

# 移动通信网络站址优化设计

## 摘要

随着移动通信技术规模飞速发展,通信的带宽越来越大,但基站的能覆盖范围越来越小,使得覆盖同样的区域,需要的基站数量变的更多。如何根据现网天线的覆盖情况,使得在特定点上新建基站后,尽可能的解决现网的弱覆盖区域是一个很棘手的问题。本文将通过解决以下问题,为企业提供合适的规划方案

针对问题一,要求解决在给定弱覆盖区域以及现有基站的条件下,进行站址规划,使得弱覆盖点总业务量的 90%被规划基站覆盖。首先,用 **K-mean 聚类分析** 进行数据处理,将数据分成 20 类,不断去除其中业务量最低的类别,最终得到业务量为原业务量的 **90.82%**,将处理后的弱覆盖点数据带入 **0-1 型整数规划模型**,得出了需要**总成本 25378**,其中需要建立 **198 个微基站**和 **2158 个宏基站**的结论。

针对问题二,要求在基站覆盖范围随角度变化线性减小的条件下,求出最优站址及其扇区角度使业务覆盖率最高。首先,用**典型分析**的方法,用 3 种典型的扇形覆盖方式  $X(60^\circ, 60^\circ)$ ,  $Y(45^\circ, 45^\circ)$ ,  $Z(45^\circ, 155^\circ)$  大致代表所有的可能,构建**最大覆盖面积模型**,通过现代优化算法中的**遗传算法**提升运行速度,得到宏基站中有 1080 个用 X 型扇区覆盖法,360 个用 Y 型扇区覆盖法,98 个用 Z 型扇区覆盖法,微基站中有 98 个用 X 型,50 个用 Y 型,50 个用 Z 型,且此时的业务量完成率为 82.78%。

针对问题三,要求解决将范围低于 20 的弱信号区聚为一类,并尽量降低时间复杂度。首先,把所有距离小于等于 20 的点之间连一条边,此操作的时间复杂度为  $O(n^2)$ ,然后使用图论算法中的**并查集算法**将点进行聚类,此操作花费  $O(\log n)$  时间。得到以 20 为界限划分距离可以将弱信号区划分成 6 类,总时间复杂度为  $O(n^2)$  的结论。

本文最后还对模型进行了误差分析,对模型的优缺点进行了客观的评价,对模型中基站成本与覆盖范围进行了灵敏度分析,最后对模型进行了横向和纵向的推广。

**关键词** 网络站址优化, K-mean 聚类分析, 0-1 型整数规划模型, 遗传算法, 并查集算法

## 目录

一、 问题重述 .....	1
1.1 背景知识 .....	1
1.2 相关数据 .....	1
1.3 具体问题 .....	1
1.3.1 问题一 .....	1
1.3.2 问题二 .....	1
1.3.3 问题三 .....	2
二、 问题分析 .....	2
2.1 研究现状综述 .....	2
2.2 问题的总体分析和解题思路 .....	3
2.3 对问题的具体分析 .....	3
2.3.1 对问题一的分析 .....	3
2.3.2 对问题二的具体分析 .....	3
2.3.3 对问题三的具体分析 .....	4
三、 模型假设 .....	4
四、 符号说明 .....	4
五、 模型的建立与求解 .....	5
5.1 问题一的分析与求解 .....	5
5.1.1 对问题的分析 .....	5
5.1.2 数据处理 .....	6
5.1.3 0-1 型整数规划模型的建立 .....	7
5.2 问题二的分析和求解 .....	10
5.2.1 对问题的分析 .....	10
5.2.2 最大覆盖区域优化模型的建立 .....	11
5.2.3 基于遗传算法优化运算速度 <sup>[4]</sup> .....	15
5.3 问题三的分析与求解 .....	17
5.3.1 对问题的分析 .....	17
5.3.2 基于并查集算法聚类模型的建立 .....	18

---

六、 模型的分析 .....	19
6.1 误差分析 .....	19
6.2 灵敏度分析 .....	20
七、 模型的评价和推广 .....	20
7.1 模型的优点 .....	20
7.2 模型的缺点 .....	21
7.3 模型的推广 .....	21
7.3.1 横向推广 .....	21
7.3.2 纵向推广 .....	21
八、 参考文献 .....	21
九、 附录 .....	22

---

## 一、问题重述

### 1.1 背景知识

移动通信技术规模飞速发展，运营规模也越来越大，导致带来的通信网络越来越复杂。随着 5G 的发展，通信的带宽越来越大，但基站的能覆盖范围越来越小，使得覆盖同样的区域，需要的基站数量变的更多。另外，基站和天线的种类也变多了。这就使得通信网络的规划特别是站址选择的问题变得越来越复杂。移动通信事业，在国民经济、国家安全、社会进步和人民的生活中起着越来越重要的作用，然而做好移动通信的基站建设是移动通信事业的基础，这使得各国都十分重视移动基站的建设。

### 1.2 相关数据

1. 关于区域中的弱覆盖点的信息，包括每个点的坐标和业务量。（见附件 1）
2. 关于现网基站的坐标。（见附件 2）

### 1.3 具体问题

#### 1.3.1 问题一

根据给定的信息和附件中的数据，进行站址规划，使得弱覆盖点总业务量的 90% 被规划基站覆盖。给出选择的站址的坐标以及每个站址选择的基站种类。

#### 1.3.2 问题二

在实际情况下，每个站并不是完全的圆形覆盖，而是每个站上有 3 个扇区，每个扇区指向一个方向。每个扇区在主方向上覆盖范围最大，在主方向左右 60 度的范围内可以覆盖，覆盖范围按线性逐渐缩小，在 60 度的时候，覆盖范围为主方向覆盖范围的一半。超过 60 度，则无法被该扇区覆盖。考虑每个站的任意 2 个扇区的主方向之间的夹角不能小于 45 度，仍然考虑上一问中的基站成本等其他条件，问在最优站址和扇区角度的条件下，新建站能否覆盖弱覆盖点总业务量的 90%。若能，给出最优站址和扇区角度的结果；否则，给出最优站址和扇区角度的结果和最多可以覆盖的弱覆盖点的总业务量的比例。

---

### 1.3.3 问题三

实际工作中,为了更好的解决弱覆盖问题,需要对弱覆盖点进行区域聚类,把距离近的弱覆盖点聚成一类,可以得到弱覆盖区域,这样可以对不同的弱覆盖区域分开管理使得可以更好的解决弱覆盖问题。若 2 个弱覆盖点的距离不大于 20,则这 2 个弱覆盖点应聚为一类,并且考虑聚类性质具有传递性,即若点 A 和点 B 是一类的,点 B 和点 C 是一类的,则点 A、B 和 C 都是一类的。试对所有弱覆盖点进行聚类,要求聚类所用方法的总时间复杂度尽量低。

## 二、问题分析

### 2.1 研究现状综述

刘娅汐<sup>[1]</sup>针对现有覆盖计算和覆盖优化的计算复杂度和算法效率等技术痛点问题,设计了一系列覆盖计算和覆盖优化相关的高效算法,侧重于考虑低复杂度算法设计和适应实际移动通信网络场景。

