

文章编号: 2095-4980(2021)04-0549-08

## 电磁空间态势研究现状综述

李泓余<sup>1</sup>, 韩路<sup>1</sup>, 李婕<sup>1</sup>, 唐磊明<sup>1</sup>, 况婷妍<sup>1</sup>, 丁国如<sup>2</sup>

(1.南京航空航天大学 电磁频谱空间认知动态系统工信部重点实验室, 江苏 南京 211106;

2.陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 面对日益复杂的电磁环境, 电磁空间态势因其整体性、动态性、关联性、可视性、海量性、多维性等特点, 为提升用频系统综合性能、实现移动通信系统频谱共享及保障重大安保活动频谱安全等提供了重要的理论支撑, 已经逐渐成为国内外频谱领域最具活力的研究方向之一。本文从电磁空间态势的角度出发, 重点介绍了国内外电磁空间态势研究的相关技术, 并进一步系统性介绍了国内外的代表性工作。最后, 总结了电磁空间态势研究的重要性与发展现状, 并提出了该领域在未来面临的挑战。

**关键词:** 电磁频谱空间; 电磁空间态势感知; 电磁空间态势分析与可视呈现; 频谱地图

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021156

## A summary of the present situation of electromagnetic space situation research

LI Hongyu<sup>1</sup>, HAN Lu<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, TANG Leiming<sup>1</sup>, KUANG Tingyan<sup>1</sup>, DING Guoru<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology on Electromagnetic Spectrum Spatial Cognitive Dynamic Systems, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China;

2.School of Communication Engineering, Army University of Engineering, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Due to the increasingly complex electromagnetic environment, the electromagnetic space situation has the characteristics of integrity, dynamics, relevance, visibility, mass, multi-dimensionality and so on. The study on the electromagnetic space situation provides an important theoretical support for improving the comprehensive performance of the frequency system, realizing the spectrum sharing of the mobile communication system and ensuring the spectrum security of major security activities, which has gradually become one of the most dynamic research directions in the spectrum field. The related technologies of electromagnetic space situation research at home and abroad are highlighted in this paper, and the representative work is systematically introduced. The importance and development status of electromagnetic space situation research are summarized, and the challenges in this field in the future are put forward.

**Keywords:** electromagnetic spectrum space; electromagnetic space situation awareness; electromagnetic space situation analysis and visual presentation; spectrum map

电磁空间作为国土空间的重要组成部分, 已成为信息时代、智能时代的人类社会主要活动空间之一。随着各类电磁用频设备和系统的数量呈现爆炸式增长, 电磁空间日益错综复杂, 演变成由多主体、多因素、多变量构成的互为输入输出的复杂系统。一方面, 电磁空间已跻身为继陆、海、空、天、网络(赛博)之后的第六维作战空间, 并贯穿于其他五维空间的作战中。2020 年 12 月, 美国国防部发布 2020 版《电磁频谱优势战略》, 旨在建立有效的电磁作战管理, 提高频谱作战能力。另一方面, 复杂电磁环境下的频谱秩序安全管控已成为影响国家和社会安全的重要课题。维护空中电波秩序与安全, 保证各种无线电业务的正常进行, 防范非法用户, 提升智能化、精细化、无人化频谱监管能力, 对于助推国家无线电治理体系和治理能力现代化日益重要。因此, 为了应对复杂电磁环境, 以电磁空间态势为核心的相关研究得以开展, 用于获取目标电磁环境中的各类要素, 并加以分析和预测, 形成一种电磁环境表达方式, 从而帮助用频人员理解与决策。

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U20B2038; 61901520, 61931011); 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20190030)

本文从电磁空间态势的角度出发,重点介绍电磁空间态势建模、态势感知及态势生成与可视分析这些关键技术。进一步地,梳理国内外相关代表性工作,包括美国国防部高级计划研究局(Defense Advanced Research Projects Agency, DAPRA)的 Radio Map、HawkEye 360、OmniSIGTM 传感器以及恩巨网络频谱地图云平台。最后对电磁空间态势相关研究方向进行了总结与展望。

## 1 电磁空间态势定义

为保证复杂电磁环境下多样化业务质量的目标,需要分析预测复杂电磁环境的当前状态和未来趋势,这离不开频谱数据的支撑。但仅仅是孤立、分散、未经关联的频谱数据难以提供有力的支撑,因此将孤立、分散、静态的频谱数据整合成一个整体、动态、关联、可视的异构数据集是目前面对的技术难关。为此,电磁空间态势被提出以解决上述问题。对于电磁空间态势,目前还没有形成一种广泛共识的定义。从技术的本源出发,文献[1]定义其为:电磁环境的当前状态、综合形势和发展趋势,并具有整体性、动态性、关联性、可视性、海量性、多维性等特点。随着与电磁空间态势相关的频谱感知、数据处理、可视化、地理信息系统等科学技术的发展和进步,电磁空间态势整体性研究正逐步成为国内外的研究热点。

