

三维空域频谱态势生成算法研究

赵晨一¹
ZHAO Chenyi

摘要

通过调研国内外频谱态势测绘的研究现状,比较现有的各个频谱补全算法的优缺点,给出频谱补全算法的原理概述。在传统的基于数据或者模型驱动方法的基础上,提出了基于数据模型双驱动的逆距离加权三维频谱态势补全算法,解决了现存方法大多只适用于二维频谱补全或者在三维频谱补全场景中补全精度低的问题。数据模型双驱动的逆距离加权三维频谱态势补全算法在传统的逆距离加权法的基础上,结合信道传播损耗模型,传统的运用于二维平面的频谱补全方法扩展到三维空间,综合考虑方向、距离和路径损耗等因素,改进传统的逆距离加权法,极大提高了补全的精度。

关键词

频谱; 频谱态势测绘; 频谱补全算法; 三维频谱; 逆距离加权法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.02.020

0 引言

随着移动通信技术的飞速发展,移动互联网、物联网、互联网+、大数据、人工智能等新兴技术和服务不断涌现,新型无线多媒体业务增长迅猛。按照 CISCO 公司统计的结果来看,世界各地的每月移动业务数据总量将会从2012年的0.8艾字节(exabyte, EB)向2022年的30.6 EB^[1]迅速增加。随着无线数据业务的迅速增加,原本有限的频谱资源越来越少,频谱需求也越来越密集,无线通信行业的发展也会受到巨大的影响。在信息环境中,5G通信的核心技术是电磁频谱,而电磁频谱又是信息时代必不可少的国家战略资源,对频谱环境感知的有效性、合理性、准确性和快速性亟待提高。取得频谱作战优势在维护国家安全和形象方面具有重大的意义。电磁频谱是《国家无线电管理规划(2016—2020年)》中的国有稀缺资源,在战略意义方面有着举足轻重的作用。随着天地一体化信息网络、航天飞行器、电磁频谱的空域作战等领域快速发展,电磁频谱资源面临的三大问题:(1)频谱面临资源短缺的问题^[1-4];(2)频谱面临不可忽视的安全问题^[5-7];(3)频谱面临的对抗挑战十分激烈^[8]正在从陆域向空域扩展。

面对这些挑战,首先需要了解频谱态势的具体情况。频谱态势主要有电磁环境当前的状态、综合形势以及未来的变化趋势^[9]。电磁频谱态势地图简称频谱地图(spectrum map),也被称为无线电环境地图(radio environment map, REM)或者射频地图(radio map)。美国 Virginia 技术团队

第一次提出了无线电环境地图的概念与模型,为的是把频谱数据和地理地图联系在一起,用以构建包含用频设备及行为、频谱政策、规则、地理特征及可用频谱资源等多维信息的数据库^[10]。构建频谱地图的过程被称为频谱态势测绘,在电磁频谱空间认知研究中,频谱态势测绘是主要任务也是必须解决的问题,是频谱态势生成的关键。频谱地图可以从地理位置、频率、时间、能量等多个层面来实现公众难以理解的频谱态势信息,同时也能反映出测量范围内频谱态势的实时情况。

1 研究现状

1.1 国内外主流频谱态势测绘系统

目前,主流的电磁频谱测绘系统主要可以分为天基、空基和地基三种^[11]。天基频谱测绘系统主要有 Kleos Space 和美国的 HawkEye360。其中, Kleos Space 提供地理定位情报数据服务,针对船只关闭自动识别系统情况,利用甚高频信号定位船只位置,其主要应用于海事态势感知; HawkEye360 通过在全球范围内采集特殊的无线电上行发射信号,实现高精度无线电测绘和上行射频信号定位。地基频谱测绘系统大多采用频谱感知传感器或者手持频谱分析仪,商用的地基电磁频谱测绘系统有日本安立公司的远程频谱监测可视化系统 MS280001A 和 MS280007A。空基电磁频谱测绘系统有德国 Colibrex 公司的系留式无人机监测系统 Colibrex LS OBSERVER AMU,该系统可以完成绘制频谱地图和测量天线方向图等的功能。

1.2 国内外主流频谱态势生成方法

主流的频谱地图构造方法主要包括数据驱动和模型驱动

1. 中通服咨询设计研究院有限公司 江苏南京 210019

的频谱地图构建方法。其中,数据驱动构造频谱地图的方法主要分为以下几种。

(1) 逆距离加权法 (inverse distance weighted, IDW)^[13], 又称为 Shepard 法, 是一种经典的空间插值法。逆距离加权法的基本原理是运用已知的采样点数据间的空间相关性, 也就是在目标区域内, 各位置的频谱数据满足的地理学第一规律。简单地说, 空间插值法认为当采样数据和未知位置越接近时, 采样数据和该未知位置的频谱数据的相似程度越高。逆距离加权法的优点在于不用设置超参数, 构造频谱地图的速度快, 平滑度高。但是逆距离加权法的缺点则在于, 当频谱地图受到样本点分布不均匀或者异常值的影响时, 构造性能不理想, 造成补全的结果精度不够高。

