

# 权重感知的三维室内无线传感器网络部署算法

庞 博 秦小麟 江国华 刘 亮

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)

**摘 要** 已有室内受限空间无线传感器网络部署问题的研究均未综合考虑各种部署应用需求以及障碍物对无线传感器信号的干扰,导致传感器感知与通信能力的浪费。为解决上述问题,提出了一种基于启发式算法的无线传感器网络部署算法,该算法利用贪心策略在有障碍的三维室内环境中进行部署,并在此基础上设计了权重感知的遗传算法优化策略用以求解全局最优部署方案。部署算法利用分权的方式描述不同空间区域的重要性,利用带方差的指数正态阴影模型建模信号衰减过程,在获得最大覆盖效果的同时最小化部署开销,并保证空间  $k$  覆盖和网络连通性。实验结果表明,障碍物对无线传感器节点造成一定影响时,提出的 WCRH 算法与 OWCRG 算法的性能均优于使用传统 Line-of-Sight(LoS)模型的基于面积开销比的启发式算法。

**关键词** 三维室内,无线传感器网络,部署,权重感知,信号衰减

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Weight Aware Wireless Sensor Network Deployment in 3-D Indoor Space with Obstacles

PANG Bo QIN Xiao-lin JIANG Guo-hua LIU Liang

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** None of existing research for wireless sensor network deployment problem in restricted interior space considers about the requirements of various applications or the interference by obstacles on wireless sensors' signal, which leads to the waste of sensor perception and communication capabilities. To solve the problems, we proposed a heuristic-based wireless sensor network deployment algorithm which deploys sensors with a greedy-based strategy and optimizes the deployment with a weight aware genetic algorithm for global optional solution. The algorithm distinguishes the importance of different area by weight division and models the signal attenuation by log-normal shadowing model with dynamic variance (LNSM-DV) to maximize the coverage effectiveness and minimize the deployment cost guaranteeing  $k$ -coverage and network connectivity. The experimental results show that our algorithm is more efficient than the Cost-efficient  $k$ -coverage algorithm presented by Kouakou, Marc T, et al. when the obstacle causes certain effects on wireless sensor nodes.

**Keywords** 3D interior space, Wireless sensor network, Deployment, Weight aware, Signal attenuation

## 1 引言

无论无线传感器网络(WSN)需要完成何种功能,都应首先解决网络的部署问题,网络部署方案的好坏直接影响着无线传感器网络是否能够准确、高效地完成既定任务<sup>[1]</sup>。一个好的部署算法可以有效地保证覆盖程度、降低部署费用、减少消息冲突并获得更好的网络连通性。本文主要聚焦于室内空间中 WSN 的部署问题,该问题通常是研究目标空间中的最优化部署问题,通过计算确定传感器节点的部署位置,达到不同的部署花费、覆盖度、连通度等要求<sup>[2]</sup>。

现有部署算法多通过降低空间维度或忽略障碍物影响的方式计算部署方案。文献<sup>[3]</sup>提出了一种基于网络结构的一

维部署方案,即使用最少的节点达到  $k$  覆盖并保持全连通。文献<sup>[4,5]</sup>提出了两种基于二维空间的部署模式,并与已有部署模式相结合,完善了全覆盖及  $k$  连通( $k \leq 6$ )的部署模式;讨论了在不同  $r_s/r_c$  比的情况下的最优模式, $r_s$  和  $r_c$  分别表示传感器节点的感知半径和通信半径。

近年来,有人提出了三维室内 WSN 部署算法。文献<sup>[10,11]</sup>设计了几组网络部署模式,以达到全覆盖和  $k$  连通,然后证明了它们在任意的通信范围和感知范围比的条件下的最优性,但忽略了目标空间中的障碍物。文献<sup>[7]</sup>研究如何使用最少的无线传感器节点对三维空间进行全覆盖,指出使用泰森多边形将 3D 空间划分为多边形 cell 是最优的策略,但其对无线传感器的感知半径与通信半径的比有特殊要求。这样

到稿日期:2013-07-04 返修日期:2013-10-28 本文受国家自然科学基金项目(61373015),2010 年度国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20103218110017),江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD),南京航空航天大学基本科研业务费(NP2013307)资助。

庞 博(1989—),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络技术,E-mail:pb0830@163.com;秦小麟(1953—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式环境的数据管理与安全;江国华(1963—),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为软件测试、物联网工程;刘 亮(1985—),男,讲师,主要研究方向为分布式环境数据管理。

得到的部署方案在实际部署过程中往往会遇到各种问题<sup>[8]</sup>。不同维度空间的差异导致的实际部署位置偏移、障碍物对无线节点信号的干扰引起的覆盖范围变化等均会导致覆盖度或网络连通性不达标。

对于特定的 WSN 应用,不同的区域有不一样的重要性和覆盖需求。易燃物品存放处、杂物室等区域的火灾监控传感器的覆盖程度应较高;而办公室、仓库等区域应保持较高的非法入侵监测设备覆盖率。而统一的覆盖模式无法区分不同的覆盖需求,对全部区域进行最低级别的监控无法保证高危区域的安全,而对全部区域进行最高级别的监控,则无疑是一种巨大的资源浪费。