## 2 电磁空间态势相关技术研究现状

### 2.1 电磁空间态势建模

文献[2]指出,国内外围绕复杂电磁环境下进行建模的方向主要有两点:a)围绕对象目标进行几何形状建模以及本身材质复合材料的建模,计算目标的电磁吸收与电磁散射特性;b)建立传播衰减模型。建模方式为经验模型与确定性模型,前者对大量数据进行统计分析并插值拟合即可获取目标区域的电磁数据,而后者则需要基于麦克斯韦方程组及其推导公式计算获取电磁数据。文献[3-4]介绍了经验模型获取数据,主要适用于小尺度电磁波传播,由于建模较为简单,预测精确度还需要提升;文献[5-6]提出确定性模型,在获取电磁传播的初始条件与边界条件等先验信息的基础上求解麦克斯韦方程组,预测精确度得到较大提升。围绕上述建模方法,提出了结合地理信息实现电磁环境综合信息可视化定量描述的电磁频谱地图构建。射频环境地图(Radio Environmental Maps, REMs)的概念与模型由美国弗吉尼亚技术团队(Virginia Tech team)首次提出,该模型旨在建立包含用频设备位置及行为、频谱政策及规则、地理特征及可用频谱资源等多维信息的数据库,为认知无线网络提供外部支持。在 REMs 存储信息的基础上,法国电信公司的 Orange Labs 实验室将 REMs 进一步深化,利用数据空间相关性实现对数据的解析补全,从而提供一种可视化频谱环境地图,用于检测、分析、决策及资源管理。随着 REMs 多项功能的进一步拓展,美国明尼苏达大学的 Georgios B. Giannakis 团队通过时-空-频三维获取功率频谱密度图和局部信道增益图,使认知无线电系统识别可用频谱机会、主用户定位、发射功率估计及移动主用户的轨迹追踪,并实现干扰控制、频谱资源分配以及路由规划等。文献[7]提出电磁频谱地图的系统架构,指出电磁频谱地图系统可实现电磁环境信息的感知、重构、存储以及展示。根据其功能性,系统通常包括 4 个主要模块:具备电磁物理量测量功能的传感器、先验信息数据库、认知引擎和存储与获取单元。

### 2.2 电磁空间态势感知

电磁空间态势感知技术是实现广域电磁空间态势生成与利用的基石,关键在于提高电磁空间态势获取的实时性与准确度,并尽量减少频谱感知信息的冗余度。其主要目标是获取频谱空间的当前状态,包括频谱忙闲情况、频谱辐射功率、频谱调制方式以及频谱接入协议等电磁频谱态势信息。

频谱忙闲感知是认知无线电研究的重要内容,得到了国内外广泛关注。它通过及时检测空闲频谱资源并加以有效利用,减少频谱资源的闲置浪费,提高频谱利用率。国内外主要研究了 3 种数字信号处理方法(能量检测、匹配滤波检测和循环平稳特征检测)在频谱忙闲感知中的应用。分析表明能量检测和匹配滤波检测容易受背景噪声的影响,在低信噪比情况下具有较高的误检概率和虚警概率。相比之下,循环平稳检测可以从背景噪声中有效识别出调制信号,因此在低信噪比区域仍可以获得较好的检测性能。针对频谱忙闲感知过程中单节点检测容易受无线衰落和背景噪声不确定性等不利因素的影响问题,国内外学者提出了协作频谱感知方法。协作频谱感知通过多个检测节点的相互协作,提高频谱忙闲感知的检测性能。这种技术的关键在于尽可能地减少分布式检测用户向融合中心汇报的数据观测量,以降低协作频谱感知过程中的频谱资源开销。为此,目前已经出现一些利用压缩感知理论,降低协作频谱感知过程中所需的分布式数据观测量的研究。

除频谱的忙闲状态信息外，频谱辐射功率、频谱调制方式以及频谱接入协议等其他频谱信息也非常重要。国内学者研究了频谱发射功率的多电平检测问题，将频谱忙闲的简单二元假设检验推广到频谱发射功率多电平的多元假设检验，探讨了多电平发射功率的协作感知方法，并推导了相应的检测概率和虚警概率闭式解。文献[8]中，M Abdelbar 等研究了认知无线网络中的多用户自动频谱调制识别问题，提出了一种基于四阶累积量联合概率分布的协作调制识别方法。结果表明，通过用户协作可以显著改善无线多径衰落环境下的频谱调制识别准确度。文献[9]中，S Hu 等研究了认知无线网络中的媒体接入控制协议识别，称之为认知媒体接入控制协议，提出了基于机器学习的媒体接入控制协议识别方法。通过自动识别无线频谱的媒体接入控制协议，不仅能使无线用户自适应调整网络参数以提高无线频谱利用率，同时也可以减少不同用户之间信号干扰，最终提高频谱资源的利用率。

