

基于 Kriging 算法的电磁频谱地图构建技术研究

胡炜林, 刘辉, 彭闯, 王伦文*

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230031)

摘要 针对电磁频谱地图构建中感知节点分布不均匀、构建效率不高的难题,提出了一种基于 Kriging 算法的电磁频谱地图构建算法。该算法首先运用 Kriging 算法将感知数据构建成电磁频谱地图;其次利用 K-means 聚类算法实现感知区域多粒度划分,将整体区域划分为层次不同的多个局部区域,利用 Kriging 算法对局部区域进行电场强度插值估计,形成不同粒度下的多个电磁频谱地图;最后根据感知节点分布状况,基于 Voronoi 图计算不同粒度下局部区域的均匀度权重,对各粒度下的电磁频谱地图进行加权融合,生成电磁频谱地图。仿真结果表明:该算法将电磁频谱地图的构建误差降低了 2%~5%,在噪声强度大于 8 dBW 时构建效率大幅高于原始算法,具有构建精度高、容错性强的特点。

关键词 电磁频谱地图;电磁态势;Kriging;多粒度;均匀度权重

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.005

中图分类号 TN925 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0026-08

A Construction Technology of Electromagnetic Spectrum Map Based on the Kriging Algorithm

HU Weilin, LIU Hui, PENG Chuang, WANG Lunwen*

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230031, China)

Abstract Aimed at the problems that sensing nodes are uneven in distribution and low in construction efficiency in the construction of electromagnetic spectrum map, a new electromagnetic spectrum map construction algorithm is proposed based on the Kriging algorithm. Firstly, the Kriging algorithm is used to build electromagnetic spectrum map from perceptual data. Secondly, the K-means clustering algorithm is introduced to realize the multi-granularity division of the perception region, and the whole region is divided into multiple local regions at different levels. Meanwhile, the Kriging algorithm is used to interpolate and estimate the electric field intensity of the local region, and the multiple electromagnetic spectrum maps with different granularity are formed. Finally, according to the distribution of sensing nodes, the weight of local region uniformity under different granularity is calculated based on the Voronoi diagram, and the electromagnetic spectrum map under different granularity is weighted, generating the electromagnetic spectrum map. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce the error of electromagnet-

收稿日期: 2021-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(11975307)

作者简介: 胡炜林(1997—),男,四川泸州人,硕士生,研究方向为电磁态势分析、机器学习等。E-mail:hw1550@nudt.edu.cn.com

通信作者: 王伦文(1966—),男,安徽休宁人,教授,博士生导师,研究方向为智能信息处理、数据挖掘等。E-mail:wanglunwen@163.com

引用格式: 胡炜林,刘辉,彭闯,等.基于 Kriging 算法的电磁频谱地图构建技术研究[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(3):26-33. HU Weilin, LIU Hui, PENG Chuang, et al. A Construction Technology of Electromagnetic Spectrum Map Based on the Kriging Algorithm [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 26-33.

ic spectrum map construction by 2%~5%, and the construction efficiency is much higher than that of the original algorithm when the noise intensity is greater than 8 dBW, and the algorithm is characterized by high construction accuracy and strong fault tolerance.

Key words electromagnetic spectrum map; electromagnetic situation; Kriging; granularity; uniformity weight

现代战争中,电磁环境异常复杂,掌握“制电磁权”是作战的关键^[1]。因此,构造准确的电磁频谱地图、获取战场电磁能量分布、实现电磁环境可视化,可以间接反映战场电磁态势的变化,为电磁态势等级评估和威胁判断提供参考,其意义不言而喻^[2-4]。

电磁频谱地图(spectrum map)也被称为无线电环境地图、电磁环境地图^[5-6]。为了构建精确的电磁态势,众多研究者从电磁频谱地图入手,开展了广泛的研究。夏海洋等人^[7]将电磁频谱地图的构建方法分为空间插值构建法、参数构建法和混合构建法,仔细比较了各个算法之间的优劣。Marek Suchansk 等人^[8]在多场景下比较了 Kriging、IDW 和 NN 等 8 种算法的无线电环境地图的构建精度,得出 Kriging 算法较为精确的结论。张舒明等人^[9-10]采用改进模基参数估计法重构电磁场,使得在采样较低的情况下也能取得较好的效果,但由于结合了滑动窗口模型,算法计算量较大。蒋涵铭^[11]基于残差改进和滞后距改进的 Kriging 插值算法提升了原有算法预测结能,但是采集点较多,不适用于战场紧张的装备数量。路镜涵等人^[12-13]针对辐射源过多时重构性能不理想的问题,提出基于观测值插值的频谱地图重构方法,利用电波传播模型改进 Kriging 算法,但算法须知的辐射源参数等先验信息难以获得。随着人工智能的兴起,众多的神经网络算法也应用到电磁态势的构建中来,韩旭等人^[14]结合认知无线电,利用深度神经网络复原残缺的功率频谱图。此外,周宇等人^[15-16]将支持向量机替换变异函数,采用改进克里金算法生成电磁态势,算法精度高于其他经典算法。但是神经网络系统由于训练时间较长、训练数据庞大、实际可训练数据不足,因此实时效果有待提高。