文献[8]研究考虑障碍物影响的室内三维空间部署方式,提出了一种最小化整体部署开销并保证 k 覆盖的启发式算法,但该算法采用 LoS 模型建模障碍物对无线传感器网络的影响,直接将传感器节点的感知能力与通信能力限制到其视线可达的空间位置上,而非具体计算障碍物对传感器感知、通信能力的影响作用,过多浪费了传感器节点的通信能力与感知能力。

无线传感器信号衰减特性研究的发展,使我们能更具体地计算传感器在室内空间中受到的不同种类障碍物的影响。文献[12]通过具体实验分析了多种无线传感器发出的无线信号在建筑物中随距离增加而衰减的趋势。文献[13]分析了 LNSM 模型的优缺点,经过大量的实验总结了信号强度与距离之间的关系,提出了带有动态方差的 LNSM-DV 模型,使该模型可以根据环境动态调整并具有自适应性。文献[14, 15]将仿真结果与具体实验数据对比,验证了对无线信号穿透墙体所带来的衰减进行仿真的可行性。

我们的贡献在于:将空间分权,使算法能够自适应地调整节点的部署位置,采用了一种更切合实际的信号衰减模型代替 LoS 模型来建模室内三维空间中障碍物对无线传感器节点感知能力与通信能力的影响,在具体计算无线传感器节点实际覆盖范围的同时综合考虑目标空间中部署的整体开销;提出了一种针对室内三维空间的综合考虑覆盖权重与部署开销的启发式算法,使无线传感器网络在 k 覆盖并连通的基础上,加强重点区域的监测能力,使用遗传算法优化部署方案,以求得全局最优解。

本文第 2 节描述了研究的目标问题,将其形式化表达并证明了问题的复杂性;第 3 节提出了基于权重开销比贪心策略的启发式算法和基于权重感知的遗传算法优化策略;第 4 节以实验数据验证了算法的优越性;最后总结了我们的工作,并指出下一步的研究方向。

## 2 有障碍的三维带权室内空间 WSN 部署

本文研究的覆盖与连通是在房间内部的复杂三维空间中进行的,有如下基本假设:①传感器节点的通信能力和感知能力会受到障碍物的影响,不同属性的障碍物对传感器节点的通信能力和感知能力所产生的影响不同;②本文中只考虑静态的传感器节点和障碍物,它们均是固定且无法移动的。

### 2.1 部署模型与定义

**定义 1** 设三维室内空间  $Z$  中,待监测的子区域为  $G$ ,可部署传感器的子区域为  $D$ ,障碍物集合为  $O$ 。将待监测区域  $G$  根据一定的粒度划分成网格点集合  $G = \{g_1, \dots, g_n\}$ ,每个

待监测点  $g_i$  均表示一块待检测区域。 $D = \{d_1, \dots, d_m\}$  为可将部署区域  $D$  根据一定粒度分成的网格点集合,每个可部署点  $d_i$  均表示一块可部署区域。

**定义 2** 映射  $w(p)$  为待监测点  $p$  的权重,权重值越大表示  $p$  点的重要程度越大。设  $G_i = \{g_a, \dots, g_b\} \subset G$ , 式(1)即为区域  $G_i$  的权重  $W(G_i)$ 。

$$W(G_i) = \sum_{j=a}^b w(g_j) \quad (1)$$

权重取决于空间的重要程度、需要的覆盖度等。毫无疑问,机密档案室、办公室、休息大厅、卫生间等空间区域的权重有所区别,需要 1 覆盖与需要 k 覆盖的位置,权重也不应相同。不同区域间的权重之比代表着它们所需要的覆盖程度之比。权重值从一定程度上表现了覆盖该区域所需要付出的代价。

**定义 3** 设  $\cos t_i$  为购买一个传感器的开销。由于部署区域中位置的不同,在不同的点  $p$  部署传感器的花费也不尽相同。设  $\cos t(p) (\forall p \in D)$ , 表示在  $p$  点部署传感器所需要的开销。

当传感器节点进行感知而在通信的方向上存在障碍物时,节点在该方向上的感知和通信能力均会受到障碍物的影响(如图 1、图 2 所示)。现有研究多采用 LoS 模型对其建模,即当空间中任意两点间存在障碍物时,则视为无法相互感知或通信(如图 1 所示)。事实并非如此。以无线电波为例,无线电信号穿透障碍物所受的衰减,不仅与信号频率、障碍物属性有关<sup>[14, 15]</sup>,还与其传播路径的环境有着密切的关系<sup>[13]</sup>。

