



引文格式:吴辉,刘哲,胡进.考虑障碍物的RSSI室内定位传感器多目标优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(3):471-479.DOI:10.13203/j.whugis20200421

Citation: WU Hui, LIU Zhe, HU Jin. Multi-objective Optimization of RSSI Sensor Deployment Considering Obstacles for Indoor Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(3):471-479. DOI:10.13203/j.whugis20200421

# 考虑障碍物的RSSI室内定位传感器 多目标优化

吴辉<sup>1</sup> 刘哲<sup>2</sup> 胡进<sup>3</sup>

1 浙江传媒学院智能媒体技术研究院,浙江 杭州,310018

2 浙江传媒学院媒体工程学院,浙江 杭州,310018

3 杭州电子科技大学自动化学院,浙江 杭州,310018

**摘要:**针对目前无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)部署时,障碍物影响WSN优化部署的问题,以接收信号强度指示传感器室内定位应用为例,提出了一种考虑障碍物的无线传感器多目标优化部署方法。首先,基于室内定位算法原理和传感器覆盖模型,给出了在室内定位场景下WSN有效覆盖率的概念和信标节点部署模型。然后,在分析障碍物感知模型和信标节点部署策略的基础上,提出了考虑障碍物的传感器部署多目标优化模型。最后,以第三代非支配排序遗传算法为基础设计优化模型求解算法,数值仿真结果与正三角形、正方形、正六边形均匀部署,以及没有考虑障碍物的优化部署(进化1 000代,传感器个数为36)结果进行对比,结果表明所提方法的WSN有效覆盖率分别提高了52.7%、112.1%、16.6%和9.62%。

**关键词:**传感器部署;无线传感器网络;多目标优化;障碍物;有效覆盖率;室内定位

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2020-08-11

DOI:10.13203/j.whugis20200421

文章编号:1671-8860(2023)03-0471-09

## Multi-objective Optimization of RSSI Sensor Deployment Considering Obstacles for Indoor Positioning

WU Hui<sup>1</sup> LIU Zhe<sup>2</sup> HU Jin<sup>3</sup>

1 Institute of intelligent media technology, Zhejiang University of Media and Communications, Hangzhou 310018, China

2 College of Media Engineering, Zhejiang University of Media and Communications, Hangzhou 310018, China

3 School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

**Abstract: Objectives:** At present, in the research on the optimization of wireless sensor network (WSN) deployment under the application of indoor positioning, most of studies are generally carried out under the ideal conditions without obstacles, and the impact of obstacles on WSN is rarely considered. To consider the influence of obstacles for WSN deployment, we propose a multi-objective optimization method of WSN topology considering obstacles under the application of indoor positioning using received signal strength indication sensors. **Methods:** Firstly, a concept of effective coverage and beacon node deployment model is proposed based on the indoor positioning algorithm and sensor coverage model. Secondly, after the analysis of obstacle perception model and beacon node deployment strategy, a multi-objective optimization model of sensor deployment considering obstacles is proposed. Finally, the non-dominated sorting genetic algorithm III is introduced to solve this optimization model. Three optimization objectives of all individuals, effective coverage, number of sensors, and convex hull area, as well as constraints considering obstacles and WSN topology rationality are calculated. **Results:** The optimization method without considering obsta-

基金项目:浙江省基础公益研究计划(LGG21A010001);浙江省重点研发计划(2021C03138);浙江省教育厅一般科研项目(Y201942160)。

第一作者:吴辉,博士,副研究员,主要从事地理空间布局优化研究。20200020@cuz.edu.cn

通讯作者:刘哲,博士,讲师。zliu214@foxmail.com

cles is used as the comparison method, and three uniform sensor deployments are compared with the numerical simulation results of the proposed method. Regular triangle, square and hexagon are the mosaic shapes for the uniform sensor deployment. In the 1 000 generation, the effective coverage rate of the proposed method increased by 9.62% compared with the comparison method and increased by 52.7%, 112.1% and 16.6% respectively compared with the uniform deployment of regular triangle, square and regular hexagon. **Conclusions:** The method proposed in this paper not only has advantages in improving the effective coverage rate and accelerating convergence of the optimization algorithm, but also increases the effective coverage rate compared with the traditional uniform deployment of sensors. Therefore, the proposed method will be helpful to improve the accuracy of indoor positioning.

**Key words:** sensor deployment; wireless sensor network; multi-objective optimization; obstacles; effective coverage; indoor positioning

无线传感器网络(wireless sensor networks, WSN)是由具有一定传感、计算和通信能力的传感器节点所组成的网络,广泛应用于国防军事、环境检测、医疗卫生、反恐抗灾、智能家居、城市交通以及空间探索等领域<sup>[1-3]</sup>。WSN是物联网的重要组成部分,对人类生活方式有重大影响,受到了产业界和学术界的高度重视。WSN对监控区域的覆盖和对目标的定位是传感器网络研究中的两个热点问题,是开展数据融合、情报分析等其他研究的前提<sup>[4]</sup>。对ROI的覆盖问题归根结底是传感器的拓扑布局问题,直接影响目标定位与跟踪性能。感知节点的合理分布对于提高网络的感知能力和收集信息能力都具有重要作用。因此,WSN拓扑布局是传感器网络领域的基础性问题之一。