(2) 克里金内插法^[14], 也被称为空间自协方差最佳插补法。克里金内插法的原理是利用统计的模型对测量到的数据进行分析处理。克里金内插法主要有简单克里金法、协同克里金法、泛克里金法、普通克里金法等。克里金内插法和逆距离加权法相比较, 在综合考虑已采样点与待估计点的距离因子的同时, 还考虑了各个已采样点间的空间自相关性^[15]。因此, 克里金内插法适用于采样点分布相对不均匀的情况, 此时采用该方法构建频谱地图的精确度较高, 性能较为理想。但是克里金内插法的缺点在于, 当目标区域出现接收信号强度 (received signal strength, RSS) 突变的情况时, 该方法的补全性能较差。因此克里金内插法适用于固定频谱感知的频谱态势测绘系统, 不适用于只有移动频谱感知的频谱态势测绘系统。

(3) 张量补全方法, 被广泛地应用于计算机视觉和数字图像处理领域, 由多维数组组成。文献 [16] 以张量补全的方式构造出三维频谱地图, 将传统的二维频谱地图扩展到三维频谱地图, 介绍了频谱张量的概念。在多维频谱数据补全场景中可以使用张量补全方法, 对于多维频谱数据补全问题, 可以优先采用张量补全方法。虽然张量补全在数据随机缺失的情况下的补全性能很好, 但美中不足的是, 实际情况中, 空间采样时极少会出现数据随机遗漏的情况, 如果是数据有规律的缺失, 那么采样张量补全方法的补全效果并不理想。

(4) 机器学习方法, 是人工智能研究技术中发展最快的一种方法, 在目前主要的研究领域中得到了广泛的应用。文献 [17] 提出一种基于卷积神经网络的空间插值方法。其原理是, 从测量频谱数据集里面获得一个映射函数, 然后进一步得到进行空间内插后的测量区域的完整的频谱。机器学习方法在低均匀度采样和数据大规模缺失的情况下有很好的构建效果, 但是采用此方法需要大量的实测数据才能构建较为理想的频谱地图, 在特定情况下可能出现过拟合现象。

模型驱动的频谱构建则是利用无线电信道传播模型的方法^[18], 其中“模型”通常指的是无线信道的传播损耗模型或者信道损耗模型, 其属于信道传播模型。主要方法有以下几种。

(1) 基于发射源位置的估计法 (active transmethod location estimation based method, LIE)^[19], 与传统的数据驱动的空间插值法相比有较高的构建精度。但是基于发射机位置估计法的局限性在于只考虑测量区域内仅仅存在单辐射源的情况, 在实际情况中很少有单辐射源的情况。同时基于发射源位置的估计法只考虑辐射源直射径的影响, 因此当测量区域出现电磁波反射或者吸收现象的时候, 其构建精度较差。

(2) 接收信号强度差值 (received signal strength difference, RSSD) 法^[20], 与基于发射源位置估计法类似, 也是假设目标区域只存在单辐射源的情况, 但不同之处在于接收信号强度差分法要求测量区域内已知辐射源功率。同样的问题是, 当测量区域出现遮挡问题时, 仍存在构建精度不准确的问题。

(3) 基于路径损耗加权的内插法^[21], 与传统的逆距离加权法类似, 利用信道传播损耗模型提升构建精度, 但是, 容易受到采样点数据分布不均匀和异常值的影响。

2 数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型逆距离加权法

由于机器学习方法的高复杂性, 以及基于发射源位置估计法在出现遮挡时构建精度不高的问题, 本章在现有的逆距离加权法的基础上, 提出数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法。结合方向、距离和路径损耗这三个因素综合考量, 在逆距离加权空间插值法的基础上, 加入路径损耗模型, 当采样点分布均匀时, 进行频谱补全。

2.1 方向因素

首先, 考虑方向这一因素在频谱补全的过程中对于补全结果的影响。假定前提已知采样点和待补全点之间的距离相等 $d_1=d_2=d_3=d_4$ 时, 当采样点分布在补全点的一侧时, 如图 1 所示。

