虚拟力分解的空中传感器网络分段部署算法进行仿真实验,将100个随机生成到覆盖目标上空的传感器节点均匀部署到一个曲面上。节点的初始高度距离曲面中心的单位距离为6 m,曲面方程为: $Z = (\sin X^2 + \cos Y^2) \times 2 - 2$,曲面 x 和 y 的取值范围为 $[-4, 4]$ 。本文实验将整个部署过程分成2个部分,第1部分为1帧~30帧,主要表现为节点在空中的下落。第2部分为31帧到 n 帧,主要表现为节点的扩散过程。

在1帧~30帧中,设置 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的值分别为0.1,0.1,0.8。31帧到 n 帧, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的值分别为0.3,0.3,0.4。这里选取第30帧作为2个阶段的边界,此时节点的 z 坐标大于部署曲面高度的最大值,所有节点的部署过程变为扩散过程为主。节点部署过程中10帧、30帧时的状态如图5、图6所示,70帧、120帧的状态如图7、图8所示,最终部署的结果如图9所示。

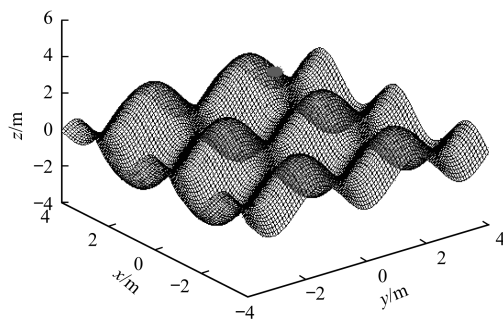


图5 第10帧时的部署过程

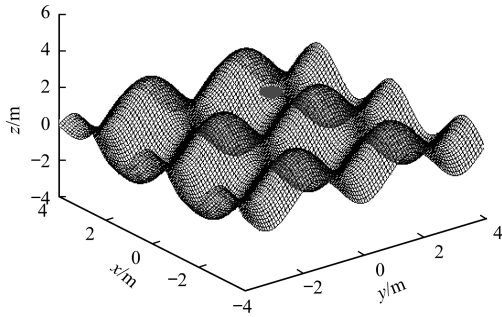


图 6 第 30 帧时的部署过程

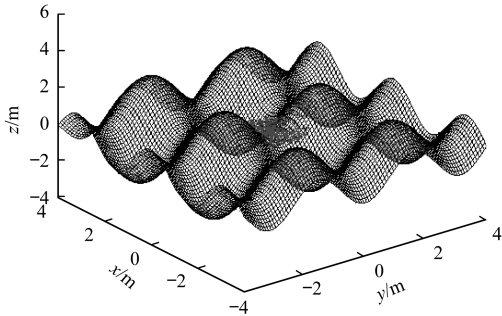


图 7 第 70 帧时的部署过程

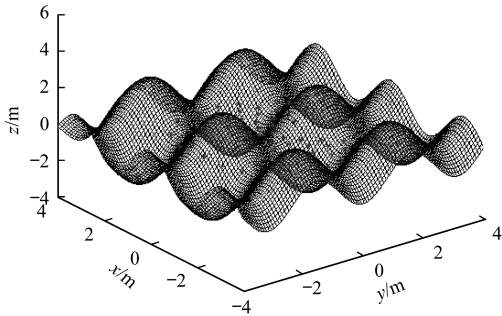


图 8 第 120 帧时的部署过程

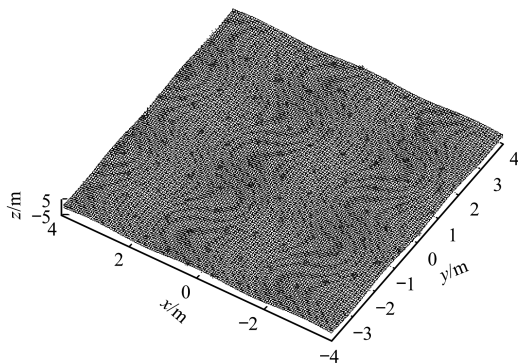


图 9 节点最终的部署过程(俯视图)