由于WSN的覆盖范围、计算能力、供电电源都是有限的,如何高效地利用有限的资源最大化地提升网络的覆盖范围和感知性能,是一个非确定性多项式(non-deterministic polynomial, NP)难问题<sup>[5-6]</sup>,即多项式复杂程度的非确定性问题。在实际应用中,很多应用场景不能预先确定,如战场等危险恶劣的环境,因此,通常使用火炮、飞机撒播等方式随机部署WSN节点,形成的WSN覆盖称为随机覆盖。如果WSN监测环境已知或相对固定,就可以根据预先部署的节点位置信息确定网络拓扑结构状态或者增加关键区域的节点密度,这种情况被称为确定性覆盖。确定性点(区域)覆盖、确定性网络路径(目标)覆盖和基于网格的目标覆盖为3种典型的确定性覆盖类型。目前,针对两种覆盖类型,WSN的部署方法主要有随机部署方法、基于网格节点(均匀)的部署方法,以及基于优化算法的节点部署方法。

基于优化算法的节点部署方法分为单目标优化方法和多目标优化方法。单目标优化一般

以节点覆盖率为目标函数,采用遗传算法、鱼群算法等优化方法优化WSN部署方案<sup>[7-11]</sup>,这些优化方案虽然提高了网络的覆盖率,但是对网络的其他性能,如能耗、成本、连通性、障碍物影响等并没有直接考虑在内。随着研究的深入,研究者将多目标优化方法应用于WSN部署优化,并构建了多种不同的部署策略,用来获得更好的无线传感器网络拓扑结构,如高覆盖率、高连通性、低能耗、低成本等<sup>[12]</sup>。文献[13]用第二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)构建了WSN中保持少量活动节点(能耗最低)和网络覆盖最大化的WSN部署方法,优化结果体现了网络覆盖和能耗的最佳平衡。文献[14]将目标环境建模成网格,通过使用基于蚁群算法的贪婪部署算法,在保证连通性和低成本的情况下优化无线传感器网络覆盖率。文献[15]提出了一种集中免疫-Voronoi部署算法,以节点覆盖率、节点移动能耗为优化目标,采用多目标集中免疫算法,利用Voronoi图的特性进行目标优化,提高了节点覆盖率、减少了节点移动能耗。目前的室内定位WSN部署优化研究中,一般都在无障碍物的理想条件下进行优化部署,障碍物对WSN的影响很少考虑,文献[16]提出了一种用于考虑障碍物的无盲区覆盖模型的新型覆盖优化算法,但该算法是以覆盖率最大为目标的单目标优化,而在实际应用中,障碍物的存在会降低定位精度<sup>[17]</sup>,考虑障碍物进行传感器多目标优化具有重要意义。随着基于位置的服务(location based services, LBS)的迅速发展,人们对包括商场、矿山、地下停车场等在内的精确室内定位的需求日益增加。

根据无线射频信号在空间传播的衰减规律,可用接收信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)来进行定位<sup>[18]</sup>。因此,本文以

RSSI 室内定位传感器为研究对象,以 WSN 有效覆盖范围最大、部署成本最小,同时考虑障碍物情况,构建 WSN 拓扑多目标优化模型,采用第三代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm III, NSGA-III)进行求解,与没有考虑障碍物的情况和多种均匀部署方案相比,在相同的信标节点数目下,本文方法能够得到更大的网络覆盖范围。

## 1 WSN 覆盖模型

### 1.1 室内定位计算模型

基于无线信号的室内定位常见算法有三边测量法、三角定位法、到达时间差法、DV-Hop 算法、质心算法等,这些方法一般都需要多个信标节点参与未知点的坐标计算。本文采用的室内定位算法为文献[19]提出的定位算法,该算法原理是将接收到的信标节点的 RSSI 从大到小排序,取信号强度最强的 4 个信标节点进行定位,然后对这 4 个信标节点进行组合,即每次取其中的 3 个信标节点进行定位。定位方法采用传统的加权质心定位算法,计算公式为:

$$\begin{cases} x = \frac{\frac{x_1}{d_A + d_B + d_C} + \frac{x_2}{d_A + d_B + d_E} + \frac{x_3}{d_A + d_C + d_E} + \frac{x_4}{d_B + d_C + d_E}}{\frac{1}{d_A + d_B + d_C} + \frac{1}{d_A + d_B + d_E} + \frac{1}{d_A + d_C + d_E} + \frac{1}{d_B + d_C + d_E}} \\ y = \frac{\frac{y_1}{d_A + d_B + d_C} + \frac{y_2}{d_A + d_B + d_E} + \frac{y_3}{d_A + d_C + d_E} + \frac{y_4}{d_B + d_C + d_E}}{\frac{1}{d_A + d_B + d_C} + \frac{1}{d_A + d_B + d_E} + \frac{1}{d_A + d_C + d_E} + \frac{1}{d_B + d_C + d_E}} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $(x, y)$  为待测点坐标;  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$  分别为信标节点 A、B、C、D 的坐标;  $d_A$ 、 $d_B$ 、 $d_C$ 、 $d_E$  分别为待测点  $(x, y)$  到信标节点 A、B、C、D 的距离。

