

无线电监测研究现状与展望

黄 铭^{1*}, 杨晶晶¹, 鲁倩南¹, 蒋洪林²

¹云南大学信息学院, 云南 昆明

²红河州工业和信息化局, 云南 蒙自

Email: *huangming@ynu.edu.cn

收稿日期: 2021年5月22日; 录用日期: 2021年6月11日; 发布日期: 2021年6月22日

摘 要

无线电频谱是连接着陆、海、空、天和网络空间的媒介, 事关国家利益和国家安全, 其使用权是“大国竞争的前沿和中心”。本文首先简要介绍国内外无线电监管的研究现状, 然后讨论无线电监测技术, 最后介绍了云南大学在边境无线电监测领域的工作及无线电监测技术的发展趋势。

关键词

电磁频谱空间, 无线通信信号处理, 无线电监测

State of the Art and Prospects of Radio Monitoring

Ming Huang^{1*}, Jingjing Yang¹, Qiannan Lu¹, Honglin Jiang²

¹School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming Yunnan

²Honghe Prefecture Bureau of Industry and Information Technology, Mengzi Yunnan

Email: *huangming@ynu.edu.cn

Received: May 22nd, 2021; accepted: Jun. 11th, 2021; published: Jun. 22nd, 2021

Abstract

The radio frequency spectrum is a medium that connects landing, sea, air, space, and cyberspace. It is related to national interests and national security. The right to use it is the “front and center of competition among major powers”. This article first briefly introduces the current research status of radio supervision at home and abroad, then discusses radio monitoring technology, and finally introduces Yunnan University’s work in the field of border radio monitoring and the development trend of radio monitoring technology.

*通讯作者。

文章引用: 黄铭, 杨晶晶, 鲁倩南, 蒋洪林. 无线电监测研究现状与展望[J]. 无线通信, 2021, 11(3): 61-75.
DOI: 10.12677/hjwc.2021.113008

Keywords

Electromagnetic Spectrum Space, Wireless Communication Signal Processing, Radio Monitoring

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自无线电发明开始, 无线电监管就应运而生[1]。美国早在 19 世纪 20 年代就制定了 0~60 MHz 无线电频谱分配表, 开始建设无线电监测系统, 随后颁布了《1927 年无线电法案》, 成立了联邦无线电委员会[2] [3]。中国无线电监管工作起步较晚, 1962 年成立中央无线电管理委员会, 指导方针经历了“少设严管”、“科学管理、促进发展”、“三管理、三服务、一突出”三个阶段, 20 世纪 90 年代我国开始大规模建设无线电监测系统, 目前已建成技术先进的无线电监测网络[4] [5]。俄罗斯继承了前苏联无线电监管的遗产, 无线电监测技术和管理经验丰富, 西方电子战专家认为[6]“俄罗斯电子战的发展水平已属世界领先, 电子战系统也是俄军最危险的武器装备之一”。

由于无线电波在开放空间中传播, 因此, 技术标准的国际协调就显得非常重要。国际电联 ITU (International Telecommunication Union) 作为联合国机构中历史最长的一个国际组织, 负责进行全球无线电频谱和卫星轨道划分, 制定技术标准, 实施无线电监管, 以确保实现网络和技术无缝互连[7]。由于 ITU 有关无线电频谱和卫星轨道资源使用权的分配原则是“先到先得”, 因此, 这些资源的使用权是“大国竞争的前沿和中心”。以卫星轨道资源的使用为例, 美国忧思科学家联盟网站统计[8], 2020 年底全球共有 3372 颗卫星, 其中, 美国、中国和俄罗斯分别拥有 1897、412 和 178 颗, 美中俄卫星数量占比超过 73%。在军事领域, 2012 年 3 月美军颁布了《联合电磁频谱管理行动》条令, 2016 年 10 月发布了《联合电磁频谱作战》条令, 2020 年 7 月正式发布 JP3-85《联合电磁频谱作战》条令, 10 月美国国防部发布《电磁频谱优势战略》, 美军将用“电磁战”概念替换了“电子战”, 并明确指出将电磁战与频谱管理融合为统一的电磁频谱作战, 美军认为“电磁频谱内的行动自由将帮助部队更好地实施作战机动并夺取最终胜利”, 这两个文件的封面见图 1 所示; 2020 年 10 月我国国防法修订草案全文公布, 修订草案新

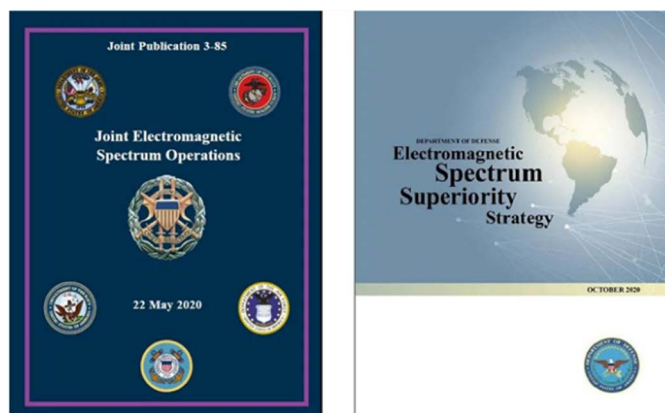


Figure 1. Covers of “Joint Electromagnetic Spectrum Operations” and “Electromagnetic Spectrum Advantage Strategy”

图 1. 《联合电磁频谱作战》和《电磁频谱优势战略》文件封面

增规定, 国家采取必要的措施, 维护包括太空、电磁、网络空间在内的其他重大安全领域的活动、资产和其他利益的安全[9] [10] [11], 国防法修订草案强化了电磁空间安全的重要性。同时, 5G、互联网卫星和未来 6G 的竞争有目共睹[12], 电磁频谱的属地性管理原则受到挑战, 因此, 大国之间电磁频谱优势的激烈竞争和对抗不可避免。

下面首先介绍无线电监测的现状, 然后介绍云南大学在边境无线电监测方面的实践, 最后讨论无线电监测技术的发展趋势。

2. 无线电监测

图 2 为我国 I 类城市无线电监测系统拓扑示意图, 系统由若干固定监测站、移动监测车、可搬移设备、便携式设备, 以及频率数据库、台站数据库、监测数据库、检测数据库、无线电发射设备型号核准库等构成[13]。虽然国家无线电管理职能部门为解决无线电监测系统数据传输问题制订了 RMTP (Radio Monitoring Transfer Protocol) 协议, 要求不同集成商的无线电监测系统通过遵循 RMTP 协议实现联网, 但不同的集成商为了保护自己的核心技术, 极少公开编程指令集, 导致国内现有的无线电监测系统并未真正实现互联互通和资源共享, 数据未建立有效关联[14]。目前的无线电监测系统本质上仍是一种典型的人机通信系统。经过几十年发展, 各类无线电业务系统(如无线电监测、频率管理、台站管理、行政执法检查等)拥有海量数据, 但数据壁垒大量存在, 无法对这些海量数据进行有效挖掘和利用, 无线电监管系统缺乏智能化[15]。

