

# 基于量子遗传算法的无线视频传感网络优化覆盖算法

樊富有<sup>1,2</sup>, 杨国武<sup>1</sup>, 乐千桀<sup>1</sup>, 吕凤毛<sup>1</sup>, 赵超<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731; 2. 宜宾学院 计算机与信息工程学院, 四川 宜宾 644000)

**摘要:** 针对智慧城市无线视频传感网络建设需要, 提出一种基于量子遗传算法的网络优化覆盖算法。算法面向复杂的监视区场景, 监视区中存在形状各异的障碍物, 各区域的重要程度不同。以二维离散网格模型描述监视区场景, 用编码描述矩阵表示监视区域, 用七元组描述有向无线视频传感器。通过严格的数学推导得出了问题的数学规划模型。优化覆盖算法由 InitialDeployment 算法和 OptimizedDeployment 算法 2 部分组成, 以获得最大有效覆盖率的网络部署方案为求解目标。采用量子遗传算法搜索解空间, 通过合理编码染色体, 优化量子旋转门参数, 使算法的运算速度快, 收敛性好。引入理想覆盖率和理想加权覆盖率 2 个极限值, 采用相对比较法评判算法优劣。仿真实验和数据分析表明, 算法获得的方案能很好地逼近理想极限值。在传感器节点数给定的情况下, 算法能获得最大的覆盖率。

**关键词:** 无线视频传感网络; 有向感知模型; 量子遗传算法; 优化覆盖算法; 理想覆盖率

**中图分类号:** TP393; TN929

**文献标识码:** A

## Optimized coverage algorithm of wireless video sensor network based on quantum genetic algorithm

FAN Fu-you<sup>1,2</sup>, YANG Guo-wu<sup>1</sup>, LE Qian-qi<sup>1</sup>, LV Feng-mao<sup>1</sup>, ZHAO Chao<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. School of Computer and Information Engineering, Yibin University, Yibin 644000, China)

**Abstract:** According to the construction needs of the smart city wireless video sensor network, an optimized network coverage algorithm based on quantum genetic algorithm is proposed. The algorithm fits in with complicated monitoring scene which has some different obstacles and different degree of importance. The monitoring region is depicted by two-dimensional discrete grid model, and the discrete grid model is represented by a code description matrix. The directional wireless video sensor is described by a seven-tuples. The mathematical programming model of the coverage problem is obtained by strict mathematical derivation. The optimized coverage algorithm is comprised by InitialDeployment and OptimizedDeployment algorithms, which takes the maximum coverage rate network deployment scheme as the solving goal. The quantum genetic algorithm with reasonable chromosome coding and optimized quantum rotation gate parameter is used to search the solution space, which has a good convergence rate and a fast computation speed. Two limit values of ideal coverage rate and ideal weighted coverage rate are introduced to evaluate the algorithm by the way of relative comparison. The result of simulation experiments and data analyses show that the solutions worked out by the algorithm can well approximate the ideal limit value. When the number of sensor nodes is given, the algorithm can obtain the maximum effective coverage rate.

**Key words:** wireless video sensor network; directional sensing model; quantum genetic algorithm; optimized coverage algorithm; ideal coverage rate

收稿日期: 2014-07-14; 修回日期: 2014-08-22

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(61272175); 四川省科技厅基础研究计划基金资助项目(2012JY009); 四川省教育厅重点基金资助项目(2011ZA173)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China( 61272175); The Research Foundation of Science & Technology Department of Sichuan Province (2012JY009); The Key Projects Foundation of the Education Department of Sichuan Province (2011ZA173)

## 1 引言

美国著名经济学家 Joseph E. Stiglitz 研究指出,“世界信息技术革命和中国的城镇化将是 21 世纪初期人类社会最具影响力的两件事”。优质的城镇化要求智慧规划、集约发展、精明增长,智慧城市概念因此应运而生。智慧城市以数字化、信息化为基础,依托传感网、云计算等技术构建可视、可感的综合网络平台,从而实现城市高效、安全、绿色运转。传感网络在智慧城市中将得到极大应用,而视频传感器网络是传感网络的重要组成部分之一。目前,由电池供电的无线视频传感器由于成本低、无需布线、安装方便等优点,已成为代替有线视频监控器的首选设备。因此,如何部署一定数量的无线视频传感器,构成无线视频传感网络,实现自主协同和对监视区的最大覆盖,成为了目前热门的研究课题。

Rahami 等在文献[1]中对大规模无线影像传感器网络进行了研究,指出由于环境的复杂性,与小规模部署较昂贵的高清视频监控器相比,大规模部署电池供电的低功耗影像传感器,能在感知可见度、姿态多样性、统计收敛性和多视角方面具有更大优势。Dimokas 等在文献[2]中对无线多媒体传感网(WMSN)进行了研究,指出运用廉价的 CMOS 相机和麦克风组建 WMSN,能增强现有无线传感网的性能,并设计了一种适用于 WMSN 的协同缓存协议。文献[3]也对 WMSN 进行了综述性研究,分析了 WMSN 中的算法、协议、硬件和体系结构,并对跨层协同和优化通信协议等开放问题进行了研究。

在工程实践中,传感器初期部署一般采用 2 种策略:1) 随机部署;2) 针对特定用途进行有计划部署。由于传感器网络通常在复杂环境下工作,网络中节点较多,通常采用随机部署方式。但大规模随机部署方式很难一次性地将网络中各个传感节点都部署在恰当位置上,极易产生不合理的覆盖结构,形成感知重叠和盲区。此外,由于成本的限制,无线视频传感器在应用中仍然难以达到大量“抛撒”的程度,因此,用有限数量节点获得最大监测范围是一个值得深入研究的问题。本文针对工程应用的需要,提出采用三步法部署大规模无线视频传感网络:1) 运用 InitialDeployment 算法生成传感节点最大覆盖方案——NCP 方案;2) 在 GPS 和罗盘

引导下,根据 NCP 方案进行实地部署,对按 NCP 方案不方便部署的节点,则就近选择合适位置进行部署,记录下异于 NCP 方案的节点位置和方位角,形成 MP 方案;3) 运用 OptimizedDeployment 算法,检测是否存在孤立节点,对节点方位角进行全局优化,形成具有固定位置的传感节点优化覆盖方案。采用以上三步法,可有效减少传感网的感知重叠区和感知盲区,形成合理的覆盖结构。InitialDeployment 算法和 OptimizedDeployment 算法采用改进的量子遗传算法搜寻全局最优解,具有运算速度快、收敛性好的优点。

