



一种基于网格划分的水下传感器网络多维优化部署策略

周凯

(浙江工业大学, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对水下无线传感器网络节点的部署问题, 提出一种基于网格划分的多维优化部署策略。首先, 将所需探测水下环境划分成相同规格的网格; 然后, 综合考虑网络节点数量、网络覆盖率、网络冗余度、网络生存率等指标, 构建多目标优化数学模型; 最后, 采用遗传算法对多维优化部署策略加以实现并进行仿真分析。结果显示: 所提策略能够有效地减少部署节点数量, 提高网络覆盖率和生存效率, 降低网络能耗。

关键词: 水下传感器网络; 网络冗余度; 网络覆盖率; 网络生存效率; 遗传算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018266

Nodes deployment strategy for underwater wireless sensors networks based on grids

ZHOU Kai

Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

Abstract: To optimal the node deployment of underwater wireless sensor network, a node deployment strategy with multi-metrics based on the grids was proposed. Firstly, the underwater environment was divided into some certain size grids. Then, based on number of nodes, coverage quality of nodes, lifetime of network, network redundancy, a multi-objectives model was proposed. In order to solve the model, cost function with constraint conditions was given. Based on the genetic algorithm, the cost and the energy consumption of the deployment method were computed. The simulation result shows that the energy consumption and the number of deployment nodes are reduced.

Key words: underwater wireless sensor network, network redundancy, coverage fraction of the network, lifetime of network, genetic algorithm

1 引言

水下无线传感器网络 (underwater wireless sensor network, UWSN) 是将低能耗、通信距离受限的节点部署在指定水域中, 利用节点的自组织能力实现自动组网, 对指定区域内的信息进行采集并

完成相应的数据收集和整理的无线网络^[1]。UWSN 在海洋资源勘探、海洋环境监测以及海洋军事领域有着广泛且重要的用途, 已经引起工业界、学术界以及军事界的极大关注。近年来, 随着各国发展海洋经济热潮的兴起, UWSN 已经成为无线传感器网络的热点新兴研究领域之一。

区别于传统二维无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN), UWSN 需要监测三维水域环境。由于水下环境复杂多变且仅能依靠衰落较快的声波信号传输信息、所需网络节点成本高、网络能耗大等特点,许多传统 WSN 的方法并不适用于 UWSN^[2]。因此,许多学者对 UWSN 的拓扑控制协议、定位算法、节点部署与覆盖控制等方面开展研究。Kulhandjian 等人^[3]对水声网络进行广泛而深入的研究,系统地讨论了 UWSN 网络层的几项关键技术,回顾性地介绍了信息传输协议的发展进程。Guan 等人^[4]对水声网络的传输接入协议进行深入探讨,在系统模型里讨论了节点传输方式与干扰控制方式,并推导了网络吞吐量的表达方式,并形成了优化数学模型。Zhan 等人^[5]采用遗传算法讨论了功率分配方法对于水声网络信息传输的重要性。其中,由于水下节点的部署直接关系到 UWSN 的节点能量、通信带宽及监测信息的准确性,成为 UWSN 众多研究方向的首要待解决问题。合理的 UWSN 节点部署策略不仅可以节约节点资源,提高网络工作效率,还可以优化网络资源,均衡网络能耗,提高网络生存时间。

近年来,有不少学者针对 UWSN 的节点部署策略展开研究。黄艳等人^[6]提出了基于 Neyman-Pearson 信息融合的节点部署策略,从而实现正方形和正三角形两种单元网格的高效覆盖,并证明他们的方法在确保感知质量的基础上获得更大的覆盖范围。但是,黄艳等人^[6]提出的正方形覆盖和正三角形覆盖本质还是一种二维覆盖方法,并不能直接应用于 UWSN 节点部署。张聚伟等人^[7]利用声纳的概率感知模型,建立模糊感知模型和模糊数据融合模型从而实现 UWSN 的节点部署。罗强等人^[8]引入“虚拟力”的概念,构建节点间虚拟力的区域算法,实现水下探测区域的三维节点部署,并证明该算法可以有效地提高小规模水域的覆盖效率。但是,张聚伟和罗强等人提出的算法并未考虑节点之间的连通性能,并不能保障水下采集的信息能够准

确地传输到基站。虽然知道 UWSN 节点部署有许多可供考虑的指标,如网络连通率、网络覆盖率、网络节能效率等,但大部分的作者仅针对单一指标展开研究。当考虑多于一个指标进行节点部署优化时,通常属于 NP 难 (non-deterministic polynomial) 问题,需要借助启发式算法加以求解。Suneet 等人^[9]考虑网络覆盖率与网络连通率两个因素,建立 2D-WSN 节点部署数学模型,并采用遗传算法进行数值仿真。由于 Suneet 等人建立的节点部署模型非三维环境,并不能直接应用于 UWSN,且 UWSN 节点部署的计算量要远高于普通 2D-WSN 节点部署的计算量。Cao 等人^[10]在 2D-WSN 的基础上进行推广,考虑网络覆盖率与网络生存时间两个因素,建立 3D-WSN 节点部署数学模型,并采用粒子群算法进行数值仿真。胡炜等人^[11]采用遗传退火算法对 UWSN 进行优化部署,证明了混合算法的可行性和优越性。但是,Cao 和胡炜等人的论文并未从多个角度衡量部署指标,未能突出混合算法的优势。可见,UWSN 的节点部署问题需要考虑到覆盖效率(即节点对于感知区域的覆盖面积)、节点连通性能(即水下节点能否有效且准确地传输到 sink 节点)、节点冗余性(即水下被多个节点覆盖的面积)、网络节能性(节点部署方案应能提高网络生存时间)等指标,现有的文献仅考虑上述一部分因素;且同时优化网络中节点部署数量与部署位置较为困难。为此,本文提出了一种基于网格划分的多维节点优化部署方案,对多个指标进行分层次优化。同时指出,在考虑 UWSN 节点部署时,需要考虑的指标不仅限于本文所讨论的 5 项指标(如节点位置引起的同频干扰等因素)。因此,综合考虑多方面因素提出一个最优的 UWSN 节点部署方案是一项艰难而有意义的课题。