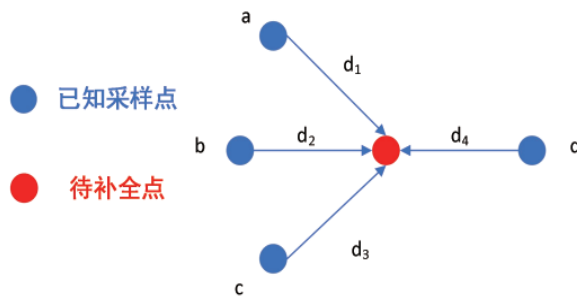


图 1 采样点集中分布不均匀的情况

图 1 中左侧 a、b、c 三个已采样点分布密集, 但是右侧

d 采样点分布稀疏, 此时左侧三个已知采样点对于待补全点的影响和右侧 d 已知采样点对待补全点的影响是不同的, 也就是此时的分配权重是不平均的。

当已知采样点均匀分布在待补全点四周时, 如图 2 所示, 每个已知采样点对于待补全点的影响才是相近的, 此时的权重才是合理的。

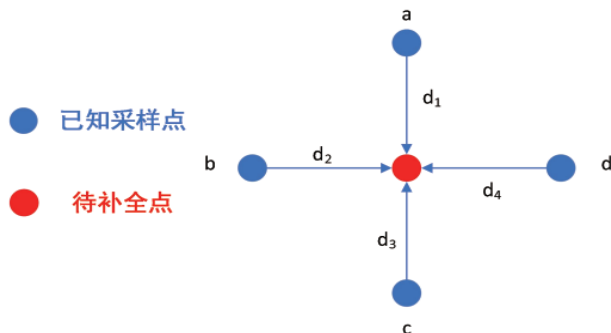


图 2 采样点分布均匀的情况

2.2 距离因素

考虑距离因素。经典的逆距离加权法利用所有可以采用的已知采样点进行插值, 改进后的逆距离加权法, 同时考虑了插值函数的斜率, 在传统的逆距离加权法的基础上, 结合改进 Shepard 法, 建立节点方程, 在测量区域内利用所有已知采样点对待补全的点进行全局插值。在三维频谱补全场景中, 选用线性节点方程更加合适。不考虑其他影响因素的情况下, 当已知采样点距离待补全点越近时, 影响权重越大, 系数值也就越大。

2.3 路径损耗因素

考虑路径损耗对于补全结果的影响, 根据无线信道传播损耗模型, 设 L 为已知采样点 (x_m, y_m, z_m) 距离待补全点 (x_0, y_0, z_0) 之间的路径损耗, f_c 为构建的频谱地图中的辐射源的中心频率, A 和 B 分别为无线信道传播损耗模型中的参数, 该参数大小和当前的测量环境相关, 路径损耗可以用公式表示为:

$$L = 32.4 + 20 \lg(f_c) + 10(A \cdot h^B) \cdot \lg(d),$$

$$h = |z_m - z_0|,$$

$$d = \sqrt{(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + (z_m - z_0)^2}$$
(1)

用 l 表示已知采样点距离待补全点之间的路径损耗对于待补全点的影响权重, 则公式可以表示为:

$$l = \frac{L^1}{\sum_{i=1}^N L^1}$$
(2)

l 的值越小, 表示从已知采样点距离待补全点之间的路径

损耗越大。

2.4 频谱补全流程

总结上述考虑了距离、方向和路径损耗三个影响因素的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的算法流程图如图 3 所示。

