

文章编号: 2095-4980(2023)06-0713-12

智能电磁空间构建与应用

方胜良, 胡豪杰

(航天工程大学 航天信息学院, 北京 100191)

摘 要: 在梳理电磁物理空间认知概念模型基础上, 针对电磁空间物理域和信息域不能有效融合以及电磁信息应用智能化不足两大问题, 提出了智能电磁空间的概念。智能电磁空间必须具有表征、理解、预测和决策 4 种能力, 其特征是以模型为核心, 以软件为载体, 高度依赖数据驱动, 达到对物理世界的精准映射, 为作战指挥和部队行动提供智能决策服务。从电磁空间信息组织机理着手, 进一步解决多源异构物理—信息数据融合问题的研究思路, 构建了智能电磁空间的技术架构, 提出了结合 GeoSOT 的高维电磁网格数据(GeoSOT-ND)模型高维张量建模与计算、多域电磁空间感知与高效存储、全维电磁态势重构与智能推演、基于网格数据驱动的应用方法等亟待突破的关键技术及实现思路。

关键词: 智能电磁空间; GeoSOT-ND 模型; 张量; 电磁态势; 人工智能

中图分类号: TN97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022180

Construction and application of smart electromagnetic space

FANG Shengliang, HU Haojie

(Academy of Space Information, Space Engineering University, Beijing 100191, China)

Abstract: In the electromagnetic space, the physical domain and information domain cannot be effectively integrated and the application of electromagnetic information lacks intelligence. A concept of intelligent electromagnetic space is put forward. The intelligent electromagnetic space should bear the ability of representation, understanding, predicting and decision making. Taking the model as the core, taking the software as the carrier, with highly data-driven, it can achieve accurate mapping of the physical world and provide intelligent decision-making services for the combat command and troop operations. According to the organization mechanism of electromagnetic space information, the problem of multi-source heterogeneous physics—information data fusion is further solved, and the technical framework is constructed. Some key technologies and implementation ideas are proposed, including Geographic Coordinate Subdividing Grid with One Dimension Integral Coding on 2n-Tree-N Dimensions (GEOSOT-ND) high-dimensional tensor modeling and computation, multi-domain electromagnetic space sensing and efficient storage, full-dimensional electromagnetic situation reconstruction and intelligent deduction, and grid data-driven application methods.

Keywords: intelligent electromagnetic space; GeoSOT-ND; tensor; electromagnetic situation; artificial intelligence

随着人工智能技术的不断发展和军事需求, 智能电磁战成为电磁频谱作战发展的必然趋势。夺取未来电磁频谱作战主动权的关键是获取电磁空间的智能优势^[1], 智能电磁战虽然争夺的是物理世界(电磁空间)的制电磁频谱权, 但离不开电磁信息产生、传输和共享空间(即智能化电磁信息空间)的支持。为此, 本文提出了智能电磁空间这一原创性概念。通过构建智能电磁空间, 解决电磁信息的智能表征问题, 提供高效及时的电磁计算框架, 实现物理世界的电磁空间与数字世界的信息空间深度融合, 为构建统一的全球电磁信息基础框架提供技术支撑, 从物理、频谱、时隙、能量和态势等 5 个方面实现战斗力提升。

1 需求分析

1.1 电磁空间技术加速向智能化方向发展

当前,电磁信息技术发展遇到一系列问题,如电磁信息技术发展受到物理极限制约,频带资源即将占用殆尽,人工预分配无线电频率的频谱管理模式越来越难以应对海量用频设备的复杂频谱接入需求^[2];与此同时,用频设备数量以及频谱占用时间的提升使得频谱数据成指数级增长,亟需对频谱大数据进行有效处理,从而满足人们日益增长的用频需求。现有数据传输-地面空间电磁信息服务的模式远远不能满足实时性需求,但人工智能算法和计算平台的突破极大推动了电磁信息技术的发展,使电磁信息智能化处理成为可能,也为电磁空间技术加速向智能化方向发展提供了新的思路。