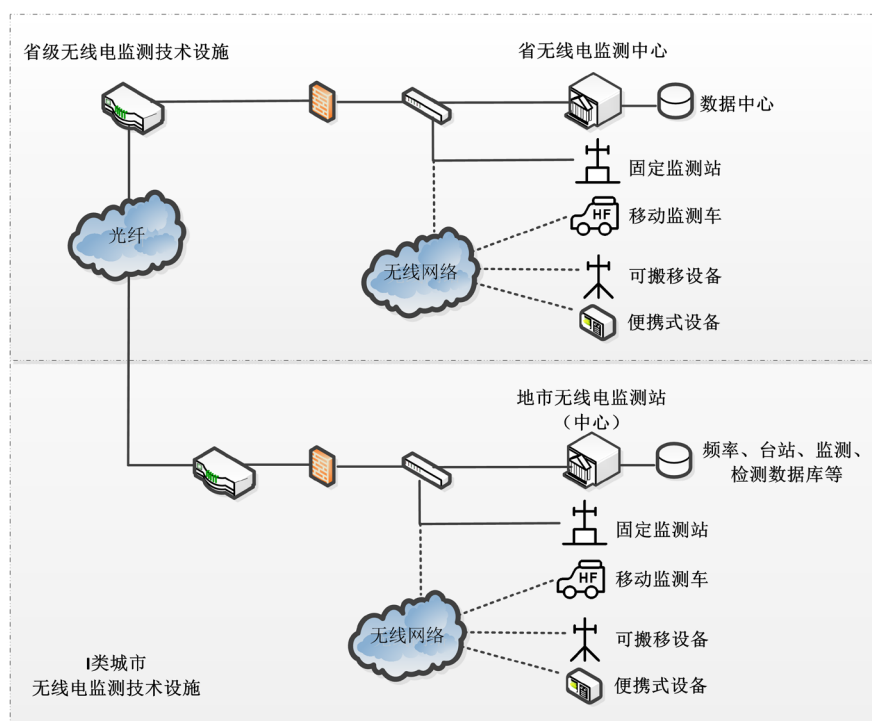


Figure 2. Topological diagram of radio monitoring system in China's Class I cities [13]

图 2. 我国 I 类城市无线电监测系统拓扑示意图[13]

为解决无线电监测系统存在的问题, 许多学者开展了相关研究工作。2015 年, Cooklev 等人[16]提出了一种基于云的频谱监测方法, 体系结构如图 3 所示, 其主要结论为: 无线电监测系统应当具备使用不同性能、不同公司生产的谱传感器的能力; 为了使频谱监测系统具有可持续性和永久性, 并能够随着时

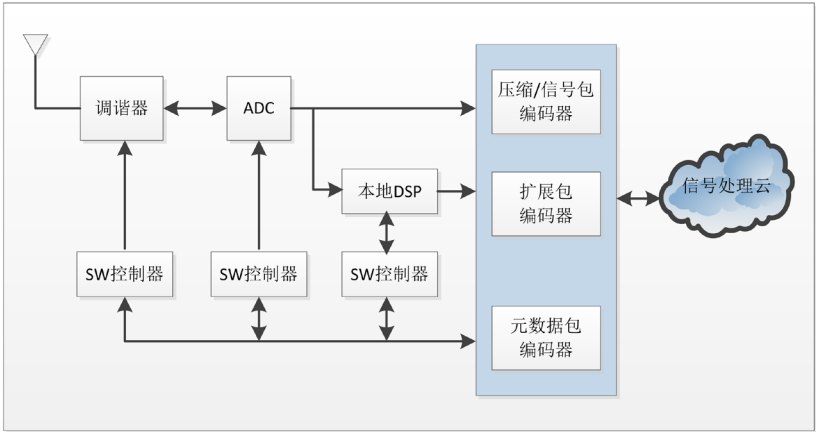


Figure 3. A cloud-based spectrum monitoring method [16]
图 3. 一种基于云的频谱监测方法[16]

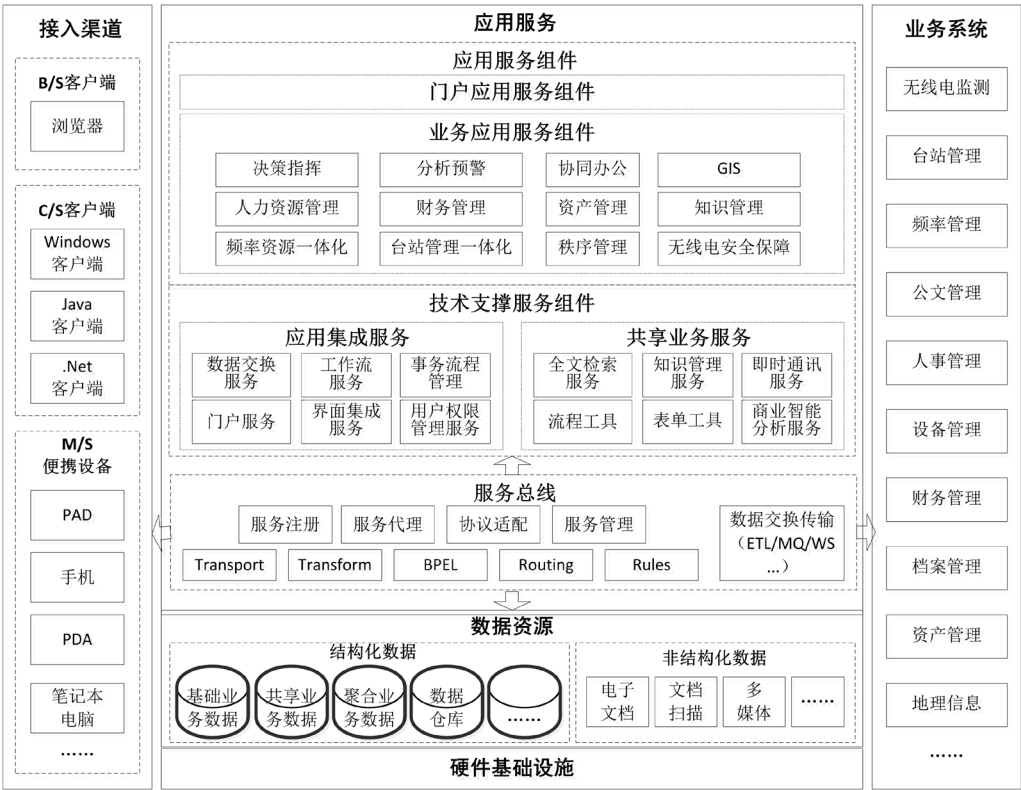


Figure 4. The overall architecture of China's integrated radio management platform [20]
图 4. 我国无线电管理一体化平台总体架构[20]

间推移不断向前发展，必须重点考虑监测系统的设计问题，使得整个系统具有无限寿命，而构成它的各个元件具有有限寿命。因此，无线电管理职能部门应该更加关注系统架构的设计，而不仅仅是监测接收机的参数。2018 年，文献[17]发表，这是一个由西班牙、德国和瑞士科学家组成的团队，他们提出了采用众包方式建立全球无线电监测系统的设想，并在欧洲搭建了由 6 个节点组成的示范网。与此同时，文献[18]提出了一种用于无线电信号监测的大数据处理架构，并详细讨论了一种基于深度学习的端到端的信号处理方法。Lin 等[19]提出了一种用于无线电频谱监测的软件定义网络架构，目的在于规范全国范围内