由上述计算原理可知,如果待测点接收到由信标节点发送的 RSSI 值越准确,则两者之间的测量距离越精确,定位精度越高。可见,保证待测点接收到的信标节点 RSSI 值的精度是减少室内定位误差的关键。确保待测点接收到最强的 RSSI 信号,一方面要避开障碍物,另一方面要使得待测点尽可能位于 4 个信标节点围成的多边形内<sup>[21]</sup>。由此可知,合理的 WSN 拓扑结构以及待测点多个信号覆盖范围最大化是提高室内定位精度的关键因素<sup>[22]</sup>,因此,这在一定程度上增加了室内定位传感器部署的复杂性。

$$\begin{cases} X_0 = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \times X_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \\ Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $(X_0, Y_0)$  为待求点定位坐标;  $N$  值取 3;  $(X_i, Y_i)$  是待定位点最近的 3 个信标节点的坐标;  $W_i$  表示每个待定位节点的权值,该权值是未知节点到固定信标节点距离的倒数。

距离计算可以根据 RSSI 值计算得到,计算公式<sup>[20]</sup>为:

$$I_1 = I_0 + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \epsilon \quad (2)$$

式中,  $d$  是待测点与信标点之间的距离;  $d_0$  是参考距离(一般取 1 m);  $n$  是信号衰减因子;  $I_1$  表示距发送节点  $d$  处的信号强度值;  $I_0$  表示  $d_0$  处的信号强度值;  $\epsilon$  是高斯随机参数。

通过传统加权质心定位算法可以得到 4 组定位结果,将这 4 组定位结果再进行加权质心处理得到待测点定位坐标,计算公式为:

### 1.2 节点覆盖模型

在二维定位空间内,全部传感器节点的覆盖(感知)面积与二维定位空间的总面积之比,称为覆盖率。任意目标节点被  $K$  个传感器节点所覆盖,称为  $K$  度覆盖<sup>[23]</sup>。由于本文采用定位算法需要 4 个信标节点参与定位,当待测点与 4 个参与定位的信标节点距离均小于节点的感知半径  $R_s$  时,即待测点都在 4 个信标节点的有效测距范围内时,在理论上其定位效果最好,如图 1 所示。本文中,部署在定位空间覆盖度为 4 度及以上的覆盖面积与定位空间的总面积之比称为有效覆盖率。有效覆盖率的计算公式为:

$$P_{kc} = \frac{\sum_{k \geq 4} S_k}{S} \quad (4)$$

式中,  $P_{kc}$  为有效覆盖率;  $s_k$  表示  $k$  重覆盖面积;  $S$  表

示二维定位空间面积。

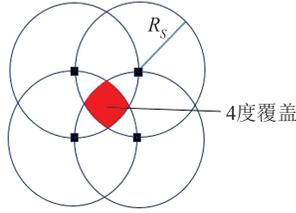


图1 4个信标节点的4度覆盖示意图

Fig.1 4-Degree Coverage Diagram of Four Beacon Nodes

### 1.3 信标节点部署模型

为了方便讨论,将待定位的室内二维空间划分为正方形网格,网格的顶点为潜在的信标节点部署位置,此方法为学术界讨论节点部署时的一种常见的处理方法<sup>[24]</sup>。假设矩形二维平面划分了 $P \times Q$ 个网格,且每个网格边长为1 m,将形成 $(P+1) \times (Q+1)$ 个网格顶点,每个网格顶点部署信标节点的可能性有两种,因此,潜在的信标节点部署方案有 $2^{(P+1) \times (Q+1)}$ 种。如图2中所示,二维平面被划分了 $10 \times 9$ 个网格,共有110个网格顶点,潜在的信标节点部署方案有 $2^{110}$ 种。为了避免信标节点被部署得过于集中,减少来自多个不同方向信号被遮挡的概率,本文规定在信标节点相邻的8个网格顶点上禁止部署信标节点,如图2所示。

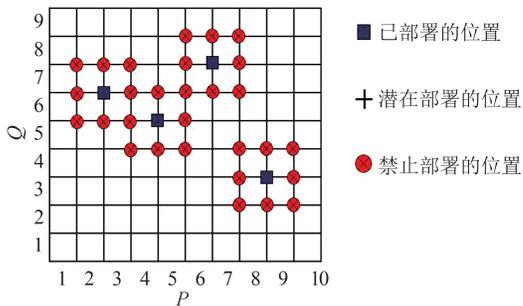


图2 二维平面网格信标节点部署模型

Fig.2 Beacon Node Deployment Restriction in 2D Planar Grid

## 2 考虑障碍物的WSN拓扑多目标优化模型

### 2.1 障碍物感知模型

在真实复杂环境中,障碍物会引起传感器信号多径效应,信号经过多条路径的反射最终到达接收端,这样接收端的RSSI信号误差会增加。因此,按式(2)计算得到的距离值与实际距离值相比,偏差增大,定位精度降低。为解决此问题,

本文借鉴文献[25]提出的有障碍物环境下的传感器感知模型,该模型如图3所示,圆为传感器节点最大感知范围,矩形为实验环境中的障碍物。

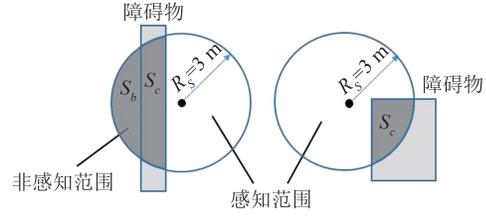


图3 障碍物感知模型示意图

Fig.3 Obstacle Perception Model

障碍物感知模型的数学表达式为:

$$c_p(s_i) = \begin{cases} 1, d(s_i, p) \leq R_s \\ 0, d(s_i, p) > R_s \\ 0, p(x, y) \in S_b \\ 0, p(x, y) \in S_c \end{cases} \quad (5)$$