何流<sup>[2]</sup>以城乡发展规划对移动通信网络的发展要求和网络覆盖目标为牵引,结合目前移动通信基站站址规划覆盖技术要求,建立城乡发展规划与通信基站站址规划技术融合的规划方法和规划导则。

李文超<sup>[3]</sup>对智慧路灯系统选址进行了深入研究,提出了衡量系统融合度的可量化指标,聚焦在 5G 微基站选址的问题,基于多系统融合的角度,建立了 5G 微基站选址模型。并选取不同类型案例,运用改进后的离散二进制粒子群算法进行模型仿真求解,并验证了模型的有效性,通过对比分析仿真结果,得到覆盖率约束与系统融合度呈负相关关系的客观规律。

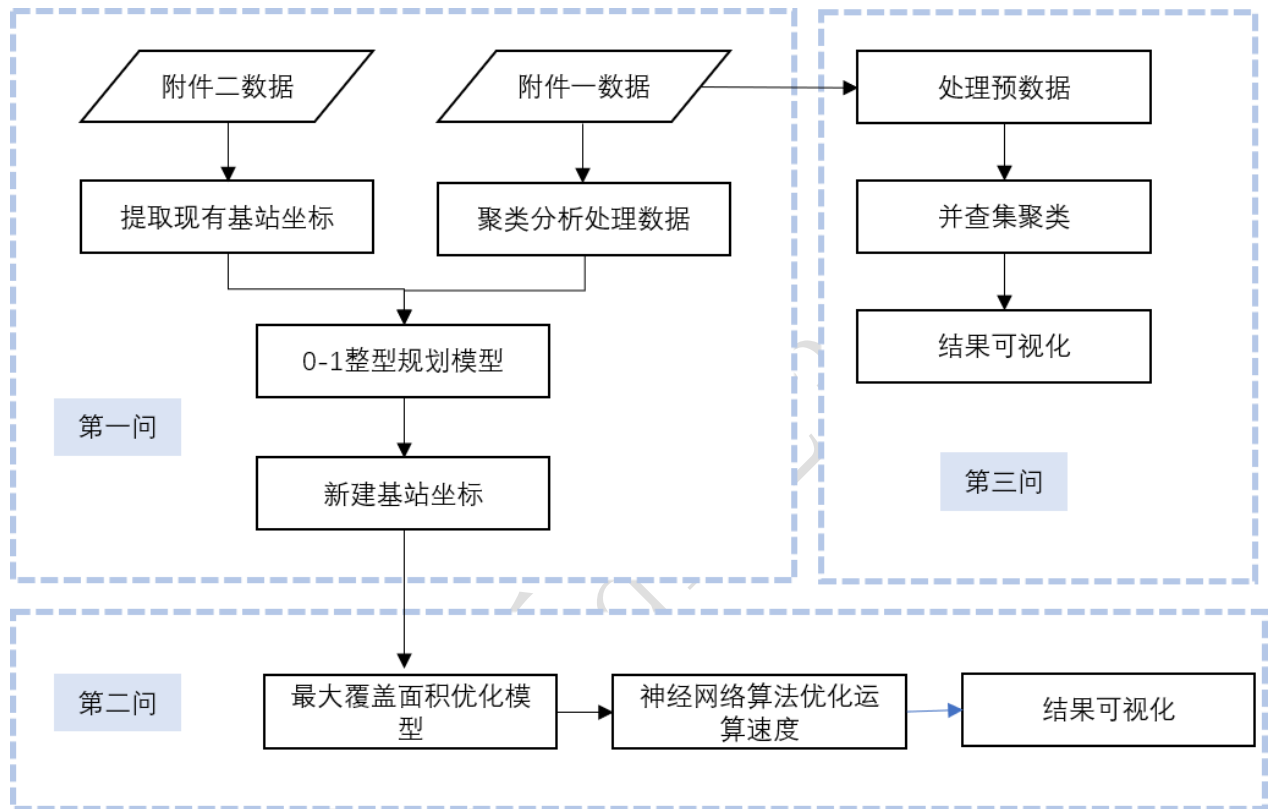
张雷阐述移动通信基站建设要考虑的行业环境,移动通信基站的建设策略分析,用户的勘察、合理方案、景观化基站、环保基站,从而基站建设与生态环境的发展相结合。

目前有大量关于移动通信网络站址优化问题的文献,但现有文献或多或少都有不足之处,需加以完善。

## 2.2 问题的总体分析和解题思路

本文主要通信网络站址优化问题，针对此问题，我们团队将对此分成 3 个问题进行研究。根据本文的研究思路，先给出整体的思路流程图，如图 1

图 1 总体思路流程图



## 2.3 对问题的具体分析

### 2.3.1 对问题一的分析

根据已知条件，在  $2500 \times 2500$  的方格内建立新的基站，使至少百分之 90 的业务量能被覆盖。由于直接去除业务量低的点不一定能减少所需基站的个数，故我们选择去除某一块区域的弱覆盖点。我们团队首先通过 K-mean 聚类分析按距离将弱信号点分成 20 组点集，剔除其中业务量最低的弱信号点集，若业务量低于百分之 90 则取消剔除，否则继续递归。将处理过后的点集带入整型线性规划模型，以最低成本为目标函数，基站有效范围覆盖全部点集、基站间的距离限制作为约束，得到选择的站址的坐标。

### 2.3.2 对问题二的具体分析

由于覆盖区域发生改变，原有的基站建立方法可能无法再覆盖所有的弱覆盖区域，我们通过构建最大覆盖区域优化模型，用几种典型的摆放方式，将扇区角度变化的动态问题变成有限个扇区形状选择问题，并将问题一中得到的基站位置和类别带入最大覆盖面积优化模型中，通过遗传算法提高运算速度，得到最优站址和相应扇区，并计算此时基站覆盖的业务量。

### 2.3.3 对问题三的具体分析

要求将范围低于 20 的弱信号区聚为一类，类似广度优先算法中岛屿数量问题，要求时间复杂度尽可能低，考虑到纯暴力求解时间复杂度为  $O(n^2)$ ，而一个算法的时间复杂度超过  $O(n^3)$  后就处于不可接受的地步了。可以先预处理所有点，把所有距离小于等于 20 的点之间连一条边，花费  $O(n^2)$  时间；然后使用并查集将点进行聚类，花费  $O(\log n)$  时间。总时间复杂度为  $O(n^2)$ 。

## 三、模型假设

- 1、所有基站的性能都严格遵从标定性能
- 2、假设地区环境对建立基站成本的影响忽略不计
- 3、在建设期间无人员迁移情况
- 4、地理因素对基站的覆盖范围影响可以忽略不计

## 四、符号说明

序号	符号	符号说明	单位
1	$A_{ij}$	$(i,j)$ 位置上是否有宏基站	
2	$B_{ij}$	$(i,j)$ 位置上是否有微基站	

序号	符号	符号说明	单位
3	$C_{ij}$	( $i,j$ ) 位置上是否有旧基站	
4	$D_{ij}$	( $i,j$ ) 位置是否是弱信号点	
5	$E_{ij}$	( $i,j$ ) 位置是否是被覆盖	
6	$AX_{ij}$	宏基站是否扇区最大面积覆盖法	
7	$AY_{ij}$	宏基站是否采用针对方式覆盖法	
8	$AZ_{ij}$	宏基站是否两头兼顾型覆盖法	
9	$R_a$	宏基站的覆盖长度	
10	$R_b$	微基站的覆盖长度	
11	$K$	宏基站与微基站的成本比例	