的频谱分配和使用管理,文中提出的软件定义网络架构为无线电频谱监测提供了使用软件定义的无线电设备来协调控制监测节点和监测中心之间通信带宽需求的能力。为了应对越来越多的来自不同集成商的无线电监管系统,国家无线电管理职能部门不得不采取一体化平台建设等手段对其进行整合[20]。2019年,工业和信息化部发布了《无线电管理一体化平台体系架构及应用规范》[20],在行业标准中明确规定了很多原则性内容,包括平台的总体架构、建设要求以及一体化标准规范体系的整体架构等,至此,国内各省(区、市)及业内各无线电监测系统集成商纷纷掀起了一体化平台建设的高潮。图4为我国无线电管理一体化平台总体架构,其采用面向服务的架构 SOA (Service-Oriented Architecture),利用业界先进技术平台开发,是一种典型的“基础平台 + 业务应用”模式的信息系统架构。主要组件包括:企业服务总线、技术支撑服务组件、应用服务组件、数据资源、接入渠道。其中,数据资源包括无线管理一体化平台数据资源包括结构化数据和非结构化数据。结构化数据包括基础业务数据(主数据)、聚合业务数据(ODS)、共享业务数据、数据仓库(DW)、数据集市(DM)等;非结构化数据包括统一管理的电子文档、文档扫描件、音频、视频等。

2020年,Roberto 等人[21]讨论了基于众包的 Web 频谱监测系统解决方案,并介绍了最新的发展趋势。由于公众参与无线电监测,使得监测系统的部署范围和监测技术的创新能力显著增强,因此,众包可能是无线电监管领域的发展方向之一。

3. 边境无线电监测

与内地无线电监测不同,边境地区无线电监测涉及境外,电磁环境十分复杂。为了做好边境地区无线电管理工作,2015年国家无线电管理办公室启动了课题“边境区域无线电管理技术设施建设及投资需求研究”,本文作者作为负责人承担完成了该课题,提出了信息系统架构下基于谱传感和云计算的智能边疆无线电监管网建设思路及解决方案,该成果被纳入《国家无线电管理规划(2016~2020)》和《云南省无线电事业发展“十三五”规划》,相关论文被中共中央网络安全与信息化领导小组办公室、人民邮电报等众多部门和媒体转载,在行业内产生了重要影响[22]。《中国无线电》杂志主编易龙以“融入国家发展战略推动边境无线电监管设施建设”为题撰文进行了评述[23]:“云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室这一研究工作对构建智能化的边疆无线电监管网、更好地服务和融入国家‘一带一路’建设及网络空间安全发展战略很有价值”。在上述工作的基础上,重点实验室还完成了云南省所有涉边地州的“边海无线电工程可研报告和技术方案编制,完成了云南省无线电监测方面的可研报告数十项,在服务国家战略和行业需求方面迈出了坚实的一步。

2016~2017年,重点实验室在云南省红河州建设了边境无线电监管示范系统,获得了系列自主知识产权,图5为示范系统架构[5]。示范系统推出后,引起了国内外的关注,在行业内产生了重大影响,示范系统按照“互联网+无线电监管”的思路建设,具有安全、开放、共享、模块化等特点,云南省工业和信息化委员会评价为[22]:“这是全国第一个基于谱传感的边境电磁频谱监管示范系统,同时也是全球第一个公开发表的集成了频谱管理和频谱监测的智能决策支撑系统,全力破解了新的时代背景下制约边境无线电监管工作效能发挥的症结,为我国实施边海地区无线电管理技术设施建设工程提供了重要支撑”。稍后,重点实验室在《Radio Science》上发表了封面论文[5],被美国《Earth and Space Science News》优选为“研究焦点”,并以“Managing Radio Traffic Jams with the Cloud”为题进行了评述[1]。2017年10月,第13次中越边境地区无线电频率协调会谈召开前,从示范系统中提取了红河州河口县中越边境时间连续、频谱完整、要素齐全的实时监测数据,大大降低了边境电磁环境测试的人员参与度,示范效果显著[22]。

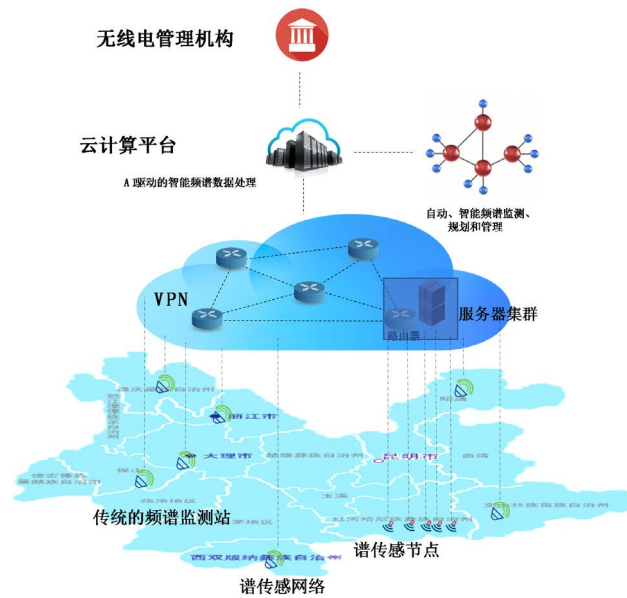


Figure 5. Demonstration system architecture [5]
图 5. 示范系统架构[5]

2018~2019 年, 重点实验室在云南省红河州建设了边境无线电监管系统, 该系统基于边缘计算和云端架构设计, 见图 6 所示。系统主要由谱传感节点、无线电专网、蒙自 OpenStack 私有云和弥勒 Kubernetes 容器云组成, 其中, 蒙自 OpenStack 私有云在 1 个控制节点、2 个计算 + 存储节点的基础上构建, 并在此基础上搭建了弥勒 Kubernetes 容器云; 蒙自 OpenStack 私有云是主系统, 弥勒 Kubernetes 容器云是备份系统, 主系统在生产环境下应用, 提供实时采集的无线电监测数据, 两个系统通过无线电专网进行连接。系统共计 18 个微服务, 主要特点为: 采用云计算和边缘计算架构, 与国家一体化平台兼容; 采用主从备份和扁平化网络拓扑结构, 系统安全可靠; 开发了知识驱动的无线电监管 APP, 扩展了系统功能。