现代战场上由于地形等因素限制,感知节点数量有限、部署位置随机性大,影响了电磁频谱地图构建效率,因此本文提出一种基于改进的 Kriging 算法的电磁频谱地图构建技术。

1 基于 Kriging 算法的多粒度电磁频谱地图构建原理

鉴于直接采用 Kriging 算法构建效率不高,结

合 K-means 聚类算法实现多粒度划分,形成层次不同的多个局部区域,在这些区域基于 Kriging 算法构建多个电磁频谱地图,再依据感知节点分布状况,采用 Voronoi 图计算不同粒度下局部区域的均匀度权重,对各电磁频谱地图进行加权融合,进而构建电磁频谱地图。

1.1 电磁频谱地图生成简介

电磁频谱地图生成流程如图 1 所示,其中左图表示感知区域的地形和节点分布,曲线是等高线,颜色代表海拔高度,采用伪彩色图映射曲线颜色,蓝色系表示低海拔,红色系表示高海拔,其中黑色实心圆代表感知节点,通过感知节点测量电场强度值(electric field strength, EFS),从而得到中间所示图的节点感知数据,数值大小同样采用伪彩色表示。在此基础上,进行插值估计和数据融合,生成右图所示的电磁频谱地图,场强大小以伪彩色图表示,蓝色系表示低场强,红色系表示高场强。

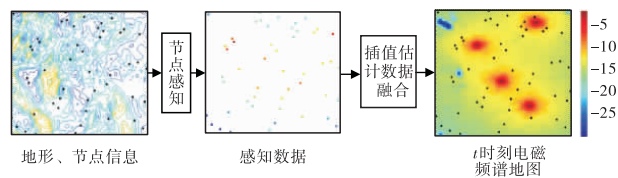


图 1 电磁频谱地图处理流程

由于感知节点因为地形等因素分布不均匀,影响了电磁频谱地图构建效率,因此本文考虑在 Kriging 插值估计的基础上,提出多粒度的插值方法,提高电磁频谱地图的构建精度和效率。

1.2 Kriging 插值法基本原理

Kriging 插值法是一种空间插值法,又被称为空间自协方差最佳插值法,是传统地统计学的主要内容之一^[17]。它以变异函数理论和结构分析为基础,通过邻域范围内的已知节点属性,对未知点进行线性无偏估计^[18]。通过已知感知节点测量的电场强度值(EFS)来估计未知点的 EFS,达到构建电磁频谱地图的目的。

假设未知点的 EFS 值为 $\hat{E}(s_0)$,其邻域范围内共有 n 个感知节点,测量的 EFS 值分别为 $E(s_i)$ ($i=1,2,\dots,n$),对该邻域感知节点进行加权求和可得到待估计值 $\hat{E}(s_0)$:

$$\hat{E}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i E(s_i) \quad (1)$$

式中: λ_i 是未知点邻域内第*i*个感知节点的电场强度 $E(s_i)$ 的权重。

由于电磁环境信息属于空间随机变量的范畴,因此可假设采集的EFS值满足二阶平稳和内蕴假设,且 $\hat{E}(s_0)$ 是 $E(s_0)$ 的线性最小无偏估计。

在规范化约束条件 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 下,引入拉格朗日乘子 μ 和变异函数 $\gamma(h)$,求解条件极值:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_i} E \left\{ [E(s_0) - \hat{E}(s_0)]^2 - 2\mu \sum_{i=1}^n \lambda_i \right\} = 0 \quad (2)$$

变异函数是Kriging插值算法的核心部分,通过变异函数能够利用感知节点的EFS值随两点距离得到变化关系,推断出未知点的EFS值。常见变异函数模型有线性模型、高斯模型、球形模型等。拟合变异函数时,采用最小二乘法代入现有变异函数模型进行拟合,求得模型参数。将变异函数模型代入式(2)并化简求得权重 λ_i 和拉格朗日乘子 μ ,即:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n [\lambda_i \gamma(x_i - x_j)] + \mu = \gamma(x_0 - x_j) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

1.3 粒度划分与均匀度评估

由于感知节点分布不均匀,为了提升电磁频谱地图的构建精度,对评估区域进行多粒度划分,构造局部均匀的感知节点布局。粒度表示电磁频谱地图的构建区域大小,粒度划分是指将作战区域从粗粒度到细粒度地划分为不同粒度的局部区域,对不同粒度下局部区域分别进行Kriging插值,提高局部区域的电磁频谱地图精度。

根据感知节点的位置分布,进行K-means聚类实现粒度划分。首先假设将*n*个已知节点 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$,随机分为*k*类,随机初始*k*个聚类中心;其次根据式(4)计算聚类中心以外的每个点与聚类中心的欧式距离,将点赋给最近的中心点构成*k*个聚类簇;然后重新计算每个聚类簇的平均值,再次确定新的聚类中心,根据式(5),直到每一聚类簇的平方和最小^[19]。

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

$$\arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{s \in O_i} \|s - \mu_i\|^2 \quad (5)$$