频谱数据准确和及时地获取是构建电磁空间态势的前提和基础。但输入的频谱数据并不完整，因为受限于监测频段、时间段以及空间部署等因素，所获取的频谱数据往往是离散且不完整的，影响后续分析处理的准确性，需要对数据进行补充。文献[10]中，基于空间插值算法，M Hamid 等使用围绕着特定数量中心位置的自适应高斯径向基函数进行空间插值构造频谱地图。D Romero 等则在文献[11]中提出一种基于量化观测模型的频谱制图算法。文献[12]中，路镜涵等针对有限观测条件下的频谱地图补全问题，讨论了辐射源数量、频谱地图的秩以及补全性能之间的关系，针对辐射源较多时频谱地图补全性能不理想的问题，提出了一种基于观测值差值的频谱地图补全方法，即使用矩阵补全算法补全有限观测条件下的频谱地图，利用相邻时刻间采样点信号强度的差值得到后一时刻的频谱地图，重构相邻时刻频谱地图的变化情况，从而实现基于测量值差值的频谱地图迭代补全机制。张量作为矩阵概念的高维扩展，能够更好地表达高阶数据内部复杂结构本质的能力。为解决更为复杂的数据问题，刻画数据中的多线性结构，Liu J 等在文献[13]中基于张量的低秩性，建立了张量补全的数学模型，并利用张量数据的结构变换，提出简单低秩张量补全算法和高精确度低秩张量补全算法，实现缺失数据的恢复。针对实际应用场景下，由于使用压缩感知方法或者受传输噪声的影响，往往采集到的都是不完整的频谱数据这一问题，唐梦云等采用缺失值恢复的方法对多维频谱地图进行重新构建，提出了一种结合预测模型的频谱张量补全方法，既用张量补全的算法来估计频谱数据中的缺失值，又采用预测的方法，来捕获频谱不同维度的关联性，在具有先验信息的基础上进行有效的预测，最终实现缺失频谱数据的恢复<sup>[14]</sup>。

### 2.3 电磁空间态势生成与可视分析

电磁空间态势生成与可视分析是在电磁空间态势感知获取频谱空间的当前状态基础上，分析预测频谱空间的综合形势和未来发展趋势，并揭示频谱演化规律对于电磁空间态势中“势”的作用，包括电磁空间态势预测、评估、可视呈现等。

当前关于电磁空间态势预测的研究已经取得了阶段性成果。早期的研究主要集中于时域频谱预测，加利福尼亚大学的 Achary 教授于 2006 年首次引入线性预测机制，推演时域频谱空洞出现的时刻和持续时间。随着基于频谱实测的数据分析工作的不断深入，频域相关性现象(即不同信道频谱状态演化之间的关联关系)逐渐引起研究者的关注，基于频域相关性的多信道联合的频域频谱预测算法也不断涌现。美国田纳西大学的李虎生博士通过建模任意频谱数据与其相邻信道的“邻居”数据之间的相关性，先后提出了基于信念传播理论和基于贝叶斯网络理论的多信道联合频谱预测算法<sup>[15-16]</sup>。此外，空域频谱预测研究也取得了阶段性研究成果，受亚马逊购物电子商务推荐系统中兴趣相近的消费者购买物品时互相推荐这一机制的启发，文献[17]针对空间位置相邻的用户面临的频谱状态之间具有相似性这一特点，设计了协同滤波理论的空域频谱预测/推理算法。文献[18]中，基于空域卡尔曼滤波理论，明尼苏达大学的 Georgios B. Giannakis 教授团队实现了多用户分布式空域频谱预测算法，即每个用户通过与邻居用户交互观测信号，经过多次迭代，所有用户均可获得整个区域的电磁空间态势(即信道增益图)。文献[19-20]中，Georgios B. Giannakis 教授团队进一步利用字典学习和压缩感知理论，基于稀疏空间采样实现了空域干扰图的构建。文献[21]提出一种利用对数似然比检验原理的基于归一化能量检测的最优合作感知方案来实现协作频谱感知，对比增益合并方法和最大归一化能量检测方法，在功率感知和可靠性差异较大的异构无线认知网络中，实现了更好的频谱感知性能。