比较图 5、图 6, 2 幅图都属于部署阶段的第 1 个阶段, 可以看出节点在空中的移动主要以下落为主, 所有节点在 10 帧的间隔内下降了 1.1 刻度, 节点在水平方向扩散了 0.1 刻度。在同一个部署阶段, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的值固定, 距离曲面越远的节点受到的中心引力越大, 因此加入权重后, 节点的下落位移会更加显著, 但随着节点 z 坐标的减少, 下落速度也会平稳的变小。

比较图 7、图 8, 在部署过程的第 2 个阶段, 可以看出节点的移动以扩散为主, 所有节点在 10 帧的间隔内下降了 0.2 刻度, 在水平方向扩散了 1 刻度, 扩散趋势显著。

根据地表扩散模型算法, 得到如图 9 所示的节点部署最终结果。该算法采用在空中快速下落的方法, 可以减少节点在空中暴露的时间, 减少由于环境、突发事件等对节点位置的影响。在第 2 个阶段中, 节点以扩散为主, 此阶段的扩散会受到部署区域的保护, 能够使节点相对安全地移动到目的区域。该算法的仿真结果与基于虚拟力分解的空中传感器网络部署改进算法仿真结果有着相近的覆盖率和均匀度, 并且此算法充分考虑部署环境, 可减少整个网络的部署时间。

4.5 结果分析

本节采用具有代表性的部署性能度量指标覆盖率进行分析。这里将覆盖率定义为在目标部署区域内所有节点覆盖的面积之和与目标区域面积的比值, 如式(8)所示。

$$C = \frac{\bigcup_{i=1}^n A_i}{A} \approx \frac{n\pi R_c^2}{A} \quad (8)$$

其中, A_i 代表 i 节点在部署区域内覆盖范围的面积; R_c 为节点的通信半径, 一般取值满足 $2R_c < R_k$; A 代表整个目标部署区域的面积; n 表示节点数。

根据空中扩散和地表扩散的仿真实验, 并与 ECA3D 算法比较, 得到如图 10 所示的空中扩散模型和地表扩散模型覆盖率随帧数变化的曲线。

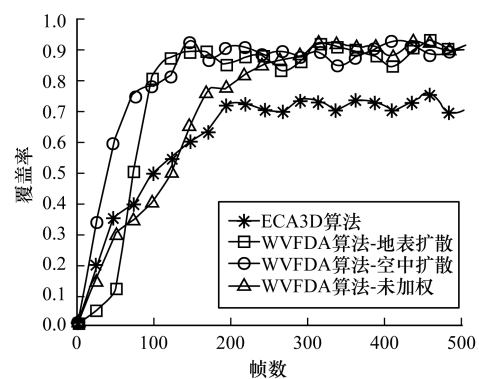


图 10 覆盖率随帧数变化曲线

从图 10 可以看出, 由于 WVFDA 算法实现的空中扩散模型首先完成空中的扩散, 因此初始状态覆盖率会急剧上升, 当部署节点位于第 2 个阶段时, 节点以下落为主, 覆盖率上升缓慢; WVFDA 算法实现的地表扩散模型则是首先以下落为主, 因此覆盖率上升相对缓慢, 当部署节点位于第 2 个阶段时, 节点以扩散为主, 覆盖率会快速增加。WVFDA 算法实现的空中

扩散模型最终的覆盖率接近于0.92,WVFDA算法实现的地表扩散模型最终的覆盖率接近于0.91。

虽然2种模型部署过程不同,但部署结果有着相似并且较高的覆盖率,部署结果优异。并且,WVFDA算法对比ECA3D算法更具有明显优势,与未加权分段的部署算法相比,部署过程更为灵活,部署算法适用性强,并在保证部署结果相近的情况下,减少了整个部署过程的部署时间。

5 结束语

无线传感器网络由二维平面部署问题拓展到三维空中部署问题后,部署算法的理论研究仍处于探索阶段,而部署模型如何高度拟合现实应用环境,面临的问题越来越突出。本文提出一种WVFDA算法,该算法包含空中扩散模型和地表扩散模型。其中空中扩散模型用于解决减少节点在部署曲面上移动的能耗问题,使节点大部分的扩散过程在空中进行。地表扩散模型用于减少节点暴露于空中的时间,从而避免受环境以及突发事件的影响。此外,通过仿真实验验证了空中扩散模型和地表扩散模型的有效性。