式中, $c_p(s_i)$ 为待测点 $s_i$ 能被传感器节点 $p$ 感知的概率; $d(s_i, p)$ 为待测点 $s_i$ 到传感器节点 $p$ 的欧氏距离; $S_b$ 为由于障碍物遮挡传感器无法感知的范围; $S_c$ 为障碍物投影到二维平面的面积与传感器感知范围的交集。

### 2.2 考虑障碍物的节点部署策略

当实验场地存在障碍物时,处于障碍物范围内的网格不能部署信标节点,如图4所示。障碍物在现实场景中以矩形多见,其次还有圆柱体(平面投影为圆形)等,考虑到圆形投影面与矩形中的正方形比较接近,为了便于计算,本文将空间内障碍物近似处理为矩形障碍物,可以用数学描述为:

$$x \notin [O_{x_1}, O_{x_2}], \text{ 且 } y \notin [O_{y_1}, O_{y_2}] \quad (6)$$

式中, $(x, y)$ 为信标节点的坐标; $[O_{x_1}, O_{x_2}]$ 为障碍物的横坐标范围; $[O_{y_1}, O_{y_2}]$ 为障碍物的纵坐标范围。

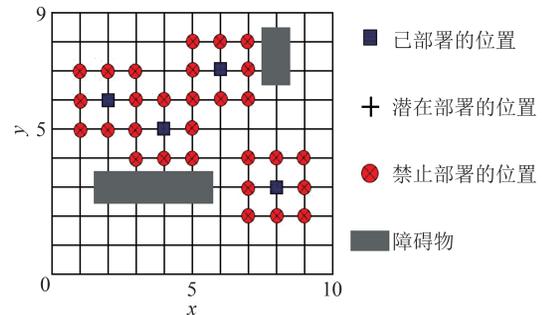


图4 考虑障碍物的节点部署模型

Fig.4 Node Deployment Model Considering Obstacles

### 2.3 考虑障碍物的传感器部署多目标优化模型

在室内定位应用场景下,结合障碍物感知模型和考虑障碍物的节点部署策略,节点覆盖要求 4 度及以上的有效覆盖。因此,设置如下 3 个优化目标:优化目标一,最大化节点 4 度有效覆盖百分比;优化目标二,最小化传感器网络部署成本(传感器个数);优化目标三,最大化由信标节点所组成的凸包面积占整个部署范围面积的百分比。结合式(4),优化模型的数学表达式为:

$$\begin{cases} \text{最大化: } P = \frac{\sum_{k \geq 4} s_k}{S} \times 100\% \\ \text{最小化: } N \\ \text{最大化: } N_s = (S_N / S) \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中, $P$ 表示节点 4 度有效覆盖百分比; $N$ 表示二维平面空间内部署的信标节点数目; $N_s$ 为凸包面积百分比; $S_N$ 表示由  $N$  个信标节点所组成的凸包面积; $S$ 为整个部署范围面积。

约束条件 1:信标节点部署在  $P \times Q$  的二维平面范围内,用数学描述为:

$$0 \leq x \leq P, 0 \leq y \leq Q \quad (8)$$

约束条件 2:在与信标节点相邻的 8 个网格点上禁止部署其他信标节点。可以用数学表示为:

$$\begin{cases} d(i, j) > \sqrt{2} \\ i \neq j, \text{且 } i, j \in [1, 2, \dots, N] \end{cases} \quad (9)$$

式中, $d(i, j)$ 表示信标节点  $i$  到信标节点  $j$  的欧氏距离。

约束条件 3:有障碍物情况下,式(7)计算有效覆盖率时,结合式(5)判断感知概率是否为 1,如果是 1,则将面积累加到有效覆盖面积,否则不做累加。同时,在信标节点部署时,以式(6)为约束条件。

优化目标一与优化目标二是为了提高有效覆盖率的同时,减少或不增加传感器个数(部署成本)。优化目标三与约束条件 1 和 2 是为了保证 WSN 拓扑合理性,避免信标节点部署过于集中造成覆盖空洞。约束条件 3 是考虑了障碍物的情况下传感器的优化部署。

## 3 算法设计及数值仿真

### 3.1 优化模型求解

上述优化模型求解属于典型的 NP 难问题,考虑到本文建立的优化模型决策变量是判断是

否部署传感器,属于 0-1 变量,采用二进制编码较为简便。另外,由式(7)可知,该优化模型为 3 个目标的多目标优化,求解时要选择合适的优化算法。为此,本文以 NSGA-III 算法<sup>[26]</sup>为基础设计优化模型求解算法。NSGA-III 是在 NSGA-II<sup>[27]</sup>基础上改进的,采用了新的选择机制——基于参考点的方法,代替了 NSGA-II 基于拥挤距离的方法,能够更好解决目标数为 3~15 的多目标优化问题<sup>[28]</sup>。