关于无线传感器网络节点覆盖理论方面,国内外学者已从多个方面进行了有益的研究<sup>[4-10]</sup>。文献[8]综述了无线传感器网络中覆盖控制理论和相关算法,并对无线传感器网络覆盖进行了分类。按照无线传感器网络节点配置方式不同,将覆盖分为确定性覆盖和非确定性覆盖 2 类。按照无线传感器网络的应用属性不同,将覆盖分为节能覆盖、栅栏覆盖、连通性覆盖和目标定位覆盖。文献[9]从无线视频传感节点的有向感知特性出发,讨论了视频传感器网络覆盖效果与监控区域之间的相互关系,并基于虚拟势场工作原理,提出了一种适用于无盲区覆盖模型的覆盖率动态优化算法。文献[10]根据最大有向  $K$  覆盖问题优化模型,设计了一种分布式有向感知  $K$  覆盖控制算法,模型中每个节点均要维护一张包含自身及邻节点的各方向目标集合,当节点数较多时,算法时空复杂度都会很大。以上文献的共同之处是对监视区的环境建模过于理想,在实际应用中会遇到困难。事实上,视频感知区中除了障碍物之外,还会存在需要重点监视的区域。文献[4~11]中仅文献[9]考虑了监视区中存在障碍物的情况,而其余文献既未考虑有障碍物的存在,也未考虑有重点监视区的存在。

本文针对智慧城市对视频传感网络的现实需要,根据城市的实际环境,提出采用低功耗电池供电的无线视频传感器构建无线视频传感网络,满足城市管理对环境的可视需要。本文的主要特点有:1) 研究的监视区中存在障碍物,障碍物可为任意形状;2) 监视区中存在重点监视区,用权重值描述其重要程度;3) 建立视频传感器有向感知七元组模型,将节点的有效感知区描述为一个以节点为圆心、感知距离为半径的扇形区域;4) 在节点数目确定的情况下,能实现全局最优加权覆盖;5) 采用三

步法部署视频传感网络；6) 采用量子遗传算法搜索全局最优解，算法运算速度快，部署的视频传感网络覆盖率高。

## 2 覆盖问题描述与数学建模

本节分析视频传感网络涉及的监视区场景和传感器节点的属性，构造出能满足理论计算和工程实践需要的数学模型，为优化覆盖算法的设计奠定基础。

### 2.1 无线视频传感网监视区场景描述与数学模型

无线视频传感网在实际工程应用中，所覆盖的监视区环境复杂，情况各异。如图1所示，监视区中可能存在街道、楼宇、河流、桥梁、树木或其他物体，这些都会对视频传感网的运行效果造成影响。工程实践中需要根据监视区场景的实际情况，合理部署传感器节点，减少感知重叠区和感知盲区，提高传感网络的有效覆盖区域。

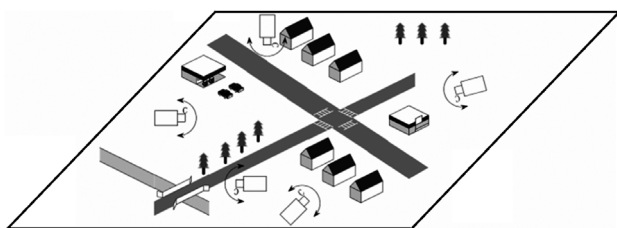


图1 无线视频传感网监视区场景

此外，监视区域中的不同部分，受重视的程度也可能有所不同。交通十字路口、车站、桥梁等都是人员较多、车流密集的地方，潜在的不安全因素较多，属于需要重点监控的区域，在部署视频传感器节点时需给予特别重视。为了用量子遗传算法求解传感器网络节点的最优部署方案，需要首先建立准确、简洁、合理的监视区数学模型。在工程实践中，由于监视区为街道、车站、广场等公共露天区域，传感器节点在垂直维度的相对差较小。因此，可将监视区近似看作一个平面。在不违背实际场景主要特征的前提下，为建立准确、简洁的数学模型，将实际监视区场景图投影为二维平面场景，进而对其进行量化处理。例如，图1中的监视区场景可投影描述为图2所示情况。

图2中，监视区中的楼宇、围墙、树木和其他影响传感器视野的物体统称为障碍物；交通十字路口、车站、桥梁等重要区域统称为重点监视区。

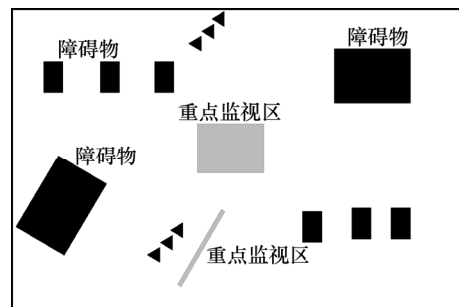


图2 无线视频传感网监视区平面

为完成传感器网络节点部署和优化覆盖控制，需对监视区进行数字化编码，构造出对应数学模型。综合考虑视频传感器的可视距离、视角、监视区的大小和监视精度等因素，经计算分析，并参考文献[9]的研究经验，确定以1 m为量化单位将监视区平面进行离散化处理，形成二维网格，如图3所示。对网格化的视频监视区进行离散采样编码，空旷区域编码为0，障碍物所在区域编码为1，重点监视区编码为2。采用二维矩阵存储编码值，矩阵的行列索引值代表该采样点在监视区中的相对坐标，称这样的矩阵为监视区描述矩阵，如式(1)所示。该数学模型结构简单，在计算机中容易实现，存取方便，并能进行分块操作，为算法设计带来诸多便利。反过来，给定一个描述矩阵，也很容易绘制出监视区的平面图，能方便进行数据的前期输出处理。

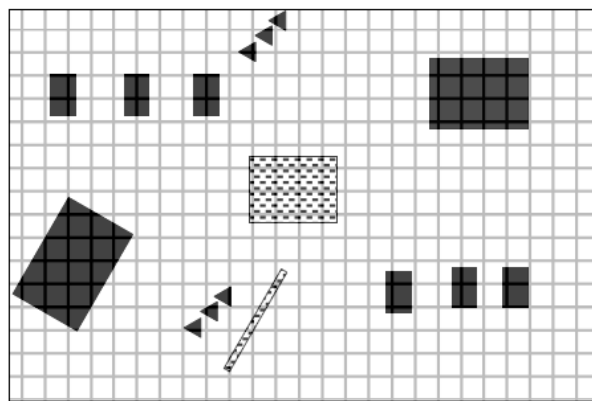


图3 网格化的无线视频传感网监视区

式(1)给出的监视区描述矩阵 $M$ 描述了一个长、宽分别为9 m的正方形区域。在该区域中，有3个障碍物，障碍物形状在可分辨精度下分别是2个三角形和一个长方形，一个三角形是直角边长为2 m的等腰直角三角形，另一个三角形是底边为3 m、腰为 $\sqrt{2}$  m的等腰三角形。监视区中存在一个边长为2 m的正方形的重点监视区域。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

从对描述矩阵  $M$  的分析可以看出, 1 m 采样精度对物体形态的描述似乎有些粗糙, 似乎不能准确描绘物体的投影外形。但考虑到街道、建筑物等实际物体的尺度大小, 1 m 的精度在工程应用中足够了。如果确实要更加精确, 只需提高采样精度即可, 但这会增加工程施工的难度和降低运算处理的速度, 需要权衡后进行折衷处理。

## 2.2 视频传感器节点的属性描述与数学建模

传感网的覆盖研究文献中, 大部分的研究对象是关于全向感知模型的。本文研究的视频传感网, 由于节点的成像器件大多是矩形的, 其有效感知范围类似于一个如图 4 所示的四棱锥, 需为其建立一种合适的有向感知模型<sup>[12]</sup>。

