

文章编号: 2095-4980(2022)04-0359-07

## 基于知识图谱的电磁干扰源定位方法

张 清, 刘楚川, 薛彦聪, 黄宏程

(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

**摘 要:** 为解决现有电磁大数据管理手段单一, 无法充分利用电磁数据的弊端, 引入分区管理的概念, 采用聚类算法将电磁数据按地理属性进行分区, 利用图数据库对电磁数据进行管理, 将电磁聚类后的结果转化为知识图谱实体, 抽取实体之间的关系, 发掘电磁数据间的潜在关联。针对电磁干扰源定位难、效率低下的问题, 提出了以知识图谱为基础, 大数据实时处理技术为辅助的改进接收信号强度指示(RSSI)定位算法, 并实验仿真了真实电磁数据下干扰源定位的过程, 分析了单目标干扰源和多目标干扰源下定位的性能。实验结果表明, 所提的基于知识图谱的电磁干扰源定位方法较传统 RSSI 定位方法效果更显著, 误差更小。

**关键词:** 电磁分区; 知识图谱; RSSI 定位; 干扰定位

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021149

## Location of electromagnetic interference source based on knowledge graph

ZHANG Qing, LIU Chuchuan, XUE Yancong, HUANG Hongcheng

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The existing electromagnetic big data management method is single and unable to make full use of electromagnetic data. The concept of partition management is introduced. The electromagnetic data is partitioned by geographic attributes using a clustering algorithm and managed by the graph database. The knowledge graph entities are transformed from the electromagnetic clustering results, and then the entity relationships are extracted to explore potential relationships among electromagnetic data. Aiming at the problem of the difficulty and low efficiency of electromagnetic interference source positioning, an improved Received Signal Strength Indication(RSSI) positioning algorithm based on knowledge graphs and big data real-time processing technology is proposed. The experiment simulates the process of interference source location under real electromagnetic data, and analyzes the performance of single-target interference source and multi-target interference source positioning. The experimental results show that the proposed method for locating electromagnetic interference sources based on the knowledge graph is more effective than the traditional RSSI locating method, and its error is smaller.

**Keywords:** electromagnetic zone; knowledge graph; Received Signal Strength Indication positioning; interference location

无线通信技术的发展和电磁技术的广泛应用使得电磁环境愈加复杂<sup>[1]</sup>。当前城市电磁环境复杂多变, 各种设备干扰、环境干扰以及人为非法干扰是造成监测设备异常的重要原因, 因此急需针对干扰的精准定位技术, 以便监测中心确定干扰位置和排除干扰, 保障无线电正常使用。传统的电磁干扰源定位技术多依靠专业测试人员手持频谱测量仪进行手工测量<sup>[2]</sup>, 效率低下且耗时较多, 成本较高。因此有必要寻找一种更加高效低廉的定位方法, 通过处理海量的电磁大数据查找电磁干扰的源头是一种可行性高的方案。

电磁监测站监测的频谱数据具有文件类型多、地理位置分散、历史周期长、存储数据量大、融合应用困难等问题<sup>[3]</sup>。电磁数据一般都以 CSV, Excel, Word, PDF 等格式分散存储在机房、办公室和单独的服务器上, 没有形成统一的电磁监测数据服务。目前常用的数据处理手段较为单一, 简单的统计分析不能发现海量电磁监测数据

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-26

间的潜在联系和规则，也不能根据已有的数据预测未来的频谱特性，且现有的数据处理手段不能实现多类数据融合分析和关联分析，很难在原始数据的基础上进行二次分析获取有用价值。由于电磁数据具有数据体量大、数据多样性、数据关联紧密等特点，传统的电磁数据处理技术大多应用关系型数据库(如 Oracle、MySQL 等数据库)。关系型数据库表结构固定，具有高并发读写需求且修改困难等特点，无法有效处理半结构化和非结构化数据，支撑容量有限，不能很好地支撑海量电磁数据的维护需求。