通过室内二维平面网格顶点坐标,将网格转化为 NSGA-III 算法的染色体基因链,如图 5 所示。考虑障碍物的 WSN 拓扑多目标优化模型求解步骤为:

1)初始化。设定网格规模参数为  $P \times Q$ 、决策变量为  $(P+1) \times (Q+1)$ 、障碍物坐标范围、种群规模  $n$ 、交叉率、变异率、最大种群代数  $M$ ,令进化代数  $i=0$ ,随机产生  $n$  个个体的初始解集。

2)计算并判断种群个体是否符合考虑障碍物、WSN 拓扑合理性的约束条件(约束条件 1~3),如果不符合约束条件,则重新随机生成并判断,直至种群内个体满足约束条件,进化代数  $i=i+1$ 。

3)进行选择操作、交叉、变异操作后调用步骤 2),生成新一代种群,新的种群与将该种群的父代种群合并,计算所有个体的 3 个优化目标:有效覆盖率、传感器个数、凸包面积,进行基于参考点的快速非支配排序,排序后取前  $n$  个个体作为新的种群。

4)判断是否达到算法终止条件( $i \geq M$ ),如果达到,则算法终止;否则转到步骤 2,继续循环迭代。

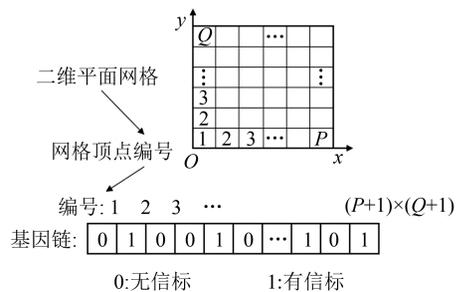


图 5 二维平面网格顶点与染色体基因链的转换

Fig.5 Transformation of Vertex of 2D Planar Grid and Chromosome Gene Chain

### 3.2 实验结果与分析

为评价所提方法的效果,本文选择在  $12 \text{ m} \times 12 \text{ m}$  的空间范围内,有一些障碍物的条件下(见图 6)进行传感器部署优化,采用 Matlab 软件进行

数值仿真,仿真实验环境为戴尔某型号计算机,处理器为Intel酷睿I5 7代处理器,内存为8 GB,软件平台为Matlab 2017。数值仿真结果与没有考虑障碍物的优化方法得到的结果进行对比。优化方法的相关仿真参数设置为:种群大小为200,决策变量为169,交叉率为0.9,变异率为0.1,目标数目为3,进化代数分别为50、100、500、1 000。

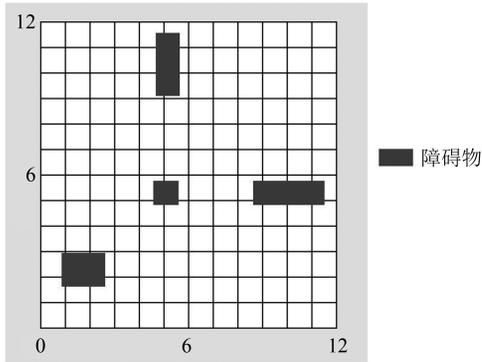


图6 包含障碍物的实验范围

Fig.6 Experimental Range Including Obstacles

仿真实验结果见图7和图8。由图7可知,无论是考虑障碍物优化方法还是没有考虑障碍物的优化方法,随着进化代数的增加,在相同的传感器个数情况下,优化部署方案的有效覆盖率逐步提升。如图8所示,在相同的进化代数下,考虑障碍物的优化方法比没有考虑障碍物的优化方法的有效覆盖率略高,例如,在进化代数为1 000代,传感器个数为36时,考虑障碍物的优化方法的有效覆盖率为89.01%,没有考虑障碍物的优化方法的有效覆盖率为81.2%。可见,在室内定位WSN拓扑优化时,考虑障碍物进行优化能够提高传感器的有效覆盖率。原因之一可能是没有考虑障碍物的优化方法不具有识别和避开障碍物的能力,导致了一些无效覆盖,从而使其有效覆盖率较低,此外,障碍物占有一定的空间,从而也影响传感器有效覆盖率的计算结果。因此,应该要选择考虑障碍物的优化方法进行WSN拓扑优化。