2 UWSN 节点部署模型

由于 UWSN 所需探测的三维环境复杂多



变, 为便于讨论节点部署问题可将所探测的长方体区域划分成一定规格的网格, 如图 1 所示。1 个规格为 $K \times M \times L$ 的长方体网络, 将会形成 $(K+1) \times (M+1) \times (L+1)$ 个网格点, $\{K, M, L\} \in \mathbb{Z}^+$ 。可以将网络中的每一个节点进行标号, sink 节点所在的位置标记为 1 号。此处假设在文中讨论最优化网络节点部署时, 传感器节点只能部署在网格点, 这是对现实连续问题的简化离散化处理, 也是国内外学者讨论节点部署时一种常见的处理方法^[12-14]。网格点划分越细, 获得最优化部署的概率越高, 所需要的计算代价也越大。

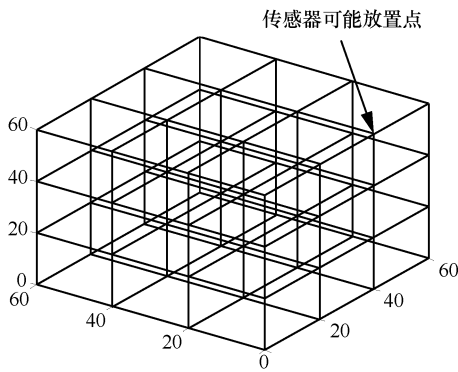


图 1 UWSN 环境离散化网格示意图

从许多学者的研究文献中可以发现^[15-20], 覆盖率与连通率是衡量 UWSN 节点部署性能的两个重要评价指标。因此, 覆盖率与连通率也是本文所提节点部署算法的基础指标。覆盖率可以评价 UWSN 对于指定区域信息采集的完整程度, 连通率可以评价 UWSN 对于指定区域信息传输的有效程度。UWSN 中的节点都具备一定的覆盖半径 R_{cov} , 如图 2 所示。该传感器可以监测虚线圆圈以内的信息, 在真实环境中, 该传感器可以监测以自身为球心, 以 R_{cov} 半径的圆球内部数据信息。为了能够将采集的信息传输给 sink 节点, UWSN 中的节点还需要和其他节点进行通信, 每个节点都具备一定的通信半径 R_{com} 。为便于分析, 假设 UWSN 中的所有节点具有相同的覆盖半径与通信半径, 且 $R_{com} > R_{cov}$ 。

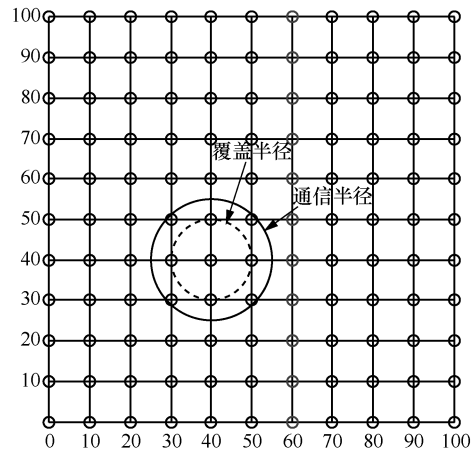


图 2 节点通信半径与覆盖半径说明示意图

为了便于描述 UWSN 节点间的覆盖状况与连通状况, 引入 2 个 0-1 矩阵, 覆盖矩阵 $F = (f_{ij})_{N \times P}$ 与连通矩阵 $T = (t_{ij})_{N \times N}$, 矩阵元素含义如下所示:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{在位置 } i \text{ 放置传感器} \\ & \text{可以采集位置 } j \text{ 处的信息} \\ 0, & \text{在位置 } i \text{ 放置传感器} \\ & \text{不能采集位置 } j \text{ 处的信息} \end{cases} \quad (1)$$

$$t_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{在位置 } i \text{ 放置传感器可以与} \\ & \text{放置于位置 } j \text{ 处的传感器通信} \\ 0, & \text{在位置 } i \text{ 放置传感器不能与} \\ & \text{放置于位置 } j \text{ 处的传感器通信} \end{cases} \quad (2)$$

其中, 连通矩阵维度 N 为所需探测网络的网格点总数, 即 $N = (K+1) \times (M+1) \times (L+1)$, 覆盖矩阵维度 P 为精细划分后的网络格点数量, $P = (K'+1) \times (M'+1) \times (L'+1)$, $P > N$ 。为降低误差且更加精确地描述 UWSN 所在环境的被覆盖状况, 可以将 $K \times M \times L$ 的长方体划分得更为细致, 划分成 $K' \times M' \times L'$ 。本文探讨如何在 $(K+1) \times (M+1) \times (L+1)$ 个网格点中部署节点, 其优化搜索工作量为 $2^{(K+1) \times (M+1) \times (L+1)}$ 。因此, 将网络划分得更为细致来约束网络的覆盖率不会大量增加优化搜索的复杂度。

2 个位置 i 与位置 j 的传感器节点三维坐标分别表示为 (xc_i, yc_i, zc_i) 与 (xc_j, yc_j, zc_j) , $i, j = 1, 2, \dots, N$ 。覆盖矩阵计算方式如式 (3) 所示:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, \sqrt{(xc_i - xc_j)^2 + (yc_i - yc_j)^2 + (zc_i - zc_j)^2} \leq R_{cov} \\ 0, \sqrt{(xc_i - xc_j)^2 + (yc_i - yc_j)^2 + (zc_i - zc_j)^2} > R_{cov} \end{cases} \quad (3)$$