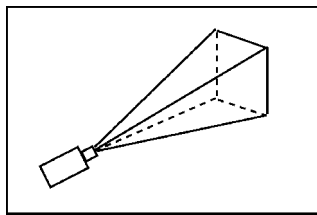


图4 视频传感器视野

在部署视频传感器时, 传感器镜头通常与水平面有一个夹角。在场景监视传感网中, 节点镜头与水平面的夹角通常不会超过  $\pm 5^\circ$ , 对传感器的视距影响在 70% 以内。为方便建模和处理, 本文将传感器与水平方向的夹角和传感器视距进行合并处理, 将传感器的有效感知范围投影在水平面上进行建模, 用七元组来描述视频传感器节点。

设  $S$  为监视区平面,  $S$  中的传感器节点集合为  $V$ ,  $V = \{v_i | i=1, 2, \dots, n\}$ ,  $n$  为  $S$  中节点的个数。传感器节点  $v_i$  定义为七元组,  $v_i = \langle x_i, y_i, \varphi_i, \theta_i, l_i, r_i, \alpha_i \rangle$ , 元素的含义如图 5 所示。其中  $x_i, y_i$  表示节点在  $S$  中的位置坐标,  $\varphi_i$  表示节点的方位角, 方位角定义为视频传感器镜头正对方向与监视区域  $S$  的  $x$  轴 (指向东方) 的夹角,  $\theta_i$  和  $l_i$  表示传感器节点的有效视

角和有效视距,  $r_i$  表示该传感器节点的通信半径,  $\alpha_i$  表示传感器节点镜头中心线与监视区平面  $S$  的夹角。

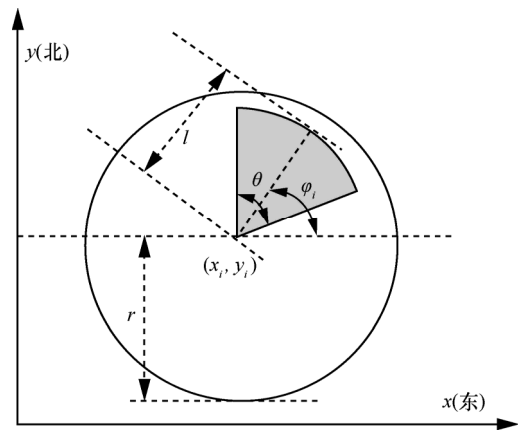


图5 视频传感器七元组模型

为便于工程应用,  $\alpha_i$  在本文的网络优化覆盖算法中不做考虑, 但在特征提取、模式识别和图像融合研究中需要作为重要参数加以考虑。此外, 本文仅考虑同构的视频传感器, 即传感器节点具有相同的有效视角、有效视距和通信半径。基于以上假设, 描述视频传感器节点的七元组可约化表示为

$$v_i = \langle x_i, y_i, \varphi_i, \theta_i, l_i, r_i, \alpha_i \rangle \quad (2)$$

对于某些多镜头组成的视频传感器, 有效感知视角为  $360^\circ$ , 成为了全向感知节点, 需要为其建立全向感知模型。在这种情况下, 只需将式(2)中的  $\theta$  值设为  $2\pi$ , 后述算法仍然有效。

## 2.3 无线视频传感网的覆盖问题分析

如果视频传感网的节点全都由式(2)描述的同构节点模型构成, 则称该传感网为同构视频传感网, 每个节点的最大覆盖面积相同。记节点  $v_i$  的覆盖面积为  $s_i$ , 则  $s_i = \theta l^2 / 2$ 。节点  $v_i$  的覆盖区记为  $C(v_i)$ , 令  $d_x = x - x_i$ ,  $d_y = y - y_i$ ,  $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ , 当  $d_y \neq 0$ , 记  $\omega = \arctan(d_x / d_y)$ , 当  $d_y = 0$  时, 记  $\omega = \pi / 2$ , 则

$$C(v_i) = \{P(x, y) | d \leq l, \varphi_i - \frac{\theta}{2} \leq \omega \leq \varphi_i + \frac{\theta}{2}, \varphi_i - \frac{\theta}{2} \leq \arcsin\left(\frac{d_y}{d}\right) \leq \varphi_i + \frac{\theta}{2}\} \quad (3)$$

由于监视区  $S$  中可能存在障碍物, 根据描述矩阵  $M$  的定义, 当  $M_{i,j}=1$  时, 表示该网格点周围有  $1 \text{ m}^2$

大小的障碍物,记障碍物所在区域为  $B$ ,则

$$B = \{P(x, y) | \langle x, y \rangle \in \{\langle i, j \rangle | M(i, j) = 1\}\} \quad (4)$$

如果有障碍物出现在节点  $v_i$  的覆盖区内,则称节点  $v_i$  有遮挡,遮挡区记为  $B(v_i)$ 。如果节点  $v_i$  的覆盖区与其他节点的覆盖区发生重叠,则将重叠部分区域记为  $C'(v_i)$ ,  $C'(v_i) = \bigcup_{j=1, j \neq i}^n ((C(v_i) - B(v_i)) \cap (C(v_j) - B(v_j)))$ 。节点  $v_i$  的有效覆盖区记为  $C''(v_i)$ ,  $C''(v_i) = C(v_i) - B(v_i) - C'(v_i)$ 。若将监视区中全体视频传感器节点的有效覆盖区域记为  $S'$ ,则

$$S' = \bigcup_{i=1}^n (C''(v_i) \cup C'(v_i)) \quad (5)$$

在部署视频传感器节点时,除考虑要使有效覆盖面积最大化外,还应考虑节点能否正常实现数据收发。根据式(2),节点  $v_i$  的通信半径为  $r$ ,它能与其周围节点进行通信的区域记为  $T(v_i)$ ,则

$$T(v_i) = \{P(x, y) | \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \leq r\} \quad (6)$$

综合以上定义,在对监视区的重要程度不做区分的情况下,视频传感网络对监视区  $S$  的覆盖率记为  $r(S)$ ,则

$$r(S) = \frac{\iint_{x,y} S'}{\iint_{x,y} (S - B)} \times 100\% \quad (7)$$

如果要区分监视区重要程度,需对重点监视区作加权处理,权值为  $w, w \in [1, N]$ ,  $N$  为权值上限,权值越大,监视区的重要程度越高。记区域  $S$  中的重点监视区为  $K$ ,则

$$K = \{P(x, y) | \langle x, y \rangle \in \{\langle i, j \rangle | M(i, j) = 2\}\} \quad (8)$$

视频传感网络对监视区  $S$  的加权覆盖率记为  $r'(S)$ ,则

$$r'(S) = \frac{\int_{x,y} (S' - (S' \cap K)) + \oint_K w(S' \cap K)}{\iint_{x,y} (S - B + (w-1)K)} \quad (9)$$

$r'(S)$  的理想极限值是 1。优化覆盖算法的目标就是使视频传感网络的覆盖率  $r'(S)$  达到最大。但由于覆盖判定问题计算量巨大,用普通数学方法求解难以凑效,本文采用量子遗传算法对解空间进行并行启发式搜索,取得了较好的效果。