式中: O 是所有的聚类簇; μ_i 是 O_i 中所有点的均值。

由聚类肘部法则可知,每个类别距离其该类中心点的距离称为畸变程度,其核心指标为误差平方

和SSE,见式(5)。最后根据该法则,确定最佳聚类数量*K*值,实现感知节点的最佳粒度划分。

根据Kriging插值算法的推导,变异函数的自变量分布越均匀、密集,拟合曲线越精确,则估计值误差越小^[20]。为了衡量感知节点的均匀程度,引入基于Voronoi图的均匀度计算^[21]。首先将各感知节点构成Delaunay三角形;其次找出离散点周围所有三角形内心;然后沿顺时针方向将感知节点周围的内心连接起来,最后即得到各感知节点的Voronoi图,记为 $V_i, i=1, 2, \dots, n$,其面积分别记为 $S_{V_i}, i=1, 2, \dots, n$ 。

定义均匀度为一个区域内所有Voronoi图面积的标准差的倒数,即:

$$u = \frac{1}{\sigma} = \sqrt{n / \sum_{i=1}^n (S_{V_i} - \bar{S}_V)^2} \quad (6)$$

式中: u 为均匀度; σ 为标准差; \bar{S}_V 为区域内Voronoi图的面积均值。根据式(6)计算一个区域的均匀度,用以衡量感知节点的分布情况。均匀度越大,该区域节点分布越均匀。

1.4 改进Kriging插值估计

根据Kriging算法的特点,感知节点的均匀程度决定插值估计的准确程度。本文改进Kriging在有限数量的感知节点下,根据地理位置的密集程度,在不同粒度下进行Kriging插值估计。理论分析表明,多粒度Kriging插值的算法复杂度会增加,但是通过该算法实现的构建效果较好、精度提升。

对于含有*n*个感知节点的战场区域,首先分别进行 $k_r (r=1, 2, \dots, R)$ 次聚类,即每次聚类处理产生*r*个聚类簇,其中每个聚类簇记为第 $k_{rp} (p=1, 2, \dots, r)$ 个待估计区域,则该区域的感知节点均匀度表示为:

$$u_{rp} = \sqrt{n_{rp} / \sum_{i=1}^{n_{rp}} (S_{V_i} - \bar{S}_{V_{rp}})^2} \quad (7)$$

式中: u_{rp} 表示第 k_{rp} 个待估计区域的均匀度; n_{rp} 表示该区域中的感知节点数量; S_{V_i} 表示该区域的第*i*个Voronoi图的面积, $i=1, 2, \dots, n_{rp}$; $\bar{S}_{V_{rp}}$ 则为该区域泰森多边形的平均面积。

对每一次聚类处理后的局部区域进行Kriging插值,假设在第 k_r 次聚类下,未知点 s_i 的EFS估计值为 $\hat{E}_r(s_i)$ 综合每次聚类区域的权重和 s_i 的估计值,未知点 s_i 的EFS表示为:

$$E(s_i) = \sum_{r=1}^{R_e} \omega_{u_r} \hat{E}_r(s_i) \quad (8)$$

式中: R_e 表示未知点 s_i 均包含于每一次聚类得到的估计区域中的数量, $R_e < R$; ω_{u_r} 表示在第 k_r 次聚类

中,未知点 s_i 所在聚类区域的均匀度权重,由式(9)得到:

$$\omega_{u_r} = u_r / \sum_{r=1}^{R_i} u_r \quad (9)$$

通过引入了均匀度对原始算法进行改进,提高

了单一 Kriging 插值算法的准确性,利用均匀度权重进行估计值整合,既增强了邻域内感知节点对未知点的作用,又考虑了邻域外感知节点的微弱影响。其具体的算法步骤见表 1。

表 1 算法步骤

输入:感知节点信息 $\{[x_1, y_1, E(s_1)], [x_2, y_2, E(s_2)], \dots, [x_n, y_n, E(s_n)]\}$
输出:估计区域每一个未知点的 EFS 值 $\hat{E}(s_i)$
步骤 1:运用 Kriging 算法对估计区域进行整体插值
步骤 2:根据式(5)将所有感知节点划分为 k_r 个区域,生成 n_r 个局部区域, $r=2$
步骤 3:根据式(7)计算 n_r 个局部区域的均匀度 u_{rp} ($p \leq r$),生成数据集 $T_r = \{[k_{r1}, u_{r1}], [k_{r2}, u_{r2}], \dots, [k_{rp}, u_{rp}]\}$
步骤 4:对局部区域进行 Kriging 插值,得到未知点 s_i 的 EFS 值 $\hat{E}_r(s_i)$
步骤 5:令 $r=r+1$,重复步骤 2~4,生成数据集 T_{r+1} 和 $\hat{E}_{r+1}(s_i)$,当 r 等于最佳聚类数时,进入下一步
步骤 6:通过式(9)得到第 k_r 次聚类下的第 p 个估计区域的均匀度权重 ω_{u_r}
步骤 7:将 ω_{u_r} 和 $\hat{E}_r(s_i)$ 代入式(1)和式(8),求得未知点 s_i 的 EFS 值 $\hat{E}(s_i)$