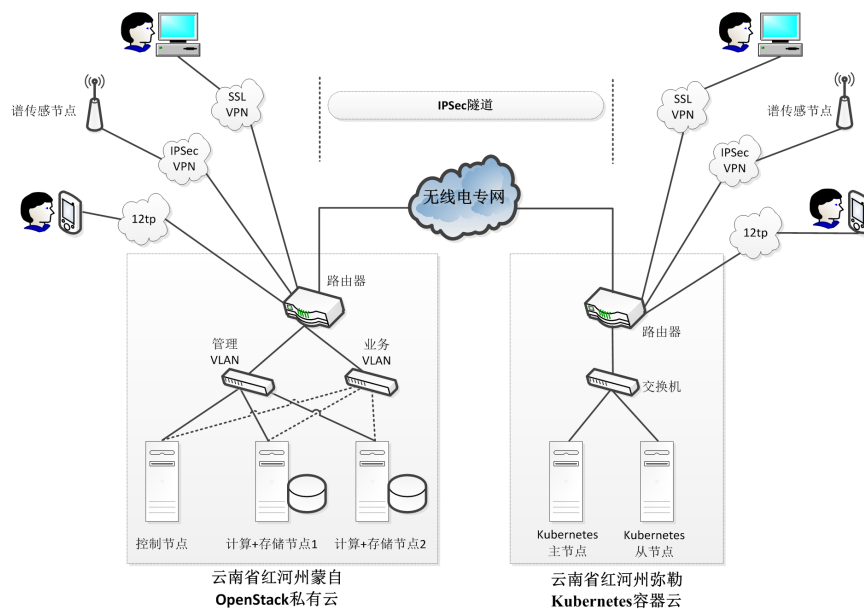


Figure 6. Border radio monitoring system architecture
图 6. 边境无线电监管系统架构

2020 年至今,针对边境无线电监管的实际需求,本文作者提出了基于业务的无线电监测方法,以及知识驱动的边疆无线电监测方法,探讨了新一代人工智能在边境无线电监管中的应用。采用基于业务的无线电监测方法[24],重点实验室完成了“基于无线电业务的高铁无线电安全及技术手段研究”、“基于无线电业务的民用航空无线电安全及技术手段研究”、“边疆无线电智能监测和管理体系研究”、“德宏州边境无线电安全工作及无线电边境管控相关政策举措”等国家“十四五”预研课题;完成了工信部无线电管理局下达的课题“5G 基站与卫星地球站电磁兼容研究”,开发了 5G 基站与卫星地球站之间的干扰协调软件 APP,具有 5G 基站干扰协调测试、5G 基站申报、5G 基站申报表导入和受干扰地球站列表显示功能;开发了基于人工智能的 FM 调频广播监测系统,并进行了规模化部署和试运行,该系统通过人工智能模仿监测人员收听广播并记录异常发射台,取代了繁重的人工劳动,并以“FM Broadcast Monitoring Using Artificial Intelligence”为题,在 Radio Science 上发表了研究论文[25] [26];开发了基于谱传感的民用航空无线电监测系统[27],并在昆明市多个监测点进行了节点安装和试运行,该方法将飞机飞行数据与地面调频广播无线电频谱数据进行融合分析,为民航干扰溯源提供支持。图 7 为基站与卫星地球站之间的干扰协调软件 APP;图 8(a)为基于人工智能的 FM 调频广播监测系统框图,图 8(b)为系统界面;图 9 为基于谱传感的民用航空无线电监测系统,图中左上角为监测节点,左下角为系统框图,右边为 FM 系统界面。2019 年,国家无线电监测中心李景春书记莅临云南省无线电监测中心调研指导工作,他指出[28]:“中心科研创新成果显著,特别是民航专用监测系统和‘黑广播’监测等系统达到国内领先水平”。在知识驱动的边疆无线电监测方法方面,本文作者提出了基于知识图谱技术的无线电监管框架[29],见图 10 所示;建立了基于实体、事件和场景的 EES 模型[30],见图 11 所示;探讨了新一代人工智能在边境无线电频谱监测中的应用。



Figure 7. Application software (APP) for interference coordination between base station and satellite earth station
图 7. 5G 基站与卫星地球站之间的干扰协调应用软件(APP)

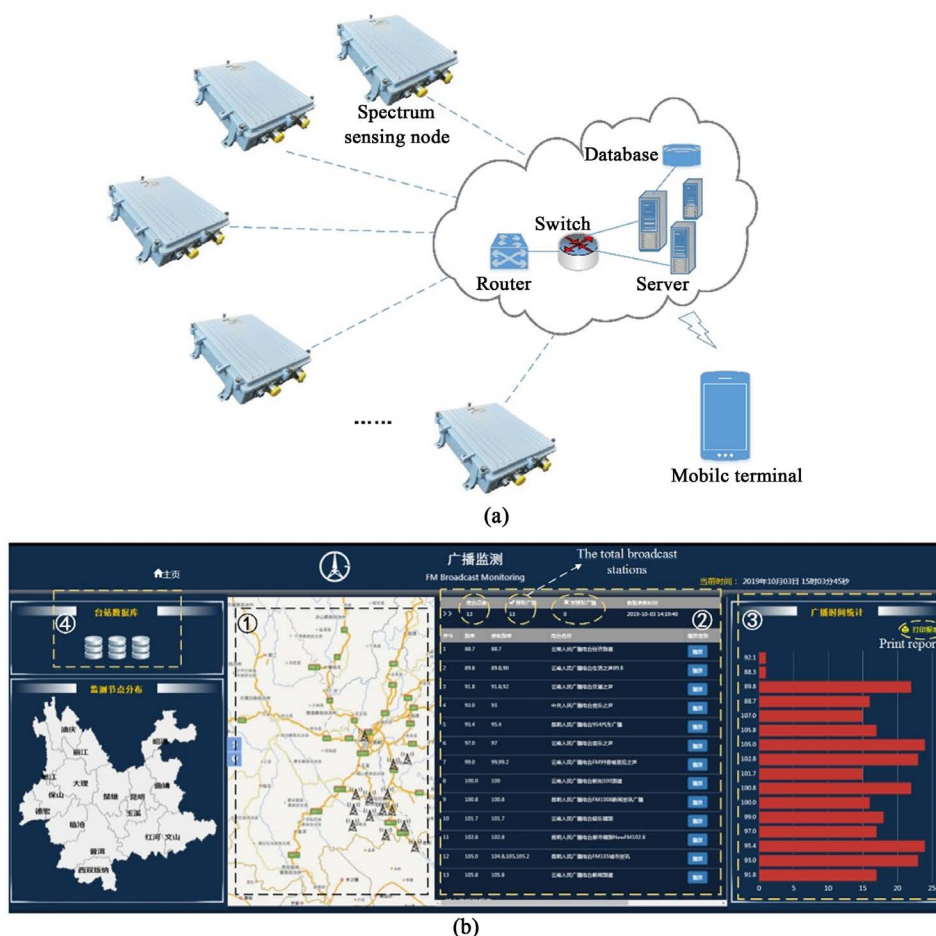


Figure 8. System design (a) Block diagram of FM radio monitoring system based on artificial intelligence; (b) Interface of FM radio monitoring system based on artificial intelligence

图 8. 系统设计(a)基于人工智能的 FM 调频广播监测系统框图; (b)基于人工智能的 FM 调频广播监测系统界面



Figure 9. Civil aviation radio monitoring system based on spectral sensing

图 9. 基于谱传感的民用航空无线电监测系统

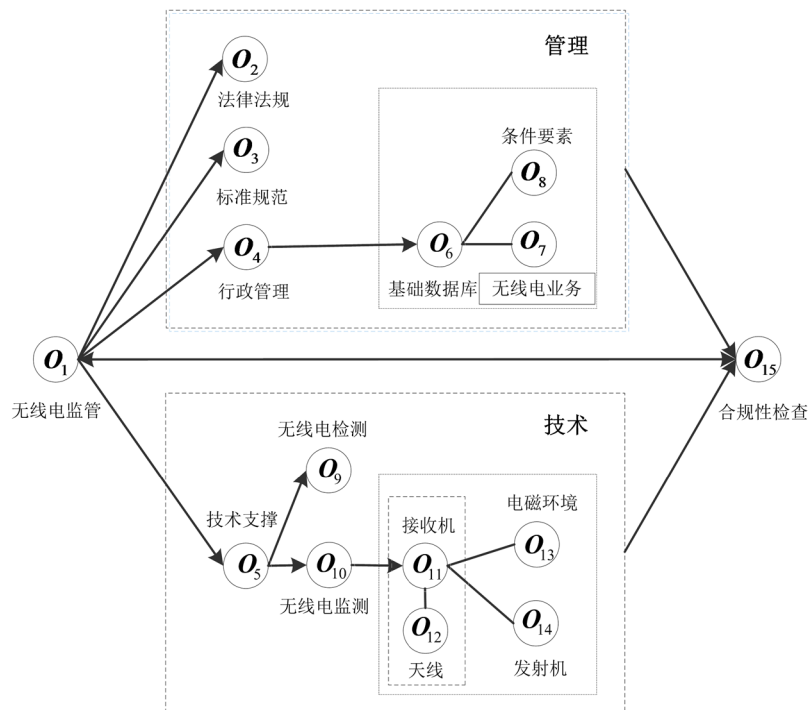


Figure 10. Radio regulatory framework based on knowledge graph technology [30]
图 10. 基于知识图谱技术的无线电监管框架[30]