1.2 电磁频谱战离不开智能化电磁信息技术的支撑

智能电磁战离不开电磁信息的全面、精准化获取,以及对相关信息的按需组织、高效处理、及时分发等关键环节^[3]。为从根本上提升这些环节的智能化水平,亟需时空统一的新型信息组织方式构建的信息空间对电磁信息进行智能化处理和应用。

在信息化时代,对高新技术武器装备运用程度越高的作战行动,越离不开对战场电磁目标和战场电磁环境的智能表征^[4]。战场电磁目标和电磁信息表征的智能程度,反映了各级指挥机构对于战场电磁信息要素的客观、精准和详实水平,进而决定着指挥、参谋人员对于战场态势的感知能力、反应速度和全局控制力。另外,战场电磁目标和电磁信息表征的智能程度,对于未来认知电子战和陆、海、空无人器集群完成高效自主可控的蜂群式侦察、欺骗与攻击行动也起到决定性作用。

复杂快变的联合作战迫切需要高效及时的电磁计算能力。信息化条件下联合作战的作战节奏快,样式多变,战场态势始终处于高速变化之中;同时双方不断调整部署,协同对抗,以及敌我双方电子对抗力量产生的电子干扰,导致战场电磁空间异常复杂,电子对抗异常激烈^[5-6]。在这种复杂的电磁对抗环境中,战场用频对象、用频需求、可用频谱都变得难以确定,更别说激烈的电子对抗博弈。可以预计,复杂快变的联合作战中的电磁环境、电磁态势以及电磁频谱管理中都涉及到大量电磁计算,同时对电磁计算的复杂性、精准性、及时性要求越来越高。使用高性能的计算机设备是提高电磁计算能力的一种有效途径,但寻求能有效提高电磁计算能力的新方法则是更为有效的解决途径。

电磁空间贯穿联合作战全域全时,亟需全军统一的全球电磁信息基础框架支撑。电磁空间交织于陆、海、空、天、网各维战场空间,贯穿于联合作战全过程,融合于电磁频谱作战相关具体业务。联合战役电磁信息应综合呈现敌我双方预警、通信、导航、制导、电子对抗等多维度、多要素的对抗过程,丰富的电磁信息已然成为信息化条件下联合作战指挥活动的重要内容,也是指挥员实施正确高效指挥的前提和关键^[7]。电磁空间的作用对电磁信息的组织提出了新的要求:既要有全球电磁信息基础模型,又要满足实时感知的电磁探测数据的快速更新,还需要具备智能推演的能力。从而使电磁信息既可像测绘一样,进行全球用频标注,绘制立体的全球空间电磁栅格;又可像气象一样,全维感知并预测电磁信息;还可像敌我识别系统一样,打上电磁标签,实现不同系统之间的快速、自主用频交互。因而,构建全军统一的全球电磁信息基础框架是关键。

1.3 智能电磁空间是获取电磁领域智能优势的有效途径

为从根本上提升电磁战的智能化水平,需要构建一个智能化的信息空间,即智能电磁空间。针对智能电磁空间多域电磁信息智能表征、高效计算、智能决策等重大需求,提出并发展一套基于全球高维张量网格的智能电磁空间技术体系,研究智能电磁空间高维时空张量网格构建、高维网格高效计算体系等方法,突破多尺度空间和时间运动协同控制、高维离散网格数值计算、多域电磁信息全息显示、联合作战行动智能规划引导等关键技术,研制智能电磁空间信息平台 and 智能服务接口组件等。在电磁态势分析、电子对抗等典型领域进行示范应用,为构建全军统一的电磁信息基础框架提供技术支撑。

借助智能电磁空间,首先为实现电磁感知一张网,电磁态势一张图,电磁智能表征、理解、预测和决策一张表(语义,同一个标准)提供支撑,实现多平台、多系统与多体系信息融合。通过物理世界的电磁空间与数字信息空间深度融合,最终形成“电磁物理空间+电磁信息空间”的协同智能服务。