基于此，本文采用聚类算法将复杂的电磁数据根据地理特性分区，利用电磁地理子区域的概念抽取电磁大数据知识实体和实体间关系，使用图数据库将电磁大数据实体和关系存储，利用电磁子分区实体标签连接电磁大数据，使电磁数据便于管理。当有电磁干扰发生时，使用改进 RSSI 算法实时追踪干扰源。本文以电磁大数据之间的相互联系为重点，将电磁数据进行分区，利用知识图谱的特性将电磁大数据抽象为若干实体，通过实体之间的关系体现电磁大数据之间的潜在关系。

### 1 基于电磁大数据知识图谱的干扰源定位技术

#### 1.1 基于 K-Means 聚类算法的电磁大数据分区

对电磁大数据按地理特征进行电磁地理子区域聚类分析。首先使用整个数据集内所有监测台的经度和纬度两个指标对监测台进行地理划分。监测台数量不大且在一定时间范围内稳定，因此采用 K-Means 算法将电磁监测台进行聚合，将地理上相近的站台划分为一个电磁地理子区域，如图 1 所示，其中横纵坐标分别表示经度和纬度。K-Means 算法为无监督的聚类算法，通过计算电磁数据之间的欧氏距离将电磁数据划分到簇中，让簇内的点尽量紧密地连接在一起，而让簇间的距离尽量大<sup>[4]</sup>，具体步骤如下：

- 1) 通过机器计算确定电磁数据的分区数，根据分区数确定电磁数据的聚类个数，选取 K 个电磁聚类的初始质心。
- 2) 对电磁数据的每一个点，计算和已选定电磁聚类质心的距离，将数据点划分到距离最近的一个聚类中。
- 3) 通过计算每一个聚类的平均值，选出新的电磁聚类质心。
- 4) 重复步骤 2)~3)，直至每个电磁聚类簇的质心不再变化。将所有数据点划分为 K 个电磁地理区域后，聚类效果如图 1 所示。

#### 1.2 电磁大数据知识图谱实现

##### 1.2.1 电磁大数据实体识别

将海量的电磁监测数据按地理特征利用 K-Means 聚类算法进行电磁分区，分区结束后，将所得的电磁地理子区域作为电磁地理子区域实体，然后将每个电磁地理子区域里面的电磁监测站点作为电磁监测台站实体，抽取电磁地理子区域实体和电磁监测台站实体的属性特征，将两种实体及其属性特征共同存储进知识图谱库中，如图 2 所示，其中红色的实体表示电磁地理子区域实体，蓝色的实体表示电磁监测台站实体。

实体识别后对两种电磁实体进行属性封装，选取的电磁地理子区域实体的实体属性和电磁监测台站实体的实体属性分别如表 1~2 所示。

##### 1.2.2 电磁大数据关系抽取

在电磁大数据知识图谱中，电磁监测台站实体之间的关系用函数来表示，函数是电磁监测数据特征之间的映射，电磁数据在知识图谱中存储为“实体-函数-实体”。电磁监测数据中有许多反映其属性的特征参数<sup>[5]</sup>，为充分挖掘电磁监测数据中的隐藏信息<sup>[6]</sup>，需要对电磁监测数据进行特征提取与特征统计。本文选取的 5 种电磁监测数据特征如式(1)~式(5)所示：