## 五、模型的建立与求解

### 5.1 问题一的分析与求解

#### 5.1.1 对问题的分析

根据已知条件，要在  $2500 \times 2500$  的网格上，建立新的基站，使至少百分之 90 的业务量能被覆盖。由于直接去除业务量低的点不一定能减少所需基站的个数，我们选择去除某一块区域的弱覆盖点。我们团队首先通过 K-mean 聚类分析按距离将弱信号点分成 20 组点集，剔除其中业务量最低的弱信号点集，当业务量低于百分之 90 则取消剔除，进行下一步运算，否则继续递归。将处理过后的弱覆盖区域数据带入整型线性规划模型，



以最低成本为目标函数，基站有效范围覆盖全部弱覆盖区域、基站间的距离限制作为约束条件，得到选择的站址的坐标和种类。总体思路如图 2。

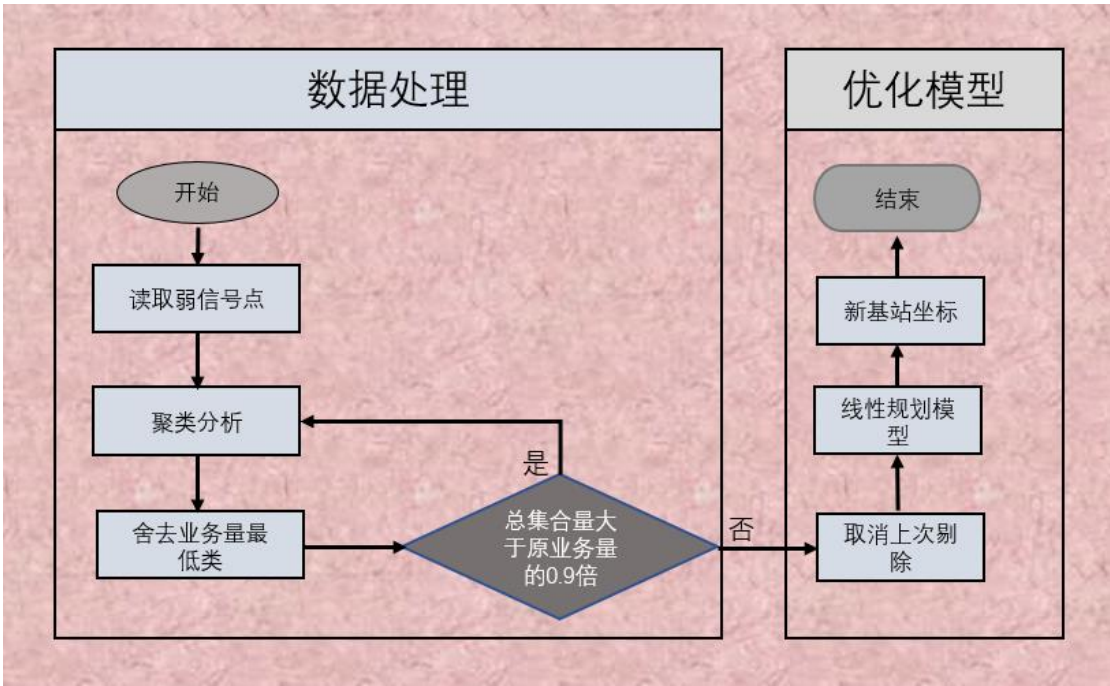


图 2 问题一的总体思路流程图

### 5.1.2 数据处理

#### (1) K-means 聚类算法原理

K-means 算法是基于划分方法的聚类算法，是无监督学习的一种典型代表，其基本原理大致可以概括为如下四步：

- 指定  $K$  个初始质心，结果将输出  $K$  个簇
- 对剩余的每个样本点，计他们到各个质心的欧式距离，并将其归入到距离最小的质心所在的簇
- 重复计算各个簇的质心所在位置，得到新的质心
- 重复第二、第三步直到质心和簇的位置不发生变化时或者到达最大迭代次数时就可以得到分类的结果

#### (2) 基于 K-means 聚类算法处理后的结果

通过 K-mean 聚类分析按距离将弱信号点分成 20 组点集，剔除其中业务量最低的弱信号点集，若业务量低于百分之 90 则取消剔除，否则继续递归。处理前后的结果如图 3 所示，处理后弱信号点业务量为原业务量的 90.82%。

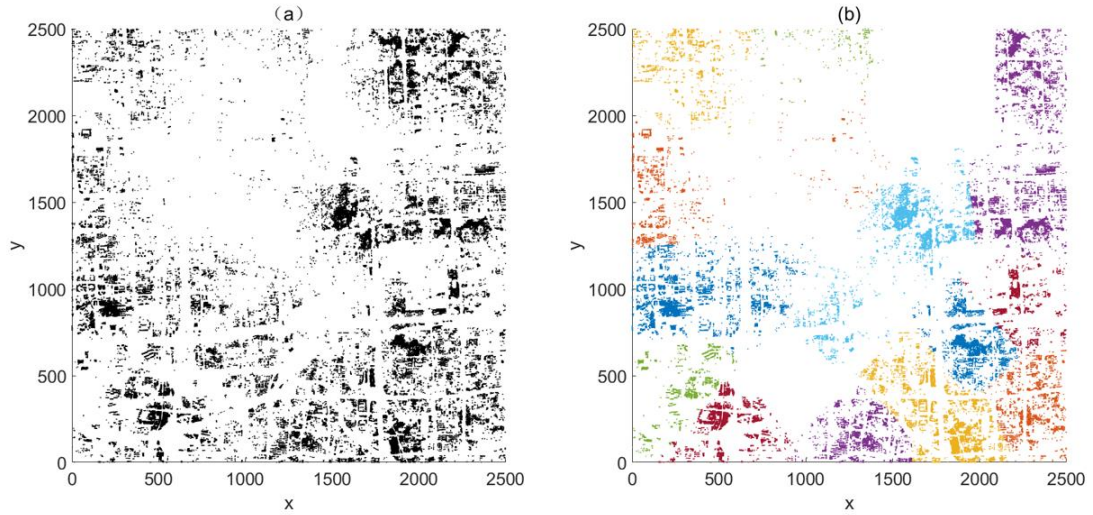


图 3 弱覆盖点 (a) 原始数据 (b) 经过聚类处理后的数据

分析上图，通过 K-mean 聚类分析法，原数据的右上方的部分弱覆盖区被剔除，但由于该地区的业务量很少，因此经过聚类分析处理后的数据满足题目要求的 90% 业务量，并且通过该数据处理方法能够有效的减少所需基站数量，节约建设成本。因此我们认为，使用 K-mean 聚类分析法处理数据是可行的。

### 5.1.3 0-1 型整数规划模型的建立

本问的目标函数是总的成本  $z$  最小，即

$$\min z = 10 \sum_{i=1}^{2500} \sum_{j=1}^{2500} A_{ij} + \sum_{i=1}^{2500} \sum_{j=1}^{2500} B_{ij} \quad (5-1)$$