智能电磁空间可从 5 方面支撑电磁作战及联合作战:a) 智能物理空间:可实现高效、可靠、安全的多物理空间敏捷机动;b) 智能频谱空间:可自动生成供我方随机利用的频谱资源;c) 智能时隙空间:可自动生成供我方利用进行对抗等作战的时间间隙;d) 智能能量空间:可自动生成能量密度分布空间,可供我方自动生成电磁安全策略;e) 智能态势空间:可进行电磁态势预测与塑造,为联合作战星火一体打击目标体系作战筹划和指控

行动先期规划提供精准支撑。

2 科学理论及关键技术解决方案

2.1 智能电磁空间的概念

智能电磁空间,是以高维时空张量为基础,将电磁领域多域信息(空间、时间、频率、场强、极化等)通过网格化和离散化后汇集在张量网格中,构造物理空间的数字孪生,实现电磁物理空间和信息空间的融合,具有自感知、自组织、自评估、自决策能力的电磁空间。

智能电磁空间是对物理世界的电磁空间精准映射,通过数据驱动、模型支撑、软件定义的方式,分层分类描述物理世界的电磁空间,从而实现智能决策。处在智能电磁空间中,经过授权的作战单元或武器平台,不仅能随时随地、透明地获取已采集或处理的电磁信息,甚至还能“链接、指挥”物理世界的传感器“按需”获取实时信息,由此形成“电磁物理空间+电磁信息空间”的智能电磁空间协同智能服务。

其基本特征如下:

- 1) 全局统一的时空 ID: 全球统一多尺度的时空编码体制,能对全球剖分网格实施精准而唯一的网格编码;
- 2) 多层次的电磁信息表示: 一方面是多粒度性,可以实现 1.5 cm 级至全球范围的电磁环境数据表示;另一方面是多维度表达性,可对电磁信息的时域、能量域、频率域等进行不同维度的多维表达并逐步扩充到其他域;
- 3) 可进化: 采用智能学习方法,不断学习积累新案例,面对复杂的电磁环境将会越来越精准、快速;
- 4) 可溯源推演: 电磁波的传播具有一定规律,反向依据这些规律可以找到电磁辐射源头;
- 5) 可预测: 基于规律性,结合已有信息对下一段时间内的分布情况做出有效预测;
- 6) 高保真性: 模拟全球真实地理环境并进行电磁态势分析;
- 7) 准确性: 准确认识电磁空间的基本特征,把信号密度、样式、强度、分布、变化等多个方面综合起来考虑,准确描述信号的频域、时域、空域、能量域等多维特征;
- 8) 动态实时性: 实时感知分析范围内的电磁数据,准确表达电磁空间分布情况;
- 9) 自主性: 基于电磁态势,自主进行电磁频谱管理,统筹好电磁频谱的使用,实施科学、规范、严格管理,从而对复杂电磁环境实施有效控制^[8]。

2.1.1 电磁物理空间认知模型

1) 电磁物理空间分层认知概念模型

现行的用于表征电磁空间的“六域”模型如图 1 所示^[9],即将电磁空间看成一个由 6 个不同属性的物理量描述的整体。每个域分别从不同的侧面反映电磁空间的部分特征,六域共同描述出电磁空间的基本特征。

按照由浅入深的认识思路,该电磁空间认知的一般层次可分为 7 层,如图 2 所示^[9],分别为:基本属性层、物理空间层、波动形态层、信号波形层、指纹特征层、基础数据层、信息应用层。每个层都包含一个物理参数用于描述六域中的物理量。

从模型应用的角度来说,针对不同的对象(用户),在认知电磁空间时可以根据需求掌握部分域的信息,每个层次对应的潜在应用如图 2 所示。认知电磁空间可按照从低层次到高层次的顺序,实现层次嵌套,只要满足用户所要求的信息即可。

2) 电磁物理空间智能认知概念模型

从电磁战角度来说,电磁物理空间智能认知的核心思想是使装备系统具备对于战场环境的自感知能力^[10]。这种有别于传统电子战系统的自感知能力极大提高了决策的效率和准确率,结合“观察(Observe)-判断(Orient)-决策(Decide)-行动(Act)” (OODA)作战过程^[11-12],智能电磁战是通过不断提升智能化水平缩短电磁领域的 OODA 周期,提升作战精确度。电磁物理空间智能认知概念模型如图 3 所示。