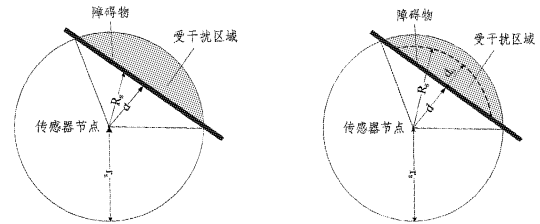


图 1 障碍物对信号的影响(a) 图 2 障碍物对信号的影响(b)

本文采用 Xu Jiuqiang 等<sup>[13]</sup>提出的一种带方差的动态阴影模型来建模无线信号的衰减过程。设阈值为  $P_0$ , 当某空间位置的信号强度低于  $P_0$  时,则认为传感器无法对该点进行感知或通信。式(2)为传输损耗  $PL(r)$  (dB) 的计算公式,当传感器发出的初始信号强度为  $P$  时,传感器节点实际信号可达距离  $r$  应满足式(2)。当  $P, P_0$  确定时,即可通过式(2)判断空间中任意点是否在传感器信号范围内。其中  $d_0$  为近地参考距离,是经验取值,  $Y$  为标准正太分布。 $d_0, \eta$  与  $\sigma$  共同描述信号的路径损耗模型,  $\eta$  与  $\sigma$  均可由实测数据计算得到<sup>[13]</sup>。

$$PL(r) (dB) = \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) = \overline{PL}(d_0) + 10\eta \lg\left(\frac{r}{d_0}\right) + \sigma Y^{[13]} \quad (2)$$

**定义 4** 设  $r_s$  为无线传感器在自由空间中的感知半径,  $r_c$  为自由空间中的通讯半径,由式(2)计算得到的受障碍物影响的室内空间实际感知信号半径为  $R_s$ , 实际通讯信号半径为  $R_c$ 。

**定义 5** 设  $Monitor(d_i)$  为可部署点  $d_i$  到所有可被该点传感器监测的待监测点集合的映射(见式(3))。当  $\forall g_i \in G$  至少被监测一次时,称区域  $G$  被全覆盖,当  $\forall g_i \in G$  至少被监测  $k$  次时,称区域  $G$  被 k 覆盖。由于全覆盖条件很容易转化

为  $k$  覆盖条件,为了叙述的简便及算法的简洁,本文在叙述时以全覆盖条件为例。

$$Monitor(d_i) = \{g_j \mid |g_j d_i| \leq \Omega(r_s), 1 \leq j \leq n\} \quad (3)$$

**定义 6** 设  $S$  为被部署的节点的集合。 $path(s_i, s_j)$  表示  $s_i$  与  $s_j$  之间是否存在通讯路径。 $path(s_i, s_j) = 1$  时,我们称  $s_i$  与  $s_j$  相互连通。若两个集合中任意两个传感器节点都相互连通,则称这两个集合相互连通。若  $s_i$  与任意  $s_j$  连通,则称是  $s_i$  连通的,以  $route(s_i) = 1$  表示。

## 2.2 问题形式化

我们研究的主要问题是决定在某个三维室内空间中部署无线传感器网络所需要的传感器节点数量,确定被部署的位置,保证传感器网络连通和待监测区域  $k$  覆盖,最大化覆盖权重并减少整体部署开销(包括传感器花费和部署节点的开销)。

令  $X = \{x_1, \dots, x_m\}$ ,  $x_i = 1$  表示在  $d_i$  处部署节点,否则  $x_i = 0$ 。目标问题可形式化表达为:求式(4)的最优解  $X$ 。

$$\text{MAX} \frac{\sum_{i=1}^m x_i \cdot W(Monitor(d_i))}{\sum_{i=1}^m x_i \cdot (\cos t(d_i) + \cos t_s)} \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \bigcup_{i=1}^m x_i \cdot Monitor(d_i) \\ route(s_i) = 1, \forall s_i \in S \end{cases}$$

## 2.3 问题复杂性证明

**定理 1** 有障碍物的室内三维空间 WSN 部署问题是 NPC 问题,当①保证网络连通和待监测区域  $k$  覆盖;②最大化覆盖权重;③最小化整体部署开销。

证明:背包问题为已知的 NPC 问题。设有  $n$  样物品,  $p_i$  为每样物品的价值,  $q_i$  为每样物品的重量,背包空间为  $B$ ,则背包问题可形式化为式(5)。

$$\text{MAX} \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \sum_{i=1}^n x_i q_i \leq B$$

取 2.2 节所述目标问题形式化表达(见式(4))的子集,如式(6)所述。

$$\text{MAX} \sum_{i=1}^m x_i \cdot W(Monitor(d_i)) \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \bigcup_{i=1}^m x_i \cdot Monitor(d_i) = G$$

$W(Monitor(d_i))$ 、 $Monitor(d_i)$  均只与  $d_i$  相关,  $p_i$  与  $q_i$  也只与被选择的物品有关。令  $W(Monitor(d_i)) = p_i$ ,  $Monitor(d_i) = q_i$ , 式(6)即转化为背包问题。所以上述问题是 NPC 问题。而式(6)是目标问题的子集,所以目标问题也是 NPC 问题,定理 1 证明完毕。