1.5 算法复杂度分析

最后分析算法复杂度,Kriging 插值算法的时间复杂度为 $O(n^3)^{[22]}$,本文算法运用了 K-means 聚类和 Voronoi 图,二者的时间复杂度分别为 $O(n \sum_{i=1}^k i)$ 和 $O(n \log n)^{[23-24]}$,其中 k 为聚类个数。根据公式推导,本文算法的复杂度为 $O((n + n \log n + n^3) \sum_{i=1}^k i)$,它取决于样本数量 n 和聚类数量 k 。由于 $O(n) < O(n \log n) < O(n^3)$,K-means 聚类和 Voronoi 图的算法复杂度可以忽略不计,因此可将本文算法复杂度简化为 $O(n^3 \sum_{i=1}^k i)$ 。

2 仿真实验分析

2.1 仿真场景构建

对战场电磁环境进行建模,验证本文所提的结合 K-means 聚类和 Kriging 算法的电磁频谱地图构建算法的有效性。

首先在 Wireless Insite 无线电波传播仿真软件

中进行仿真,选取多个面积为 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 的真实地形模拟战场环境,随机放置通信电台和感知节点。然后在图新地球 4 软件中分别选取了 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 的部分地区作为仿真环境,依次命名为 1~4 号地区,提取并输出其高程数据。将地形数据导入 Wireless Insite,在 1 号和 2 号地区中添加 Wet Earth 和 Dense Deciduous Forest in Leaf,1 号地区的海水部分添加 Sea Water,在 3 号地区添加覆盖 Dry Earth,在 4 号地区中覆盖 Dry Sand。在 4 个场景中设置了数个通信电台,其中所有通信电台均为正弦信号,中心频率为 15 MHz,带宽为 3 kHz,采用半波偶极子天线,发射增益和接收增益为 0 dB,战场仿真场景部分参数见表 2,仿真场景如图 2(a)~(d)所示。在 Wireless Insite 仿真软件中布置 80×80 个等距分布的接收机测量电场强度,生成标准的电磁频谱地图,如图 3(a)~(d)所示。

最后在地图上随机选取 60 个感知节点作为算法的已知感知节点,获取感知节点的 EFS 值,导入 MATLAB 进行计算,在此基础上得到电磁频谱地图。

表 2 战场仿真场景部分参数

地区名称	经度区域/(°)	纬度区域/(°)	通信电台数量	功率/dBm	介电常数	电导率	植被类型
1 号地区	120.649E~120.783E	36.101N~36.173N	4	50.00	20	0.020	茂密阔叶林
2 号地区	118.123E~118.206E	30.069N~30.142N	4	50.00	20	0.020	茂密阔叶林
3 号地区	100.022E~100.114E	38.895N~38.967N	4	50.00	4	0.001	无
4 号地区	87.775E~87.869E	40.213N~40.284N	4	50.00	4	0.010	无