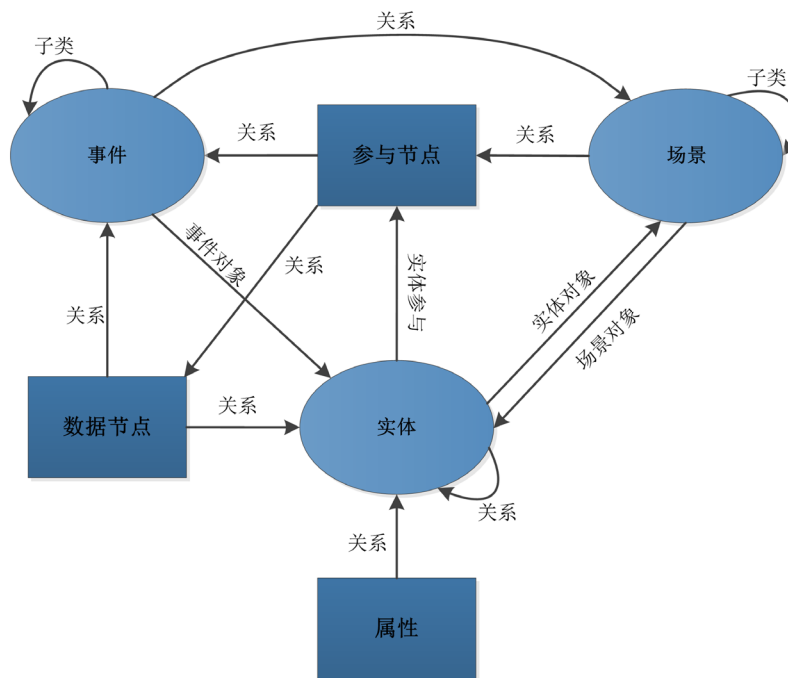


Figure 11. EES model based on entities, events and scenarios [30] [31]
图 11. 基于实体、事件和场景的 EES 模型[30] [31]

4. 无线电监测技术的发展趋势

由于无线电波“看不见，摸不着”，并且无线电业务容易受到干扰。因此，在无线电监测领域即使

要回答“无线电波是什么类型，从哪里来，是否合规”都非常困难。早期，监测人员带上频谱仪到现场进行频谱测量和电磁环境测量，随着监测覆盖范围的扩大和监测设备的增多，国内外开始大规模建设基于 RMTP 协议的无线电监测网络。由于 RMTP 协议本身的局限性，2015 年国家无线电管理办公室启动了课题“边境区域无线电管理技术设施建设及投资需求研究”，课题组通过分析研究我国陆地边境地区无线电频谱使用现状，台站设置情况，边境无线电管理技术设施建设和覆盖情况，其在边境频率协调和跨境干扰查处等工作中发挥的作用，当前边境地区无线电管理技术设施在建设、应用及管理中存在的共性问题，提出了我国陆地边境地区无线电技术设施建设建议及投资需求分析[15]，上述工作对国内外基于信息系统架构的无线电监测网络建设起到了促进作用。目前，无线电监测网络的发展趋势是从智能监测到智慧监测。

云南大学的无线电研究起源于 20 世纪 40 年代物理系无线电专门化，经历无线电监测技术发展的全过程，图 12 为云南大学怀周院楼顶上的无线电监测站的监测天线，这是国内高校第一个无线电公共安全预警监测站，该监测站通过 RMTP 协议与省内 185 个监测站互联，获得授权后可调用国内 2522 个监测站的数据，为实验室进行技术创新、数据对比、分析和工程化验证奠定了基础。同时，针对基于信息系统架构的无线电监测网络建设问题，云南大学提出了图 5 和图 6 所示的解决方案，并进行了工程化验证，对无线电监测学科方向有持续的研究和理解。



Figure 12. Radio monitoring station of Yunnan University
图 12. 云南大学无线电监测站

在智能监测和智慧监测方面，针对无线电波是什么类型的问题，国内外专家提出了不同的解决方案，例如，为了检测授权无线电用户是否存在，以便认知用户可以动态利用无线电频谱，专家提出了通过谱传感监测频谱“空洞”的方法，比如，能量检测、匹配滤波、循环检测等[32] [33]；为了识别无线电发射机，通信特定辐射源识别的多特征融合分类方法[34]、一种基于时域瞬态信号的雷达模型识别方法[35]和一种基于 CNN 的无线路由器指纹识别方法[36]等被提出；为了识别异常无线电信号，许多基于生成对抗网络 GAN (Generative Adversarial Network) 的方法被提出，包括天津大学的方法[37]和云南大学的方法[38]，图 13 和图 14 分别为我们提出的改进 GAN 模型和主要实验结果；为了识别无线电信号类型，我们建立了 5G、LET、WCDMA 和 GSM 等 22 种信号的频域、时域数据集，并通过机器学习和深度学习模型研究了其分类识别方法，图 15 为 5G NR 下行信号的时域图与频域波形，图 16 为 5 种移动通信信号的时域和频域波形，针对无线电业务复杂、调制类型繁多，尤其是无线电波在空间传播后经历了各种传输损伤和噪声干扰影响，以及特征提取困难等问题，提出了数据预处理方法，结果表明我们的模型识别正确率

高于目前行业水平 2%~3%，并节省了计算时间[39]。针对无线电波哪里来的问题，我们实施了 TDOA 测向和定位算法，并应用于国家边海无线电工程，图 17 以河口一品国际和河口森林公园两个谱传感节点对 97 MHz 信号进行测向为例，左图所示的“蓝色显向线”表明该信号为越南信号，右图两个谱传感节点监测到的信号处理过程，包括频谱、IQ 数据和相关运算；为了解决非视通 NLOS 环境下的定位，我们以 WiFi 和 LTE 定位为例进行了探讨，进一步完善了无线电监测知识体系[40]。针对无线电信号是否合规问题，我们建立了图 10 所示基于知识图谱技术的无线电监管框架，提出图 11 基于实体、事件和场景的 EES 模型；建立了知识驱动无线电监管实验系统，实现了无线电监管知识的获取、推理、决策和问答等功能，图 18 为实验系统中 6 个子场景在 Neo4j 图数据库中的关联图，台站数据库管理场景通过“频率数据”与监测场景关联，通过“设备数据”关联发射设备型号核准库管理场景，子场景功能描述见参考文献[31]；我们开发了无线电监管 APP，通过定义常规服务和特别服务解决无线电频谱数据安全与无线电监管知识普及的关系。