## 3 权重感知的三维室内传感器网络部署算法

根据定理 1,目标问题在多项式时间内不可解,所以我们提出两种启发式算法求解 2.2 节中描述的覆盖问题。3.1 节描述了一种基于权重开销比贪心策略的启发式算法。3.2 节提出了一种基于权重感知的遗传算法优化策略计算部署方案的全局最优解。

### 3.1 基于权重开销比贪心策略的部署算法

首先,我们提出一种基于权重开销比贪心策略的启发式

算法来求该覆盖问题的局部最优解。

在全覆盖条件下,当使用节点数大于 1 时,不同节点的  $Monitor(d_i)$  一定存在交集,设  $m'(d_i)$  为点  $d_i$  部署节点单独监测的待监测区域,  $m'(d_i)$  节点监测范围中已有其他节点监测的待监测区域。为了在算法运行过程中区别已部署区域和未部署区域的权重,从而避免在高权重区域重复部署而导致的资源浪费,将式(4)中权重计算部分划分为已覆盖区域权重和未覆盖区域权重,得到式(7)。 $\epsilon$  是属于  $(0, 1)$  的实数,用于控制重叠区域的权重对算法影响的大小,从而更灵活地满足实际应用中不同的传感器节点聚集程度的需求。

$$\sum_{i=1}^m x_i \cdot \frac{W(m(d_i)) + \epsilon \cdot W(m'(d_i))}{\cos t(d_i)} \quad (7)$$

算法分为两个步骤:

①选择部署点:初始化  $G, D$ , 并初始化  $S = \emptyset$ 。然后计算每一个可部署点  $d_i$  的权重开销比。权重开销比是该可部署点的覆盖权重与该点的部署开销的比值。采用贪心算法,根据式(8)选择覆盖权重与部署开销比值最大的可部署点  $d_i$  作为部署位置,并从集合  $G$  中减去  $m(d_i)$ 。其中,  $W(m(d_i))$  表示  $d_i$  点独立覆盖区域的权重,  $W(m'(d_i))$  表示  $d_i$  与其他节点共同覆盖区域的权重。算法重复上述步骤直至  $G$  变成空集。

$$\text{MAX} \frac{W(m(d_i)) + \epsilon \cdot W(m'(d_i))}{\cos t(d_i)} \quad (8)$$

②调整、添加部署点:根据节点间的连通性,将集合  $S$  划分成小集合。选取属于不同集合且距离最近的节点  $s_i, s_j$ , 在不影响覆盖度及现有网络联通程度的基础上将  $s_i$  与  $s_j$  向彼此方向移动,使其相互连通。若  $path(s_i, s_j)$  依然为 0,则在两节点连线上添加传感器,使  $path(s_i, s_j) = 1$ , 并将已连通的两节点集合与添加的传感器节点合并为一个集合。重复上述过程直至整个网络连通。

具体过程如算法 1 所示。第 1 行初始化集合  $G, D, X$  和  $S$ 。算法 2—7 行按照式(8)决定部署无线传感器的位置,使得待监测区域全覆盖并最大化覆盖权重。第 8 行根据连通性将已确定部署位置的节点划分为若干子集,任意子集中的节点相互连通,任意子集间相互不连通。通过 9—16 行的运算,使得整个网络连通。算法 17 行返回部署方案  $S$ 。

**算法 1** 基于权重开销比贪心策略的启发式算法 (WCRH)

1. 初始化  $G, D, X = \{0, \dots, 0\}, S = \emptyset, S' = \emptyset$
2. while  $G \neq \emptyset$  do
3. select current location  $d_i$  according to formula (8)
4. s. position =  $d_i$
5.  $G = G - m(d_i)$
6.  $x_i = 1$
7. end while
8. divide the set  $S$  into subsets as  $S' = \{S_1, \dots, S_b\}$  according to the connectivity between sensors. Ensure that every sensor is connected to the sensors in the same subset  $S_i$  and is unconnected to any other ones
9. while  $|S'| \neq 1$  do
10. get  $s_i$  and  $s_j$  satisfying  $path(s_i, s_j) = 0$  from different subsets which has the minimum distance  $|s_i s_j|$
11. move( $s_i, s_j$ )

12. if  $\text{path}(s_i, s_j) = 0$  then
13.  $S_i = S_i \cup S_j \cup \text{AddSensor}(s_i, s_j)$
14. end if
15.  $S' = S' - \{S_j\}$ , and update X
16. end while
17. return X

### 3.2 基于权重感知的遗传算法优化策略

根据定理 1, 贪心算法只能得到局部最优解。为了计算目标问题的全局最优解, 我们提出了基于权重感知的遗传算法(OWCRG)。

给定集合  $G, D$  和  $S$ , 如 3.2 节所述。  $X = \{x_1, \dots, x_m\}$  作为遗传的 DNA 编码, 每一个  $x_i$  对应一个可部署点  $d_i$ 。在  $d_i$  部署传感器节点, 则  $x_i = 1$ , 否则  $x_i = 0$ 。取 WCRH 算法计算得到的部署方案为  $X_1$ , 并随机生成  $X_i$ , 合计  $N$  组作为算法的初始值。