## 2.4 优化覆盖问题的数学规划模型

用量子遗传算法对优化覆盖问题进行求解,需首先建立正确的数学规划模型。

设视频传感网部署在一个矩形区域  $S$ ,按 2.1 节提出的方法对其进行离散化处理,用描述矩阵  $M_{p \times q}$  存储量化编码。若实际工程项目中的监测区域不是矩形,则只需为该区域建立一个外接矩形,区域外与矩形间的部分“填充”为障碍物即可。设传感网络内共有  $n$  个节点,构成的节点集合  $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ ,描述第  $i$  个节点的七元组为  $\langle x_i, y_i, \phi_i, \theta_i, l, r, \alpha_i \rangle$ 。障碍物区域为  $B$ ,重点监视区域为  $K$ ,节点的有效覆盖区域为  $S'$ ,节点  $v_i$  的通信区域为  $T(v_i)$ 。视频传感器网络对监视区  $S$  的加权覆盖率为  $r'(S)$ ,求解目标是使  $r'(S)$  最大化。则数学规划模型为

$$\max(r'(S)) = \max \left( \frac{\iint_{x,y} (S' - (S' \cap K)) + \oint_K w(S' \cap K)}{\iint_{x,y} (S - B + (w-1)K)} \right) \quad (10)$$

s.t.

$$\forall i, \langle x_i, y_i \rangle \in S \text{ 且 } \langle x_i, y_i \rangle \notin B, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \forall i, \exists v_j, v_k, \langle x_j, y_j \rangle \in T(v_i), \langle x_k, y_k \rangle \in T(v_j), \\ & \langle x_k, y_k \rangle \notin T(v_i), j \neq i, k \neq j, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (12)$$

其中,约束关系式(11)保证传感器节点部署在监视区内的非障碍物所在区域,约束关系式(12)表明在任意节点的通信区域内至少存在另一中继节点,以此保证无孤立节点存在。

## 3 量子遗传算法

量子计算是利用量子态的叠加、纠缠以及测量导致的量子态塌缩等量子力学特性实现的计算。量子遗传算法是一种基于量子计算思想的智能优化算法,它利用量子信息中的一些概念来表征一个粒子,用量子比特的概率幅表示方式来编码染色体,使一个染色体具有多个模态的叠加,通过量子门的更新来完成种群的进化与搜索<sup>[13~17]</sup>。算法具有搜索空间大,搜索速度快,全局寻优能力强的特点。

### 3.1 量子遗传算法中的量子比特

量子计算中的量子比特  $|\psi\rangle$  可以用计算基态  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (13)$$

其中,  $\alpha$  和  $\beta$  是复数,  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。如果用 Bloch 球来描述量子比特, 可将式(13)改写为如下的几何表示形式<sup>[18]</sup>

$$|\psi\rangle = e^{i\gamma} \left( \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \right) \quad (14)$$

其中,  $\theta, \varphi, \gamma$  都是实数, 由于  $e^{i\gamma}$  不具有可观测量, 可将式(14)写为如下等价的有效形式

$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \quad (15)$$

在本文所使用的量子遗传算法中, 仅考虑概率幅为实数的情况, 即  $e^{i\varphi} = \pm 1$ , 从而  $\varphi = 0$  或  $\pi$ 。这样的量子比特在几何形态上就是位于 Bloch 球与  $XOZ$  平面相交的圆周上的向量, 则式(13)中的  $\alpha = \cos(\theta/2)$ ,  $\beta = \sin(\theta/2)$ 。

### 3.2 量子遗传算法中的染色体表示及其变异运算

量子遗传算法中, 记种群为  $Q(t)$ , 则  $Q(t) = \{q_1^t, q_2^t, \dots, q_n^t\}$ ,  $n$  表示种群的规模,  $q_i^t$  表示第  $t$  代的一条量子染色体。 $q_i^t$  的编码表示如下

$$q_i^t = \left( \begin{array}{c|c|c|c} \alpha_{i1}^t & \alpha_{i2}^t & \cdots & \alpha_{im}^t \\ \beta_{i1}^t & \beta_{i2}^t & \cdots & \beta_{im}^t \end{array} \right) \quad (16)$$

其中,  $m$  为染色体中的基因个数, 量子比特  $[\alpha_{ij}^t, \beta_{ij}^t]^T$  表示第  $t$  代中第  $i$  条染色体的第  $j$  个基因。

为了搜索到全局最优解, 需要对染色体进行更新, 主要方法是采用量子旋转门和量子非门对基因进行改造。量子旋转门适合于解决组合优化问题<sup>[13, 14]</sup>, 通常的量子旋转门是一个  $SU(2)$  算子, 定义如下

$$R(\vartheta) = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中,  $\vartheta$  是旋转角。染色体中的第  $j$  个基因  $[\alpha_{ij}^t, \beta_{ij}^t]^T$ , 在旋转算子的作用下, 可变换为新的基因

$$[\alpha_{ij}^{t'}, \beta_{ij}^{t'}]^T = [\alpha_{ij}^t \cos \vartheta - \beta_{ij}^t \sin \vartheta, \alpha_{ij}^t \sin \vartheta + \beta_{ij}^t \cos \vartheta]^T \quad (18)$$

旋转角  $\vartheta$  的幅值会对收敛速度产生影响, 如果幅值过大, 会导致早熟; 如果过小, 会使收敛速度变慢, 影响求解速度, 文献[14]建议  $\vartheta$  的取值区间为  $[0.001\pi, 0.05\pi]$ , 文献[15, 17]提出了一种对传统量子旋转门的改进方法, 该方法有助于跳出局部最

优, 避免出现早熟收敛现象。本文将这一思想引入覆盖优化算法中, 也将旋转门命名为  $H_\varepsilon$  门<sup>[15]</sup>, 规定  $H_\varepsilon$  门的作用过程如下

$$[\alpha_{ij}^{t'}, \beta_{ij}^{t'}]^T = H_\varepsilon(\alpha_{ij}^t, \beta_{ij}^t, \vartheta) \quad (19)$$

基因变异规则为<sup>[17]</sup>

- 1) 若  $|\alpha_{ij}^{t'}|^2 \leq \varepsilon$ , 则  $[\alpha_{ij}^{t'}, \beta_{ij}^{t'}]^T = [\sqrt{\varepsilon}, \sqrt{1-\varepsilon}]^T$
- 2) 若  $|\beta_{ij}^{t'}|^2 \leq \varepsilon$ , 则  $[\alpha_{ij}^{t'}, \beta_{ij}^{t'}]^T = [\sqrt{1-\varepsilon}, \sqrt{\varepsilon}]^T$
- 3) 否则,  $[\alpha_{ij}^{t'}, \beta_{ij}^{t'}]^T = [\alpha_{ij}^t, \beta_{ij}^t]^T$