其中， $A$ 、 $B$  是 0-1 变量，定义如下

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置上建立宏基站} \\ 0, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置上不建立宏基站} \end{cases}$$

$$B_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置上建立微基站} \\ 0, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置上不建立微基站} \end{cases}$$

考虑到基站间距离的约束条件，每个基站间距不能小于 10，由于我们将网格划分成  $2500 \times 2500$  个离散点，构建距离模型如图 4。

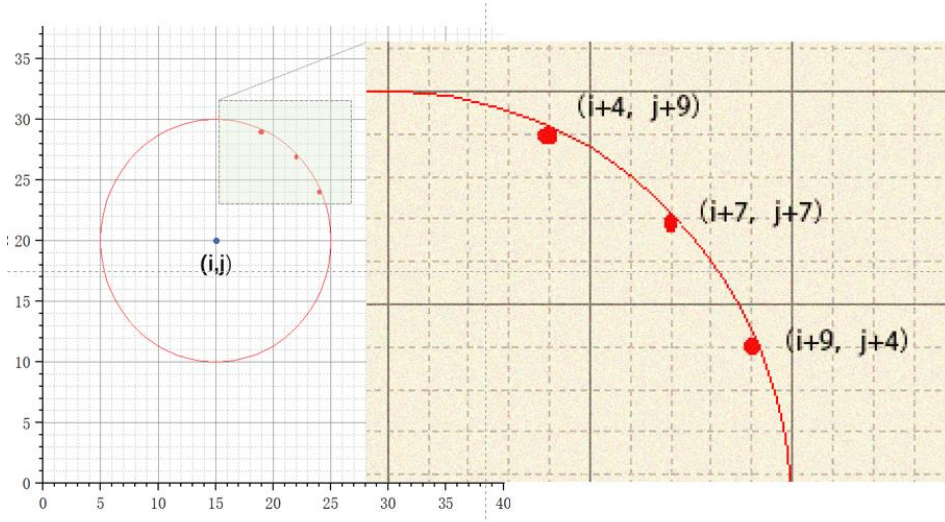


图 4 半径为 10 时覆盖的基点坐标

只需依次判断在半径为 10 范围内的离散点处是否存在基站，若存在基站，则待定点  $(i,j)$  不可建造新基站，根据图 4，得到约束公式

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{ij} + B_{i(j+10)} + C_{i(j+10)} \leq 1 \\ A_{ij} + \sum_{x=1}^4 A_{(i+x)(j+9)} + \sum_{x=-4}^{-1} A_{(i+x)(j+9)} + \sum_{x=-4}^4 B_{(i+x)(j+9)} + \sum_{x=-4}^4 C_{(i+x)(j+9)} \leq 1 \\ \dots\dots\dots \\ A_{ij} + \sum_{x=1}^9 A_{(i+x)j} + \sum_{x=-9}^{-1} A_{(i+x)j} + \sum_{x=-9}^9 B_{(i+x)j} + \sum_{x=-9}^9 C_{(i+x)j} \leq 1 \\ \dots\dots\dots \\ A_{ij} + \sum_{x=1}^4 A_{(i+x)(j-9)} + \sum_{x=-4}^{-1} A_{(i+x)(j-9)} + \sum_{x=-4}^4 B_{(i+x)(j-9)} + \sum_{x=-4}^4 C_{(i+x)(j-9)} \leq 1 \\ A_{ij} + B_{i(j-10)} + C_{i(j-10)} \leq 1 \\ A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \end{array} \right. \quad (5-2)$$

其中，C 是 0-1 变量，定义如下

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置有旧基站} \\ 0, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置没有旧基站} \end{cases}$$

考虑到需要覆盖所有弱信号点，A 基站的距离能够覆盖 30 的区域，B 基站能覆盖

10 区域，构建半径为 30 的距离模型，如图 5。

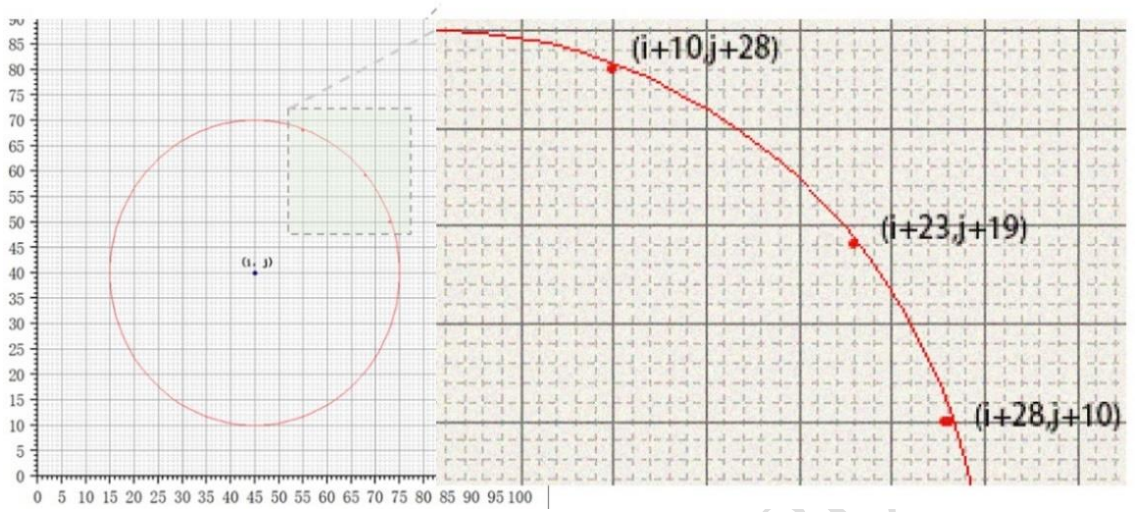


图 5 半径为 30 时覆盖的基点坐标

定义变量  $x_i$  满足如下条件

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{ij} + A_{i(j+30)} = x_1 \\ \dots\dots\dots \\ D_{ij} + \sum_{x=-28}^{28} A_{(i+x)(j+10)} + B_{i(j+10)} = x_{20} \\ \dots\dots\dots \\ A_{ij} + \sum_{x=-30}^{30} A_{(i+x)j} + \sum_{x=-10}^{10} B_{(i+x)j} = x_{30} \\ \dots\dots\dots \\ D_{ij} + A_{i(j-30)} = x_{60} \\ A_{ij}, D_{ij}, B_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \end{array} \right. \quad (5-3)$$

其中，D 是 0-1 变量，定义如下

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置不是弱信号点} \\ 0, & \text{第 } (i,j) \text{ 位置是弱信号点} \end{cases}$$