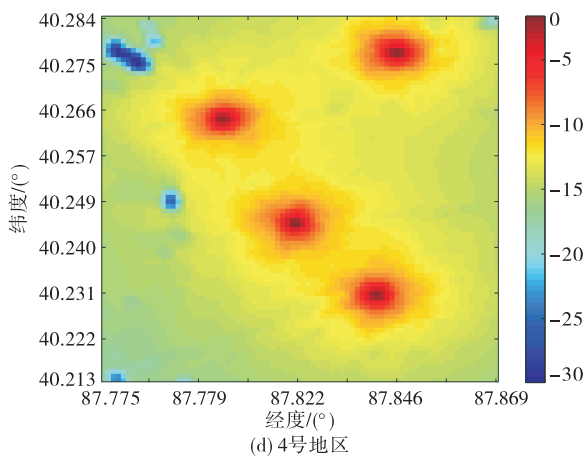
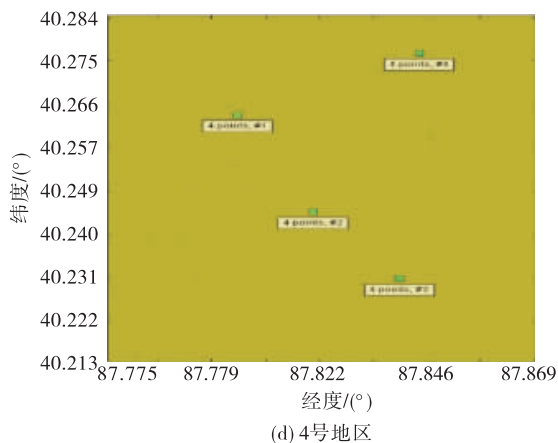
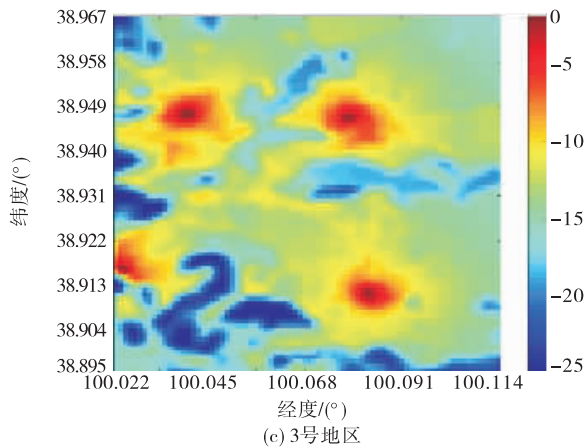
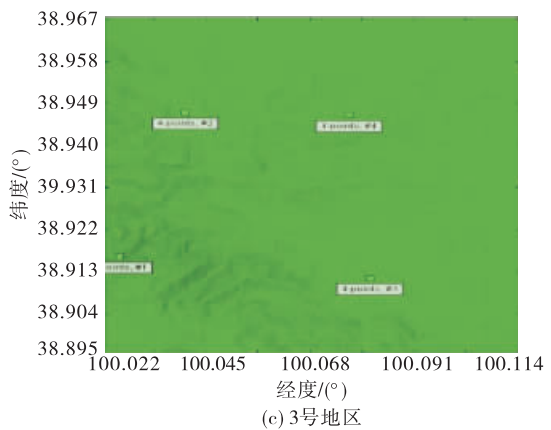
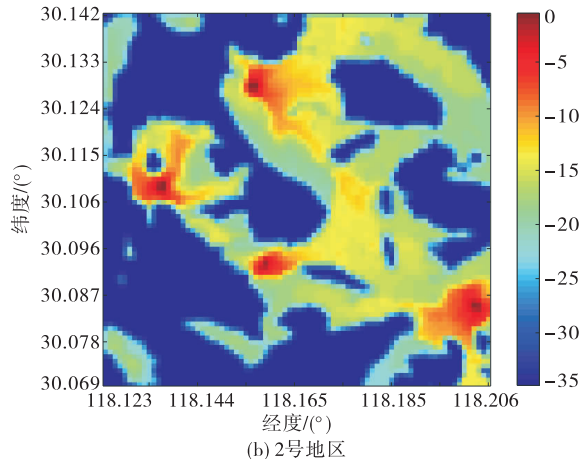
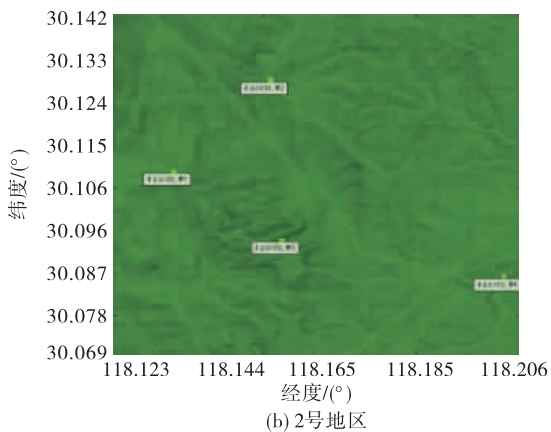
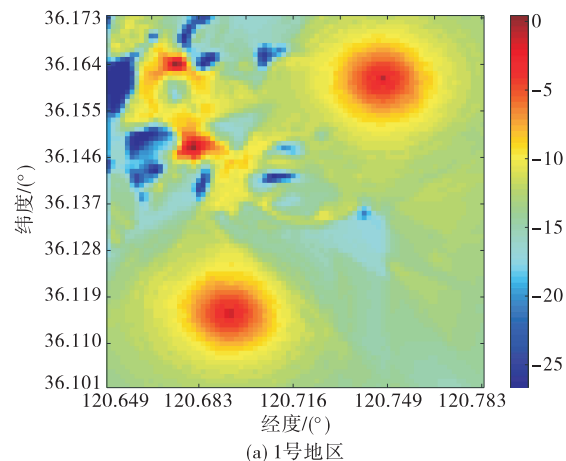
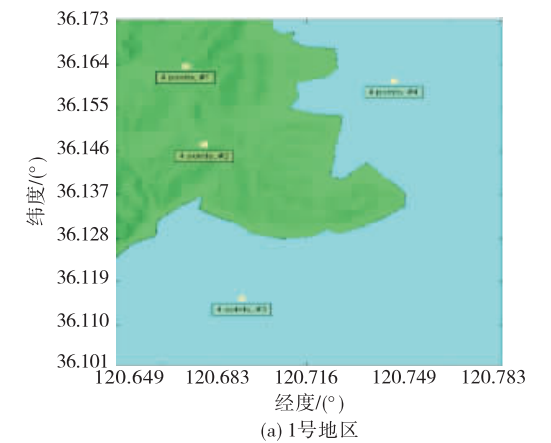


图2 不同地区地形及电台部署图

图3 不同地区标准电磁频谱地图

2.2 电磁频谱地图构建性能分析

从 Wireless Insite 中提取各个仿真场景的电场强度值,导入 MATLAB R2018b,在处理器为 AMD R7-4800H、RAM 为 16 GB、GeForce RTX 2060 的环境下运行。采用高斯模型作为变异函数模型,以聚类簇的个数为自变量,以各个仿真场景下的均方根误差 (RMSE) 为因变量,定义算法性能提升比 α 为:

$$\alpha = \frac{RMSE_K - RMSE_i}{RMSE_K} \quad (10)$$

式中: $RMSE_i$ 表示 i 个聚类下的克里金算法的 RMSE; $RMSE_K$ 为原始算法下的 RMSE。

为更加有效地衡量算法在各个场景的应用效果,对 60 个感知节点进行了 1 000 次的独立抽取,根据计算结果生成不同仿真环境下聚类个数与 RMSE 的变化关系图,如图 4 所示。将多个聚类簇下的 RMSE 与原始算法的 RMSE 进行比较后,形成如图 5 所示的性能提升曲线。与图 4 相比,图 5 消除了平均值带来的影响,算法性能提升更为直观。实验中,聚类数为 3 和 4 时的 RMSE 分别为 8.809 和 8.812,性能提升比呈现下降趋势,蓝线代表山地地形,场强分布杂乱,插值较为困难,从而造成算法效果提升不高。同时,为了评估各个仿真场景下应用算法的稳定性,计算每次聚类的 RMSE 的标准差,1 号、2 号、3 号和 4 号在 4 个仿真环境下得到的 RMSE 标准差分别为 0.204、0.397、0.229 和 0.290。经过比较可以看出,该算法相对于原始算法 RMSE 可降低 2%~5%。性能提升程度与地形有一定关系,地形越简单,电场分布的规律性越好,构建精度越高,算法应用更为稳定。

利用上述算法对目标区域进行插值估计,从 4 号地区随机选取 60 个位置放置感知节点,分别在原始算法、改进算法(3 个聚类簇)、改进算法(5 个聚类簇)下生成该地区电磁频谱地图,如图 6(a)~(d) 所示。

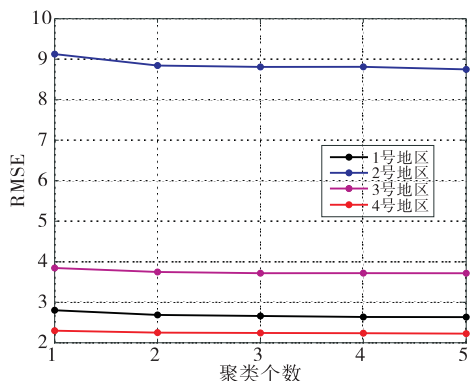


图 4 聚类个数与 RMSE 的变化关系图

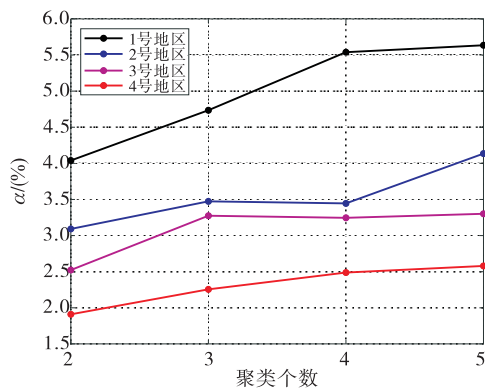
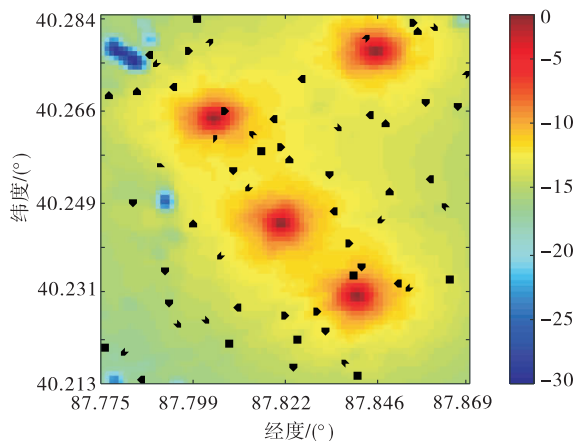
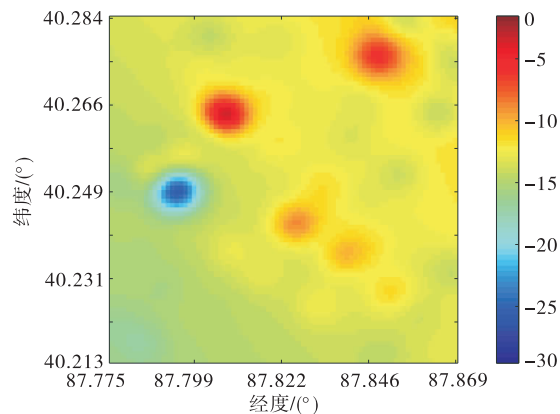