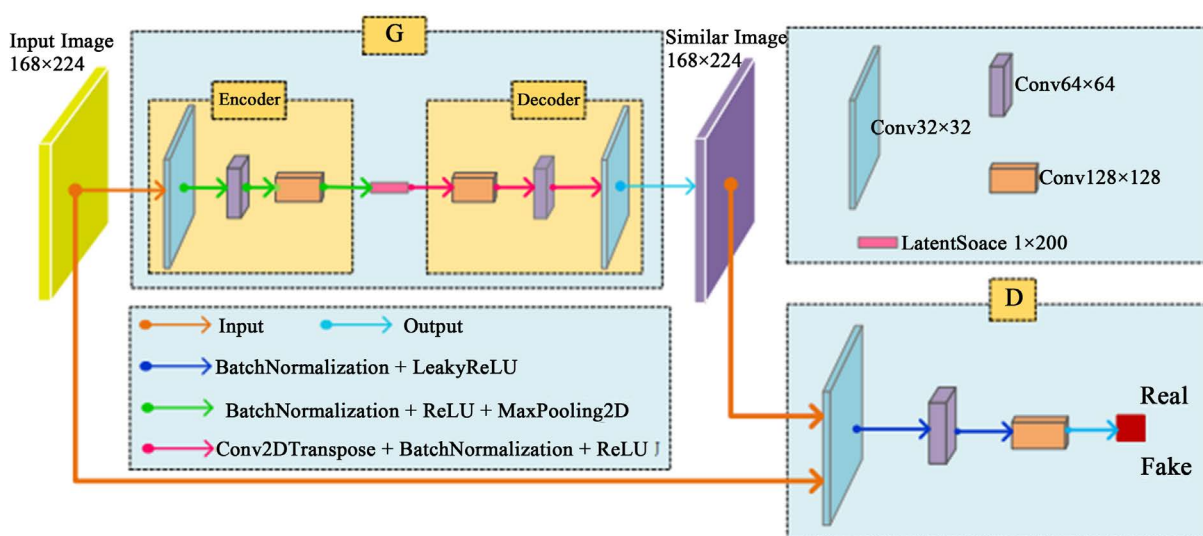


Figure 13. Architecture of proposed model

图 13. 改进 GAN 模型

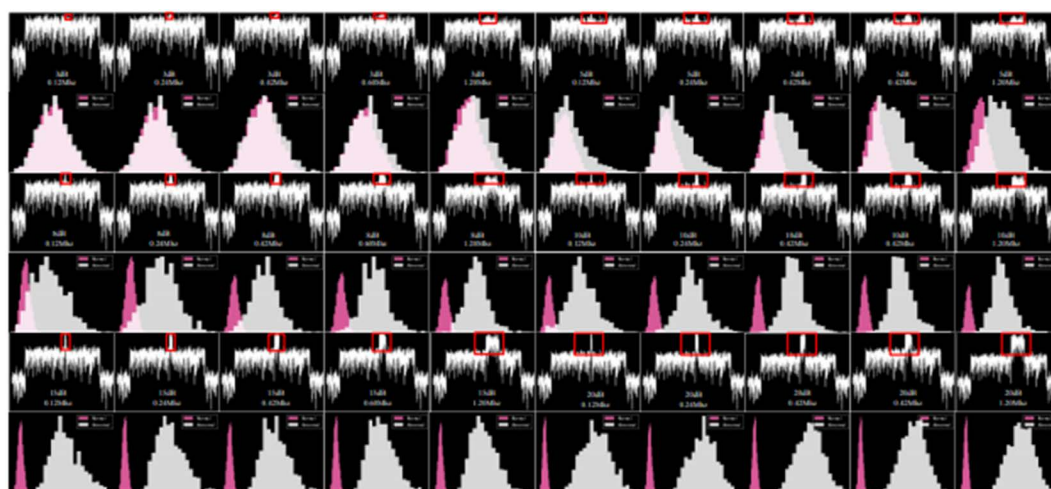


Figure 14. Spectrum images with pulse interference and residual distribution

图 14. 具有脉冲干扰频谱图像和残差分布

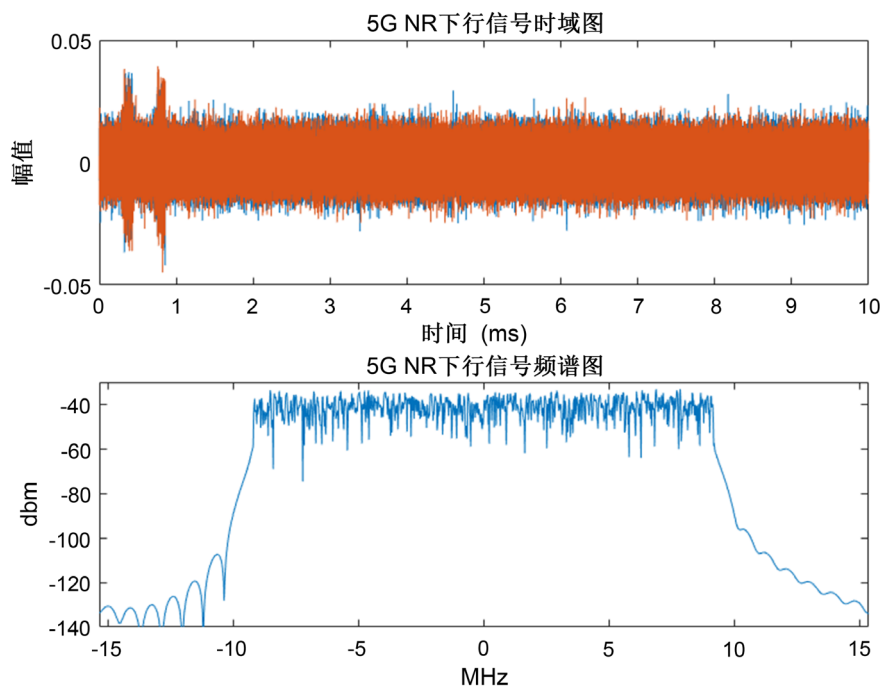


Figure 15. Time domain diagram and frequency domain waveform of 5G NR downlink signal