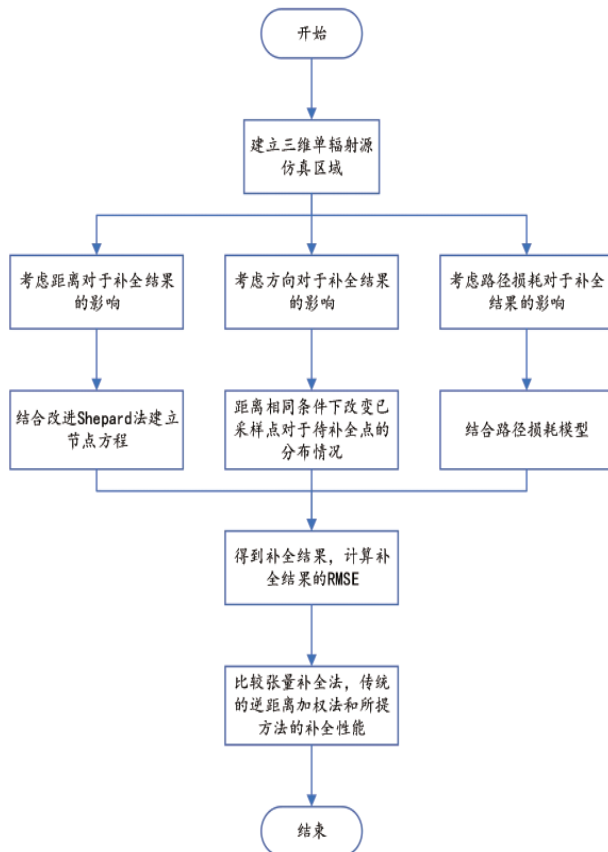


图 3 数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的流程图

3 频谱地图补全仿真与分析

3.1 均匀度计算

对于三维频谱测绘的情况, 第一步, 把需要补全的点和周围的 N 个已知采样点, 作为三维测量区域计算均匀度的最小区域; 第二步, 用数个第一阶单位立方块生成一个第一阶立方块, 涵盖整个测量范围; 第三步, 判断第一阶单位立方块中的已知采样点数量是否大于 1, 如果第一阶单位立方块中的已知采样点数量大于 1, 则把第一阶单位立方块再次划分成 8 个相同的第二阶单位立方块; 第四步, 重复第三步的操作, 如果第二阶单位立方块中的已知采样点数量大于 1, 则把第二阶单位立方块再次划分成 8 个相同的第三阶单位立方块; 第五步, 重复上述操作, 直到所有的单位立方块中的采样点数目为 1 或者 0; 第六步, 给每个采样点编码, 编码依据是其所在的单位立方块的阶级数; 第七步, 计算测量范围的三维均匀度。其流程图如图 4 所示。

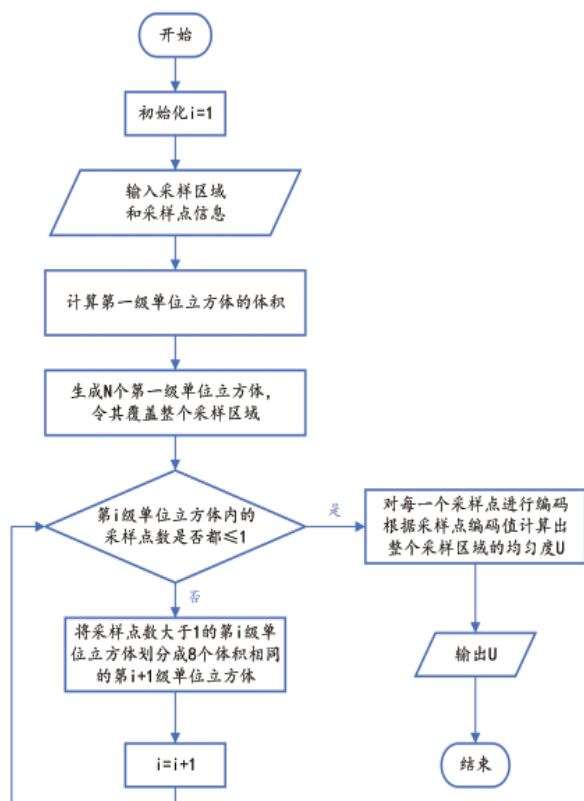


图4 三维均匀度计算流程

3.2 补全性能指标 RMSE

针对单个辐射源的模拟场景，设置不同的采样点分布情况，即不同均匀度的情况，然后分别用张量补全法、传统的逆距离加权法和数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法进行三维空间的频谱地图补全，用 RMSE 表示频谱补全的性能，RMSE 的值越小，表示补全的精度更高，补全性能更优。

3.3 100 MHz 时不同均匀度下的频谱补全结果分析

3.3.1 仿真场景建立

用 MATLAB 软件建立一个大小为 $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的三维空间仿真区域，并将其均匀分割成 $50 \times 50 \times 10$ 个子网格块，在目标场景内建立一个发射功率是 40 dBm，中心频率是 100 MHz 的发射源，如图 5 所示。

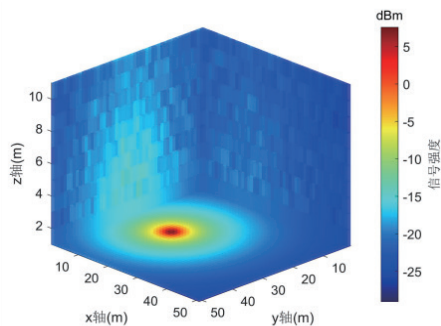


图5 三维空间频谱补全仿真场景

在此仿真场景中，设置不同的均匀度 15%、30%、45%、60%、75% 和 90%，分别采用张量补全法、传统的逆距离加权法和本文提出的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法进行三维频谱补全，将补全性能用 RMSE 表示，并归纳为折线图，直观地表示出不同均匀度下三种方法的补全性能变化。