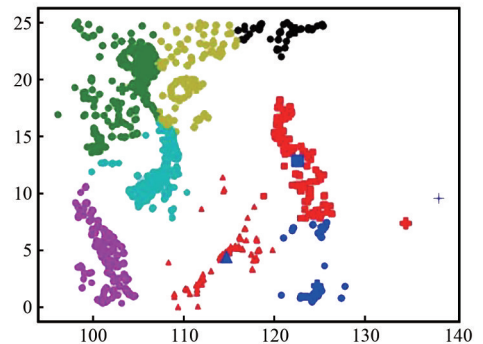


Fig.1 Diagram of electromagnetic data clustering effect  
图 1 电磁数据聚类效果图

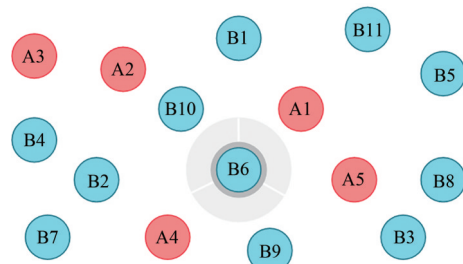


Fig.2 Physical map of electromagnetic geographic subregion and electromagnetic monitoring station  
图 2 电磁地理子区域实体和电磁监测台站实体图

表 1 电磁地理子区域实体属性表

Table1 Entity attributes of electromagnetic geography subregion

entity attributes	attribute explanation
ID	entity id number
SiteInformationFile	file address for storing site information
Name	entity name

表2 电磁监测台站实体属性表  
Table2 Entity attributes of electromagnetic monitoring station

entity attributes	attribute explanation	entity attributes	attribute explanation
ID	entity number id	equipmentParam	device parameters
SiteID	site id	scanSpeed	spectrum scanning speed
Name	entity name	antennaHeight	antenna hanging height
Diliarr	area code	startFrequency	start frequency
SiteType	monitoring station type	step	spectrum monitoring step
Longitude	site longitude	freSpotNumber	monitoring frequency points
Latitude	site latitude	interference	station interference
dUTime	data update time		

$$\bar{x}_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

$$s_{\text{var}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$H_{\text{powerPri}} = - \sum_{i=1}^N P_i \ln p_i \quad (3)$$

$$x_{\text{rootMean}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (4)$$

$$K_s = \sum_{m=2}^N \left| y_m(i) - \frac{y_m(i-1) + y_m(i) + y_m(i+1)}{3} \right| \quad (5)$$

式中： $\bar{x}_{\text{mean}}$  为均值特征； $s_{\text{var}}^2$  为方差特征； $H_{\text{powerPri}}$  为功率谱熵特征； $x_{\text{rootMean}}$  为均方根特征； $K_s$  为 K 不规则性特征； $x_i$  为电磁监测数据； $p_i$  为每个电磁监测数据的功率， $y_m$  为根据式(1)~(4)计算出的聚类值。对每个电磁地理子区域内的电磁监测台站实体分别计算上述 5 个特征值，利用欧氏距离计算 2 个监测台站实体之间的电磁特征相关性。由于每个电磁地理子区域内可能存在多类型的监测站点，因此计算 2 个监测台站实体之间的电磁特征相关性时，电磁监测台站实体的所属台站类型必须相同。

对某一电磁地理子区域实体其中一种台站属性分别计算 5 个电磁特征值：首先对提供的电磁 IQ 数据进行幅值计算，然后在频域上选取所有样点对电磁监测信号的幅值数据进行特征参数提取，且每个特征参数使用其全局最大值进行归一化，计算出 5 个电磁特征值。以功率谱熵特征为例，将功率谱熵特征代入欧氏距离函数，得到两个电磁监测台站实体功率谱熵特征的函数关系为：

$$F_{\text{-powerPri}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\text{powerPri}_{1,i}} - H_{\text{powerPri}_{2,i}})^2} \quad (6)$$

当计算出来的电磁特征函数值大于系统预先设定的电磁特征阈值后，2 个电磁监测台站实体间的关系唯一确定，此时抽取出 2 个实体间的电磁特征关系，构建知识图谱三元组。

### 1.2.3 基于 Neo4j 的电磁大数据存储

电磁地理子区域实体和电磁监测台站实体间的对应关系提取后，需要数据库对其进行存储，但传统的数据库不能很好地存储关系实体以及体现实体和实体之间的关系。Neo4j 是一个高性能的 NOSQL 图形数据库，它能够将结构化的电磁数据存储在网络中，节点和节点通过网络表现其实体间关系<sup>[7]</sup>；同时 Neo4j 具有一个高性能的图引擎，可以快速查找检索实体节点之间的关系，因此本文采用 Neo4j 存储电磁地理子区域实体和电磁监测台站实体以及实体间关系。