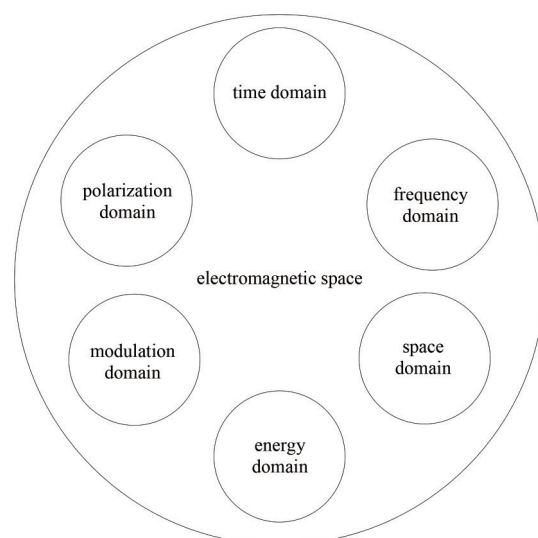


Fig.1 Six-domain model of electromagnetic physical space
图 1 电磁物理空间六域模型

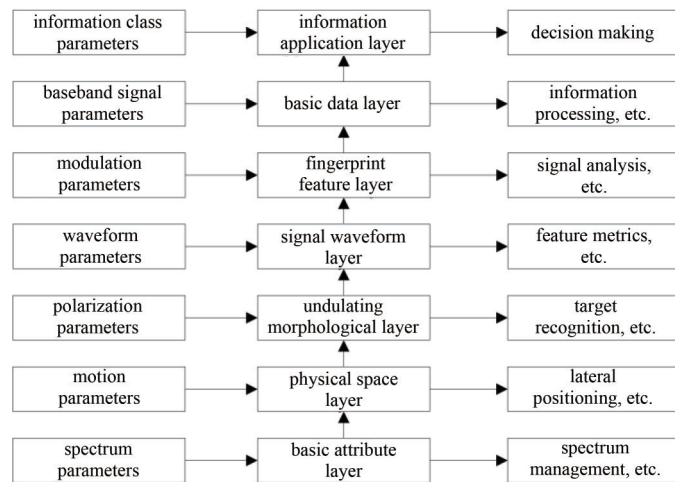


Fig.2 Conceptual model for layered application of electromagnetic physical space
图2 电磁物理空间分层应用概念模型