3.3.2 不同均匀度情况下的频谱补全

(1) 均匀度为 15% 时的频谱补全结果如图 6 所示。

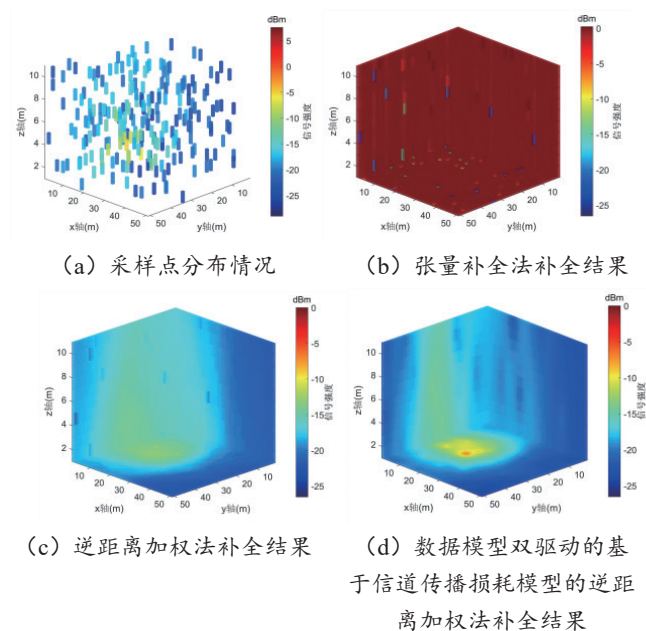
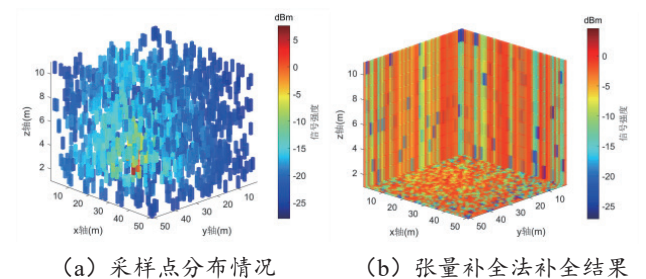


图6 均匀度为 15% 时的频谱补全结果

均匀度为 15% 时采样分布情况如图 6 (a) 所示，此时采样点分布稀疏，均匀度低。采用张量补全法的补全结果如图 6 (b) 所示，此时信号强度的 RMSE 值为 -0.0574 dB ，补全精度很低，性能不理想。采用传统的逆距离加权法的补全结果如图 6 (c) 所示，此时的均方根误差值为 -9.8931 dB ，与张量补全法的补全性能相比有很大的提升。采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全结果如图 6 (d) 所示，此时的 RMSE 值为 -11.0577 dB ，低于用张量补全法和传统的逆距离加权法进行补全的 RMSE 值，补全性能较两者相比更好，精度更高。

(2) 均匀度为 30% 时的频谱补全结果如图 7 所示。



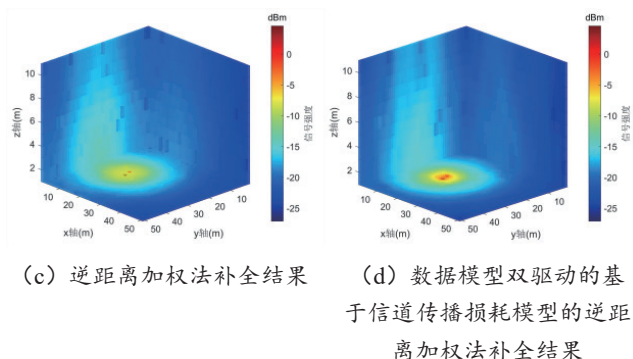


图7 均匀度为30%时的频谱补全结果

均匀度为30%时采样分布情况如图7(a)所示,此时采样点分布稀疏。采用张量补全法的补全结果如图7(b)所示,此时的RMSE值为-1.2077 dB,补全精度很低,性能不理想。采用传统的逆距离加权法的补全结果如图7(c)所示,此时的RMSE值为-12.0497 dB,补全性能较张量补全法有很大提升,但是精度仍然不高。采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全结果如图7(d)所示,此时的RMSE值为-12.3708 dB,其性能较张量补全法和传统的逆距离加权法有很大的提升。