结合图 4 和图 5 得到约束条件

$$\sum_{i=1}^{60} x_i \geq 1 \quad (5-4)$$



综合上述约束条件，写出相应代码（见附件 代码.rar），在 Matlab 上运行，得到新建基站结果如图 6

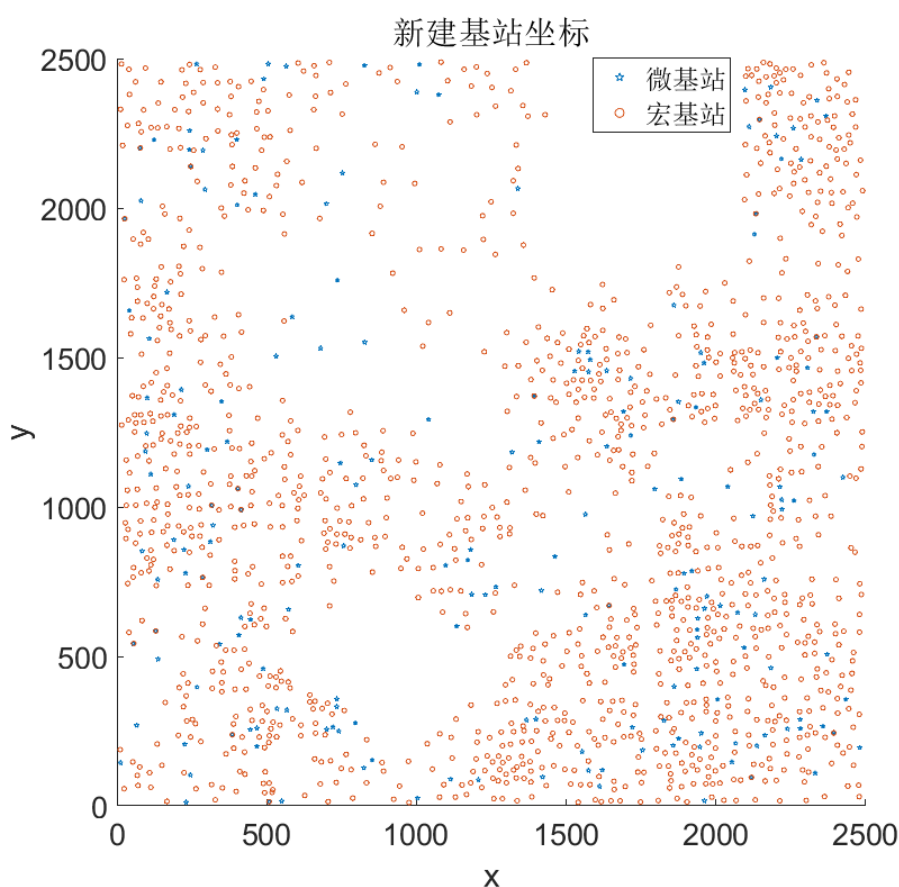


图 6 新建基站分布情况

其中宏基站个数为 2158 个，微基站的个数为 198 个，进一步分析可知，由于宏微基站覆盖面积是微基站的 9 倍，且每个基站间有不能小于 10 的距离限制，因此在弱覆盖点密集的地区，宏基站的性价比要比微基站高的多，而在弱覆盖点稀疏的区域，微基站有更高的性价比。

## 5.2 问题二的分析和求解

### 5.2.1 对问题的分析

由于覆盖区域发生改变，原有的基站建立方法可能无法再覆盖所有的弱覆盖区域，

我们通过构建覆盖区域模型，用几种典型的摆放方式，将扇区角度变化的动态问题变成最优扇区形状选择问题，在最优覆盖率的扇区摆放方式下计算是否满足最大业务量。总体思路如图 7。

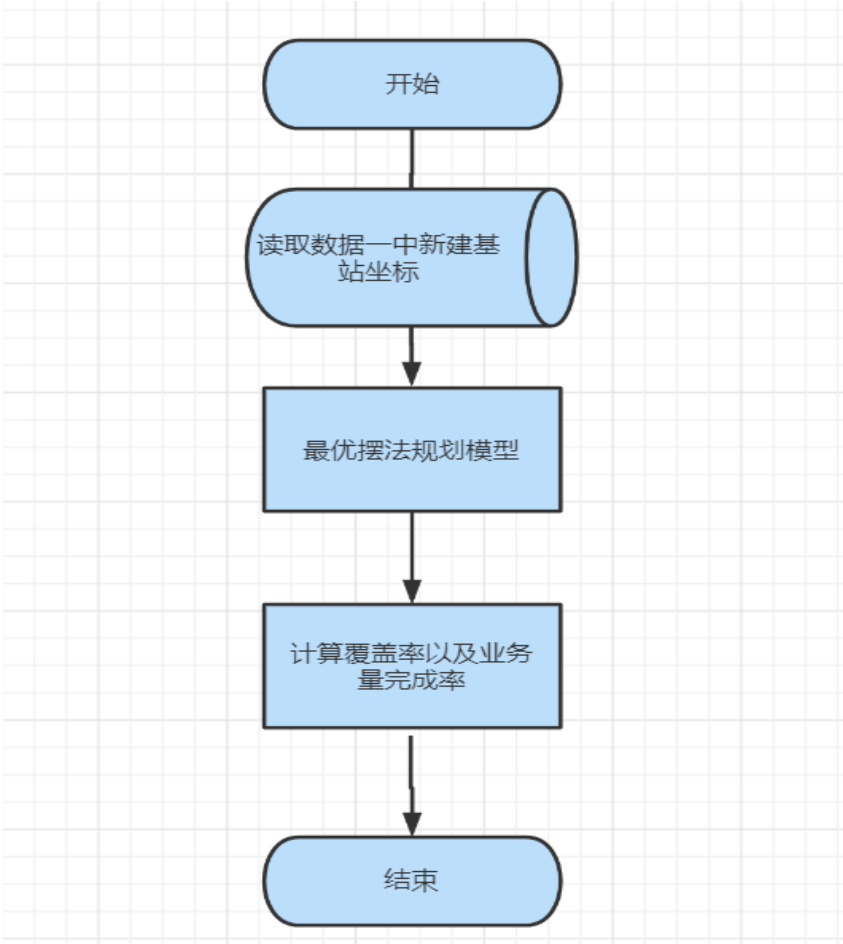


图 7 问题二思路流程图

### 5.2.2 最大覆盖区域优化模型的建立

在理想的情况下 3 个扇区的主方向夹角为  $120^\circ$ ，此时覆盖面积为一个完整的圆，但由于实际情况下每个扇区在主方向左右  $60^\circ$  度的覆盖范围按线性逐渐缩小，在  $60^\circ$  度的时候，覆盖范围为主方向覆盖一半，为了便于建模，我们使用 PPT 等软件绘制出几种典型的覆盖情况。在实际情况下单个扇形覆盖范围如图 8 (a)。考虑到一个基站拥有三个扇区，每个扇形主方向之间不能小于  $45^\circ$ ，故我们可以得到 3 种典型的扇区摆法：最大面积覆盖法 X ( $60^\circ, 60^\circ$ ) 如图 8 (b)，针对方式覆盖法 Y ( $45^\circ, 45^\circ$ ) 如图 8 (c)，