电磁空间态势的可视化呈现对于展现电磁频谱空间中当前状态、综合形势和发展趋势等信息有重要意义。通过运用科学可视化与信息可视化方法，利用电磁空间态势的天然几何结构特征，对电磁波的频率、能量等物理量进行视觉编码，从而实现电磁空间态势的视觉呈现。

文献[7]在电磁频谱地图构建的基础上，通过认知引擎，根据可测量设备(Measurement Capable Devices, MCDs)采集的电磁环境信息监测数据、先验信息数据库中相关信息，对未知区域内电磁环境信息进行估计。其

中先验信息数据库提供的先验信息一般是指包括位置和辐射功率在内的发射机信息和感兴趣区域内的电波传播模型信息。目前国内外绘制三维电磁数据场的方法主要有面绘制与直接体绘制两种方法<sup>[22-28]</sup>。面绘制技术可以清楚反应目标区域表明的轮廓信息,在缺少内部数据的情况下,不能展示完整的三维数据场。直接体绘制技术可以展示目标区域内部的数据信息并完整表现三维数据场,相应的需要大量计算。图 1 对可视化呈现技术进行了更具体的分类,见文献[2]。基于上述可视化呈现技术,专利 CN104486015A 提出通过选择特定的电磁信号传播模型,采用空间网格化的能量计算方法,计算出给定电磁空间的能量值并绘制等值线来呈现电磁空间态势。针对传统电磁环境中多维度信息不能全面定量展现的问题,文献[29]提出一种基于多维信息可视化技术的电磁态势展现方法,即电磁环境特征的维度映射模型,该模型采用平行坐标系和放射坐标系两种方法,将与多维度态势信息有关联的纳入统一的可视化框架,从而全面直观展示态势信息,为频谱管理提供支持。针对传统八叉树不能对大规模体数据直接体绘制的问题,文献[30]提出混合八叉树分割方法,并设计了球形规则网格体数据组织模型,构建了复杂电磁环境的通用组织计算框架。

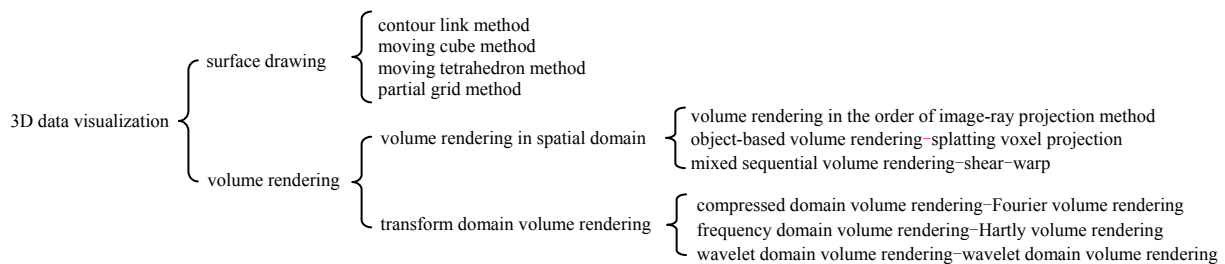


Fig.1 Construction of electromagnetic spectrum map

图 1 可视化呈现技术分类

### 3 国内外代表性工作

#### 3.1 DAPRA 先进频率无线电地图

DAPRA 先进无线频率地图,通过开发用于设计和优化无线通信的新方法和软件系统,率先通过信息共享、数据融合、态势挖掘应用等,实现无线电在频率、分布和时间上的实时精细化感知,即可以实时感知不同频率、时间和地理位置上的射频频谱使用情况。

无线电先进频率地图技术基于三个级别的软件,包含无线电先进频率地图顶层软件、无线和大规模分布式操作(Wireless And Large-scale Distributed Operations, WALDO)中层软件系统和大规模分布式操作系统。

无线电先进频率地图顶层软件关注热图和射频态势感知,通过信息显示实时了解频谱环境,如图 2 所示。若是高功率发射器,则会在热力图上显示一个暖色调区域;若是低功率设备,则会在热力图上显示一个冷色调区域,因此可以明确射频频谱发射的具体地理位置。WALDO 系统是中层软件系统,几乎可以实时监控大的 WALDO 网络(约 100 节点,其中包括传感器位置、状态的可视化),并具体申请分配任务以及详细规定 WALDO 利用作战层次的网络和设备资源的限制条件,如:总的网络带宽、消耗的电池能量。