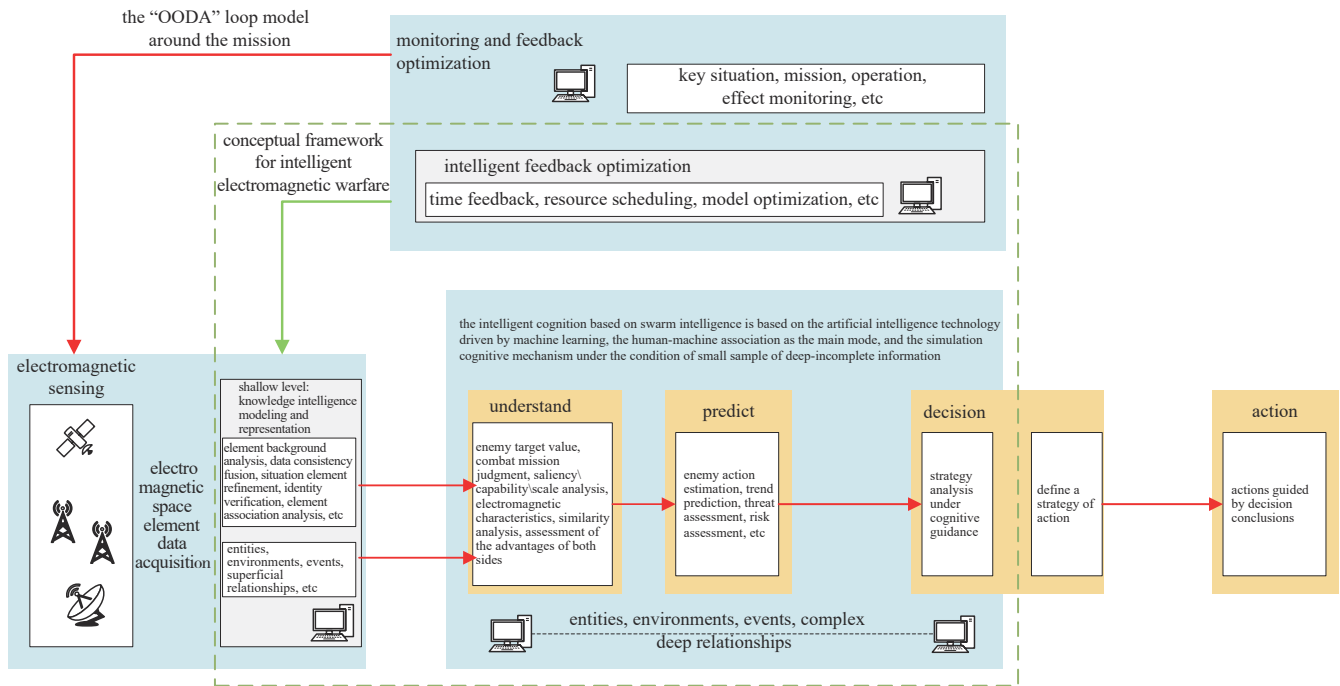


Fig.3 Conceptual model of intelligent cognition in electromagnetic physical space
图3 电磁物理空间智能认知概念模型

2.1.2 智能电磁空间认知基础

从电磁物理空间智能认知概念模型中可以看出，整个智能电磁战流程是从感知、表征、理解、预测、决策到行动，再不断循环反馈的过程。因此智能电磁空间具有4种能力：表征、理解、预测和决策，如图4所示。表征是通过感知设备采集到的数据，提取电磁特征，对电磁物理空间各要素进行监测和动态描述；理解是利用模型分析电磁数据，检查功能、性能和态势变化的原因；预测是提示各类模式的关系，预测未来发展趋势；在分析过去和预测未来的基础上，对行为进行指导。

为满足电磁物理空间分层认知、分层应用及智能认知需求，智能电磁空间必须具有表征、理解、预测和决策4种能力，并对电磁物理空间精准映射，通过数据、模型并以软件的方式分层分类描述电磁空间，最终提供智能决策服务，如图5所示。