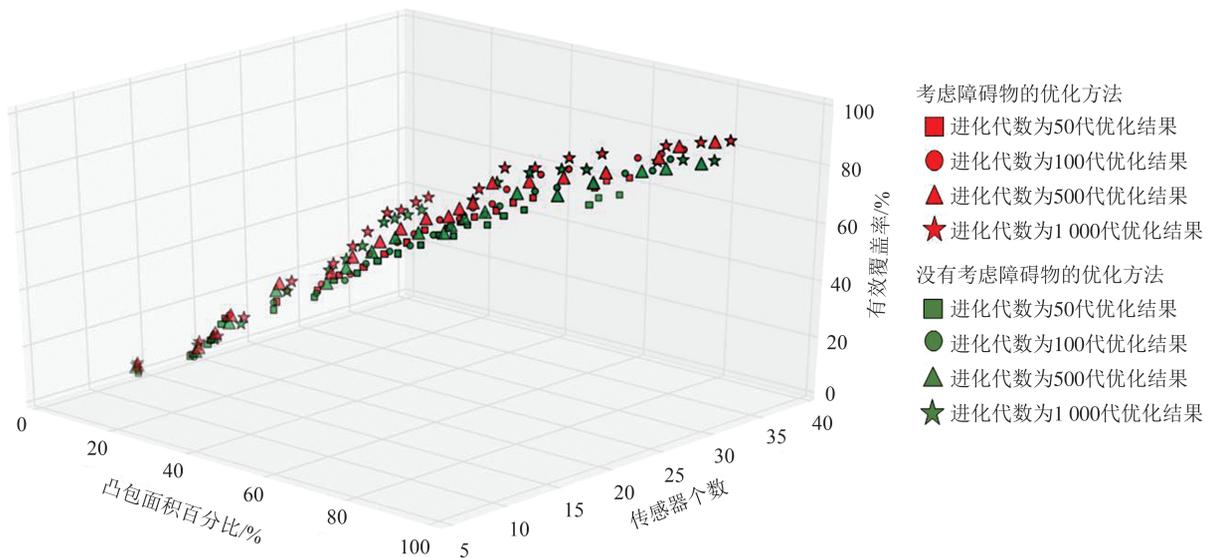


图7 不同优化方法在不同进化代数下的优化结果

Fig.7 Optimization Results of Different Optimization Methods Under Different Generations

本文选择的对比实验方案为均匀网格部署方案,均匀网格的基本单元是由信标节点组成的多边形。因此,均匀网格部署可以描述为使用一种多边形连续不重叠地覆盖监测区域,在几何学中被称作镶嵌。镶嵌需要满足的必要条件为:各个多边形在镶嵌的同一点处的各个内角之和为 $360^\circ$ 。为了方便对比,本文仅选取正三角形、正方形、正六边形为镶嵌形状,一旦确定镶嵌形状,实验范围内的信标节点数即确定。若由正方形镶嵌,该区域需要选用边长为3 m的正方形,使用的

信标节点数目为25;由正三角形镶嵌,该区域需选用边长为2.4 m的正三角形,使用的信标节点数目为27;由正六边形镶嵌,该区域则需选用边长为2 m的正六边形,所使用的信标节点数目为28(见图9)。将优化数值仿真结果与正三角形、正方形、正六边形均匀部署方案的效果进行对比,结果见表1。结果表明,在相同的信标节点数目下,优化方法在1 000代进化后的方案相比均匀部署的正三角形、正方形、正六边形方案,其WSN覆盖率分别提高了52.7%、112.1%、16.6%。