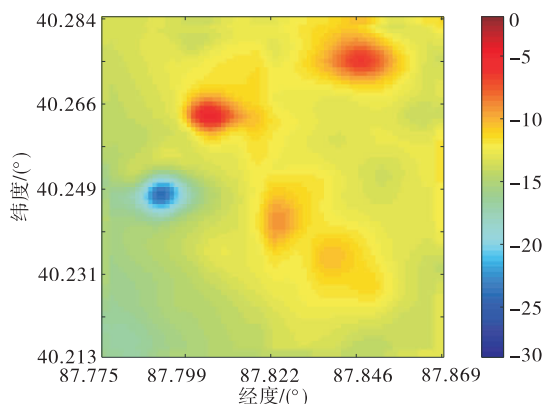
图 5 性能提升曲线图



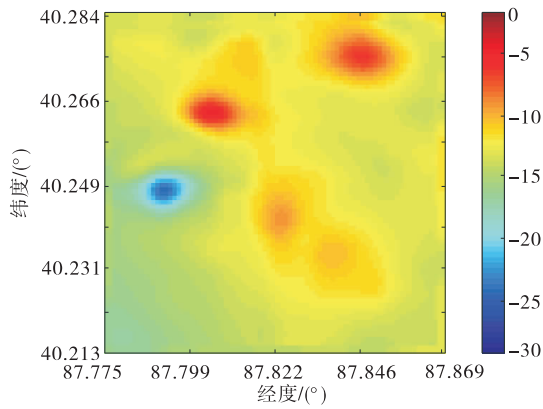
(a) 标准电磁频谱地图



(b) 原始算法电磁频谱地图



(c) 3个聚类簇电磁频谱地图



(d) 5个聚类簇电磁频谱地图

图6 不同算法下4号地区标准电磁频谱地图

随着聚类个数的增加,目标区域电磁频谱地图的RMSE逐步减小,原始算法、改进算法(3个聚类簇)和改进算法(5个聚类簇)的RMSE分别为1.77、1.76和1.70,改进算法相对于原始算法分别提高了0.5%和3.6%,证明本文所提算法在构建电磁频谱地图上具有可行性,能更好地反映电磁环境的真实情况。

在同样的实验条件下,对算法的复杂度进行分析,不同粒度下的算法复杂度及其对应的运行100次平均时间见表3。

表3 不同粒度下算法复杂度及其运行时间

算法	复杂度	运行平均时间/s
原始算法	$O(n^3)$	4.019 7
改进算法(2个聚类簇)	$O(3n^3)$	11.775 0
改进算法(3个聚类簇)	$O(6n^3)$	22.765 4
改进算法(4个聚类簇)	$O(6n^3)$	34.029 7
改进算法(5个聚类簇)	$O(6n^3)$	48.773 2

2.3 算法容错性分析

由于介电常数变化、障碍物折射等客观不定因素影响,电场强度会在一定范围内波动,基于对算法的容错性分析,验证算法应对环境的适应能力。根据2.2节的实验现象,选取地形较为简单的4号地区作为实验场景。在生成的随机感知节点中,随机选取一组感知节点作为后续实验的固定已知点,感知节点分布见图7。

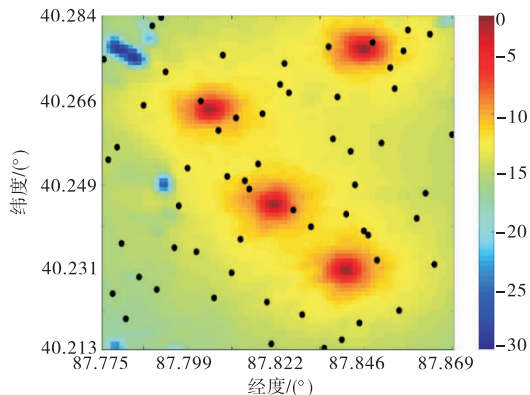


图7 感知节点分布图

随后,在标准电磁频谱地图数据上采集感知节点的电场强度值,以噪声强度代表由于客观因素造成的电场强度数据误差,对数据进行不同程度的加噪处理,将处理后的数据代入本文所提算法,在不同粒度下进行验证,实验结果见图8。

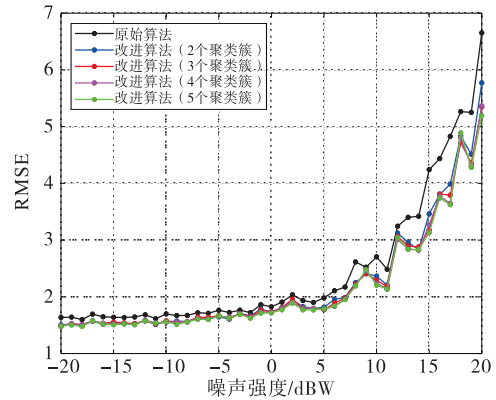


图8 噪声强度对构建精度的影响

根据实验结果可知,本算法在噪声强度较小时, RMSE变化平稳,聚类个数对构建精度影响不大,但原始算法的效果普遍低于本文算法。当噪声强度增大时, RMSE逐渐加大,噪声强度小于8 dBW时, RMSE保持平稳;噪声强度大于8 dBW时, RMSE明显增大,改进算法相对于原始算法有较好优势,表明本文算法在强噪声下的构建精度更高,容错能力更强。

从以上实验得知,本文算法在4个场景中应用效果较之原始算法都有较大提升,地形越复杂,提升效果越明显。通过算法性能分析的实验,证明本文算法在细粒度下构建精度有所提升,且聚类个数越多,粒度越细,性能提升比越大。根据大量实验可得,聚类数为2~3时,时间性能比相对较大,可以为后续运用提供建议。此外,通过容错性分析实验表明,算法对于8 dBW以下的噪声强度有较好的适应性,对电磁频谱地图构建精度影响不大,而感知节点数量不足的情况下,该算法可以通过划分更为精细的粒度,改善构建精度,证明本文算法鲁棒性强,应用能力广泛。

3 结语

本文旨在探究战场条件不利情况下提高电磁频谱地图的构建精度,考虑到感知节点分布不均影响电磁频谱地图构建效率,提出了一种基于Kriging算法的多粒度电磁频谱地图构建技术,引入了多粒度插值的思路和均匀度的概念改进Kriging算法,以Voronoi图的原理计算了各个粒度区域的均匀度,并将其作为数据融合的权值,实现了在感知节点