图 15. 5G NR 下行信号的时域图与频域波形

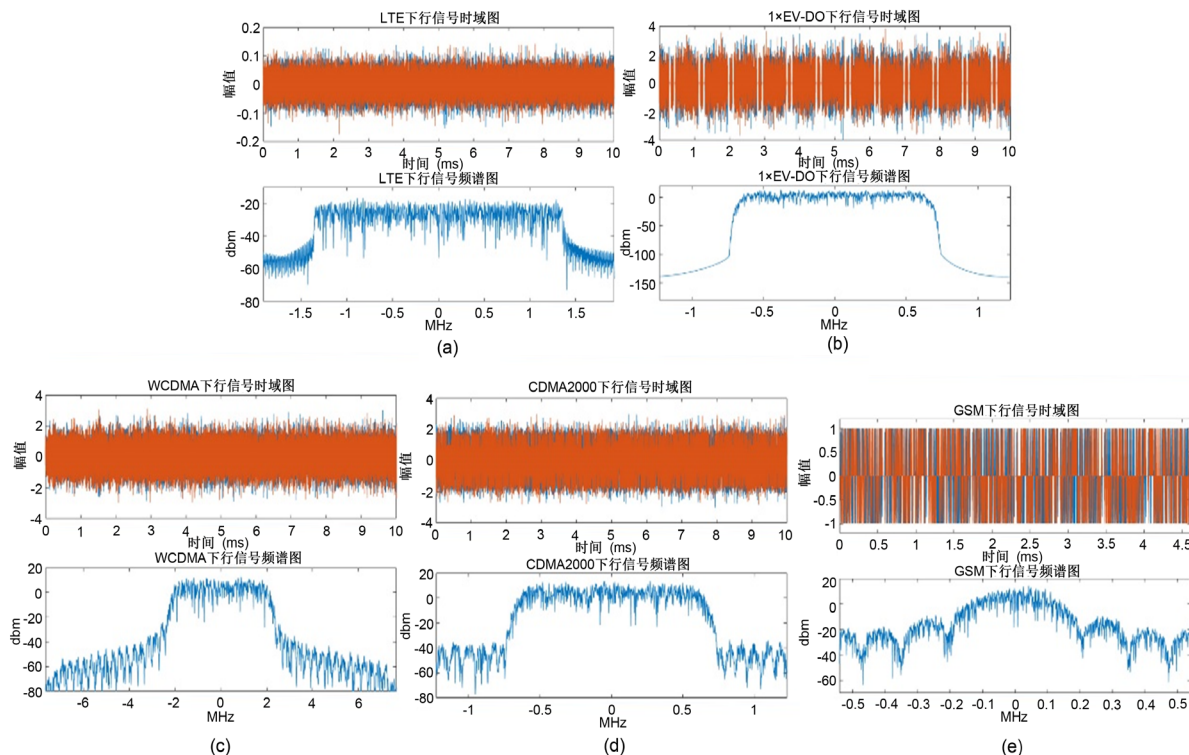


Figure 16. Time domain and frequency domain waveforms of 5 kinds of mobile communication signals. (a) LTE downlink signal; (b) 1xEV-DO downlink signal; (c) WCDMA downlink signal; (d) CDMA2000 downlink signal; (e) GSM downlink signal

图 16. 5 种移动通信信号的时域和频域波形。(a) LTE 下行信号, (b) 1xEV-DO 下行信号, (c)WCDMA 下行信号, (d) CDMA2000 下行信号, (e) GSM 下行信号

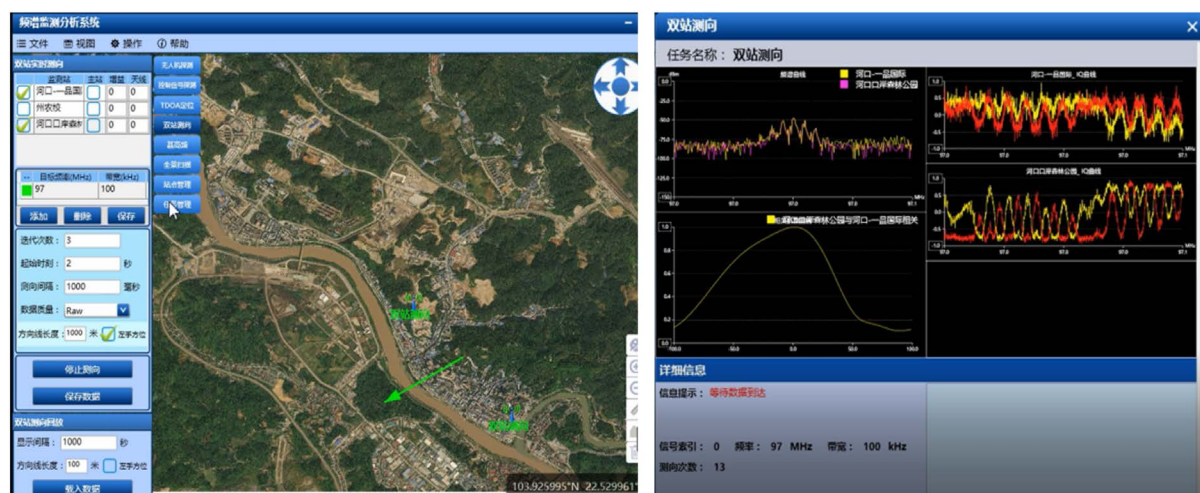


Figure 17. TDOA direction finding and signal processing

图 17. TDOA 测向及信号处理

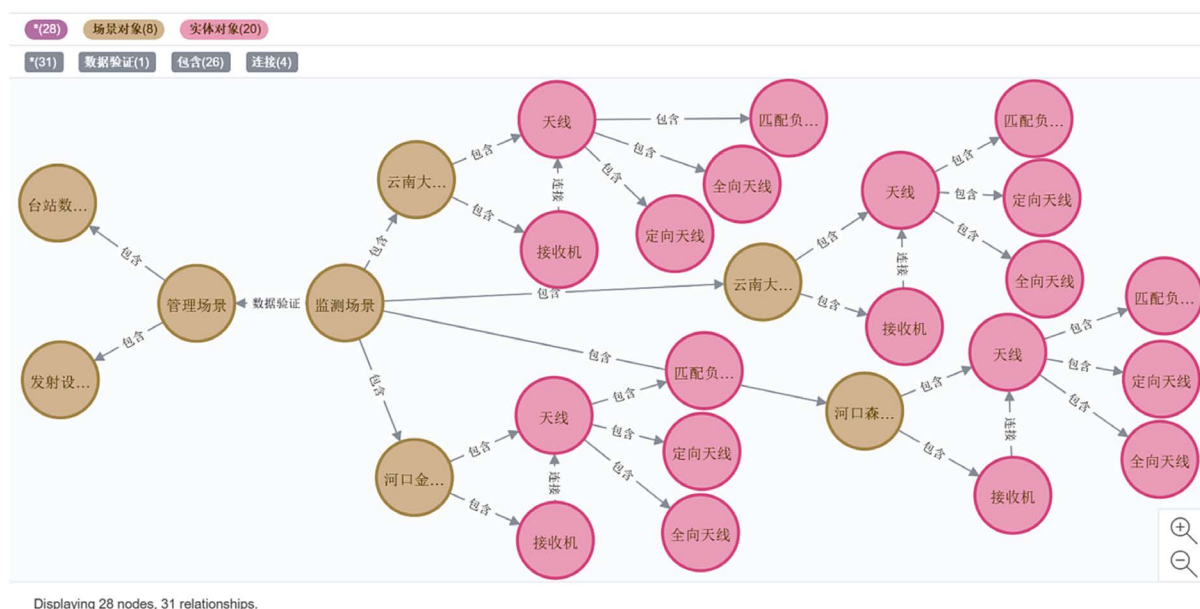


Figure 18. 6 sub-scene correlation diagrams of the experimental system

图 18. 实验系统 6 个子场景关联图

综上所述，无线电监测技术的发展经历了人工监测、基于 RMTF 协议的无线电监测网络监测和基于信息系统架构的无线电监测网络监测三个阶段，目前是实现从智能监测向智慧监管转变的关键时期。

5. 结论

电磁频谱是“大国竞争的前沿和中心”，云南大学作为“国家双一流”重点建设大学，无线电监测研究将继续服务于国家战略和行业发展需求，基于大学交叉学科的优势，发展基于新一代人工智能的无线电监管理论，解决目前无线电监测系统难以回答无线电波是什么类型、从哪里来、是否合规等关键共性技术问题，依托地方政府和相关企业，为国家边境电磁空间安全和无线电监测学科方向的发展贡献云南方案、技术和装备，同时，为学校信息与通信工程学科的建设添砖加瓦。