#### 3.2 HawkEye 360 天基频谱监测卫星系统

HawkEye 360 天基频谱监测卫星系统的主要功能是频谱测绘、信号源定位和应急通信。为了实现对地面的上行发射信号定位,HawkEye 360 系统采用了卫星编队的方法。由 3 颗卫星组成一组编队,卫星在轨道上飞行的过程中,卫星之间的间距保持在 125~250 km。当 3 颗卫星中的任意 2 颗卫星在目标发射源的可视范围内时,可通过时频差测量的方法对该信号进行定位。该系统利用从卫星轨道上监测和定位无线电信号建立地球的无线电地理数据层,为用户提供特定领域的数据分析报告。

根据相应的频谱感知服务,在电磁空间态势感知获取频谱空间的当前状态基础上,分析并预测频谱空间的综合形势和未来发展趋势。进一步地,针对特定频率范围进行频谱调查,创建整个区域能量密度热图,从而实

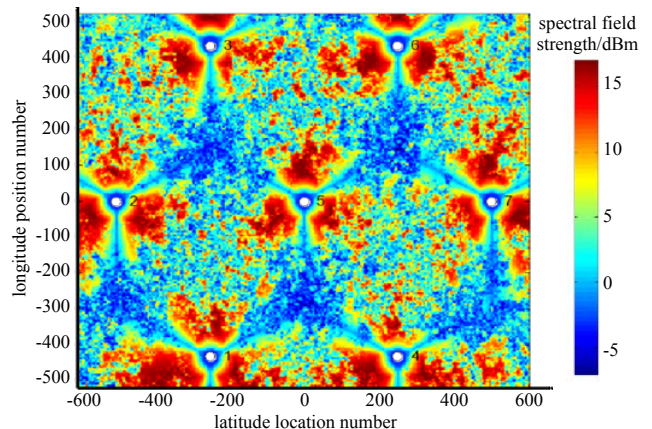


Fig.2 Thermal map distribution of radio frequency map

图 2 无线电频率地图按热力图分布



现电磁空间态势预测、评估和可视化呈现，见图 3。

HawkEye360 天基频谱检测卫星系统的代表性产品主要有 RFGeo,RFMosaic。RFGeo 作为首个商用 RF 感应平台，可在 VHF 至 Ku 频段的各种 RF 信号上提供发射器的全球覆盖范围和独立的地理位置。RFGeo 分析提供了一个新的全球地理空间数据层，可提高对 RF 频谱的认知。它利用 HawkEye 天基频谱检测星座生成的独特数据来识别和定位感兴趣的 RF 信号；且为了降低定位误差，RFGeo 为信号坐标提供了伴随的位置误差椭圆，提高目标位置定位的精确度。另外，RFGeo 分析还可实现如下功能：a) 精确绘制地球的 RF 信号，实现精准频谱测绘；b) 启动对感兴趣区域的例行监视；c) 区分各种信号类型。这些功能强大的 RF 分析可有效补充其他数据源，帮助精准高效地实现电磁空间态势评估、可视化呈现，并且可以在陆地、海洋和空中提供可信赖的 RF 信号认知。



Fig.3 Global spectrum mapping

图 3 全球频谱测绘图

RFMosaic 可以实现可视化跨区域的信号密度，是 HawkEye 360 的射频事件密度产品。它利用 HawkEye 天基频谱检测星座系统生成的数据来调查感兴趣区域内期望频率上的 RF 活动。这种独特的地理空间数据层提供了新的频谱感知水平。它可以有效评估 RF 活动，结果以栅格热图文件的形式提供，根据梯度显示描绘了在卫星单次通过期间测得的各个信号事件的累积分层。RFMosaic 主要功能包括：a) 调查区域以评估频率使用情况；b) 了解随时间变化的 RF 活动；c) 找出潜在的干扰源。这些强大的 RF 分析功能可以有效补充其他数据源，精确查找潜在干扰源、获取动态变化的 RF 活动和发现频谱演化规律，帮助精准分析预测频谱空间的综合形势和未来发展趋势，实现电磁空间态势预测以及极大的满足电信、国防和安全以及紧急响应方面的需求。

### 3.3 OmniSIG™ 传感器

DeepSig 的 RF 信号处理方法是机器学习用于时间序列无线电样本和信道测量，从而可以从数据中学习。通过创建从 I/Q 表示中学习信号和效果的算法，DeepSig 系统比传统的简化分析模型或基于特征的方法具有更好的性能。利用 DeepSig 在无线系统上已做的开创性人工智能应用，OmniSIG™ 传感器提供了新型的射频传感和感知功能，超越了现有频谱监视解决方案的功能。

OmniSIG™ 能够直接使用从频谱记录中学会检测和分类低延迟的信号，与传统方法相比，它提供了更高的灵敏度和准确性，并且在恶劣的动态频谱环境中功能更加强大。OmniSIG™ 软件可以在各种目标设备上部署和扩展，从低 SWAP 移动和嵌入式系统到移动个人计算机再到云和数据中心环境，其基于 Web 的 UI，开放的低延迟流接口和控件 API 提供了与客户系统和应用程序的无缝集成。