两头兼顾型覆盖法 Z (45°, 155°) 如图 8 (d)。

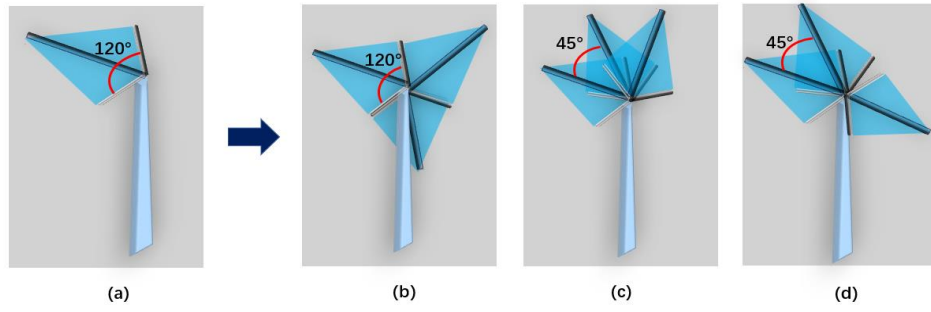


图 8 基站覆盖典型特例 (a) 单个扇区覆盖范围 (b) X 型覆盖 (c) Y 型覆盖 (d) Z 型覆盖  
基于上图，我们构建二维平面覆盖模型，宏基站使用 X 型覆盖法覆盖范围如图 9

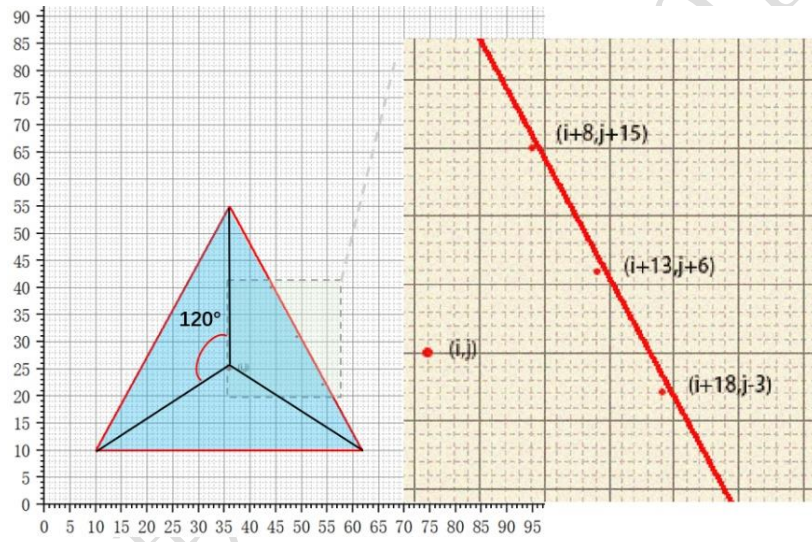


图 9 X 型覆盖法宏基站覆盖的基点坐标

用公式表达其覆盖面积为

$$\begin{aligned}
 & \text{if } XA_{ij}=1 \\
 & \left\{ \begin{aligned} & E_{i(j+30)} = 1 \\ & \dots\dots\dots \\ & \prod_{x=-8}^8 E_{(i-x)(j+15)} = 1 \\ & \dots\dots\dots \\ & \prod_{x=-18}^{18} E_{(i-x)(j+3)} = 1 \\ & \dots\dots\dots \\ & \prod_{x=-26}^{26} E_{(i-x)(j-15)} = 1 \\ & E_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \end{aligned} \right. \quad (5-5)
 \end{aligned}$$

其中， $E_{ij}$  为 0-1 整型变量，定义如下

$$E_{ij} = \begin{cases} 1, \text{位置 } (i, j) \text{ 被信号覆盖} \\ 0, \text{位置 } (i, j) \text{ 没有被信号覆盖} \end{cases}$$

当宏基站使用 Y 型覆盖法覆盖范围如图 10

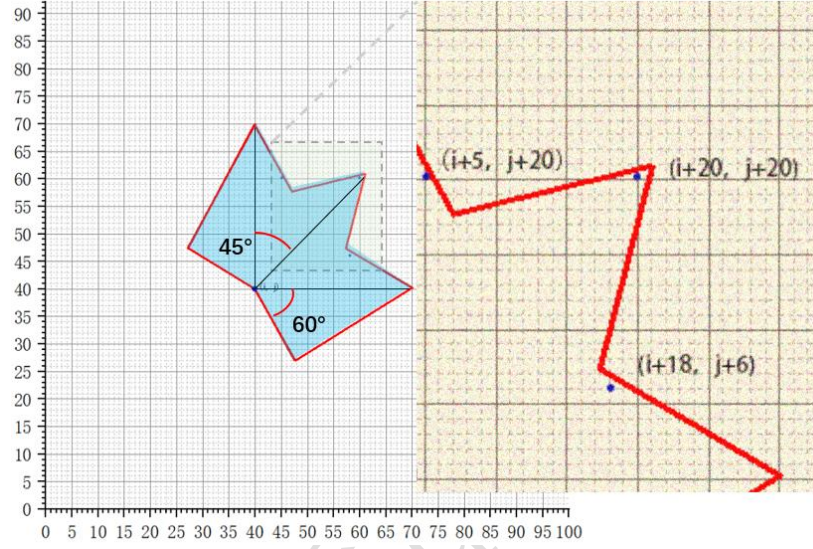


图 10 Y 型覆盖法宏基站覆盖的基点坐标

用公式表达其覆盖面积为

$$\begin{aligned} & \text{if } YA_{ij}=1 \\ & \left\{ \begin{aligned} & E_{i(j+30)} = 1 \\ & \dots\dots\dots \\ & \left[ \prod_{x=-8}^8 E_{(i-x)(j+15)} \right] E_{(i+20)(j+20)} = 1 \\ & \dots\dots\dots \\ & \prod_{x=-10}^{18} E_{(i+x)(j+6)} = 1 \\ & \dots\dots\dots \\ & E_{(i+7)(j-13)} = 1 \\ & E_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (5-6)$$



当宏基站使用 Y 型覆盖法覆盖范围如

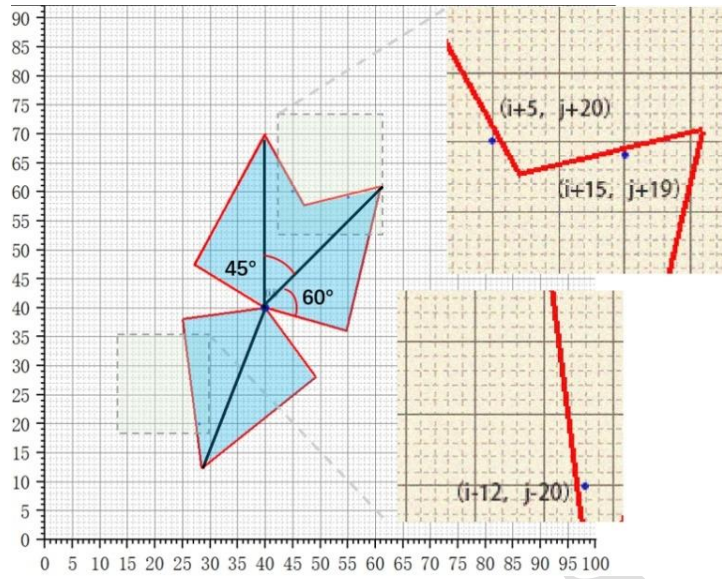


图 11 Z 型覆盖法宏基站覆盖的基点坐标

用公式表达其覆盖面积为

$$\begin{cases} \text{if } ZA_{ij}=1 \\ E_{i(j+30)}=1 \\ \dots\dots\dots \\ \prod_{x=-5}^5 E_{(i-x)(j+15)}=1 \\ \dots\dots\dots \\ \prod_{x=0}^{16} E_{(i-x)j}=1 \\ \dots\dots\dots \\ E_{(i-11)(j-27)}=1 \\ E_{ij}=0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (5-7)$$