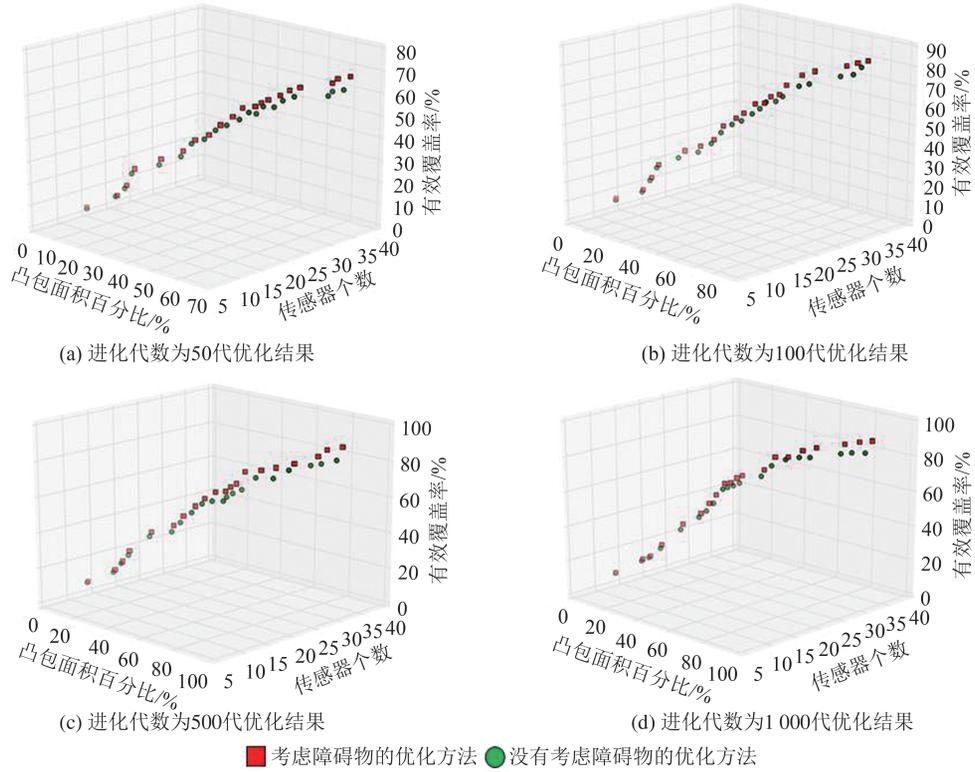


图 8 在相同进化代数下两种优化方法效果对比

Fig.8 Comparison of Two Optimization Methods Under Same Generation

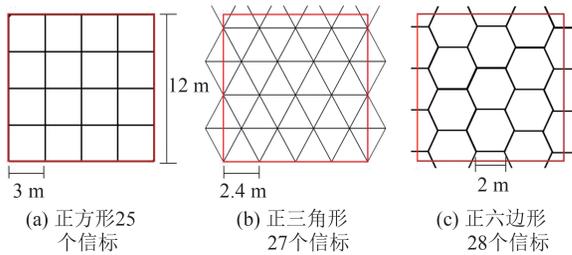


图 9 不同均匀部署方案示意图

Fig.9 Deployments of Different Uniform Layout Methods

从表 1 中可以看出,不同的均匀部署方案,由于空间拓扑结构的不同,其有效覆盖率随着信标数目增加而增加,采用优化方法的部署方案均比

上述 3 种均匀部署方案的有效覆盖率高。但是,在计算时间方面,均匀部署方法有一定优势。

障碍物位置以及考虑障碍物的信标节点优化部署方案如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在相同的信标节点数(28 个)下,均匀部署方案在障碍物情景下存在不合理的部署情况,如遇到障碍物时,如何躲避和调整,使得有效覆盖率最大。而本文提出的考虑障碍物的优化方法,具有避让障碍物的功能,信标节点拓扑结构更加合理,有效覆盖率更高。因此,本文方法在实际工程应用中更加实用和高效。

表 1 本文提出的方法与不同均匀部署方法对比

Tab.1 Comparison Between the Proposed Method and Different Uniform Layout Methods

实验方案	进化代数	有效覆盖率/%			运行时间/min
		信标个数			
		27	25	28	
优化部署	50代	59.8	57.6	61.9	2.86
	100代	65.5	61.6	69.8	5.80
	500代	72.8	65.1	74.3	27.66
	1 000代	78.8	66.4	79.4	57.44
均匀部署		51.6(正三角形)	31.3(正方形)	68.1(正六边形)	0.015
有效覆盖率提高/%		52.7	112.1	16.6	

注:有效覆盖率提高是指优化部署方案的 1 000 代方案与均匀部署各方案相比,有效覆盖率提高程度。

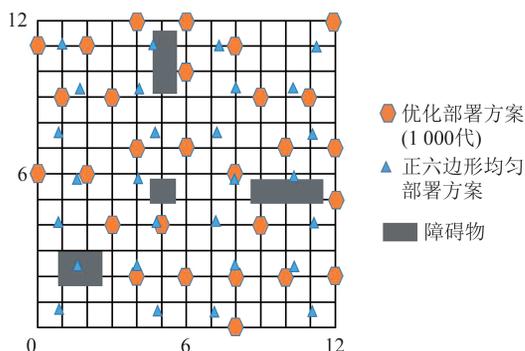


图10 考虑障碍物的信标节点优化部署方案与正六边形均匀部署方案示意图

Fig.10 Optimized Deployment Scheme Considering Obstacles and Regular Hexagon Uniform Deployment Scheme

障碍物的不同摆放可能会对传感器的部署产生影响,优化算法中为了不断提升传感器的有效覆盖率,不断调整传感器的位置,使得传感器在避开障碍物的同时,增加有效覆盖率。因此,本文在进行对比实验时,假设障碍物是固定的,从而避免因障碍物的变化引起传感器有效覆盖率的变化,导致对比实验失败。当然,在障碍物变化的情况下,如何进行传感器多目标优化是另一个科学问题,不在本文的讨论范围内。

本文提出的基于测距方式的室内定位传感器优化部署方案,对于信号覆盖、测距定位均有意义,但是,对于非测距方式的室内定位传感器部署,如指纹匹配方式,本文方法还需要改进和进一步验证,也是未来研究的一个方向。

## 4 结 语

无线传感器网络是物联网系统的重要组成部分之一,在考虑投入产出比的情况下,快速规模化部署应用要与实际场景需求相结合。在高精度室内定位导航应用场景下,障碍物是导致室内定位误差的重要原因。本文从基于测距方式室内定位的计算原理出发,以最大化有效覆盖率、最小化传感器个数、最大化信标节点所组成的凸包面积为优化目标,结合考虑障碍物、WSN拓扑合理性的约束条件,提出了考虑障碍物的WSN拓扑多目标优化模型,并以NSGA-III算法为基础设计优化模型求解算法。通过Matlab软件数值仿真,将优化结果与没有考虑障碍物的优化方法结果进行对比,结果显示,有效覆盖率在进化代数为1000代,传感器个数为36时,本文方法WSN的有效覆盖率提高了9.62%;与正三角

形、正方形、正六边形均匀部署方案结果进行对比,在相同的信标节点数目下,进化代数为1000代的方案的WSN有效覆盖率分别提高了52.7%、112.1%、16.6%。由于不同的优化算法性能不同<sup>[29]</sup>,未来将针对不同优化算法在考虑障碍物时的不同效率和改进方法开展研究。