因为研究的目标是在满足全覆盖和全连通的基础上, 尽量增加覆盖的权重并减少部署开销, 所以连通性、覆盖程度、整体覆盖权重和部署开销均为网络的指标, 且种群应朝着覆盖权重增大、总体开销减少且满足空间全覆盖和网络连通的方向进化。部署方案的适值应与覆盖权重、连通性成正比, 与部署开销成反比。综合考虑上述指标, 设计适值函数, 如(9)式所述。其中  $\xi$  为正实数, 调节部署点连通与否的重要程度。

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^m x_i \cdot W(\text{Monitor}(d_i)) \cdot (1 + \xi \cdot \text{route}(d_i))}{\sum_{i=1}^m x_i \cdot (\cos t(d_i) + \cos t_s)} \quad (9)$$

然而, 虽然式(9)会使得种群向着高覆盖率、高连通度的方向繁衍, 但容易出现同一区域重复覆盖的情况, 且无法保证全覆盖和网络连通的限定条件。所以, 我们定义了惩罚函数, 如式(10)所示, 促使遗传向全覆盖与网络连通的方向进行。  $N_s$  为部署所需传感器节点的数量;  $N_u$  为未连通的节点的个数;  $\omega$  为惩罚系数, 决定惩罚力度。

$$P(X) = \left[ \frac{\prod_{i=1}^m X_i \cdot \text{Monitor}(d_i)}{|G|} \cdot N_s^{-1} \cdot (N_u + 1)^{-1} \right]^\omega \quad (10)$$

将适值函数修改为式(9)与式(10)的乘积, 如式(11)所示。  $F(X)$  越大表示该 DNA 编码越适应我们的需求。设交叉概率为  $P_c$ , 变异概率为  $P_m$ 。使用轮法决定选择概率(见式(12))。随机选择交叉位置进行两点交叉。

$$F(X) = f(X) \cdot P(X) \quad (11)$$

算法的每一代, 先依据式(11)对当前族群中的所有个体进行评估, 计算出相应的适值函数  $F(X_i)$ , 并将其代入式(12)计算出个体遗传的概率  $P_i$ 。以概率  $P_i$  从  $X$  中选择个体, 并以概率  $P_c$  进行交叉, 直至新个体数量达到族群数量上限为止。再将所有新个体按概率  $P_m$  进行突变。重复进行上述迭代操作, 直至新族群的适应性达到一定的阈值  $\delta$  或种群繁衍代数达到预设的迭代次数  $N_g$  为止。

$$P_i = \frac{F(X_i)}{\sum_{j=1}^m F(X_j)} \quad (12)$$

具体算法如算法 2 所示。首先初始化初始族群(1—2 行), 然后进行族群的繁衍过程(3—18 行)。其中 3—17 行为新族群的产生过程; 7—9 行按照遗传概率  $P_i$  选择个体, 并以概率  $P_c$  选择进行交叉操作(8, 9 行)或直接遗传(10, 11 行)

(概率很低且任意个体最多可直接遗传一次); 14—16 行以概率  $P_m$  对新族群中所有个体执行突变操作。19—25 行选出  $F(X_i)$  最大的个体  $X_{\text{MaxID}}$ 。26 行对  $X_{\text{MaxID}}$  进行调整, 使其满足连通度要求。27 行返回算法的优化结果  $X_{\text{MaxID}}$ 。

#### 算法 2 基于权重感知的遗传算法(OWCRG)

1. Initialize  $X_1$  by WCRH. Initialize  $X_2 \sim X_N$  randomly.
2.  $\text{maxValue} = 0, \text{count} = 0$
3. while  $\text{maxValue} < \delta$  且  $\text{count} < N_g$  do
4. calculate  $F(X_i)$  for each  $X_i$  according to formula (11).
5. calculate  $P_i$  for each  $X_i$  according to formula (12)
6. while the new population is less than  $N$
7. if random number  $p < P_c$  then
8. choose  $X_i, X_j$  according to  $P_i, P_j$
9. Cross( $X_i, X_j$ ).
10. else if  $\forall X_j' \neq X_i$  then
11. add  $X_i$  to the new population
12. end if
13. end while
14. for each  $X_i'$  in the new population do
15. Mutation( $X_i'$ )
16. end for
17. update each  $X_i$  to  $X_i'$ ,  $\text{count} = \text{count} + 1$
18. end while
19. for each  $X_i$  do
20. calculate  $F(X_i)$  according to formula (11)
21. if  $\text{maxValue} < F(X_i)$  then
22.  $\text{maxValue} = F(X_i)$
23.  $\text{maxID} = i$
24. end if
25. end for
26. adjust  $X_{\text{MaxID}}$  to satisfy the network connectivity requirement.
27. return  $X_{\text{MaxID}}$