位置 i 的传感器节点与位置 j 的探测点三维坐标分别表示为 (xc_i, yc_i, zc_i) 与 (xs_j, ys_j, zs_j) , $i, j = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, P$ 。连通矩阵计算方式如式 (4) 所示:

$$t_{ij} = \begin{cases} 1, \sqrt{(xc_i - xs_j)^2 + (yc_i - ys_j)^2 + (zc_i - zs_j)^2} \leq R_{com} \\ 0, \sqrt{(xc_i - xs_j)^2 + (yc_i - ys_j)^2 + (zc_i - zs_j)^2} > R_{com} \end{cases} \quad (4)$$

区别于传统 WSN, UWSN 中的节点采用声纳方式相互通信。UWSN 环境中, 节点的能耗包括 3 部分: 发送数据能耗、接收数据能耗、数据融合能耗, 可以参考以声波为媒介的 UWSN 数据通信能耗模型^[21-25]。节点发送数据能耗 E_{send} 、节点接收数据能耗 E_{rec} 、数据融合的能耗 E_{intg} 计算方式如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} E_{send} = lP_s d^\lambda \alpha^d \\ E_{rec} = lP_r \\ E_{intg} = lE_{date} \end{cases} \quad (5)$$

其中, l 表示数据分组的长度, P_s 表示节点可以接收到单位数据所需的最小功率, d 表示发送节点和目的节点之间的距离, P_r 是常数, E_{date} 表示数据融合能耗, λ 为能量扩散因子。由于水中信号呈现球形扩散, 通常取 $\lambda = 2$ ^[22]。 α 表示吸收参数, 由载波频率 f 决定, 它们之间关系如式 (6) 所示:

$$10 \log \alpha = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (6)$$

基于对 UWSN 中节点模型的假设和讨论, 可以分析衡量节点部署策略的各项指标。

3 UWSN 节点优化部署模型

除监测区域覆盖效率与网络连通状况外, UWSN 节点部署问题还需要考虑多方面的因素, 如网络节点冗余度、网络生存时间等。为此, 本文提出了一种多目标优化的节点部署方案。

目标一: 部署节点数量的最小化。

UWSN 节点需要配置水声调制解调器、大容量电池、节点固定装置, 使得其成本要远高于普通 WSN 节点成本^[2]。因此, 在考虑网络节点部署时, 首先需要考虑节点数量的最小化。引入 0-1 决策变量 x_i 用于表述是否在位置 i 部署节点, $i = 1, 2, \dots, N$ 。

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{在位置 } i \text{ 放置传感器} \\ 0, \text{在位置 } i \text{ 不放置传感器} \end{cases} \quad (7)$$

在指定的某种节点部署方案 $\mathbf{X} = (x_i)_{1 \times N}$ 下, 网络节点总数指标 $ZB_1(\mathbf{X})$ 可以计算如下:

$$\min ZB_1(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

易见, $0 < ZB_1(\mathbf{X}) \leq N$ 。 $ZB_1(\mathbf{X}) = N$ 意味着区域中的每个格点都部署一个传感器节点。

目标二: 网络覆盖效率的最大值。

在水下部署节点的目的在于对指定区域进行覆盖性探索。由于 UWSN 是一个复杂多变的三维连续区域, 为便于计算网络覆盖效率, 可以将 $K \times M \times L$ 的长方体网络区域划分成 $K' \times M' \times L'$ 的网格。通过覆盖矩阵 $\mathbf{F} = (f_{ij})_{N \times P}$, 可以得到网络中的任何一个格点被覆盖的情况 $\mathbf{FF} = (\mathbf{ff}_{ij})_{1 \times N}$ 。如前所介绍的 x_i 含义可知: 如果 $x_k f_{ki} = 1$ 说明在格点 k 放置传感器可以采集到位置 i 的信息。因此, 覆盖矩阵元素的计算方法如下:

$$\mathbf{ff}_{ij} = \begin{cases} 1, \text{位置 } i \text{ 可以被覆盖, } \sum_{k=1}^N x_k f_{ki} \geq 1 \\ 0, \text{位置 } i \text{ 不能被覆盖, } \sum_{k=1}^N x_k f_{ki} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将 UWSN 节点的覆盖效率定义为指定区域被覆盖格点数与网络格点总数之比^[15-16]。在指定的



某种节点部署方案 $X = (x_i)_{1 \times N}$ 下,网络覆盖效率指标 $ZB_2(X)$ 可以表达如下:

$$\max ZB_2(X) = \frac{\sum_{i=1}^P f_i}{P} \quad (10)$$

易见, $0 < ZB_2(X) \leq 1$ 。 $ZB_2(X) = 1$ 意味着区域中的每个格点都可以被覆盖,可以近似地认为网络区域实现全覆盖。

目标三:网络通信连通性最大。

当传感器节点采集区域信息后,将以节点间多跳传输的形式传递到水面的 sink 节点,如图 3 所示。通过连通矩阵 $T = (t_{ij})_{N \times N}$ 可以得到在指定的某种节点部署方案 $X = (x_i)_{1 \times N}$ 下,节点之间的一跳相互连通状况。其中,标号为 1 的节点为 sink 节点。如前所介绍的 x_i 的含义可知: $(x_i t_{ij}) \sum_i x_i \geq 1$ 说明位于格点 i 的传感器可以通过 $\sum_i x_i$ 跳传输信息到位于格点 j 的传感器。进而可以得到网络中节点与 sink 节点的连通情况 $TT = (tt_i)_{1 \times N}$ 其元素的含义与计算方式如下所示:

$$tt_i = \begin{cases} 1, \text{位置} i \text{的传感器节点可以与sink节点通信,} \\ S = (s_{ij})_{N \times N} = (x_i t_{ij}) \sum_i x_i, s_{i1} \geq 1 \\ 0, \text{位置} i \text{的传感器节点不能与sink节点通信,} \\ S = (s_{ij})_{N \times N} = (x_i t_{ij}) \sum_i x_i, s_{i1} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中,网络中共有 $\sum_i x_i$ 个格点布置传感器节点。