首先将电磁地理子区域实体、电磁监测台站实体、实体属性和实体间关系进行封装，然后将封装后的电磁实体数据和关系导入 Neo4j 数据库中，并用实体关系将两个相关的实体联系起来，如图 3 所示。每个电磁地理子区域实体下有若干个电磁监测台站实体，电磁监测台站实体与电磁地理子区域实体间存在上述 5 种特征关系中的一种或多种特征关系，而电磁地理子区域实体间存在地理相近的关系，两种电磁实体通过实体间关系进行连接。

### 1.2.4 电磁干扰源精准定位

电磁数据从电磁监测点上传至中心服务器，中心服务器集群将数据导入对应的电磁子区域中，利用 Spark 大数据处理框架对每个子区域内的电磁数据进行监控。当出现干扰源时，选取电磁监测台扰动度大的区域，建立

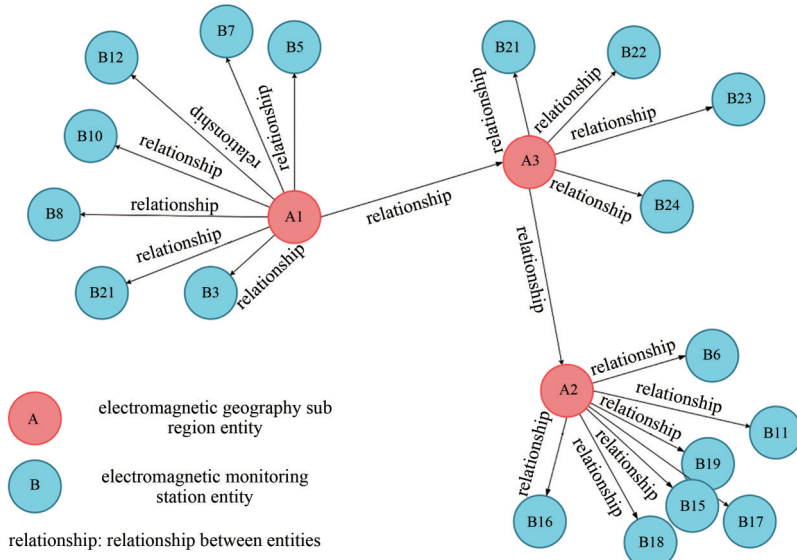


Fig.3 Diagram of two kinds of entity relationship  
图3 两种实体关系图

电磁干扰监测队列，将扰动区域的电磁监测台站实体输入监测队列中进行监测。电磁监测台扰动度计算各个电磁监测频点电平值进行归一化处理，并计算总均方差。

本文采用改进的 RSSI 定位算法，根据电磁监测点的接收信号强度<sup>[8]</sup>，得到发射功率和接收功率之间的关系：

$$RSSI = P_{\text{emission}} - L \tag{7}$$

电磁干扰信号在传播过程中会不断损耗，因此选择适合的传播模型对电磁干扰定位起到至关重要的作用。将地理环境分为理想化电波简易环境、电波复杂的城市环境以及城市周围地势起伏不大的环境，分别对应自由空间传播模型、Okumura-Hata 传播模型、Egli 传播模型<sup>[9]</sup>。3 种传播模型的损耗如下所示：

$$L = 32.45 + 20\lg f + 20\lg d - 10\lg(g, g_r) \tag{8}$$

$$L = 88 + 40\lg d + 20\lg f - 20\lg h_t h_r - G \tag{9}$$

$$L = 69.55 + 26.16\lg f - 13.8\lg h_t + \alpha(h_t) + [44.9 - 6.55\lg h_t] \lg d \tag{10}$$