其中,  $0 < \varepsilon < 1$ , 不同的  $\varepsilon$  值对算法的收敛性影响很大。当  $\varepsilon = 0$  时,  $H_\varepsilon$  门成为普通的  $R_\vartheta$  门; 当  $\varepsilon$  过大时, 个体的收敛趋势将会消失。根据文献[15]的研究成果, 本文的  $\varepsilon$  取值区间定为  $[0.005, 0.01]$ 。

为避免搜索过程中种群多样性的丢失, 防止早熟收敛和增大搜索最优位置的机会, 可引入变异算子来改变染色体基因的位置, 用量子非门即可完成这一功能。量子非门是 Pauli 算子之一, 定义如下

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\sigma_x [\alpha_{ij}^t, \beta_{ij}^t]^T = [\beta_{ij}^t, \alpha_{ij}^t]^T \quad (21)$$

### 3.3 量子遗传算法的基本步骤

在定义了量子比特、种群、染色体、基因、旋转算子和变异算子后, 基于这些数据结构和操作算子的量子遗传算法按如下基本步骤进行。

**Step1** 初始化量子遗传算法中的各个参数。

**Step2** 产生初始种群。

**Step3** 对种群中的所有个体进行测量, 得到一组解, 评估这组解的适应度, 记录下其中的最优个体作为下一代的演化目标值。

**Step4** 判断算法终止条件是否满足。如果满足, 则程序结束, 保留结果后退出; 否则继续。

**Step5** 根据当前的演化目标值, 运用旋转算子对种群个体进行更新, 获得子代种群。

**Step6** 用变异算子对染色体进行变异更新。

**Step7** 将父代种群中的最优解与当前的目标值作比较, 取适应度较高的个体作为下一次的演化目标值, 循环到 Step4。

## 4 无线视频传感网络优化覆盖算法

由于城市环境的特殊性和视频传感节点的有

向性,不能采用大量随机“撒播”的方式来部署视频传感网络。在第1节中已提出采用适合于智慧城市工程应用的视频传感网络部署方案,称为三步法方案。第一步运用 InitialDeployment 算法,以量子遗传算法计算出节点具有最大覆盖率的 NCP 部署方案,NCP 方案中规定了节点数量、各节点的位置坐标、方位角。位置坐标受监视区描述矩阵  $M$  约束,且对重点监视区作加权处理,方位角不受约束,方案能保证无孤立节点存在。第二步根据 NCP 方案,在 GPS 和罗盘引导下进行实地部署。在部署过程中,当遇到 NCP 方案拟定的节点坐标不方便部署的情况时,可就近选择合适位置进行部署,记录下异于 NCP 方案的节点位置和方位角,形成 MP 方案。第三步,对节点位置固定的无线视频传感网络,运用 OptimizedDeployment 算法,对节点方位角进行全局优化调整,形成位置固定的传感节点优化覆盖方案。本文研究的视频传感器节点不具备自主改变位置坐标的能力,改变位置需要人工干预。

#### 4.1 InitialDeployment 算法

根据式(10)~式(14)给出的数学规划模型,目标函数  $\max(r'(s))$  的解空间是一个  $n$  维空间,每一维又由一个三维向量构成,分别表示节点的  $x$  坐标,  $y$  坐标和方位角  $\varphi$ 。其中  $x, y$  为自然数,范围不大于监视区描述矩阵的行、列数。 $\varphi$  为实数,  $\varphi \in [0, 2\pi]$ , 精确到百分位。InitialDeployment 算法的目标是求解出满足约束条件的传感器节点部署方案,使总的网络节点覆盖率最大。

##### 4.1.1 染色体编码

对染色体进行合理编码是高效运行量子遗传算法的重要基础。在种群中,一条染色体表征解空间中的一个可行解。每条染色体由  $n$  个基因序列构成,每个基因序列描述一个传感器节点的位置坐标和方位角。基因序列中的量子比特数,由表数精度和问题规模决定。

在本算法的仿真程序中,描述  $x, y, \theta$  的量子编码均为 10 量子比特。在测量时,可分别得到 10 位的二进制 0、1 序列,但它们代表的含义不同。描述  $x, y$  的 0、1 序列代表一个整数,表数范围为 0~1023。描述  $\theta$  的 0、1 序列代表一个实数,前 3 位代表整数部分,表数范围为 0~7,后 7 位代表小数部分,表数范围为 0~0.9921875,整体表数范围为 0~7.9921875,包含了 0~ $2\pi$  这一区间。由于量子比特对  $\theta$  的离散表示,使方位角的精度存

在误差,最大误差值为 0.007 813 弧度,产生的覆盖面积最大相对误差仅为 0.75%。所以,因离散取值而产生的精度误差是可以接受的。

##### 4.1.2 适应度计算

适应度函数是选择和评估染色体的重要依据。为了得到式(10)中的最大值,采用传感器节点在监视区中的有效覆盖率作为适应度函数,如下所示。

$$C_g = \frac{\iint_{x,y} (S' - (S' \cap K)) + \oint_K w(S' \cap K)}{\iint_{x,y} (S - B + (w-1)K)} \quad (22)$$

直接计算式(22)中的  $C_g$  较为困难。根据 2.1 节中建立的数学模型,监视区被描述为离散网格,由描述矩阵  $M$  表示。因此,可把式(22)中各区域的面积积分计算,近似为对区域所围网格点数的求和运算,从而可得

$$C'_g = \frac{\sum P_{(S'-(S' \cap K))} + w \sum P_{(S' \cap K)}}{\sum P_{(S-B-K)} + w \sum P_k} \quad (23)$$

$C'_g$  可作为  $C_g$  很好的近似,因此,InitialDeployment 将  $C'_g$  作为量子遗传算法的适应度函数。

##### 4.1.3 InitialDeployment 算法步骤

**Step1** 根据监视区环境,初始化描述矩阵  $M$ ,生成障碍物集合  $B$  和重点监视区集合  $K$ 。

**Step2** 随机在非障碍物区“撒播”视频传感器,记录下各传感器节点的位置坐标和方位角。

**Step3** 在约束条件限制下,采用量子遗传算法求解出传感器节点集的合理位置坐标和方位角,得到一组最优解。

**Step4** 形成 NCP 方案,算法结束。

#### 4.2 OptimizedDeployment 算法

在 NCP 方案指导下进行实地部署,部署完成后,形成 MP 方案。此时无线视频传感网络已能正常工作,各节点已具备调整自身方位角的能力。但整个视频传感网络的覆盖率可能不是最优的,需要对其进行优化调整。OptimizedDeployment 算法的流程如下。

**Step1** sink 节点汇集各视频传感器节点的位置坐标和方位角信息。

**Step2** 检测是否存在死亡节点和孤立节点,如有则发出告警信息。

**Step3** 在约束条件限制下,sink 节点采用量子遗传算法求解出各节点合理的方位角,同时保证节点的位置坐标不变,得到一组最优解。

**Step4** sink 节点把计算结果分发给各视频传感器节点，算法结束。

各传感器节点根据发来的姿态参数，调整自己的方位角。一轮完整的优化调整过程结束。

4.3 OptimizedDeployment 算法的可扩展性

由于部署于城市的视频传感网中的节点位置通常不变，传感器网络的灵活性受到一些限制。但在一些特定的环境中，如果视频传感器具备了自主移动的能力，OptimizedDeployment 算法能够很容易地适应这种变化。只需在求解最优解时取消节点位置固定这一约束，增加节点移动消耗能量大小的决策判定，用坐标变化阈值加以约束，限制节点过度移动，采用大致相同的量子遗传算法，生成新的节点部署参数。sink 节点将新的位置坐标和方位角分发给各节点，各节点按新参数调整自己的位置坐标和方位角。一轮完整的优化调整过程结束。