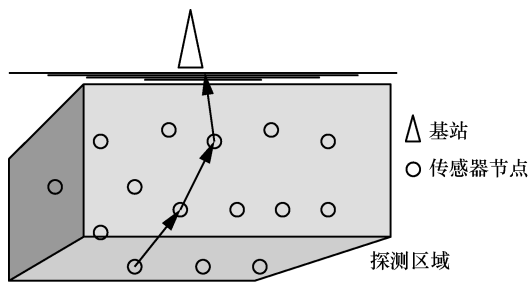


图3 UWSN 信息传输示意图

连通矩阵 T 描述了任意两节点之间通过一跳连通的状态,而 $T \sum_i x_i$ 描述了网络中任意两节点之间通过 $\sum_i x_i$ 连通的状态。

将网络连通性能定义为网络中节点能够与 sink 节点通信总数与网络节点总数之比^[15]。在指定的某种节点部署方案 $X = (x_i)_{1 \times N}$ 下,网络连通效率指标 $ZB_3(X)$ 表达如下:

$$\max ZB_3(X) = \frac{\sum_{i=1}^P tt_i x_i}{N} \quad (12)$$

易见, $0 < ZB_3(X) \leq 1$ 。 $ZB_3(X) = 1$ 意味着区域中的每个传感器节点都可以将采集获得的信息传递给 sink。此时,可以认为网络区域实现全连通。

目标四:网络的冗余度最小。

在现实的应用环境中,每个网络格点都有可能被多个传感器覆盖,即多个传感器可以采集同一处的信息。这样做的目的在于,避免某个节点由于转发大量数据而负载过重,过早因能量耗尽退出网络而出现覆盖盲区^[18]。本文针对前述划分的 $K' \times M' \times L'$ 的探测区域网络进行分析,通过覆盖矩阵 $F = (f_{ij})_{N \times P}$ 可以得到网络中的任何一个格点是否被传感器节点重复覆盖 $DF = (df_i)_{1 \times N}$ 。如前所介绍的 x_i 和 f_{ki} 含义可知: $\sum_{k=1}^N x_k f_{ki}$ 表示可以采集格点 i 的传感器节点数量。

$$df_i = \sum_{k=1}^N x_k f_{ki} \quad (13)$$

将网络覆盖冗余度定义为网络格点被覆盖传感器节点的平均值,即能在该处采集信息的传感器节点数量平均值。在指定的某种节点部署方案 $X = (x_i)_{1 \times N}$ 下,网络覆盖效率指标 $ZB_4(X)$ 可以表达如式 (14) 所示:

$$\min ZB_4(X) = \frac{\sum_{i=1}^P df_i}{P} \quad (14)$$

易见, $0 < ZB_4(X) \leq \sum_{i=1}^N x_i$ 。 $ZB_4(X)=1$ 意味着区域中的每个格点平均仅被一个传感器节点覆盖。

目标五: 网络生存时间尽可能长。

在现实的应用环境中, UWSN 的每一个节点通信范围内可能存在多个其他节点。一种优秀的节点部署策略不仅要求高覆盖率、高连通率、低成本、低冗余度, 低能耗也非常重要。由于 UWSN 节点部署于水下, 不易更换电池。因此, 设计一种高效节能的部署策略, 延长网络生存时间的部署策略非常有必要。

本文将 UWSN 生存时间定义网络中有 10% 节点由于能量耗尽退出网络的时间^[1,22]。在指定的某节点部署方案 $X = (x_i)_{1 \times N}$ 中, 网络生存效率指标 $ZB_5(X)$ 可以表达如式 (15) 所示:

$$\max ZB_5(X) \quad (15)$$

由于网络生存时间受到网络路由协议等多因素的影响, 有许多学者针对 UWSN 路由协议展开研究^[26-29]。当未确定路由协议时, 无法给出统一的网络生存时间计算表达式, 可以根据水声模型在具体计算时代入获得网络生存时间。

通过如上 5 个目标的分析可知: 一种优秀的 UWSN 节点部署策略需要考虑以上多个指标, 而且指标之间往往相互约束, 存在此消彼长的关系。例如, 降低网络部署冗余度可能会降低网络生存时间与网络连通效率等。

4 算法设计

如上所述, 本文提出了部署 UWSN 节点时需要考虑的 5 项指标, 这是 1 个经典的多目标优化问题。通常, 求解多目标规划的数学模型只能将多个指标转化为单一目标函数进行计算。为了求解此多目标规划的数学模型, 可以采用主次目标法将 5 个指标按重要程度进行分类。

第一层次: 网络节点数量。此项指标关乎网

络构建成本, 被认为是 UWSN 节点部署中最关键的问题。因此, 第一层次将网络节点数量最小化作为优化模型的目标函数。在 UWSN 区域中部署节点的目的在于对指定区域进行信息采集并将采集获得的信息传输到 sink 节点。因此, 在考虑网络部署时, 可以将该指标作为刚性约束条件。通常, 将网络连通效率设定为 100%。网络覆盖效率与网络冗余度可以视所需建立 UWSN 的具体要求, 设定参数 α 和 β 作为优化模型的柔性约束。因此, 可以建立如下单目标规划数学模型:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \min ZB_1(X) \\ ZB_2(X) = \frac{\sum_{i=1}^P ff_i}{P} \geq \alpha \\ ZB_3(X) = \frac{\sum_{i=1}^P tt_i x_i}{N} = 100\% \\ ZB_4(X) = \frac{\sum_{i=1}^P df_i}{P} \geq \beta \end{cases} \quad (16)$$