本文根据提供数据选取某城市电波环境，将 Egli 传播模型作为距离模型，将其代入式(10)，得到如下关系式：

$$RSSI_0 - RSSI_i = L_i - L_0 = 40\lg \frac{d_i}{d_0} + 20\lg \frac{h_{t0}}{h_{ti}} \tag{11}$$

$$k_{i0} = \frac{d_i}{d_0} = \frac{RSSI_0 - RSSI_i - 20\lg \frac{h_{t0}}{h_{ti}}}{40} \tag{12}$$

式中： $RSSI_0$ 为主电磁监测站接收频率； $RSSI_i$ 为第*i*个电磁监测站的接收频率； $k_{i0}$ 为两两电磁监测点之间的距离比。根据解析几何得：当 $k_{i0}$ 为一个固定值时，函数表达式为圆，当发生电磁干扰时，干扰点在距离两个电磁监测站的一个一定距离比的圆上，该距离比圆的圆心位于连接两个电磁监测站的直线上。现选取干扰监测队列中的3个电磁监测站点 $p_0=(x_0, y_0)$ ， $p_1=(x_1, y_1)$ ， $p_2=(x_2, y_2)$ ，设置 $p_0$ 为主电磁监测站，电磁干扰源位于未知经纬度 $p_w=(x, y)$ ，电磁监测站的监测电平根据干扰源信号强弱变化，其中 $(x, y)$ 表示经纬度。电磁监测点接收天线的高度依次为 $h_0, h_1, h_2$ ，因此整理式(12)可得：

$$\left(x - \frac{x_i - \sigma_i x_0}{1 - \sigma_i}\right)^2 + \left(y - \frac{y_i - \sigma_i y_0}{1 - \sigma_i}\right)^2 = \frac{\sigma_i}{1 - \sigma_i} [(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2] = \frac{\sigma_i}{1 - \sigma_i} d_{i0}^2 \tag{13}$$

式中： $d_{i0}$ 为第*i*个电磁监测站和主电磁监测站的固定距离； $\sigma_i$ 为 $k_{i0}$ 的根方值。由式(13)可得，电磁观测站点和电磁干扰点处在一个标准圆的方程上，因此当发生电磁干扰时，主电磁监测站和其他电磁监测站对于干扰源定位可

将其定位到一个距离比的圆上。当使用选取的  $p_0, p_1, p_2$  3 个电磁监测站同时确定电磁干扰源时，可以确定出两个距离比的圆  $C_1$  和  $C_2$ ，其原理图如图 4 所示，圆的经纬度圆心坐标为：

$$x_{ci} = \frac{x_i - \sigma_i x_0}{1 - \sigma_i}, y_{ci} = \frac{y_i - \sigma_i y_0}{1 - \sigma_i} \quad (14)$$

距离比电磁定位圆半径  $R_i$  为：

$$R_i = \left| \frac{k_{i0}}{1 - \sigma_i} \right| d_{i0} \quad (15)$$

两个电磁定位圆的交点即为电磁干扰源所在的位置，该位置坐标为电磁干扰源的经度和纬度。

在实际电磁干扰源定位时，一个区域可能出现多个电磁干扰源干扰正常电磁使用秩序，会有多个电磁监测点得到多个电磁距离比圆。为减小定位误差，对多个距离比相交点运用式(8)，得到

$$\text{电磁干扰源的位置：} \min \sum_{i=0}^n \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}。$$

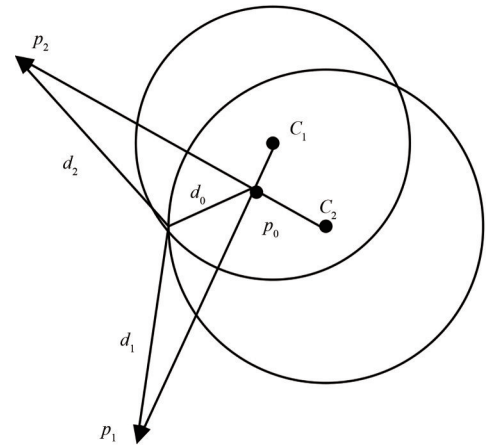


Fig.4 Diagram of improved RSSI interference source location principle  
图4 改进RSSI干扰源定位原理图