微基站可以由此类推得到。

本问的模板函数是使覆盖面积最大，即

$$\max \sum_{i=0}^{2500} \sum_{j=0}^{2500} E_{ij} \quad (5-8)$$

考虑每个基站的扇区有且只有一种摆放方式，即

$$XA_{ij} + XB_{ij} + YA_{ij} + YB_{ij} + ZA_{ij} + ZB_{ij} = 1 \quad (5-9)$$

考虑只有对应坐标位置存在基站才有扇形区域，即

$$XA_{ij} + XB_{ij} + YA_{ij} + YB_{ij} + ZA_{ij} + ZB_{ij} + A_{ij} + B_{ij} = 2 \quad (5-10)$$

综上所述，建立非线性整数规划模型

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=0}^{2500} \sum_{j=0}^{2500} E_{ij} \\ & \begin{cases} XA_{ij} + XB_{ij} + YA_{ij} + YB_{ij} + ZA_{ij} + ZB_{ij} = 1 \\ XA_{ij} + XB_{ij} + YA_{ij} + YB_{ij} + ZA_{ij} + ZB_{ij} + A_{ij} + B_{ij} = 2 \\ \text{if } XA_{ij}=1 \\ \dots\dots\dots \\ \text{if } YA_{ij}=1 \\ \dots\dots\dots \\ \text{if } YB_{ij}=1 \\ \dots\dots\dots \\ \text{if } ZB_{ij}=1 \\ \dots\dots\dots \end{cases} \end{aligned} \quad (5-11)$$

### 5.2.3 基于遗传算法优化运算速度<sup>[4]</sup>

本题需要在遍历所有网格的基础上再回溯扇区摆法，时间复杂度是第一问的 3 倍，我们考虑用现代优化算法中的遗传算法来降低时间复杂度，遗传算法的基本实现方法如下：

- (1) 根据具体问题确定可行解域，确定一种编码方法，能用数值串或字符串表示可行解域的每一解。
- (2) 对每一解应有一个度量好坏的依据，它用一函数表示，叫做适应度函数，一般由目标函数构成。
- (3) 确定进化参数群体规模  $M$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$ 、进化终止条件

本问题选取种群大小  $M=50$ ，最大代数  $G=1000$ ，交叉率  $p_c=1$ ，变异率  $p_m=0.1$

遗传算法的运行流程图如下

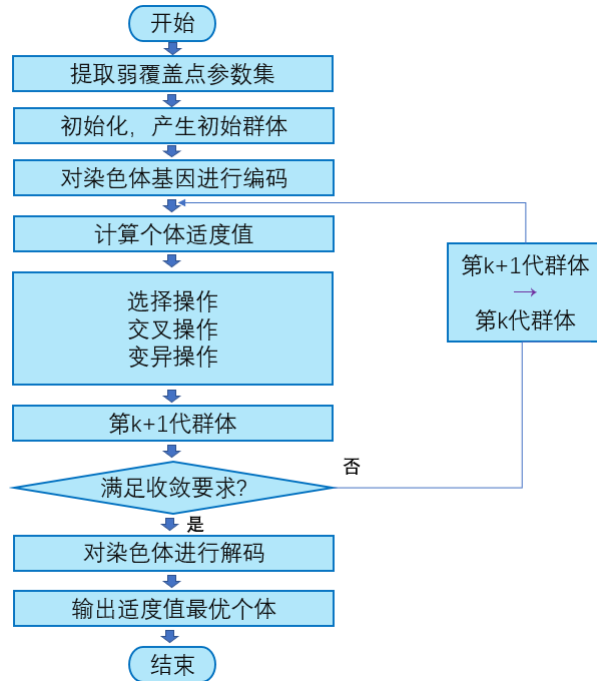


图 12 基于神经网络的最大覆盖面积模型流程图

在 Matlab 上运行代码（见附件 代码.rar），结果如图 13 各基站扇区摆法，其中宏基站有 1080 个扇区按 X 型覆盖，360 个扇区按 Y 型覆盖，98 个扇区按 Z 型覆盖。微基站有 98 个扇区按 X 型覆盖，50 个扇区按 Y 型覆盖，50 个扇区按 Z 型覆盖。其中，业务量覆盖率为 82.38%

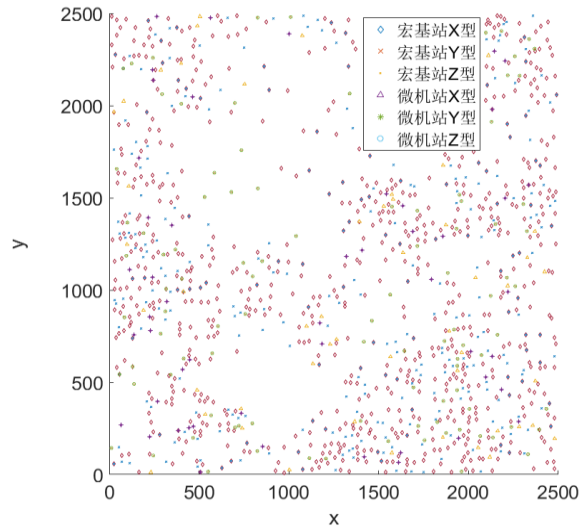


图 13 各基站扇区摆法

分析上图，由与目标函数是覆盖面积最大，因此大部分基站是以最大面积覆盖法 X 进行扇区摆放，而业务量覆盖率从 90.28%降低到 82.38%也属于可接受范围。

### 5.3 问题三的分析 and 求解

#### 5.3.1 对问题的分析

本问要求将范围低于 10 的弱信号区聚为一类，类似广度优先算法中岛屿数量问题，要求时间复杂度尽可能低，考虑到纯暴力求解时间复杂度为  $O(n^3)$ ，而一个算法的时间复杂度超过  $O(n^3)$  后就处于不可接受的地步了。可以先预处理所有点，把所有距离小于等于 20 的点之间连一条边，花费  $O(n^2)$  时间；然后使用图论算法中的并查集算法将点进行聚类，花费  $O(\log n)$  时间。总时间复杂度为  $O(n^2)$ 。具体流程图如图