上述优化模型的第一条约束条件说明传感器节点覆盖区域占总监测区域比例超过 α , 第三条约束条件说明区域中每个点都可以被至少 β 个传感器节点采集信息。

第二层次: 网络生存时间效率。第一层次优化模型求得 UWSN 最优节点数量后, 在此基础上求解网络生存时间的最大化。因此, 可以建立如下单目标规划数学模型:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \min ZB_5(X) \\ ZB_2(X) = \frac{\sum_{i=1}^P ff_i}{P} \geq \alpha \\ ZB_3(X) = \frac{\sum_{i=1}^P tt_i x_i}{N} = 100\% \\ ZB_4(X) = \frac{\sum_{i=1}^P df_i}{P} \geq \beta \\ ZB_1(X) = \text{opt} \end{cases} \quad (17)$$



首先, 计算式 (16), 获得最少网络节点数量 $ZB_1(X)$ 为 opt , 然后, 以此为约束条件计算以网络生存时间最优化为目标函数的式 (17), 最终获得较优的节点部署策略。

通过如上分析可以发现: 求解节点优化部署的多目标规划数学模型被分解为 2 个单目标规划数学模型。由于模型处理过程中, 将 UWSN 离散成 N 个可部署传感器节点的格点, 故搜索节点部署方案的最优解空间共有 2^N 种可能性, 计算复杂度为 $O(2^N)$, 属于 NP 难问题^[10-11]。在已知第一次获得较优节点数量为 opt 基础上, 部署网络节点位置共有 C_N^{opt} 中可能性, 计算复杂度为 $O(\text{opt} \times N)$ 。

当需要监测区域较大且划分网格较细时, 需要设计一种算法可以快速收敛到节点部署方案的较优解。为此, 本文以遗传算法 (genetic algorithm, GA) 为基础设计求解算法。

由于 GA 需要集中控制, 不适用于水下实时运算。因此, 本文所提出的部署方案主要应用于无异动节点的静态网络, 通过飞机或者其他辅助措施将节点部署于决策者事先计算得到的位置。由于数学模型式 (16) ~ 式 (17) 的决策变量都属于 0-1 变量, 采用二进制编码方式更为简便, 如第 i 条染色体编码 $R_i = r_1, r_2, \dots, r_N$ 。数学模型式 (16) 的适应度函数取目标函数的倒数, 如第 i 个体的适应度函数为 $\text{fitness}_1(R_i) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N r_i}$ 。数学模型式 (17) 的适

应度函数取目标函数, 如第 i 个体的适应度函数为 $\text{fitness}_2(R_i) = ZB_5(R_i)$ 。具体算法流程如下所示。

步骤 1 设定网络初始参数, 如网络区域范围、sink 节点位置、网络覆盖区域范围要求 α 、网络冗余度要求 β 、离散化格点边长、初始种群数量、迭代最大代数、GA 交叉概率、GA 变异概

率、节点初始能量、节点发送信息与接收信息能耗等基本参数。

步骤 2 计算并判断种群内个体是否符合覆盖范围约束要求 $ZB_2(R_i) \geq \alpha$ 、冗余度约束要求 $ZB_4(R_i) \geq \beta$ 。如果种群内个体不符合此 2 项约束条件, 随机生成个体并重新判断, 直至使得种群内个体数量等于初始种群数量。

步骤 3 计算种群内各个体的适应度函数 $\text{fitness}_1(R_i)$, 将种群个体按照适应度函数值从大到小排序, 选择前 10% 的种群个体直接复制到下一代的种群。根据交叉准则, 从原始种群中按照适应度大小顺序进行两两交叉, 并将交叉后的结果放至下一代种群。根据变异准则, 从原始种群中按照适应度大小顺序进行变异, 并将变异后的结果放至下一代种群, 直至使得下一代种群数量等于初始种群数量。检查下一代种群数量是否等于初始种群数量。如果不足, 则随机生成个体加入下一代种群。

步骤 4 检查是否达到最大代数或者满足算法结束条件。如果满足结束条件, 则输出网络最少节点数量 opt 。如果不满足结束条件, 则跳转至步骤 2。

步骤 5 初始化, 生成初始种群。

步骤 6 计算并判断种群内个体是否符合覆盖范围约束要求 $ZB_2(R_i) \geq \alpha$ 、冗余度约束要求 $ZB_4(R_i) \geq \beta$ 以及网络节点总量要求 $ZB_1(R_i) = \text{opt}$ 。如果种群内个体不符合此 3 项约束条件, 随机生成个体并重新判断, 直至使得种群内个体数量等于初始种群数量。

步骤 7 计算种群内各个体的适应度函数 $\text{fitness}_2(R_i)$, 将种群个体按照适应度函数值从大到小排序, 选择前 10% 的种群个体直接复制到下一代的种群。根据交叉准则, 从原始种群中按照适应度大小顺序进行两两交叉, 并将交叉后的结果放至下一代种群。根据变异准则, 从原始种群中按照适应度大小顺序进行变异, 并将变异后的