5 仿真实验与优化效果分析

本文的优化覆盖算法采用 C++编程实现，场景仿真用 Matlab 实现。仿真实验模拟一个的监视区，监视区中有各种形状的障碍物，障碍物的数量和位置可根据实验要求任意调整。场景中可设置重点监视区域，区域的重要程度由区域权值决定。假设部署于监视区的传感器节点规格一致，即具有相同的视角、有效视距和通信半径。算法以 1 m 为单位对监视区进行离散化处理。图 6 是用于仿真实验的监视区场景。

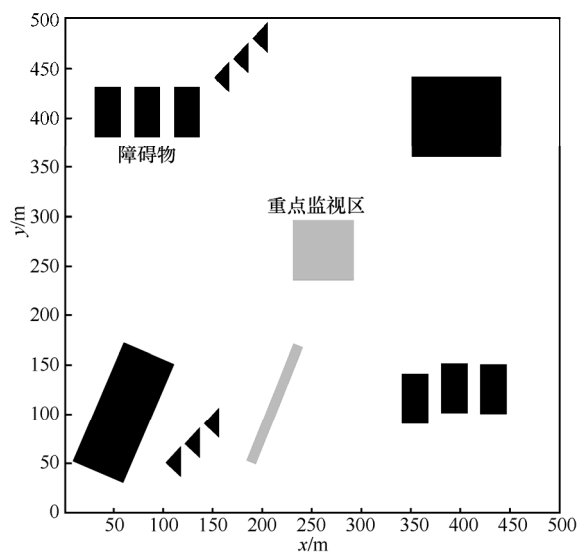


图 6 仿真模型中的监视区场景

为验证算法的有效性和正确性，在仿真实验，分别设定了 3 组监视区场景参数用例和 4 组视频传感器节点参数用例。监视区场景参数值设置如表 1 所示，其中第 1 组数据所描述的就是图 6 所示的监视区场景。视频传感器节点的参数值设置如表 2 所示。用表 1 和表 2 可组合出 12 种配置参数用例，分别交由优化覆盖算法进行处理，以测试算法的有效性和正确性。

表 1 监视区场景在仿真模型中的参数设置

仿真对象	仿真项目	第 1 组	第 2 组	第 3 组
监视区	区域范围/m	500 × 500	500 × 500	500 × 500
	区域面积/m <sup>2</sup>	250 000	250 000	250 000
	障碍物个数	14	10	10
	障碍物面积/m <sup>2</sup>	24 030	15 891	15 891
	重点监视区域个数	2	2	1
	重点监视区面积/m <sup>2</sup>	4 810	4 810	1 089
	重点监视区权值 w	2	3	5
	空旷区面积/m <sup>2</sup>	225 970	229 299	229 299
	离散化单位/m	1	1	1

表 2 视频传感器节点在仿真模型中的参数设置

仿真对象	仿真项目	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
视频传感器节点	有效视距/m	40	40	40	30
	通信半径/m	100	100	100	100
	节点视角	$\pi/3$	$\pi/3$	$\pi/2$	$2\pi/3$
	覆盖面积/m <sup>2</sup>	837	837	1 256	942
	节点数/个	50	200	300	400

5.1 覆盖优化仿真效果展示

通过分别对 12 种配置参数进行仿真实验，算法均获得了满意的求解结果。为了展示算法的良好性能，用表 1 和表 2 中的第 1 组参数组合配置进行仿真展示，由于这个组合的参数节点数较少，便于读者直观对比。当算法优化迭代到 800 代时，就已取得较好的效果。下面以图表和数据展示仿真过程和效果。首先，将 50 个视频传感器节点随机“撒播”在监视区中，此时不能保证节点能进行有效通信。初始部署的传感器节点分布如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，有些节点的感知区域存在重叠，有部分节点已处于节点的有效通信半径范围之外，属于孤立节点，不能接入传感网中。



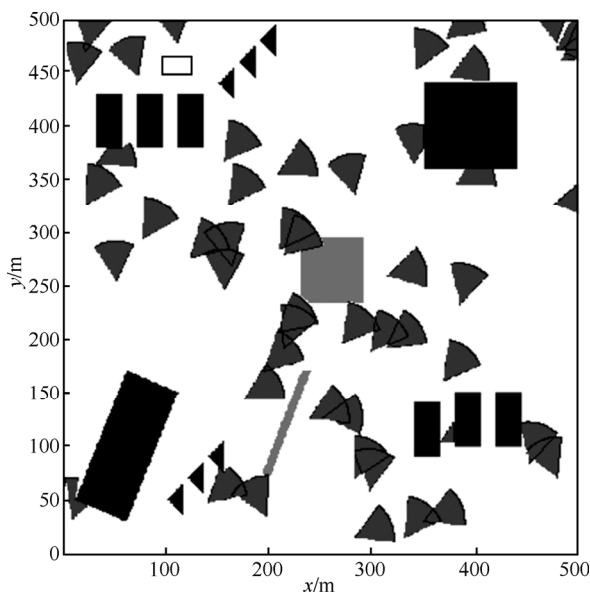


图7 仿真模型中的传感器节点分布(第0代)

优化算法继续运行,图8是优化迭代到300代时的部署情况。从图8可以直观看出,已经完全消除了孤立节点,满足了全体节点入网的基本条件。与此同时,传感网的总有效覆盖率有明显提高。

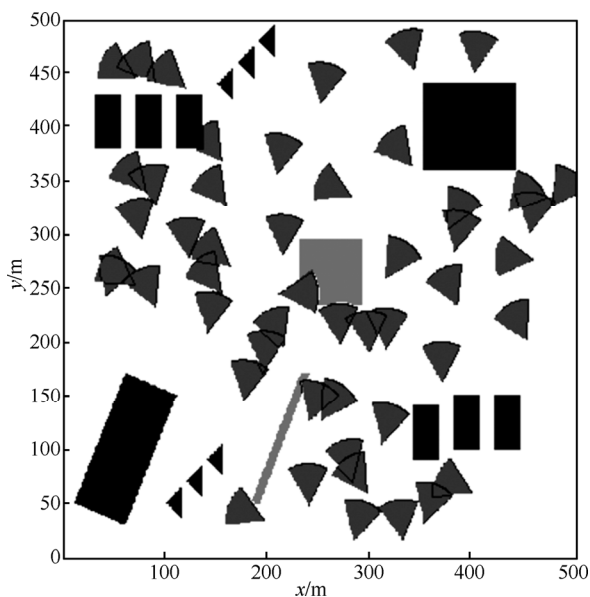


图8 仿真模型中的传感器节点分布(第300代)