此外，较少的计算资源和较低动态范围帮助其在速度和设备的要求上得到指数级提高。具体来说，OmniSIG™ 传感器通过在几毫秒内完成大频谱带宽内 RF 发射信号的检测和分类，实时报告异常变化和威胁，在恶劣和拥挤的环境中提供准确的结果以及在较大的瞬时带宽上检测宽带和窄带信号。其中检测和识别功能已在多种信号类型上得到验证，包括蜂窝和基础设施信号、ISM 频段信号、移动无线电服务、物联网信号和商用飞机雷达信号。最后，此算法能够针对一组性能要求优化整个系统，而不是优化单个组件，帮助快速适应新的信号和干扰类型、获得计算效率高的推理引擎以及应对各种干扰影响与各种不同环境。

### 3.4 恩巨网络频谱地图云平台

苏州恩巨网络有限公司研发的频谱地图云平台，充分利用现有监测资源，融合多元化大数据，包括固定站、网格化节点和移动站等采集的监测数据，具有强大的数据分析能力，由局部(点、线)数据获得全局分布及频谱态势；同时还拥有快速数据处理能力，基于国产自主研发的超级计算机，安全、可控，从时域、频域、空间域和能量域等维度来描述频谱及场强分布，以可视化的方式动态地反映电磁环境状况。

频谱地图云平台整个系统流程可分为：频谱数据采集、数据融合处理、GIS 渲染展示三部分。其中，频谱数据采集利用路测、网格化节点、大型固定站和其他频谱感知设备，实现频谱数据的获取和采集；数据融合处理通过时间融合、空间融合、频域融合等方式，对电波传播进行分析处理；最后经过 GIS 渲染展示，利用 2D/3D 方式展示，实现动态回放与历史对比，多维度、多类别地进行频谱信息可视化直观展示。

频谱地图云平台结合地理信息展示频谱数据,如行政图、卫星影像图、城市三维地图等数据形式,实现多种应用:频谱评估、频率规划/指配、台站监管、电磁环境评估、辅助干扰查处黑广播与伪基站等。具体有以下功能:a)直观展现信道占用度、频段占用度和信号覆盖率,对频率使用进行监管核查;b)基于可用频率资源分析,可以直观地了解辖区内可用频率资源,并处理设台/频率申请,进一步地,基于目前用频情况,辅助完成频率指配;c)融合各类监测数据,分析某一信道/业务频段的场强/功率分布图;d)基于合法台站数据库的参数分析并利用电波传播模型计算场强和功率,通过将监测分析结果和台站计算结果进行比对发现异常;e)主动发现黑广播,针对调频广播频段(87.5~108 MHz)生成不同时间的频谱地图,系统自动标示能量有显著变化的区域,从而找出发生变化的具体频率,最后与台站数据库中的调频广播比对确定是否为非法发射。

#### 4 电磁空间态势研究展望

随着频谱感知、数据处理、可视化、地理信息系统等科学技术的发展进步,电磁空间态势整体性研究面临更多机遇与挑战。

##### 1) 多维频谱态势演化主动预测技术。

从频谱历史数据出发,研究频谱数据在时、频、空、能、波束等多维空间上的特点及规律,构建态势演化的概率预测模型;从态势演化规律出发,构建自适应、快速时变、多粒度的态势预测模型,具备复杂多样的频谱环境趋势分析预测。

##### 2) 面向复杂地理电磁环境的分布式电磁传感器优化布设技术研究。

在特定区域内,依据地形及特定的行动,优化频谱感知网络布设。针对感知节点资源受限与节点感知能力有限问题,研究基于强化学习、凸优化的分布式优化布设算法。

3) 基于大数据技术实现电磁频谱空间数字孪生化。电磁频谱数字孪生化是指电磁环境的当前状态、综合形势和发展趋势的数字化,核心是状态感知、数字体验、辅助决策以及一次做优,即将复杂物理电磁环境映射到数字空间中,形成数字化的电磁频谱空间,从而提升动态频谱效率以及加强频谱安全管控。