## 参 考 文 献

- [1] Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, et al. A Survey on Sensor Networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] Cui Li, Ju Hailing, Miao Yong, et al. Overview of Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(1): 163-174. (崔莉,鞠海玲,苗勇,等.无线传感器网络研究进展[J].计算机研究与发展,2005,42(1):163-174.)
- [3] Liu Hui, Chai Zhijie, Du Junzhao, et al. Sensor Redeployment Algorithm Based on Combined Virtual Forces in Three Dimensional Space[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(6): 713-723. (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,2011,37(6):713-723.)
- [4] Ke W C, Liu B H, Tsai M J. Constructing a Wireless Sensor Network to Fully Cover Critical Grids by Deploying Minimum Sensors on Grid Points is NP-Complete [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2007, 56(5): 710-715.
- [5] Ke W C, Liu B H, Tsai M J. The Critical-Square-Grid Coverage Problem in Wireless Sensor Networks is NP-Complete [J]. *Computer Networks*, 2011, 55(9): 2209-2220.
- [6] Liu Yuying, Shi Wangwang. Optimal Distribution of Detecting Node of Measure Control System Based on Wireless Sensor Network[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6): 869-872. (刘玉英,史旺旺.一种基于遗传算法的无线传感器网络节点优化方法[J].传感技术学报,2009,22(6):869-872.)
- [7] Mahboubi H, Aghdam A G. Distributed Deployment Algorithms for Coverage Improvement in a Network of Wireless Mobile Sensors: Relocation by Virtual Force[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(4): 736-748.
- [8] Dai G Y, Lü H X, Chen L Y, et al. A Novel Coverage Holes Discovery Algorithm Based on Voronoi Diagram in Wireless Sensor Networks[J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2016, 9

- (3): 273-282.
- [9] Jin Heli, Liu Banteng, Chen Wei, et al. Research on the Nodes Deployment Scheme for Sensor Coverage in Underwater Wireless Networks Based on Genetic Algorithm[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(7): 1083-1087. (金合丽, 刘半藤, 陈唯, 等. 基于遗传算法的水下传感器网络节点部署算法研究[J]. 传感技术学报, 2019, 32(7): 1083-1087.)
- [10] Li Sheng, Yao Xinhua, Fu Jianzhong. Communication Quality Constraint-Based Location Optimization of Wireless Sensor in Thermal Monitoring of Spindle [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(7): 1281-1286. (李晟, 姚鑫骅, 傅建中. 基于通信质量约束的主轴热监测无线传感器布点优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(7): 1281-1286.)
- [11] Yang Yongjian, Fan Xiaoguang, Gan Yi, et al. Coverage Optimization of Sensor Network Based on Improved Particle Swarm Optimization[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(2): 310-315. (杨永建, 樊晓光, 甘轶, 等. 基于改进 PSO 算法的传感器网络覆盖优化[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(2): 310-315.)
- [12] Sengupta S, Das S, Nasir M D, et al. Multi-objective Node Deployment in WSNS: In Search of an Optimal Trade-off Among Coverage, Lifetime, Energy Consumption, and Connectivity[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(1): 405-416.
- [13] Jia J, Chen J, Chang G R, et al. Multi-objective Optimization for Coverage Control in Wireless Sensor Network with Adjustable Sensing Radius [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2009, 57(11/12): 1767-1775.
- [14] Liu X X, He D S. Ant Colony Optimization with Greedy Migration Mechanism for Node Deployment in Wireless Sensor Networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 39: 310-318.
- [15] Abo-Zahhad M, Sabor N, Sasaki 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.
- [16] Quan Enmeng. Maximal Coverage Enhancement Based on Genetic Algorithm in Multiple Obstacles Area [J]. *Industrial Control Computer*, 2017, 30(12): 108-110. (权恩猛. 基于遗传算法的多障碍区域最大覆盖优化[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 108-110.)
- [17] Liu Tao, Xu Aigong, Sui Xin, et al. An Improved Robust Kalman Filtering Method Based on Innovation and Its Application in UWB Indoor Navigation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(2): 233-239. (刘韬, 徐爱功, 隋心, 等. 新息向量的抗差 Kalman 滤波方法及其在 UWB 室内导航中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(2): 233-239.)
- [18] Chen Ruizhi, Ye Feng. An Overview of Indoor Positioning Technology Based on Wi-Fi Channel State Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2064-2070. (陈锐志, 叶锋. 基于 Wi-Fi 信道状态信息的室内定位技术现状综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2064-2070.)
- [19] Zhao Zhao, Chen Xiaohui. An Improved Localization Algorithm Based on RSSI in WSN [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(3): 391-394. (赵昭, 陈小惠. 无线传感器网络中基于 RSSI 的改进定位算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(3): 391-394.)
- [20] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System [C]//The 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Tel Aviv, Israel, 2000.
- [21] Bishop A N, Fidan B, Anderson B D O, et al. Optimality Analysis of Sensor-Target Localization Geometries [J]. *Automatica*, 2010, 46(3): 479-492.
- [22] Jameii S M, Faez K, Dehghan M. Multiobjective Optimization for Topology and Coverage Control in Wireless Sensor Networks [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 2015(2): 100-113.
- [23] Sun Zeyu, Wu Weiguo, Wang Huan Zhao, et al. Optimized Coverage Algorithm in Probability Model [J]. *Journal of Software*, 2016, 27(5): 1285-1300. (孙泽宇, 伍卫国, 王换招, 等. 概率模型下的一种优化覆盖算法[J]. 软件学报, 2016, 27(5): 1285-1300.)
- [24] Rebai M, Le berre M, Snoussi H, et al. Sensor Deployment Optimization Methods to Achieve both Coverage and Connectivity in Wireless Sensor Networks [J]. *Computers and Operations Research*, 2015, 59: 11-21.
- [25] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor Placement for Effective Coverage and Surveillance in Distributed