结果放至下一代种群,直至使得下一代种群数量等于初始种群数量。检查下一代种群数量是否等于初始种群数量。如果不足,则随机生成个体加入下一代种群。

步骤 8 检查是否达到最大代数或者满足算法结束条件。如果满足结束条件,则输出网络最优节点部署方案。如果不满足结束条件,则跳转至步骤 6。

5 仿真分析

为评价本文所提出算法的效果,本文采用 MATLAB 软件进行数值仿真。针对一个 $60\text{ m} \times 60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的水下区域,部署传感器节点建设 UWSN。仿真时,以 10 m 为步长将网络离散为 $7 \times 7 \times 7$ 的大型网格,传感器节点仅允许布置在大型网格的格点。为了进一步描述 UWSN 区域被覆盖状况,以 2 m 为步长将网络离散为 $31 \times 31 \times 31$ 的小型网格,以小型网格被覆盖情况评价网络被覆盖状况。假定 UWSN 中每个节点的通信半径是覆盖半径的 1.5 倍,传感器节点至 sink 节点的连通率为 100%。在遗传算法中,设定迭代代数最多为 30,初始种群大小为 80,交叉概率为 80%,变异概率为 50%。首先,计算式 (13) 讨论节点覆盖半径对于算法收敛效率与网络最小节点数量的影响,如图 4~图 6 所示。

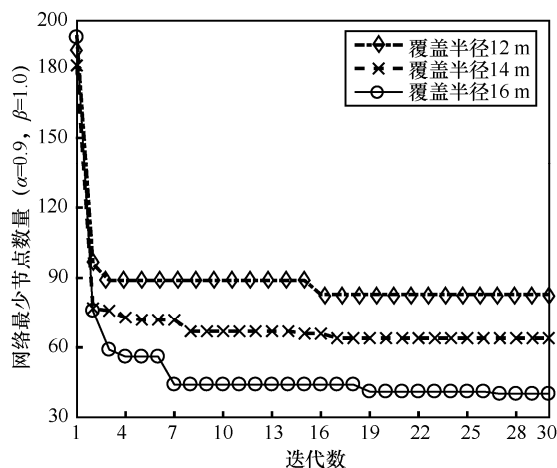


图4 网络节点数量 GA 收敛图

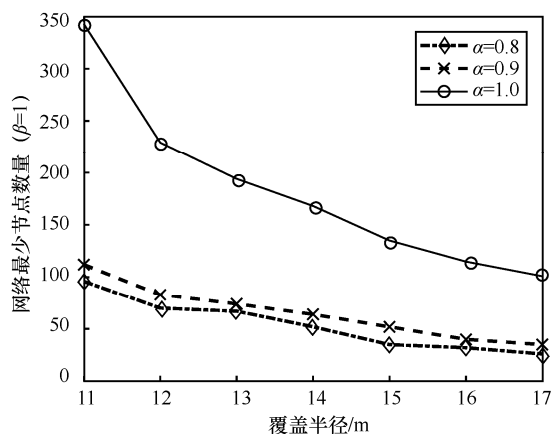


图5 不同覆盖率要求下网络最少节点数量与覆盖半径间的关系

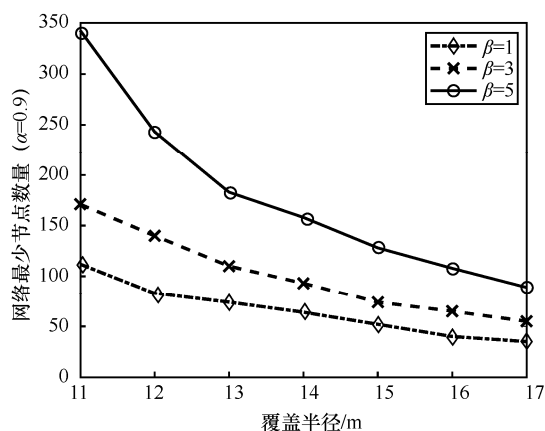


图6 不同冗余度要求下网络最少节点数量与覆盖半径间的关系

从图 4 中可见: 当网络的冗余度 β 和网络的覆盖率 α 确定后, 网络节点的覆盖半径变化时, 本文所提出的算法都将在迭代 10 次左右时快速收敛, 且迭代至 20 次左右后收敛到较为稳定的解, 体现出本文算法的稳定性与收敛性。从图 5 中可见, 当网络冗余度确定后, 不同的覆盖率下, 网络最少节点数量将随着覆盖半径的增大而减少, 且节点变化速率不与覆盖率变化呈比例。当覆盖率要求为 100% 时, 网络最少节点数量远高于覆盖率为 90% 与 80% 时所要求的网络最少节点数量。当网络覆盖率要求为 100% 时, 网络最少节点数量随着覆盖半径的变化速率较快。因此, 当网络覆盖率要求为 100% 时, 设置节点覆盖半径就显得非常重要。从图 6 中可见, 当网络覆盖率要求确定后, 不同网络冗余度要求下, 网络最少节点数量随着覆盖半径的增大而减少。而且, 网络冗余度



要求越高时,网络最少节点数量的变化速率越大。

当确定 UWSN 最优节点数量后,本文将根据网络生存时间计算式(14)部署网络节点的部署位置。设:节点的初始能量为 20 J,工作频率为 25 kHz,传输功率 $P_s=3$ mW,接收功率 $P_r=2$ mW,数据融合能量 $E_{\text{date}}=5$ nJ/bit,发送长度为 $l=10$ bit 数据。

参考文献[30]提出了一种 UWSN 三维节点部署算法,基于连通覆盖率和网络生存时间两项指标提出 UWSN 节点部署方案。由于参考文献[30]并未提出节点数量的计算方法,故先采用本文的方法进行节点数量计算。根据计算得到的网络最少节点数量分别计算两种算法的 UWSN 节点部署方案,采用最短路径的路由方式,最后对比两种部署方案下的指标效果。定义 UWSN 所有节点中能量最低的节点为瓶颈节点。两种算法中网络中生存节点数量、瓶颈节点能量变化规律、网络覆盖率变化规律的仿真结果如图 7~图 10 所示。