(3) 均匀度为45%时的频谱补全结果如图8所示。

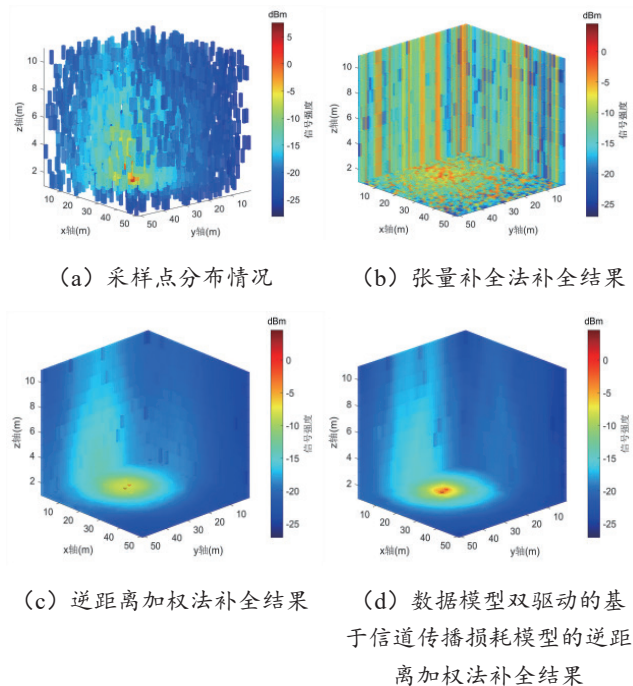


图8 均匀度为45%时的频谱补全结果

均匀度45%时采样点分布情况如图8(a)所示,采用张量补全法的补全结果如图8(b)所示, RMSE值为-2.7328 dB。

采用张量补全法得到的频谱地图补全精度依旧很低,性能不理想。采用传统的逆距离加权法的补全结果如图8

(c)所示,此时的RMSE值为-12.5798 dB。采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全结果如图8(d)所示,此时补全结果的RMSE值为-12.7604 dB。与张量补全法相比,采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全性能有较大的提高,精度更高,和传统的逆距离加权法相比补全性能相近。

(4) 均匀度为60%时的频谱补全结果如图9所示。

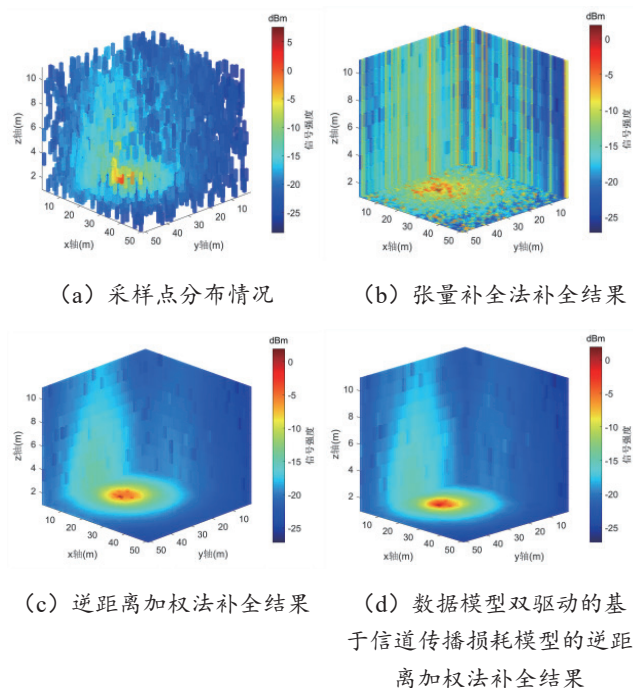
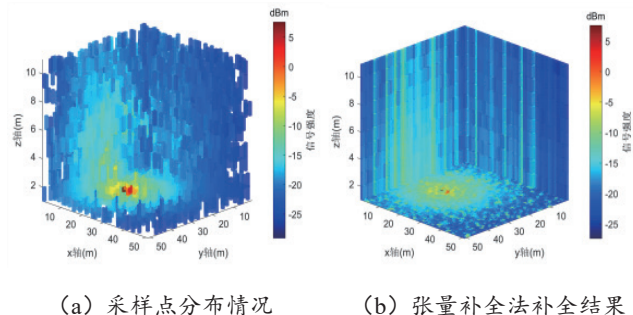


图9 均匀度为60%时的频谱补全结果

均匀度为60%时采样分布情况如图9(a)所示,采用张量补全法的补全结果如图9(b)所示,此时的RMSE值为-3.6853 dB,补全性能有所提高。采用传统的逆距离加权法的补全结果如图9(c)所示,此时的RMSE值为-12.8327 dB,采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全结果如图9(d)所示,此时的RMSE值为-13.0165 dB。较15%、30%和45%均匀度情况下,补全性能得到了提高。