基金项目

国家自然科学基金(61963037, 61863035)。

参考文献

- [1] Underwood, E. (2018) Managing Radio Traffic Jams with The Cloud. *Eos*, 99. <https://eos.org/research-spotlights/managing-radio-traffic-jams-with-the-cloud>
- [2] 杨春青. 美国无线电管理和监测概况(上篇) [J]. 中国无线电, 2002(11): 17-20.
- [3] 杨春青. 美国无线电管理和监测概况(下篇) [J]. 中国无线电, 2002(12): 18-21.
- [4] 翁木云, 吕庆晋, 谢绍斌, 刘正锋, 编著. 频谱管理与监测[M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [5] Lu, Q.N., Yang, J.J., Jin, Z.Y., Chen, D.Z. and Huang, M. (2017) State of the Art and Challenges of Radio Spectrum Monitoring in China. *Radio Science*, 52, 1261-1267. <https://doi.org/10.1002/2017RS006409>
- [6] 王培美. 当代俄罗斯电子战产品主要研制单位及装备发展综述[J]. 国防科技, 2020, 41(6): 68-76.
- [7] 国际电信联盟. 国际电信联盟(ITU)简介[EB/OL]. <https://www.itu.int/zh/about/Pages/default.aspx>
- [8] Union of Concerned Scientists (2021) UCS Satellite Database. <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>
- [9] 陆震, 黄用华. 美俄电子战对抗的现状与分析[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(5): 1-8
- [10] 李硕, 李祯静, 朱松, 张春磊. 美军电磁频谱战发展分析及启示[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(8): 721-724
- [11] 王丹琛. 建设国家电磁空间安全体系维护电磁空间安全国家利益——陈鲸院士谈电磁空间安全[J]. 中国信息安全, 2020(12): 24-28.
- [12] 陈云雷, 李向龙, 王鑫鑫. 美国卫星互联网军事应用趋势及其影响研究[J]. 飞航导弹, 2021(2): 82-87.
- [13] 国家无线电办公室. 省级无线电管理“十二五”技术设施建设指导意见[Z]. 2010: 9.
- [14] 刘新浩, 赵越, 陈国成. 浅谈无线电监管技术设施标准化工作现状[J]. 数字通信世界, 2018(5): 1-4.
- [15] 杨晶晶, 黄铭, 鲁倩南. 边境区域无线电管理技术设施建设及投资需求研究[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2015.
- [16] Cooklev, T., Darabi, J., Mcintosh, C. and Mosaheb, M. (2015) A Cloud-Based Approach to Spectrum Monitoring. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, 18, 33-37. <https://doi.org/10.1109/MIM.2015.7066682>
- [17] Rajendran, S., Calvo-Palomino, R., Fuchs, M., Van den Bergh, B., Cordobes, H., Giustiniano, D., et al. (2018) Electro-sense: Open and Big Spectrum Data. *IEEE Communications Magazine*, 56, 210-217. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700200>
- [18] Zheng, S.L., Chen, S.C., Yang, L.F., Zhu, J., Luo, Z., Hu, J., et al. (2018) Big Data Processing Architecture for Radio Signals Empowered by Deep Learning: Concept, Experiment, Applications and Challenges. *IEEE Access*, 6, 55907-55922. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872769>
- [19] Lin, Y.C. and Shih, Z.S. (2018) Design and Simulation of a Radio Spectrum Monitoring System with a Software-Defined Network. *Computers and Electrical Engineering*, 68, 271-285. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.03.043>
- [20] 工业和信息化部. YDT 3699-2020. 无线电管理一体化平台体系架构及应用规范[S]. 北京: 工业和信息化部, 2020.
- [21] Calvo-Palomino, R., Cordobés, H., Engel, M., Fuchs, M., Jain, P., Liechti, M., et al. (2020) ElectroSense+: Crowdsourcing Radio Spectrum Decoding Using IoT Receivers. *Computer Networks*, 174, Article ID: 107231. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107231>
- [22] 黄铭, 鲁倩南, 杨晶晶. 红河州边境无线电监管示范与创新[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2018.
- [23] 易龙. 融入国家发展战略, 推动边境无线电监管设施建设[J]. 中国无线电, 2016(1): 87.
- [24] 云南大学无线创新实验室. 基于业务的无线电监测方法和技术[J]. 中国无线电, 2019(7): 72-73.
- [25] Huang, M., Yang, D.R., Zhu, D., Yang, M.X. and Yang, J.J. (2020) FM Broadcast Monitoring Using Artificial Intelligence. *Radio Science*, 55, Article ID: e2019RS006885. <https://doi.org/10.1029/2019RS006885>
- [26] 云南大学无线创新实验室. “黑广播”监测进入 AI 时代[J]. 中国无线电, 2019(2).
- [27] 云南大学无线创新实验室. 基于谱传感的民用航空无线电监测系统 CARM[J]. 中国无线电, 2019(3): 75-76.

- [28] 朱亚磊. 国家无线电监测中心党委书记李景春赴云南省无线电监测中心调研[J]. 中国无线电, 2019(4): 2-3.
- [29] Lu, Q.N., Li, C.X., Yang, J.J., Li, P., Huang, M. and Li, L. (2020) Radio Regulatory Knowledge Graph Framework and Its Application. *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Electronics and Communication Engineering*, Xi'An, 14-16 December 2020, 61-65. <https://doi.org/10.1109/ICECE51594.2020.9353042>
- [30] Li, C.X., Lu, Q.N., Yang, J.J. and Huang M. (2021) Construction of Radio Transmission Equipment Type Approval Knowledge Graph and Its Application. 2021 *IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering*, Nanchang, 26-28 March 2021, 956-961. <https://doi.org/10.1109/ICBAIE52039.2021.9389933>
- [31] 鲁倩南. 知识驱动的无线电监管理论与关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2021: 5
- [32] Yucek, T. and Arslan, H. (2009) A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **11**, 116-130. <https://doi.org/10.1109/SURV.2009.090109>
- [33] Liu, X., Sun, C., Zhou, M., Wu, C., Peng, B. and Li, P. (2021) Reinforcement Learning-Based Multislot Double-Threshold Spectrum Sensing With Bayesian Fusion for Industrial Big Spectrum Data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **17**, 3391-3400. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2987421>
- [34] 何遵文, 侯帅, 张万成, 张焱. 通信特定辐射源识别的多特征融合分类方法[J]. 通信学报, 2021, 42(2): 103-112.
- [35] Guo, S., Akhtar, S. and Mella, A. (2021) A Method for Radar Model Identification using Time-Domain Transient Signals. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3074129>
- [36] 张六, 曾正, 陈俊昌, 杨晶晶, 黄铭. 一种基于 CNN 的无线路由器指纹识别方法[J]. 电波科学学报, 2020, 35(3): 350-357
- [37] Zhou, X., Xiong, J., Zhang, X., Liu, X. and Wei, J. (2021) A Radio Anomaly Detection Algorithm Based on Modified Generative Adversarial Network. *IEEE Wireless Communications Letters*. <https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3074135>
- [38] Zhang, L., Huang, C.X., Tang, H., Yang, J.J. and Huang, M. (2020) DTV Radio Spectrum Anomaly Detection Based on an Improved GAN. 2020 *33rd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*, Rome, 29 August-5 September 2020, 1-4. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS49373.2020.9232396>
- [39] Zhang, H.Z., Huang, M., Yang, J.J. and Sun, W. (2021) A Data Preprocessing Method for Automatic Modulation Classification Based on CNN. *IEEE Communications Letters*, **25**, 1206-1210. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3044755>
- [40] 陈丽琴, 高凌宇, 杨晶晶, 黄铭. WiFi 信号传播与无线 AP 定位研究[J]. 无线通信, 2021, 11(2): 26-35. <https://doi.org/10.12677/HJWC.2021.112004>