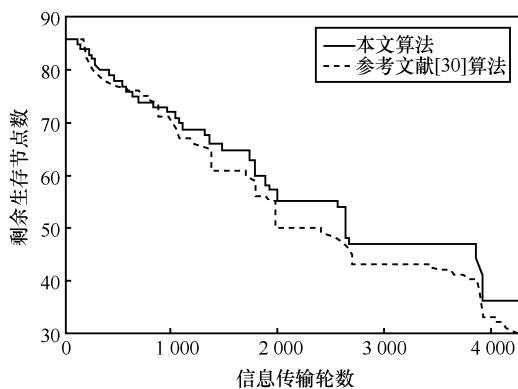


图 7 网络剩余节点数量随时间变化曲线

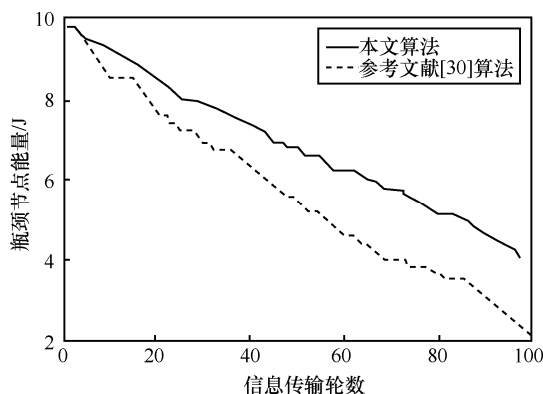


图 8 网络瓶颈节点随时间变化曲线

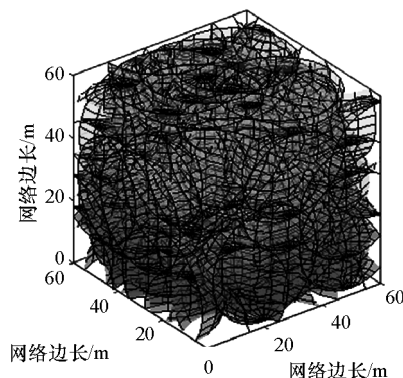


图 9 网络节点覆盖示意图

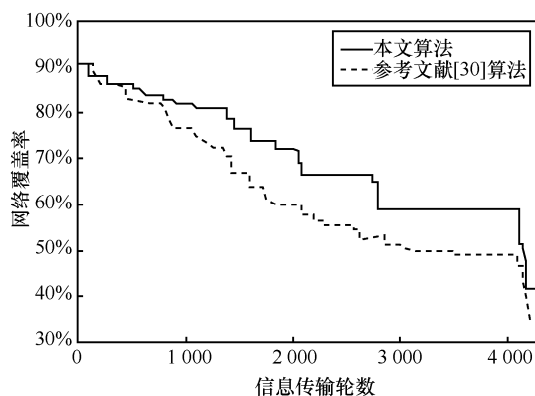


图 10 网络覆盖率随时间变化曲线

定义当节点能量降低至 0.01 J 时,该节点称为失效节点不再参与信息传输业务。图 7~图 8 显示当网络的冗余度 $\beta=1$ 和网络的覆盖率 $\alpha=0.9$ 时,对比参考文献[30]提出的节点部署方案在指标方面的效果,本文算法提出的节点部署方案能够有效延迟节点失效的速度以及延缓瓶颈节点能量下降的速率,从而提高 UWSN 的生存时间。图 10 显示,本文提出的节点部署方案可以降低网络覆盖率降低的速率,在一定程度上保障网络正常的信息传输业务。

6 结束语

本文介绍了一种基于双遗传算法的多维网络节点优化部署策略。在进行 UWSN 节点部署时,综合考虑网络成本、网络连通性、网络覆盖性、网络冗余性和网络能耗等多方面的因素,采用逐步优化的方式对经典遗传算法进行修正,提出双

重遗传算法进行求解节点部署的优化模型。仿真结果显示,本文所提出的算法具有稳定性高、适用性强且延长网络生存时间等特点。

参考文献:

- [1] 蒋鹏, 冯洋, 吴锋, 等. 果蝇启发的水下传感网部署算法[J]. 电子学报, 2017, 45(6): 1403-1407.
JIANG P, FEN Y, WU F, et al. Fruit fly Inspired underwater sensor network deployment algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(6): 1403-1407.
- [2] NAZRUL A S M, ZYGMUNT, HAAS J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment[J]. Ad Hoc Networks, 2015(34): 157-169.
- [3] KULHANDJIAN T M H, KUO L C, DEMIRORS E. Advances in underwater acoustic networking[M]//Mobile Ad Hoc networking: cutting edge directions(2nd Edition). Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2013: 804-852.
- [4] GUAN Z, MELODIA T, YUAN D. Stochastic channel access for underwater acoustic networks with spatial and temporal interference uncertainty[C]//ACM International Conference on Underwater Networks and Systems, Nov 5-6, 2012, Los Angeles, USA. New York: ACM Press, 2012: 1-8.
- [5] ZHEN C, FENG Y, NIE D Q, et al. Transmission power allocation for underwater acoustic multicarrier-CDMA communication networks based on genetic algorithm [C]//Oceans 2016, April 10-13, 2016, Shanghai, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [6] 黄艳, 梁静, 于海斌, 等. 一种高效覆盖的水下传感器网络部署策略[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1035-1039.
HUANG Y, LIANG W, YU H B, et al. A deployment strategy for effective coverage in underwater sensor networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5): 1035-1039.
- [7] 张聚伟, 刘亚闯, 杨挺, 等. 基于模糊数据融合的水下传感器网络节点部署策略[J]. 模式识别与人工智能, 2015, 28(11): 1050-1056.
ZHANG J W, LIU Y C, YANG T, et al. Nodes deployment strategy for underwater sensor network based on fuzzy data fusion[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2015, 28(11): 1050-1056.
- [8] 罗强, 潘仲明. 一种小规模水下无线传感器网络的部署算法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(7): 1043-1047.
LUO Q, PAN Z M. An algorithm of deployment in small-scale underwater wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(7): 1043-1047.
- [9] SUNEET K G, PRATYAY K, PRASANTA K. Genetic algorithm approach for k -coverage and m -connected node placement in target based wireless sensor networks[J]. In Computers & Electrical Engineering, 2016(56): 544-556.
- [10] CAO B, ZHAO J W, LV Z H, et al. Deployment optimization for 3D industrial wireless sensor networks based on particle swarm optimizers with distributed parallelism[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2018(103): 225-238.
- [11] 胡炜, 曾斌. 基于遗传退火算法的水下传感器部署优化方法[J]. 舰船电子工程, 2015(11): 22-25, 97.
HU W, ZENG B. An optimization method of underwater sensors deployment based on genetic and anneal algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2015(11): 22-25, 97.
- [12] MATHER R M, MATTHIEU L B, HICHEMSNOUSS I, et al. Sensor deployment optimization methods to achieve both coverage and connectivity in wireless sensor networks[J]. In Computers & Operations Research, 2015(59): 11-21.
- [13] SANAY A, NAVIMIPOUR N. Deployment strategies in the wireless sensor network: a comprehensive review[J]. Computer Communications, 2016: 1-16.
- [14] 王军, 倪雪莉, 程勇, 等. 基于网格划分和虚拟力的水下传感器网络部署策略[J]. 电子技术应用, 2016, 42(2): 102-105, 109.
WANG J, NI X L, CHENG Y, et al. Underwater sensor deployment based on grid division and virtual forces[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(2): 102-105, 109.
- [15] AL-TURJMAN F M, HASSANEIN H S, IBNKAHLA M. Quantifying connectivity in wireless sensor networks with grid-based deployments[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(1): 368-377.
- [16] AHELIL A, BEGHAD R. ESA: an efficient self-deployment algorithm for coverage in wireless sensor networks[J]. Procedia Computer Science, 2016(98): 40-47.
- [17] TAHIRY R, MILAN E, DIMITRIOS Z, et al. Spread and shrink: Point of interest discovery and coverage with mobile wireless sensors[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2017(102): 16-27.
- [18] SIMONE S, KEN G. MobiBar: an autonomous deployment algorithm for barrier coverage with mobile sensors[J]. Ad Hoc Networks, 2017(54): 111-129.
- [19] MOHAMMED A Z, SABAH M, AMNABIL S, et al. Rearrangement of mobile wireless sensor nodes for coverage maximization based on immune node deployment algorithm[J]. Computers & Electrical Engineering, 2015(43): 76-89.
- [20] MOHAMMED A Z, NABIL S, SHIGENOBU S, et al. A centralized immune-Voronoi deployment algorithm for coverage maximization and energy conservation in mobile wireless sensor networks[J]. Information Fusion, 2016(30): 36-51.
- [21] 李鑫滨, 高梦玲, 闫磊, 等. 一种负载均衡且能量高效的水下传感网络分簇协议[J]. 电信科学, 2016, 32(11): 42-49.
LI X B, GAO M L, YAN L, et al. A load balanced and energy efficient underwater clustering protocol for UWSN[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(11): 42-49.
- [22] 蒋鹏, 阮斌锋. 基于分簇的水下传感器网络覆盖保持路由算



- 法[J]. 电子学报, 2013(10): 2067-2073.
- JIANG P, RUAN B F. Cluster-based coverage-preserving routing algorithm for underwater sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2013(10): 2067-2073.
- [23] 彭舰, 洪昌建, 刘唐, 等. 基于分层的水下传感器网络路由策略[J]. 通信学报, 2014, 35(6): 25-31.
- PENG J, HONG C J, LIU T, et al. Strategy of routing based on layered for underwater wireless sensor networks[J]. Journal of Communications, 2014, 35(6): 25-31.
- [24] 王静, 陈建峰, 张立杰, 等. 水下无线传感器网络[J]. 声学技术, 2009, 28(1): 89-95.
- WANG J, CHEN J F, ZHANG L J, et al. Underwater sensor networks[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(1): 89-95.
- [25] 张颖, 孙宏梁, 季常刚, 等. 基于深度和能量的水下三维传感器网络分簇路由算法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(11): 1655-1659.
- ZHANG Y, SUN H L, JI C G, et al. A clustered routing algorithm based on depth and energy for three-dimensional underwater sensor networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(11): 1655-1659.
- [26] NADEEM J, SHERAZ H, ASHFAQ A, et al. Region based cooperative routing in underwater wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017(92): 31-41.
- [27] NUSRAT Z Z, MOHAMMED A, MUHAMMAD R, et al. Energy-efficiency and reliability in MAC and routing protocols for underwater wireless sensor network: a survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016(17): 72-85.
- [28] MUKHTIAR A, MAZLEENA S, CHANNA M I. Routing protocols based on node mobility for underwater wireless sensor network (UWSN): a survey[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017(78): 242-252.
- [29] DEJEY N K. Void handling using Geo-opportunistic routing in underwater wireless sensor networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2017(64): 365-379.
- [30] 赵敏华, 李玲燕, 赵坤, 等. 一种水下无线传感器网络节点的三维部署算法[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(12): 138-141, 145.
- ZHAO M H, LI L Y, ZHAO K, et al. A three-dimensional deployment algorithm for underwater wireless sensor networks node[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(12): 138-141, 145.

[作者简介]



周凯 (1985-), 男, 博士, 浙江工业大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络容量建模、路由协议等。