(5) 均匀度为75%时的频谱补全结果如图10所示。



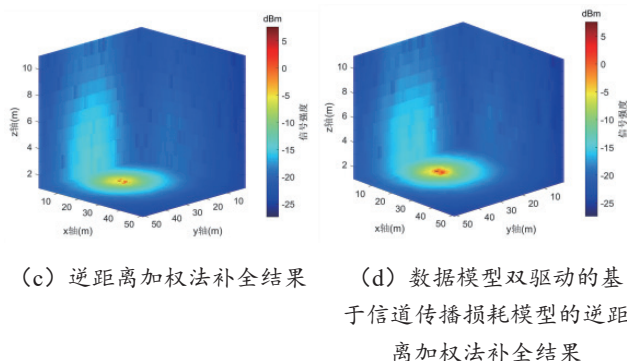


图 10 均匀度为 75% 时的频谱补全结果

均匀度为 75% 时采样分布情况如图 10 (a) 所示, 采用张量补全法的补全结果如图 10 (b) 所示, 此时的 RMSE 值为 -6.843 3 dB, 补全精度有所提升, 但仍然很低。采用传统的逆距离加权法的补全结果如图 10 (c) 所示, 此时的 RMSE 值为 -13.081 0 dB, 采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全结果如图 10 (d) 所示, 此时补全结果的 RMSE 值为 -13.149 0 dB。可以得出, 在均匀度为 75% 情况下, 张量补全法的补全性能已经和采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全性能十分相近, 但是仍然偏低。采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全性能。

(6) 均匀度为 90% 时的频谱补全结果如图 11 所示。

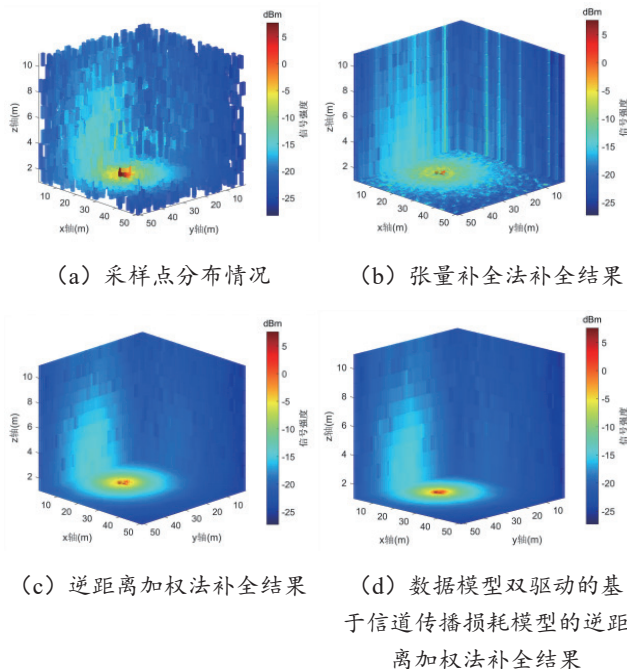


图 11 均匀度为 90% 时的频谱补全结果

均匀度为 90% 时采样分布情况如图 11 (a) 所示, 采用张量补全法的补全结果如图 11 (b) 所示, 此时的 RMSE 值

为 -8.537 8 dB, 补全精度有了很大的提升, 较低均匀度时补全性能得到了提升。采用传统的逆距离加权法的补全结果如图 11 (c) 所示, 此时的 RMSE 值为 -13.328 1 dB, 采用数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全结果如图 11 (d) 所示, 此时补全结果的 RMSE 值为 -13.362 7 dB。在均匀度为 90% 情况下, 张量补全法的性能有了很大的提高, 传统逆距离加权法和数据模型双驱动的逆距离加权法的补全性能最为接近, 其补全精度比张量补全法高出很多。

3.3.3 不同均匀度下补全性能变化

根据仿真实验得到的结果, 各方法的 RMSE 汇总归纳为折线图如图 12 所示。

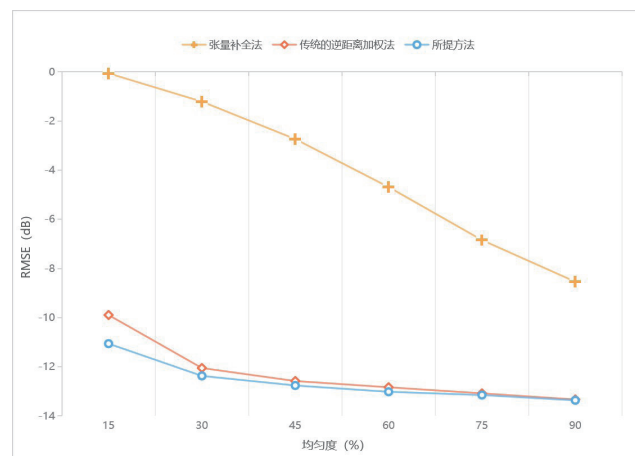


图 12 不同均匀度下补全性能变化

可以看出, 在低均匀度时, 文中提出的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的补全性能明显优于张量补全法和传统的逆距离加权法, 随着均匀度的逐渐增加, 传统的逆距离加权法的性能和提出的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法的性能趋同, 但是仍然远高于张量补全法。尤其在低均匀度时所提的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法明显地提高了三维频谱地图的补全精度。在高均匀度时, 补全精度仍然有所提升。