## 4 实验与分析

我们的主要目标是在保证空间  $k$  覆盖和网络连通的基础上, 尽量提高网络覆盖的权重并减少网络的整体部署开销, 所以网络覆盖权重与总体开销的比值(WCR)是算法效率的衡量标准。为了比较算法效率, 我们选用基于面积的贪心算法(CBH)和基于面积开销比的启发式算法(CEH)<sup>[8]</sup>与 WCRH 算法和 OWCRG 算法进行比较。

虽然诸如 NS-2、OPNET、SensorSim、EmStar、OMNet、GloMoSim、TOSSIM、PowerTOSSIM 等现有仿真器以各自的特点在 WSN 仿真方面得到了广泛的应用, 但它们大多偏向网络通信模拟方面, 而缺少对三维室内空间 WSN 部署、划分空间区域权重、确定可部署位置等功能的良好支持, 也无法进行遗传算法的迭代过程的计算。所以, 我们以 C++ 实现了一个三维室内空间 WSN 部署仿真器来模拟算法运行过程并评估算法效率。仿真器具有自主设置空间大小, 添加、删除障碍物, 设置障碍物属性, 设置传感器节点属性, 设置部署开销等功能, 并可输出算法仿真过程与实验结果数据。

我们在某实际建筑中选择了实验的目标三维空间区域, 包括若干房间、一条走廊、一个大厅和相应的门、窗、隔板、墙等。可部署区域定义为天花板、墙面和地面, 待监测平面定义

为距地面 1.5m 的空间平面。按照不同位置的实际意义将待监测平面划分为 3 个权重等级。实际测量结果显示,不同强度的信号穿透相同障碍物所受的衰减效果十分相近。排除干扰因素,可近似认为不同强度信号穿透相同障碍物所受的衰减相同。为减少信号的反射、衍射等影响,我们进行了短距离内的小功率测量。当初始信号强度  $P=19\text{dB}$  时,信号穿透障碍物后的信号强度与传播距离的关系如表 1 所列(均为多次测量的均值),将其代入式(2)即可得到信号穿透不同障碍物所受衰减的规律,从而确定传感器实际的感知范围  $R_s$  和通信范围  $R_c$ 。

表 1 信号穿透障碍物后的强度

障碍\距离	0.6m	0.8m	1m	1.2m	1.4m	1.6m
墙	-29.71	-35.85	-32.01	-37.70	-45.56	无
门	-42.70	-35.50	-33.04	-36.20	-42.14	-46
隔板	-22.71	-15.5	-13.06	-19.39	-25.69	20.9
玻璃墙	-9	-11.6	-12.67	-13.71	-9.67	-13.44

设计了两种不同的场景来对各算法在不同环境下的性能进行测试,场景 1 中购买传感器节点的开销大于传感器部署的开销,场景 2 中模拟传感器部署的开销大于购买传感器节点的开销。设购买一个节点的开销为  $C_s$ ,在天花板、墙面、地面部署一个节点的开销分别为  $C_c$ 、 $C_w$ 、 $C_f$ 。

场景 1 设  $C_s=100$ , $C_f=6$ , $C_w=2$ , $C_c=10$ 。OWCRG 算法、WCRH 算法、CEH 算法与 CBH 算法的实验效果如图 3、图 4 所示。图 3 为 4 种算法所得部署方案的 WCR 对比图,图 4 记录了 4 种算法所得部署方案的总体部署开销。

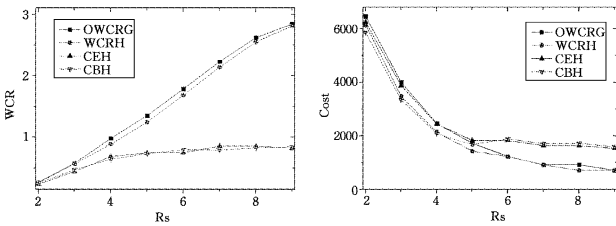


图 3 场景 1 中不同  $R_s$  下的 WCR 对比图

图 4 场景 1 中不同  $R_s$  下的整体部署开销变化曲线

如图 3 所示,CEH 算法与 CBH 算法的 WCR 几乎一致。而  $R_s$  较小时,本文 OWCRG 与 WCRH 算法所得 WCR 相对于 CEH 算法与 CBH 算法的优势并不大。但随着  $R_s$  的增大,OWCRG 与 WCRH 算法相对于 CBH 与 CEH 算法的优越性越来越明显。图 4 也表现出了类似的规律。当  $R_s$  较小时,4 种算法的总开销区别并不是很大,WCRH 算法开销最小,CEH 算法开销最大,但随着  $R_s$  的增大,OWCRG 与 WCRH 算法所得部署方案的开销将远低于另两种算法。OWCRG 算法与 WCRH 算法所得部署方案的总开销几乎一致,但 WCR 却略高于 WCRH 算法。