#### 5 结论

电磁空间日益错综复杂,演变成由多主体、多因素、多变量构成的互为输入输出的复杂系统,面对如此复杂的电磁环境,电磁空间态势整体性研究对于解决未来移动通信系统的频谱共享、确保重大安保活动频谱安全以及掌握重要战略方向的制电磁权等问题起到重要作用。本文围绕技术发展方向,系统介绍了有关电磁空间态势整体性研究的相关技术,即电磁空间态势建模技术、获取电磁频谱空间状态的电磁空间态势感知技术以及分析预测电磁频谱空间综合形势和未来发展趋势的电磁空间态势生成与可视化分析技术;另外围绕技术应用角度,从产品的原理与功能等角度介绍了 4 个国内外代表性工作。除了上述代表性工作,电磁空间态势研究还可以应用到众多方面。如,通过对辐射源电磁场分布的绘制直接展示出物理空间的电磁场分布,并帮助查找非法辐射源;实现各类无线通信设备的有效管理,并帮助确保重大公共活动的频谱安全;收集频谱使用规律并建立频谱态势,从而提高频谱利用率。

#### 参考文献:

- [1] 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. (WU Qihui, REN Jing. New cognitive paradigm of electromagnetic spectrum space: spectrum situation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016,48(5):625-632.)
- [2] 高颖,张政,王凤华,等. 复杂电磁环境建模与可视化研究综述[J]. 计算机工程与科学, 2014,36(9):1742-1749. (GAO Ying,ZHANG Zheng,WANG Fenghua,et al. A review of modeling and visualization of complex electromagnetic environment[J]. Computer Engineering and Science, 2014,36(9):1742-1749.)
- [3] HAR D,WATSON A M,CHADNEY A G. Comment on diffraction loss of rooftop-to-street in COST 231-Walfisch-Ikegami model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002,48(5):1451-1452.
- [4] 翁干飞,华祖耀,田新华. 电磁环境仿真研究[J]. 计算机仿真, 2002,19(5):107-110. (WENG Ganfei,HUA Zuyao,TIAN Xinhua. The study of the electromagnetic environment simulation[J]. Computer Simulation, 2002,19(5):107-110.)
- [5] XU Y,CUMMER S A. Applying the nonuniform FFT to the parabolic equation split-step algorithm for high frequency propagation modeling[C]// Antennas & Propagation Society International Symposium. Columbus,OH,USA:IEEE, 2003:598-601.

- [6] ANKARSON Peter,CARLSSON Jan. FDTD-simulation of the electrical environment for vehicles by using cad-data[C]// 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Beijing:IEEE, 2002:272-275.
- [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. (XIA Haiyang,ZHA Song,HUANG Jijun,et al. Summary and prospect of research on construction methods of electromagnetic spectrum map[J]. Journal of Radio Science, 2020,35(4):445-456.)
- [8] DUDLEY S M,HEADLEY W C,LICHTMAN M,et al. Practical issues for spectrum management with cognitive radios[J]. Proceedings of the IEEE, 2014,102(3):242-264.
- [9] ZAREEI M,ISLAM A K M M,BAHARUN S,et al. Medium access control protocols for cognitive radio ad hoc networks:a survey[J]. Sensors, 2017,17(9):2136-1-19.
- [10] HAMID M,BEFERULL-LOZANO B. Non-parametric spectrum cartography using adaptive radial basis functions[C]// IEEE International Conference on Acoustics. New Orleans,LA,USA:IEEE, 2017:3599-3603.
- [11] ROMERO D,KIM S J,GIANNAKIS G B. Online spectrum cartography via quantized measurements[C]// 2015 49th Annual Conference on Information Sciences and Systems. Baltimore,MD,USA:IEEE, 2015:1-4.
- [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(S2):118-122. (LU Jinghan, ZHA Song,HUANG Jijun,et al. The completion method of spectrum map based on the difference of observations[J]. Journal of Microwave, 2018,34(S2):118-122.)
- [13] LIU J MUSIALSKI P,WONKA P,et al. Tensor completion for estimating missing values in visual data[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013,35(1):208-220.
- [14] 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(3A):47-52. (WU Qihui,TANG Mengyun. Construction of multi-dimensional spectrum map based on tensor completion[J]. Signal Processing, 2017,33(3A):47-52.)
- [15] LI H. Reconstructing spectrum occupancies for wideband cognitive radio networks:a matrix completion via belief propagation[C]// IEEE International Conference on Communications. Cape Town,South Africa:IEEE, 2010:1-6.
- [16] ZHANG Zhenghao,LI Husheng,YANG Depeng,et al. Space-time Bayesian compressed spectrum sensing for wideband cognitive radio networks[C]// IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum. Singapore:IEEE, 2010:1-11.
- [17] MENG Jia,YIN Wotao,LI Husheng,et al. Collaborative spectrum sensing from sparse observations in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(2):327-337.
- [18] KIM S J,DALL'ANESE E,GIANNAKIS G B,et al. Collaborative channel gain map tracking for cognitive radios[C]// International Workshop on Cognitive Information Processing. Elba,Italy:IEEE, 2010:338-343.
- [19] BAZERQUE J A,GIANNAKIS G B. Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks by exploiting sparsity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010,58(3):1847-1862.
- [20] KIM S J,GIANNAKIS G B. Dynamic learning for cognitive radio sensing[C]// 2013 IEEE 5th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing(CAMSAP). St.Martin,France:IEEE, 2013:388-391.
- [21] YANG Guosheng,WANG Jun,LUO Jun,et al. Cooperative spectrum sensing in heterogeneous cognitive radio networks based on normalized energy detection[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016,65(3):1452-1463.
- [22] LORENSEN W E,CLINE H E. Marching cubes:a high resolution 3D surface construction algorithm[J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1987,21(4):163-169.
- [23] WESTOVER L A. Footprint evaluation for volume rendering[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1990,24(4):367-376.
- [24] LACROUTE P,LEVOY M. Fast volume rendering using a shear-warp factorization of the viewing transformation[C]// Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques,SIGGRAPH 1994. New York:ACM, 1994:451-458.
- [25] 何丽君,王晓强,云健,等. 三维数据场体绘制研究进展[J]. 大连民族学院学报, 2012,14(5):486-491. (HE Lijun,WANG Xiaoqiang,YUN Jian,et al. Recent advances in volume rendering for 3D data sets[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2012,14(5):486-491.)
- [26] SWEENEY J,MUELLER K. Shear-warp deluxe: the shear-warp algorithm revisited[C]// Proceedings of the Symposium on Data Visualisation 2002. Goslar,Germany:Eurographics Association, 2002:95-104.
- [27] BUNEMAN Oscar. Conversion of FFT's to fast Hartley transforms[J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1986,7(2):624-638.
- [28] MALZBENDER T. Fourier volume rendering[J]. ACM Transactions on Graphics, 1993,12(3):233-250.