4 研究总结

本文通过调研国内外频谱态势测绘的研究现状, 比较现有的各个频谱补全算法的优缺点, 给出频谱补全算法的原理概述。在传统的数据或者模型驱动方法的基础上, 提出了基于数据模型双驱动的逆距离加权三维频谱态势补全算法, 解决了现存方法大多只适用于二维频谱补全或者在三维频谱补全场景中补全精度低的问题。数据模型双驱动的逆距离加权三维频谱态势补全算法在传统的逆距离加权

法的基础上,结合信道传播损耗模型,传统的运用于二维平面的频谱补全方法扩展到三维空间,综合考虑方向、距离和路径损耗等因素,改进传统的逆距离加权法,极大提高了补全的精度。

根据结果可以知道,随着均匀度的提高,各方法的补全性能逐渐提升,数据模型双驱动的逆距离加权三维频谱态势补全算法的性能高于传统的逆距离加权法,且远高于张量补全法。尤其是在低均匀度时所提的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法明显地提高了三维频谱地图的补全精度。在高均匀度时,所提的数据模型双驱动的基于信道传播损耗模型的逆距离加权法补全精度仍然有所提升。

参考文献:

- [1] CISCO. Global mobile data traffic forecast update 2016—2021 white paper[Z].2017-5-12.
- [2] 徐宏飞,杨健,刘得胜.认知无线电与未来电磁频谱管理[J].中国无线电,2015(6):39-41+52.
- [3] 罗金亮,王雷,杨健,等.美“电磁频谱战”作战概念解析[J].中国电子科学研究院学报,2016,11(5):474-477.
- [4] 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.
- [5] 张恒.继续保持打击“黑广播”“伪基站”的高压态势[J].中国无线电,2017(1):17-18.
- [6] 杨立坤,薛凡,孙宏志,等.打击非法调频广播电台净化空中电磁环境[J].中国无线电,2014(10):17+19.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部.2020年打击治理“黑广播”“伪基站”情况[EB/OL].(2021-1-25)[2023-09-26].
https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/sjdt/art/2021/art_e38f0db-3c6024d30a603d9c0305e4405.html.
- [8] 李竞铭.面向频谱地图构建的频谱态势生成技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2019.
- [9] 吴启晖,任敬.电磁频谱空间认知新范式:频谱态势[J].南京航空航天大学学报,2016,48(5):625-632.
- [10] ZHAO Y, REED J H, MAO S, et al. Overhead analysis for radio environment map-enabled cognitive radio networks[C]//2006 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks (SDR).Piscataway:IEEE, 2006: 18-25.
- [11] 朱秋明,杜孝夫,吴启晖,等.传播模型驱动的三维频谱地图测绘研究[J].宇航总体技术,2021,5(6):1-11+19.
- [12] 查淞,路镜涵,黄纪军,等.基于监测数据的非参数频谱地图构造方法[J].微波学报,2018,34(2):431-434.
- [13] DENKOVSKI D, ATANASOVSKI V, GAVRILOVSKA L, et al. Reliability of a radio environment map: case of spatial interpolation techniques[C]//2012 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). Piscataway:IEEE, 2012: 248-253.
- [14] 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). Piscataway: IEEE, 2018:1-3.
- [15] 包世泰,廖衍旋,胡月明,等.基于Kriging的地形高程插值[J].地理与地理信息科学,2007(3):28-32.
- [16] 吴启晖,唐梦云.基于张量补全的多维频谱地图构建[J].信号处理,2017,33(S1):47-52.
- [17] HASHIMOTO R, SUTO K. SICNN: Spatial interpolation with convolutional neural networks for radio environment mapping[C]//2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). Piscataway: IEEE, 2020:167-170.
- [18] BASSER P J, MATTIELLO J, LEBIHAN D. MR diffusion tensor spectroscopy and imaging[J]. Biophysical journal, 1994, 66(1): 259-267.
- [19] YILMAZ H B, TUGCU T. Location estimation-based radio environment map construction in fading channels[J]. Wireless communications & mobile computing, 2015, 15(3): 561-570.
- [20] ALFATTANI S, YONZACOGU A. Indirect methods for constructing radio environment map[C]//2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). Piscataway: IEEE, 2018:1-5.
- [21] 王梦艺,盛业华,黄一昀,等.电磁地理环境监测数据空间插值方法[J].地球信息科学学报,2017,19(7):872-879.

【作者简介】

赵晨一(1999—),男,江苏无锡人,本科,研究方向:数据及有线接入。

(收稿日期:2023-11-28)