当迭代到第600代时,输出的传感器分布结果如图9所示,覆盖率得到进一步优化。

图10是优化迭代到800代时的节点分布。从图10中可以看出,重叠的感知区域进一步减少,重点覆盖区域的覆盖面积得到进一步提高。仅从输出的效果图来直观评判算法优劣还不足为凭,具体的量化分析在5.2节中给出。

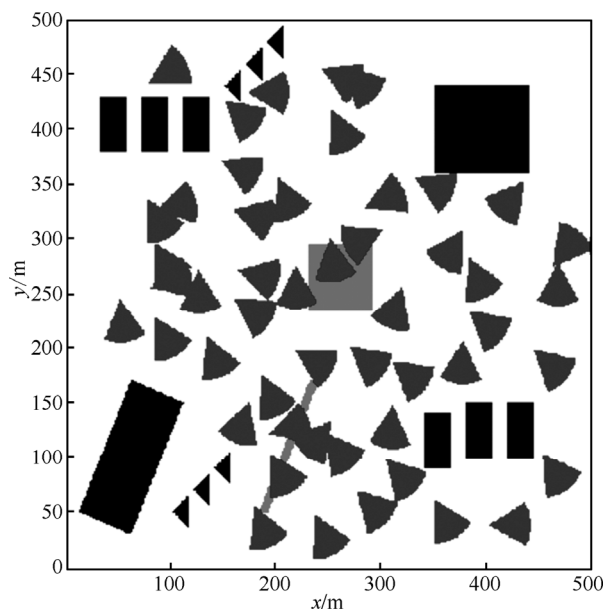


图9 仿真模型中的传感器节点分布(第600代)

## 5.2 优化覆盖效果分析

为了考察算法对监视区优化覆盖的效果,需对其做定量比较分析。考察算法优劣,不能简单地通过绝对覆盖率大小来评判。因为绝对覆盖率是和节点数量成正相关的,当节点数量超过某一数值后,绝对覆盖率可达100%,但付出的成本却会很高。因此,本文采用相对比较的方法来评判算法的优化覆盖效果,即用尽量少的节点,达到尽量大的覆盖率。为此,引入2个极限理想参数:理想覆盖率和理想加权覆盖率。视频传感网的理想覆盖率是指在理想态下,传感网的覆盖率上限。比如:监视区面积为 $2\,500\text{ m}^2$ ,部署有10个节点,每个节点的覆盖面积是 $200\text{ m}^2$ ,则10个节点总覆盖面积为 $2\,000\text{ m}^2$ ,理想覆盖率为80%(总覆盖面积除以监视区面积)。那么,实际覆盖率越接近80%,算法的效果就越好。视频传感网的理想加权覆盖率是指在理想态下,传感网的理想加权覆盖率上限。当节点覆盖面积之和超过监视区面积时,理想覆盖率和理想加权覆盖率将超过100%。此时,理论上讲就造成了节点的浪费。但如果要得到更高的绝对覆盖率,多投放一些冗余节点是必须的选择。

对于5.1节中展示的仿真实验结果,由表1和表2中的第1组数据组合,可计算出理想覆盖率和理想加权覆盖率。在仿真模型中,经模拟计算,取平均值 $840\text{ m}^2$ 作为单个节点的覆盖面积,与连续区域计算出的 $837.8\text{ m}^2$ 相比,相对误差仅为0.26%。

在仿真模型中投放 50 个节点，加权值  $w=2$  时，可计算出理想覆盖率为 18.59%，理想加权覆盖率为 20.28%。表 3 给出图 7~图 9 中的节点实际覆盖率和实际加权覆盖率与理想值的比率关系。

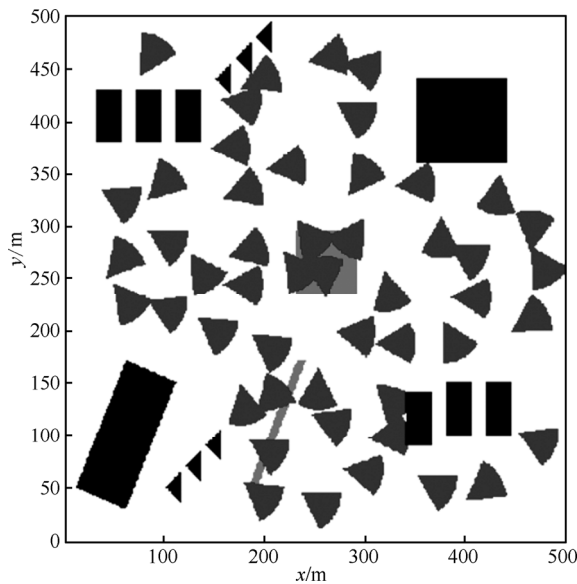


图 10 仿真模型中的传感器节点分布（第 800 代）

从表 3 中可以看出，当迭代到 800 代时，节点覆盖率可达到理想极限值的 98.90%，加权覆盖率可达理想极限值的 95.06%。由于加权覆盖率离理想值还有 4 个相对百分点，算法看起来不是特别优秀，但这并不是算法本身的问题。主要原因是节点的可视范围形状与重点监视区形状无法实现无缝无重叠覆盖，从理论上讲就无法向理想极限值靠近了。从这 2 个数据与极限值的对比情况来看，算法的效果已经很好。

表 3 节点覆盖率与理想值的对比

节点个数	迭代次数	实际覆盖率	与理想覆盖率之比	实际加权覆盖率	与理想加权覆盖率之比
50	0	14.57%	78.39%	14.51%	71.56%
	300	17.06%	91.75%	17.00%	83.84%
	600	18.19%	97.86%	18.62%	91.80%
	800	18.39%	98.90%	19.28%	95.06%

为了考察算法在节点数不同时对覆盖率的提高情况，再次选择表 1 和表 2 中的第 1 组数据构成仿真环境，并将节点数从 50 个相继改为 100 个、200 个和 250 个，在迭代 300 代、600 代和 800 代时输出结果，得到的覆盖率和加权覆盖率对比数据如图 11 和图 12 所示。

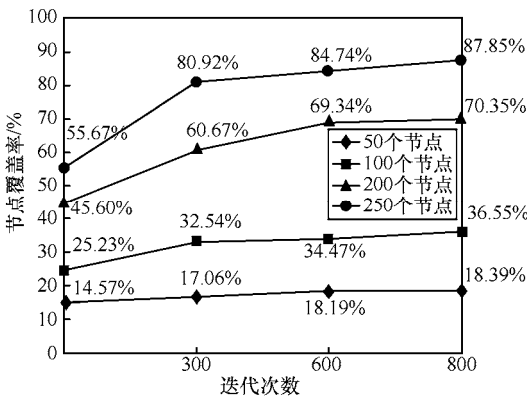


图 11 节点数不同时的覆盖率

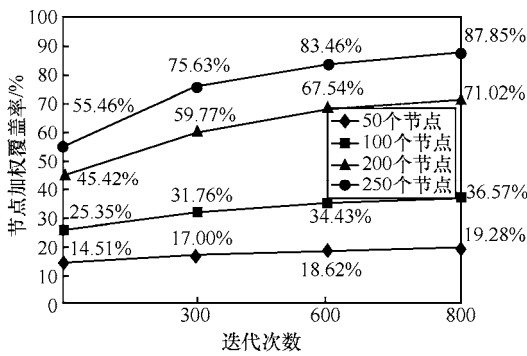


图 12 节点数不同时的加权覆盖率

从图 11 和图 12 可以看出，算法在前 300 次的迭代中，节点覆盖率和节点加权覆盖率提高速度较快，再往后提高速度就减缓，接近理想值时，就很难再提高了。在表 1 和表 2 第 1 组数据限定的仿真环境下，表 4 给出节点数目不同时的理想覆盖率和理想加权覆盖率。