## 2 电磁大数据知识图谱干扰定位性能分析

本文所用数据集为中国电子科技集团公司第二十二研究所提供的真实电磁监测频谱数据，数据为中国某省市及其周边电磁监测台站监测的近两年的历史频谱数据。因保密要求不得出现相关的真实数据及地名，因此本文对相关数据做模糊处理。利用 HiBench 随机使某一监测区域电磁电平发生异常，沿着信号传输方向，电磁扰动随着 Elig 传输损耗不断减小，记录电磁异常区域。当知识图谱库中数据发生扰动时，提取电磁监测参数扰动最大地理区域的电磁监测台站实体加入创建的电磁干扰监测队列中。在模拟单目标电磁干扰时，使监测电磁区域内随机生成 1 个干扰信号源；模拟多目标电磁干扰时，随机生成 3 个干扰信号源。在单目标和多目标干扰模拟时，设置接收电磁监测站的信噪比分别为 10 dB, 16 dB, 20 dB，对不同信噪比下目标电磁干扰信号源进行定位 200 次模拟，得到单目标电磁干扰定位精确度图和多目标电磁干扰定位精确度图，如图 5~6 所示：

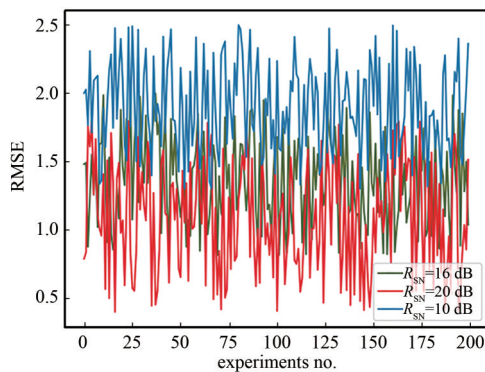


Fig.5 Chart of single target positioning performance analysis  
图5 单目标定位性能分析图

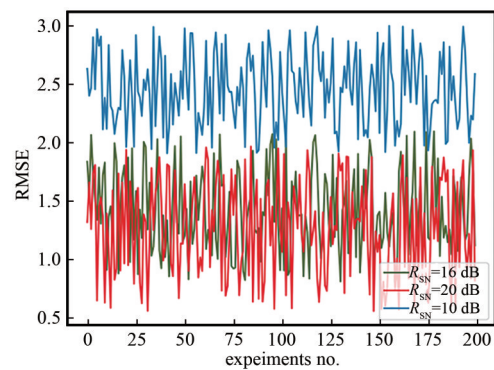


Fig.6 Chart of multi-target positioning performance analysis  
图6 多目标定位性能分析图

采用改进的 RSSI 电磁干扰源定位算法，在单目标干扰下误差范围为 43~174 m。随着信噪比的增加，干扰源定位的精准度不断提高，在信噪比为 20 dB 时，定位的精准度最高，误差最小。在多目标干扰情况下，算法误差范围为 55~192 m，且随着信噪比的增大，准确度越高。统计结果如表 3~表 4 所示。

表 3 单目标定位性能统计表(单位:m)

Table3 Statistics table of single target positioning performance(unit: m)

$R_{SN}/\text{dB}$	maximum error/m	minimum error/m	average error/m
10	252	167	192
16	199	89	106
20	174	43	63

表4 多目标定位性能统计表(单位:m)

Table4 Statistics table of multi-target positioning performance(unit: m)

$R_{SN}/\text{dB}$	maximum error/m	minimum error/m	average error/m
10	294	198	224
16	210	85	113
20	192	55	75