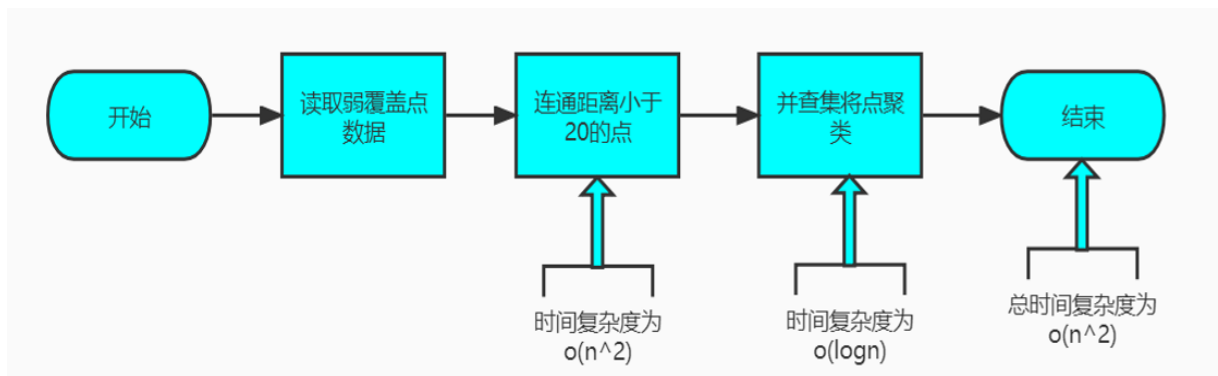


图 14 问题三总体思路流程图

### 5.3.2 基于并查集算法聚类模型的建立

并查集是一种树型的数据结构，用于处理一些不交集（Disjoint Sets）的合并及查询问题。并查集的主要操作有

- ✧ 初始化(init)
- ✧ 查询(find)
- ✧ 合并(union)

在 Matlab 上运行代码（见附件 代码.rar），得到结果如图 15

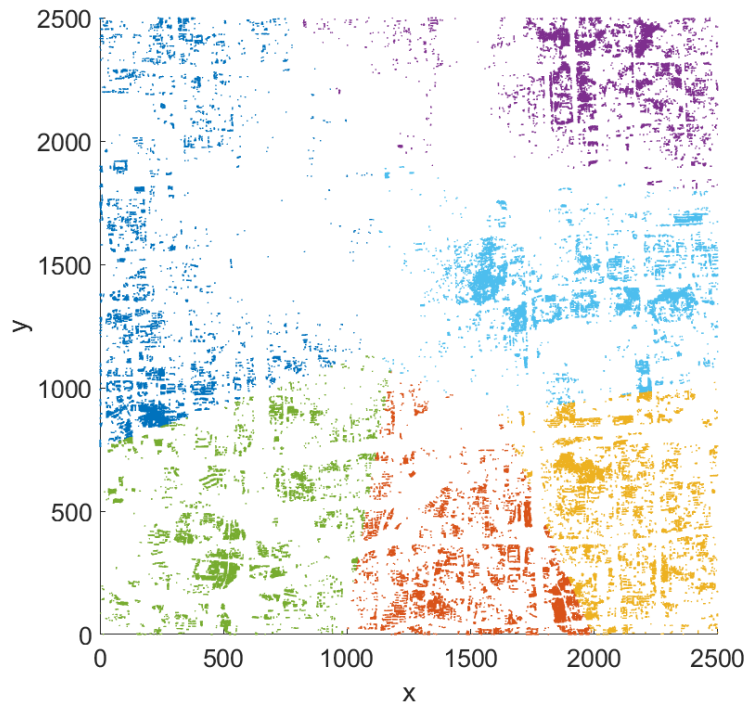


图 15 并查集聚类后的结果

由图 15 可知，经过并查集聚类后，弱覆盖点被分成 6 个区域，通过分区域管理可以大幅度减少数据运算量，能够有效的节省运算时间，符合实际分区管理情况。

## 六、模型的分析

### 6.1 误差分析

在问题一中，我们用 K-mean 聚类分析将弱信号点分成了 20 份，并逐渐去掉业务量最低类，忽略了可能存在区域重叠情况，如果考虑边缘位置优先，可以提高优化结果的准确性。

在问题二中，我们仅考虑了几种典型的扇区摆法，如果能够多考虑几种摆法，会使结论更准确。不过计算时间也会大幅增加。

在问题二中，遗传算法具有很强大的全局搜索能力，通常是可以找到很好的解，但是并不能保证能找到全局最优解。为了克服这个问题，需要使用不同初始种群进行多次遗传算法运行。

## 6.2 灵敏度分析

由于地理环境的影响，不同地区建立基站的成本以及基站的有效覆盖范围可能不同，我们通过改变基站的有效覆盖范围以及各基站的成本，观察这些变量对我们优化模型结果的影响，得到结果如表 1

表 1  $R_a$  为宏基站的最大覆盖长度， $R_b$  为微基站的最大覆盖长度， $K$  为二者价格比例

$(R_a, R_b, K)$	宏基站个数	微基站个数
$(30, 10, 10)$	2158	198
$(30, 10, 15)$	2149	307
$(25, 10, 10)$	2155	217
$(30, 5, 10)$	2158	202

对表 1 结果进行分析可知，当基站的性能和价位在 $\pm 5\%$ 范围内波动时，宏基站的个数稳定在 2150 个左右，当宏基站与微基站的价格比例升高时，微基站的性价比提高，所需数量大幅度增加，符合实际情况，当微基站性能降低时，宏基站的个数不增加，微基站数量增加，分析原因得出，微基站是布置在弱覆盖点稀疏的区域，因此尽管微基站性能下降，但在弱覆盖点稀疏地区，微基站的性价比依旧高于宏基站，这点也符合实际情况。

综上，我们的模型具有一定的稳定性，同时也符合实际情况，具有很高的可信度。

## 七、模型的评价和推广

### 7.1 模型的优点

- 本文对问题的求解有合理的猜想、假设、计算。

- 本文采用覆盖区域模型，准确的得到了每个数据的覆盖情况。
- 图文并茂。有流程图，结果图，思维导图等，可视化强。
- 多种软件相互配合，取长补短，本文通过 Origin, PPT, Matlab、Python 等软件，进行问题求解和结果可视化。
- 条理清晰，逻辑缜密，模型简单易懂，在求解的过程中逐步完善理论。

## 7.2 模型的缺点

对于扇区的转动问题的简化模型，仅选用 3 种典型摆法无法代表全部可能的形状，无法正确算出最大覆盖率，但是能够简化模型，在误差可接受范围内提升运算速度。

## 7.3 模型的推广

### 7.3.1 横向推广

我们建立模型的过程中用到的方法可以推广到其他领域，例如，在物品传输优化过程中，使用 K-means 算法的组合找到无人机最佳发射位置和遗传算法来解决旅行商的行车路线问题，优化无人机物品传输过程。使用 0-1 规划可以延伸到制定防灾预案中的应用，具有普适性。

### 7.3.2 纵向推广

我们建立的模型不仅可以在已知弱覆盖区域的前提下进行基站规划，在弱覆盖区域未定的条件下，也能得到不错的结果，可以用来于预测灰箱地区所需的基站数量。

## 八、参考文献

- [1] 刘娅汐. 移动通信网络覆盖计算与优化方法研究 [D]; 北京科技大学, 2021.
- [2] 何流. <城乡规划与通信站址规划的技术融合探讨\_何流.pdf> [J].
- [3] 李文超, 刘汉伟, 梁荣欣, et al. 基于智慧路灯系统的 5G 微基站选址研究; proceedings of the 2021 中国自动化大会——中国自动化学会 60 周年会庆暨纪念钱学森诞辰 110 周年, 中国北京, F, 2021 [C].



---

[4] 于丰源. 基于遗传算法与粒子群算法的供水管网水力模型校核对比研究 [D]; 河北工程大学, 2021.

## 九、附录

需求请联系q1423801308