有限的情况下生成更为精确的电磁频谱地图,并验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 李峥, 旷生玉, 余康, 等. 电磁态势演进与发展思考[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(4): 44-49.
- [2] SZMIT G, LOPATKA J. Optimization of Cognitive Radio Networks Performance Using Policies Definition [C]// 2015 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). Cracow, Poland; IEEE, 2015: 1-7.
- [3] HU Y, ZHANG R. Differentially-Private Incentive Mechanism for Crowdsourced Radio Environment Map Construction [C]// IEEE Conference on Computer Communications. Paris, France; IEEE, 2019.
- [4] LIANG Y Y, PENG T, HAN Z Z, et al. Reverberation Chamber Simulation System Research on Radar Battlefield Electromagnetic Environment [C]// 2015 International Power, Electronics and Materials Engineering Conference. [S. l.]: Atlantis Press, 2015: 125-129.
- [5] ZI R, CHANG J, ZONG R, et al. Research on the Construction of Radio Environment Map (REM) Based on Spatial Interpolation [C]// International Conference on Communications and Networking in China. [S. l.]: Springer, Cham, 2017: 405-415.
- [6] URETEN S, YONGACOGLU A, PETRIU E. A Comparison of Interference Cartography Generation Techniques in Cognitive Radio Networks [C]// IEEE International Conference on Communications. Ottawa, ON, Canada; IEEE, 2012: 1879-1883.
- [7] 夏海洋, 查淞, 黄纪军, 等. 电磁频谱地图构建方法研究综述及展望[J]. 电波科学学报, 2020, 35(4): 445-456.
- [8] SUCHANSKI M, KANIEWSKI P, ROMANIK J, et al. Radio Environment Maps for Military Cognitive Networks: Deployment of Sensors vs Map Quality [C]// 2019 International Conference on Military Communications and Information Systems. Budva, Montenegro; IEEE, 2019: 1-6.
- [9] 张舒明, 柯炜, 唐万春, 等. 结合滑动窗口法和 MBPE 的电磁场重构算法[J]. 中国科技论文, 2020, 15(11): 1296-1301, 1307.
- [10] ZHANG S, YAO J, LI B, et al. Electric Field Reconstruction Using Block Spatial Model-Based Parameter Estimation [C]// APCAP. Incheon, Korea (South); IEEE, 2019: 375-376.
- [11] 蒋涵铭. 区域环境信息感知及预测方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [12] 路镜涵, 查淞, 黄纪军, 等. 基于观测值差值的频谱地图的补全方法[J]. 微波学报, 2018, 34(A02): 426-430.
- [13] LU J, ZHA S, HUANG J, et al. The Iterative Completion Method of the Spectrum Map Based on the Difference of Measurement Values [C]// 2018 IEEE 3rd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP). Shenzhen, China; IEEE, 2018: 255-259.
- [14] HAN X, XUE L, XU Y, et al. A Two-Phase Transfer Learning-Based Power Spectrum Maps Reconstruction Algorithm for Underlay Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Access, 2020, 8: 81232-81245.
- [15] 周宇, 王红军, 邵福才, 等. 无线通信网络电磁态势生成中的信号覆盖探测算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(6): 1088-1096.
- [16] WANG H J, ZHOU Y, SHA W H. Research on Wireless Coverage Area Detection Technology for 5G Mobile Communication Networks [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(12): 155014771774635.
- [17] MAO D, WEI S, QIAN Z, et al. Constructing accurate Radio Environment Maps with Kriging Interpolation in Cognitive Radio Networks [C]// 2018 Cross Strait Quad Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). Xuzhou, China; IEEE, 2018: 1-3.
- [18] XIAO S, ROTARU M, SYKULSKI J K. Adaptive Weighted Expected Improvement with Rewards Approach in Kriging Assisted Electromagnetic Design [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2057-2060.
- [19] SINAGA K P, YANG M S. Unsupervised K-Means Clustering Algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 80716-80727.
- [20] 朱永兴, 谭述森, 杜兰, 等. 顾及粗差影响的全球电离层克里金插值及精度分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 840-848.
- [21] HOSEINI M, DEHGHAN M, PEDRAM H. A New Measurement Method of the Node and Energy Distribution Uniformity in the Sensor Networks [C]// 2012 8th International Conference on Information Science and Digital Content Technology (ICIDT2012). Jeju, Korea (South); IEEE, 2012: 183-188.
- [22] OLOKODANA I L, MOHANTY S P, KOUGIANOS E. Ordinary-Kriging Based Real-Time Seizure Detection in an Edge Computing Paradigm [C]// 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas, NV, USA; IEEE, 2020.
- [23] SAVVAS I K, TSELIOS D. Combining Distributed and Multi-core Programming Techniques to Increase the Performance of K-Means Algorithm [C]// IEEE International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises. Poznan, Poland; IEEE, 2017: 95-100.
- [24] SMITH E, TREFFTZ C, DEVRIES B. A Divide-and-Conquer Algorithm for Computing Voronoi Diagrams [C]// 2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). [S. l.]: IEEE, 2020: 495-499.

(编辑: 徐楠楠)