本文主要对比了两种定位方案。方案1:传统TDOA定位方法。传统干扰源定位方法一般依赖专业监测人员的判断,需先把环境背景噪声和真正干扰源的噪声分离出来,然后获取监测到的电磁干扰信号频谱得出超标频率点。方案2:文献[10]提出的一种基于卡尔曼滤波的干扰定位方法。该方法通过构建状态方程,描述电磁干扰动态变化过程,识别和提取电磁监测数据中的相关信息,从而对电磁干扰源进行定位。本文在信噪比为20 dB时,在单目标干扰源和多目标干扰源下分别与两种方案进行200次对比实验,结果如图7~8所示。

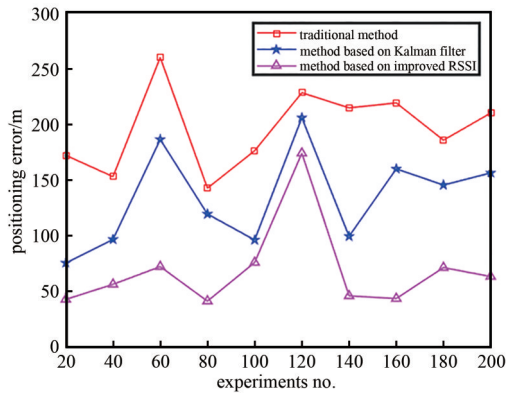


Fig.7 Comparison chart of single target interference source location algorithm  
图7 单目标干扰源定位算法对比图

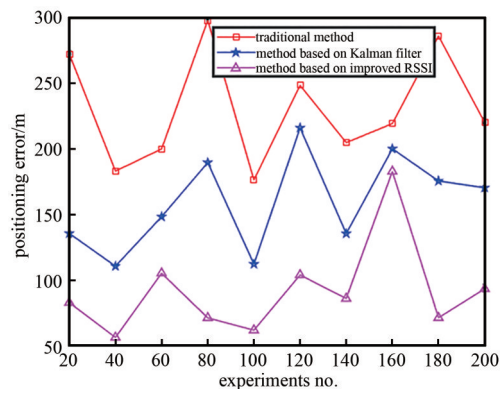


Fig.8 Comparison chart of multi-target interference source location algorithm  
图8 多目标干扰源定位算法对比图

由图7可知,在单目标干扰源下,采用传统方法对电磁干扰源进行定位时,最大定位误差可达259 m,最小定位误差为142 m;采用基于卡尔曼滤波方法时,最大定位误差为205 m,最小定位误差为76 m;而本文所提定位方法,最大定位误差为174 m,最小定位误差为43 m。通过对比实验可以发现,基于卡尔曼滤波的定位方法定位误差比传统方法小,但比本文改进的RSSI电磁干扰源定位方法误差大。在多目标干扰源情况下,由于区域内多个干扰源共同存在,干扰源之间的频谱彼此叠加,共同影响,分离环境噪声和干扰噪声更加困难,因此3种定位方法性能都有所下降,但本文所提的干扰定位算法在多目标干扰源下仍比另外两种定位算法表现更优秀,定位误差更小。方案1在多目标干扰源下最小定位误差为176 m,方案2的最小定位误差为96 m,而本文定位方法最小定位误差为55 m。综上所述,本文所提的干扰定位方法,结合知识图谱,通过对电磁干扰进行分区,利用改进RSSI定位算法对电磁干扰源进行定位,在单目标干扰源和多目标干扰源情况下,比另外两种定位方法表现更好,定位误差更小。