随着科技的发展,无线传感器节点的制造成本越来越低,WSN 的部署开销中购买无线传感器的花费将远低于部署节点所需要的代价。所以,设计场景 2 对算法的性能进行评估。

场景 2 设  $C_s=1$ , $C_f=600$ , $C_w=200$ , $C_c=1000$ 。图 5 为 4 种算法所得部署方案的 WCR 对比图,图 6 记录了不同算法所得部署方案所需要的总开销。

图 5 表明,注重了不同位置部署开销的 CEH 算法的 WCR 要高于只关注覆盖面积的 CEH 算法。与图 3 中类似的

是,当  $R_s$  较小时,WCRH 与 OWCRG 算法已明显优于 CEH 算法,但相对于 CEH 算法的优势并不大。随着  $R_s$  的增大,WCRH 与 OWCRG 算法所得部署方案的优势越来越明显。观察图 6 可知当节点花费远小于节点部署开销时,CBH 算法所得部署方案的总体部署开销远大于其它 3 种考虑节点具体部署位置开销的算法。WCRH 算法与 OWCRG 算法的部署开销几乎一致。 $R_s$  较小时,CEH、WCRH 与 OWCRG 算法的总体部署开销区别很小,但当  $R_s$  较大时,CEH 算法的总体部署开销高于 WCRH 算法与 OWCRG 算法。

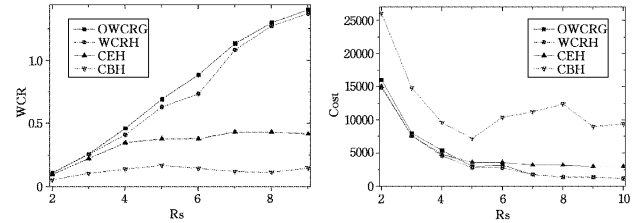


图 5 场景 2 中不同  $R_s$  下的 WCR 对比图

图 6 场景 2 中不同  $R_s$  下的整体部署开销变化曲线

贪心算法往往只能求得 NPC 问题的局部最优解,而非全局最优解,这样的解的性能很不稳定。为了使算法的效率更稳定,我们选用遗传算法优化启发式算法所得解,以求得更接近全局最优的解。因为遗传算法的进化过程有一定的随机性,OWCRG 算法的实验数据均为多次运行所得解的均值。

图 7 是  $R_s \in [4,9]$  时,OWCRG 算法与 WCRH 算法在场景 2 下的 WCR 对比图。如图所示,贪心算法性能并不稳定,而遗传算法的优化效果较为明显,WCRH 算法所得部署方案经遗传算法优化后,不仅性能有所提升,其整体趋势也更加平稳。

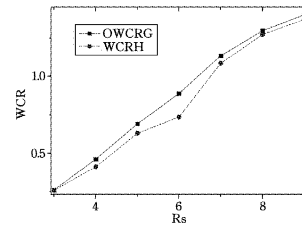


图 7 OWCRG 算法与 WCRH 算法的 WCR 对比

在场景 1 与场景 2 中,WCRH 与 OWCRG 算法相对于另外两种算法的优越性均随着  $R_s$  的增大而增长。而  $R_s$  越大,无线传感器节点信号的覆盖范围相对于空间大小的比值越大,室内各空间区域形状与障碍物对传感器节点信号范围的影响越大,被部署节点受环境因素影响越大。所以,实验结果表明,当无线传感器信号覆盖范围与房间大小的比值达到一定程度,即传感器在室内空间中受到障碍物的干扰较为明显时,OWCRG 算法与 WCRH 算法由于更具体地计算了传感器节点的覆盖范围并综合考虑了传感器所覆盖区域的权重和被部署点的部署开销,其性能远优于采用 LoS 模型且忽略了不同区域权重的 CEH 算法与 CBH 算法。

**结束语** 本文提出了一种受障碍物影响的室内三维空间无线传感器网络确定性部署方案。该方案综合考虑覆盖权重与整体部署开销,以达到最优的权重开销比。提出了一种基于权重开销比贪心策略的启发式算法,其在保证 k 覆盖和网络连通性的基础上以最少的部署开销达到最大的覆盖权重,

并使用权重感知的遗传算法优化启发式算法所得解。算法采用实际测量值建模信号穿透障碍物所受到的衰减,从而更高效地利用无线传感器节点的感知能力与通信能力;使用划分区域权重的方式根据不同的需求决定不同区域使用节点的数量和位置,加强重要区域的监控力度。实验验证了所提出的算法的优越性。但是,我们所设计的部署方案只考虑了静态障碍物,下一步我们将研究如何更具体地考虑动态障碍物对传感器节点信号的影响。

### 参 考 文 献

[1] 刘丽萍,王智,孙优贤. 无线传感器网络部署及其覆盖问题研究[J]. 电子与信息学报,2006,28(9):1752-1757

[2] 莺池,梁奕,周晓峰. 一种能量异构自适应的无线传感器网络覆盖控制协议[J]. 计算机科学,2009,36(5):39-44

[3] Xiong S, Yu L, Shen H, et al. Efficient algorithms for sensor deployment and routing in sensor networks for network-structured environment monitoring [C] // INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE. IEEE, 2012:1008-1016