表 4 不同节点数的理想覆盖率

节点个数	理想覆盖率	理想加权覆盖率
50	18.59%	20.28%
100	37.17%	38.48%
200	74.35%	74.88%
250	92.93%	93.08%
300	111.52%	111.28%

结合图 11 和表 4 分析可知，当迭代运算到 800 代时，100 个节点的覆盖率可达理想值的 98.33%，200 个节点的覆盖率可达理想值的 94.62%，250 个节点的覆盖率可达理想值的 94.53%。

算法在处理表 1 和表 2 组合出的另外 11 种参数配置时，也取得了类似的满意效果，限于篇幅，本文省略了其仿真效果展示。

## 6 结束语

本文以智慧城市无线视频传感网络建设为背景,提出一种基于量子遗传算法的网络优化覆盖算法。优化覆盖算法面向复杂的监视区场景,监视区中存在形状各异的障碍物,区域面积大,各区域的重要程度不同。论文以二维离散网格模型表示监视区场景,用编码描述矩阵表示监视区域,用七元组描述有向视频传感器,采用严格的数学推导得出了问题的数学规划模型。优化覆盖算法由 InitialDeployment 和 OptimizedDeployment 算法 2 部分组成,以获得最大有效覆盖率的网络部署方案为求解目标。采用量子遗传算法搜索解空间,通过合理编码染色体,优化量子旋转门参数,使算法的运算速度快,收敛性好。引入理想覆盖率和理想加权覆盖率 2 个极限值,采用相对比较法评判算法优劣。仿真实验和数据分析表明,算法获得的方案能很好逼近理想极限值。在传感器节点数给定的情况下,算法能获得最大的有效覆盖率,适合用于实际工程项目。

在后续的研究工作中,文献[19]论述的若干热点问题,如三维场景覆盖、QoS 体系与保障方法等也备受关注,相关的研究工作有待进一步开展。

## 参考文献:

- [1] RAHIMI M, AHMADIAN S, *et al.* Magic of numbers in networks of wireless image sensors[EB/OL]. <https://escholarship.org/uc/item/9bk26563>.
- [2] DIMAKAS N, KATSAROS D, *et al.* Cooperative caching in wireless multimedia sensor networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2008, 13(3): 337-356.
- [3] AKYILDIZ I, MELODIA T, *et al.* A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 926-960.
- [4] KAR K, BANERJEE S. Node placement for connected coverage in sensor networks[A]. *Proc of the Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks[C]*. 2003:50-52.
- [5] LIN F, CHIU P. A near-optimal sensor placement algorithm to achieve complete coverage/discrimination in sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(1):43-45.
- [6] MEGERIAN S, KOUSHANFAR F, *et al.* Worst and best-case coverage in sensor networks[J]. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 2005, 4(1):84-92.
- [7] FAN G, WANG R, *et al.* Coverage-guaranteed sensor node deployment strategies for wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2010, 10(3): 2064-2087.
- [8] 任彦,张思东,张宏科. 无线传感器网络中覆盖控制理论与算法[J]. *软件学报*, 2006, 17(3):422-433.  
REN Y, ZHANG S D, ZHANG H K. Theories and algorithms of coverage control for wireless sensor networks[J]. *Chinese Journal of Software*, 2006, 17(3):422-433.
- [9] 蒋一波,王万良等. 视频传感器网络中无盲区监视优化[J]. *软件学报*, 2012, 23(2):310-322.  
JIANG Y B, WANG W L, *et al.* Coverage optimization of occlu-

- sion-free surveillance for video sensor networks[J]. *Chinese Journal of Software*, 2012, 23(2):310-322.
- [10] 张美燕,蔡文郁. 无线视频传感器网络有向感知  $K$  覆盖控制算法研究[J]. *传感技术学报*, 2013, 26(5):728-733.  
ZHANG M Y, CAI W Y. Research on directional  $K$ -coverage control algorithm for wireless video sensor networks[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(5):728-733.
- [11] ZHAO D, MA H, LIU L. Analysis for heterogeneous coverage problem in multimedia sensor networks[A]. *IEEE International Conference on Communications[C]*. 2011:1-5.
- [12] MA H, LIU Y. Some problems of directional sensor networks[J]. *International Journal of Sensor Networks*, 2007, 2(1): 44-52.
- [13] HAN K H, KIM J H. Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinational optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computing*, 2002, 6(6):580-593.
- [14] HAN K H, KIM J H. On setting the parameters of quantum-inspired evolutionary algorithm for practical application[A]. *Congress on Evolutionary Computation[C]*. 2003. 178-194.
- [15] HAN K H, KIM J H. Quantum-inspired evolutionary algorithms with a new termination criterion,  $H_g$  gate, and two-phase scheme[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(2): 156-169.
- [16] LI P C, LI S Y. Quantum-inspired evolutionary algorithm for continuous spaces optimization based on bloch coordinates of qubits[J]. *Neurocomputing*, 2008, 72(1/3):581-591.
- [17] 张小锋, 睢贵芳等. 一种改进的量子旋转门量子遗传算法[J]. *计算机工程*, 2013, 39(4):234-238.  
ZHANG X F, SUI G F, *et al.* An improved quantum genetic algorithm of quantum revolving gate[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(4): 234-238.
- [18] NIELSEN M A, CHUANG I L. *Quantum Computation and Quantum Information*[M]. Cambridge University Press, 2000.
- [19] 马华东,陶丹. 多媒体传感网络及其研究进展[J]. *软件学报*, 2006, 17(9):2013-2028.  
MA H D, TAO D. Multimedia sensor network and its research progresses[J]. *Chinese Journal of Software*, 2006, 17(9):2013-2028.

## 作者简介:



樊富有(1974-),男,四川宜宾人,电子科技大学博士生,宜宾学院副教授,主要研究方向为量子计算与量子信息、量子可逆逻辑电路综合。

杨国武(1966-),男,湖北阳新人,博士,电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为量子计算与量子信息、形式化验证和算法优化。

乐千桀(1976-),女,四川成都人,电子科技大学博士生,主要研究方向为算法优化。

吕凤毛(1990-),男,重庆人,电子科技大学博士生,主要研究方向为统计机器学习。

赵超(1986-),男,河北邯郸人,电子科技大学博士生,主要研究方向为量子计算与量子通信。