智能电磁空间综合运用电磁感知、计算和建模等信息技术，通过软件定义，对电磁物理空间进行表征、理解、预测和决策，进而实现物理世界和信息空间的相互映射，如图6所示。

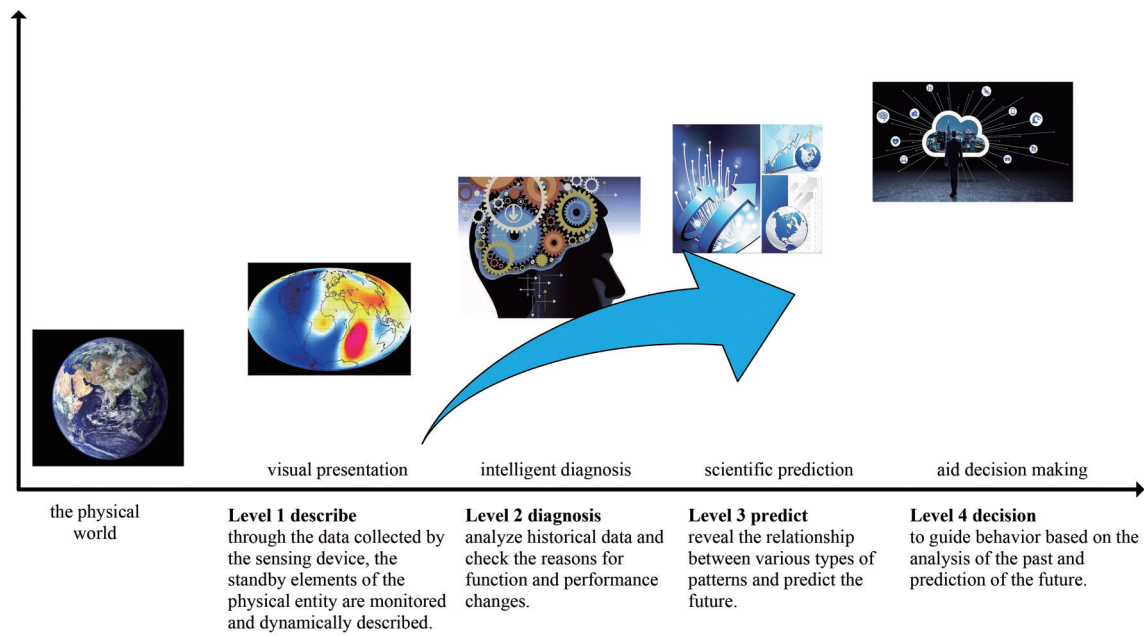


Fig.4 Four capabilities of intelligent electromagnetic space
图4 智能电磁空间四种能力

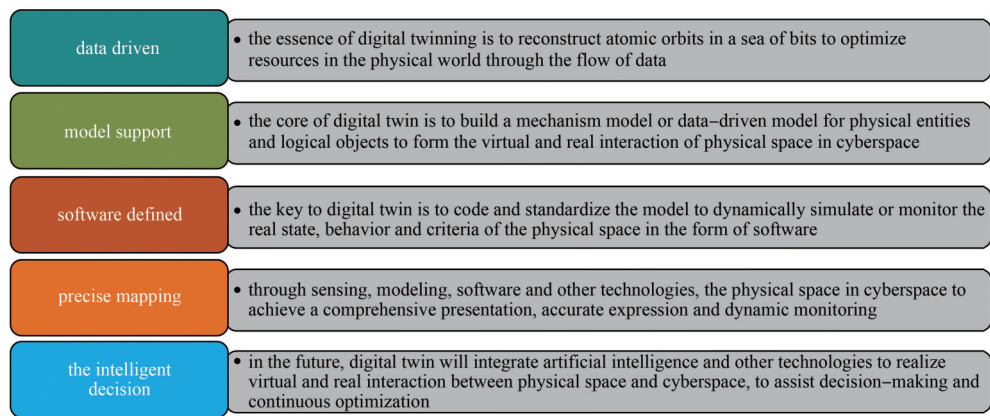


Fig.5 Typical characteristics of intelligent electromagnetic space
图5 智能电磁空间典型特征

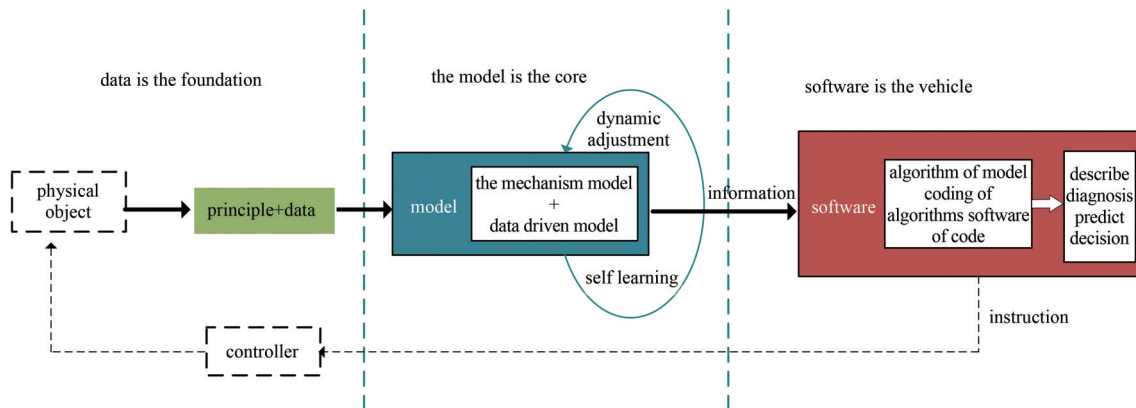


Fig.6 Three foundations of intelligent electromagnetic space
图6 智能电磁空间三大基础

2.2 智能电磁空间的科学问题

电磁作战物理域与信息域不能有效融合、电磁信息应用智能化欠缺 2 大问题，可归纳为电磁空间信息物理融合这一科学问题。要解决这一核心问题，必须首先解决电磁空间信息组织问题，在此基础上进一步解决多源