[4] Bai X, Xuan D, Yun Z, et al. Complete optimal deployment patterns for full-coverage and k-connectivity ( $k \leq 6$ ) wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. ACM, 2008:401-410

[5] Bai X, Yun Z, Xuan D, et al. Optimal patterns for four-connectivity and full coverage in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(3):435-448

[6] Oh Y, Schmidt A, Woo W. Designing, developing, and evaluating context-aware systems[C] // International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2007 (MUE' 07) IEEE,

2007:1158-1163

[7] Alam S M, Haas Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks[C] // Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2006:346-357

[8] Kouakou M T, Yasumoto K, Yamamoto S, et al. Cost-efficient sensor deployment in indoor space with obstacles[C] // 2012 IEEE International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM). IEEE, 2012:1-9

[9] Watfa M K, Commuri S. A coverage algorithm in 3D wireless sensor networks[C] // Proc. of the 1st Int'l. Symp. on Wireless Pervasive Computing (ISWPC 2006). 2006:10-16

[10] Bai X, Zhang C, Xuan D, et al. Low-connectivity and full-coverage three dimensional wireless sensor networks[C] // Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing. ACM, 2009:145-154

[11] Bai X, Zhang C, Xuan D, et al. Full-coverage and k-connectivity ( $k=14, 6$ ) three dimensional networks[C] // INFOCOM 2009, IEEE. IEEE, 2009:388-396

[12] Benkic K, Malajner M, Planinsic P, et al. Using RSSI value for distance estimation in wireless sensor networks based on ZigBee [C] // 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 2008 (IWSSIP 2008). IEEE, 2008:303-306

[13] Xu J, Liu W, Lang F, et al. Distance measurement model based on RSSI in WSN[J]. Wireless Sensor Network, 2010, 2(8):606-611

[14] 郭山红,孙锦涛,谢仁宏,等. 电磁波穿透墙体的衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1):113-117

[15] 王召召,邹澎,王瑶. 建筑物对通信信号衰减的定量研究[J]. 通信技术, 2010, 5:23

(上接第4页)

有语义标记的大数据放在同一节点,但是其仍然有许多不足。未来要着重解决如下几个问题。

(1)基于时间段的大数据语义标记。未来对大数据的实时分析,不一定需要对整个大数据集进行全部分析,可能只需要分析从某个时间段到另外一个时间段的大数据。对于这种需求,我们针对大数据的未来标记应该设计出一种基于时间段的大数据语义标记机制和方法。

(2)可编程大数据放置策略。云计算的发展终态是可编程数据中心。未来对于大数据的放置,也将朝着可编程的方向发展,因此未来有用户编程能够控制的可编程大数据放置策略应该为未来的重点研究内容。

(3)未来将以 Hadoop 为基础搭建一个大的数据中心平台,以便对不同的数据集进行测试得到实验对比数据。

### 参 考 文 献

[1] 覃雄派,王会举,李芙蓉,等. 数据管理技术的新格局[J]. 软件学报, 2013, 24(2):175-197

[2] Kaushik R T, Bhandarkar M. GreenHDFS: towards an energy-conserving, storage-efficient, hybrid Hadoop compute cluster[C] // HotPower'10 Proceedings of the 2010 International Conference on Power Aware Computing and Systems. 2010:1-5

[3] Arasanal R M, Rumani D U. Improving MapReduce Performance through Complexity and Performance Based Data Placement in Heterogeneous Hadoop Clusters[C] // Distributed Computing and Internet Technology, Lecture Notes in Computer Science. 2013, 7753:115-125

[4] Xie J, Yin S, Ruan X, et al. Improving MapReduce performance through data placement in heterogeneous Hadoop clusters[C] // Proceedings of IPDPS Workshops. 2010:1-9

[5] 王俊伟. 大规模多媒体存储系统中数据放置与调度策略的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005

[6] 林伟伟. 一种改进的 Hadoop 数据放置策略[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2012(01):152-158

[7] Mohamed Y, Tian Yuan-yuan, Özcan F, et al. CoHadoop: flexible data placement and its exploitation in Hadoop[J]. Proceedings of the VLDB Endowment VLDB2011, 2011, 4(9):575-585

[8] Dittrich J, Quian'e-Ruiz J A, Jindal A, et al. Hadoop++: Making a yellow elephant run like a cheetah (without it even noticing)[J]. PVLDB2010, 2010, 3(1/2):518-529

[9] Zhao Yan-rong, Wang Wei-ping, Meng Dan, et al. A data locality optimization algorithm for large-scale data processing in Hadoop [C] // ISCC 2012. 2010:655-661

[10] 赵彦荣,王伟平,孟丹,等. 基于 Hadoop 的高效连接查询处理算法 CHMJ[J]. 软件学报, 2012, 23(8):2032-2041