参考文献

- [1] Kim A, Han Jaejun, Yu Taeyoon, et al. Hybrid Wireless Sensor Network for Building Energy Management Systems Based on the 2.4 GHz and 400 MHz Bands[J]. Information Systems, 2015, 48(1): 320-326.
- [2] Tuna G, Nefzi B, Conte G. Unmanned Aerial Vehicle-aided Communications System for Disaster Recovery[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 41(5): 27-36.
- [3] Drones Project Page[EB/OL]. (2015-01-16). <http://uav.lakeside-labs.com/>.
- [4] Khan A, Yanmaz E, Rinner B. Information Merging in Multi-UAV Cooperative Search[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 3122-3129.
- [5] Wang G, Cao G, La P T. Movement-assisted Sensor Deployment[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6): 640-652.
- [6] 庞 博, 秦小麟, 江国华, 等. 权重感知的三维室内无线传感器网络部署算法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 31-36.
- [7] 刘志坤, 夏清涛, 罗 浩, 等. 无线传感器网络三维覆盖策略研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2013, 37(3): 582-584.
- [8] 钟永信, 黄建国. 三维传感器网络部署、覆盖和连接问题研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(10): 1447-1451.
- [9] Zou Y, Chakrabarty K. Sensor Deployment and Target Localization in Distributed Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2004, 3(1): 61-91.
- [10] 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(5): 1152-1163.
- [11] Ma K, Zhang Y, Trappe W. Managing the Mobility of a Mobile Sensor Network Using Network Dynamics[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(1): 106-120.
- [12] 王学军. 一种改进的无线传感器网络节点部署方案[J]. 计算机工程, 2012, 38(19): 82-84.
- [13] 金仁成, 韦 宁, 徐 浩, 等. 基于虚拟力的无线传感器网络分簇部署策略[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2014, 35(5): 640-644.
- [14] 李 享, 李轩涯. 基于虚拟力的三维部署技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(9): 1671-1815.
- [15] 刘 惠, 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, 32(6): 713-722.
- [7] Vasiliadis G, Polychronakis M, Ioannidis S. MIDeA: A Multi-parallel Intrusion Detection Architecture[C]//Proceedings of the 18th ACM Conference on Computer and Communications Security. New York, USA: ACM Press, 2011: 297-308.
- [8] TCPDUMP Workers. TCPDUMP & LIBPCAP[EB/OL]. [2015-04-22]. <http://www.tcpdump.org>.
- [9] Gerald Combs. Tshark—Dump and Analyze Network Traffic[EB/OL]. (2014-06-17). <https://www.wireshark.org/docs/man-pages/tshark.html>.
- [10] Pereira S S L, Maia J E B, Silva J L D C E. ITCM: A Real Time Internet Traffic Classifier Monitor[J]. International Journal of Computer Science & Information Technology, 2015, 6(6).
- [11] Yahalom S. TCP Session Reconstruction Tool[EB/OL]. (2007-09-22). <http://www.codeproject.com/Articles/20501/TCP-Session-Reconstruction-Tool>.
- [12] Wojtczuk R. Libnids[EB/OL]. (2012-12-11). <http://libnids.sourceforge.net/>.
- [13] Lee Yeon-hee, Lee Young-seok. A Hadoop-based Packet Trace Processing Tool[C]//Proceedings of TMA'11. Berlin, Germany: Springer, 2011: 51-63.
- [14] Lee Yeon-hee, Lee Young-seok. Toward Scalable Internet Traffic Measurement and Analysis with Hadoop[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2013, 43(1): 6-13.
- [15] Lee Young-seok. An Internet Traffic Analysis Method with MapReduce[C]//Proceedings of Network Operations and Management Symposium Workshops. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 357-361.
- [16] White T. Hadoop: The Definitive Guide[M]. 3rd ed. 华东师范大学数据科学与工程学院, 译. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [17] 蔡 斌, 陈湘萍. Hadoop 技术内幕: 深入解析 Hadoop Common 和 HDFS 架构设计与实现原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [18] 董西成. Hadoop 技术内幕: 深入解析 MapReduce 架构设计与实现原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

编辑 索书志

编辑 陆燕菲

(上接第117页)