- [6] 李忠武. 时间序列分析与数据挖掘[J]. 电子商务, 2016(11):41-44. (LI Zhongwu. Time series analysis and data mining[J]. Electronic Commerce, 2016(11):41-44.)
- [7] BROWN G,POCOCK A,ZHAO M J,et al. Conditional likelihood maximisation:a unifying framework for information theoretic feature selection[J]. Journal of Machine Learning Research, 2012,13(1):27-66.
- [8] COVER T,THOMAS J,WILEY J. Elements of information theory[M]. Wiley-Blackwell:Tsinghua University Press, 2003.
- [9] 耿丽娟,李星毅. 用于大数据分类的 KNN 算法研究[J]. 计算机应用研究, 2014,31(5):1342-1344. (GENG Lijuan,LI Xingyi. Research on KNN algorithm for big data classification[J]. Application Research of Computers, 2014,31(5):1342-1344.)
- [10] 夏勇,丁岐鹏,尤路. 基于大数据的雷达健康管理系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):686-690. (XIA Yong,DING Qijuan,YOU Lu. Radar prognostic and health management technology based on big data[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):686-690.)

#### 作者简介:

冯蕴天(1990-), 男, 河南省洛阳市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为电磁大数据和智能博弈推演. email:fengyuntian2009@live.cn.

韩慧(1980-), 女, 云南省宣威市人, 副研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.

陈翔(1986-), 男, 河南省信阳市人, 助理研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.

王国良(1964-), 男, 黑龙江省双鸭山市人, 研究员, 主要研究方向为电子信息装备试验鉴定、雷达对抗仿真.

许雄(1985-), 男, 福建省莆田市人, 副研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.

吴若无(1987-), 男, 四川省广安市人, 助理研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.

郇宁(1989-), 男, 陕西省宝鸡市人, 助理研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.

(上接第 555 页)

- [29] 邓建辉,周侗. 多维度电磁态势展现方法研究[J]. 舰船电子工程, 2014(11):1-4,119. (DENG Jianhui,ZHOU Jie. Research on the method of multi-dimensional electromagnetic situation display[J]. Ship Electronic Engineering, 2014(11):1-4,119.)
- [30] 马良,张政. 复杂电磁环境三维态势展示方法研究[J]. 中国无线电, 2020(4):33-39. (MA Liang,ZHANG Zheng. Research on 3D situation display method of complex electromagnetic environment[J]. China Radio, 2020(4):33-39.)

#### 作者简介:

李泓余(1991-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光电导器件. email:2018100209@mails.cust.edu.cn.

李婕(1992-), 女, 在读博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理、雷达抗干扰技术等.

况婷妍(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为异常信号识别与监测、时频分析、深度学习.

韩路(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为认知无线电、无线通信、频谱可视化.

唐磊明(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号处理、张量补全.

丁国如(1986-), 男, 教授, 主要研究方向为认知无线电、统计信号处理、机器学习和无线网络大数据分析.