### 3 结论

本文在电磁频谱监测中建立分区管理机制,采取分而治之的思想管理复杂的电磁数据。在地理层面上,将所监测地区的监测站点按地理属性进行聚类划分,对电磁数据进行分区。采用图数据库对电磁数据进行管理,将电磁聚类后的结果转化为知识图谱实体,抽取电磁实体之间的关系,并把电磁实体和对应的实体间关系存入图数据库。针对电磁干扰源定位难、效率低下的问题,本文提出了以知识图谱为基础,以大数据实时处理技术为辅助的改进RSSI定位算法,并且实验仿真了真实电磁数据下的干扰源定位过程,分析了所提定位方法的性能。实验结果表明,本文所提的电磁数据管理方案在管理电磁大数据、挖掘电磁数据间的潜在关系上优于传统的基于Oracle、MySQL等结构化数据库的方法,基于电磁知识图谱干扰源定位方法在查找电磁干扰源的工作中效果显著,能够在减少人工成本和人为误差的同时,提高结果的准确性和可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 汪连栋,申绪涧,周波.复杂电磁环境认知研究综述[J].航天电子对抗,2020,36(2):1-6. (WANG Liandong,SHEN Xujian,ZHOU Bo. A summary of research on cognition of complex electromagnetic environment[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2020,36(2):1-6.)

- [2] 彭显恒. 无线电磁频谱监测系统中定位跟踪模块的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (PENG Xianheng. Design and implementation of the location tracking module in the wireless electromagnetic spectrum monitoring system[D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xidian University, 2014.)
- [3] 罗争. 基于大数据的电磁频谱感知数据管理与挖掘[J]. 信息通信, 2016(9):137-138. (LUO Zheng. Management and mining of electromagnetic spectrum sensing data based on big data[J]. Information and Communication, 2016(9):137-138.)
- [4] 柴变芳, 李有熠. 基于Spark的主动重叠K-means聚类算法[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(1):70-76. (CHAI Bianfang, LI Youyi. Spark-based active overlapping K-means clustering algorithm[J]. Microelectronics and Computer, 2021, 38(1):70-76.)
- [5] 王梦寒, 刘文斌, 丁建锋, 等. 典型电磁泄漏信号特征提取与统计分析[J]. 通信技术, 2020, 53(9):2320-2327. (WANG Menghan, LIU Wenbin, DING Jianfeng, et al. Feature extraction and statistical analysis of typical electromagnetic leakage signals[J]. Communication Technology, 2020, 53(9):2320-2327.)
- [6] 李进柱, 喻亦林. 云南省辐射环境质量监测网2019年电磁环境监测选点与电磁辐射环境质量[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(2):92-96. (LI Jinzhu, YU Yilin. Yunnan province radiation environmental quality monitoring network 2019 electromagnetic environment monitoring site selection and electromagnetic radiation environmental quality[J]. Environmental Science Guide, 2021, 40(2):92-96.)
- [7] 卢民军, 叶慕戎, 张高煜. 审计数据知识图谱的构建与实现——基于Neo4j图数据库[J]. 信息与电脑(理论版), 2021, 33(1):154-157. (LU Minjun, YE Murong, ZHANG Gaoyu. Construction and realization of audit data knowledge graph—based on Neo4j graph database[J]. Information and Computer(Theoretical Edition), 2021, 33(1):154-157.)
- [8] YE Tian, AKIYOSHI Tatematsu, Kazuo Tanabe, et al. Development of locating system of pulsed electromagnetic interference source based on advanced TDOA estimation method[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6):1326-1334.
- [9] 黄威. 基于RSSI的无线传感器网络的节点与目标定位优化算法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2020. (HUANG Wei. Research on optimization algorithm for node and target location of wireless sensor network based on RSSI[D]. Nanjing, Jiangsu, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.)
- [10] 梁拥军. 基于卡尔曼滤波的无线电台电磁干扰源定位方法研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(9):112-116. (LIANG Yongjun. Research on location method of radio station electromagnetic interference source based on Kalman filter[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(9):112-116.)

#### 作者简介:

张清(1997-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为大数据分析. email:2350769074@qq.com.

薛彦聪(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为大数据融合与应用.

刘楚川(1981-), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为移动通信与信息处理.

黄宏程(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信网络和信息处理.