异构物理—信息数据融合问题。

2.2.1 电磁信息组织机理

电磁信息组织机理是指电磁信息组织的内在规则,主要包括信息之间的关联性、统一性、可标识性、可分割与可聚合性等特性,是决定信息组织有效性的基础。

电磁信息组织机理研究,着重解决电磁信息离散化、精细化描述问题,提升电磁信息智能表征水平。首先开展基于空间网格剖分的电磁信息表达机理研究,将电磁信息以栅格的形式进行分层,逐格进行描述,提出电磁信息时域、频域、空域和能域等(多域)的编码与关联方法,形成电磁信息的多域网格表达方法;再以多域网格为基本单元,构建规范化、标准化、归一化的电磁数据场。其次开展面向立体电磁空间的多维网格编码代数方法研究、基于剖分编码代数的空间关系计算研究、基于剖分编码代数的空间信息关联模型研究、基于剖分编码代数的查询检索应用方法研究,为进行多域网格电磁信息数据关联、检索、计算等提供方法、模型支撑,最终达到电磁信息“统一组织、智能表征、高效计算”的目的。

2.2.2 物理信息融合

电磁空间物理要素的智能感知与互联、虚拟模型的构建、异构多源数据的融合、连接交互的实现、应用服务的生成等,都离不开物理信息融合。同时,物理信息融合贯穿于OODA作战链各个阶段,是每个应用实现的根本。

结合智能电磁空间参考架构,电磁空间物理信息融合科学问题可进一步细分为电磁空间的要素融合、数据模型融合(数据融合)、服务融合与应用(服务融合)。

1) 要素融合

要素融合指通过可靠感知电磁物理空间内异构全要素信息,将动态网络环境下的海量感知数据实时传输至信息层,集成规约多源多模态异构数据,并精准控制复杂电磁环境下各类电磁活动,从而实现电磁物理空间全要素的智能感知与互联、高效数据传输与集成、实时交互与控制、智能协作与共融。

2) 数据融合

针对军事电磁数据获取难、高维度开环特征、高度安全性、高度对抗性、高度时效性和高度权威性军事大数据特征,数据融合基于电磁空间一致性原理,对电磁物理空间实时数据、虚拟世界模型数据、仿真数据等覆盖全要素、全流程、全业务的相关数据,进行生成、建模、清洗、关联、聚类、挖掘、迭代、演化、融合等操作,真实地刻画和反映物理世界电磁空间状态、行为等各类动态演化过程、演化规律、统计学等特性。

3) 服务融合

融合了物理—信息数据的智能电磁空间既能反映电磁物理空间和电磁信息空间的运行情况,也能驱动并影响两者的运行。服务是实现物理世界和信息世界智能互联与智能操作的重要桥梁,是将智能电磁空间的“能力”包装成服务给用户,其复杂性和动态性体现在环境动态不确定、要素状态不确定、任务需求动态变化、目标及约束多样性等方面。

2.2.3 基础支撑技术

开展智能电磁空间研究过程,除上述理论与技术外,还需要以下基础支撑:

1) 标准与规范、接口与协议:包括多源异构电磁空间资源要素数据转换和通信标准与协议、电磁空间与物理空间映射语义与标准规则、智能电磁空间数据构成与分类标准、智能电磁空间服务技术与规范接口等。

2) 通用设备、工具与系统:包括电磁空间资源采集设备、数据通用传输与转换设备、数据建模与分析工具、软/硬件及异构信息系统集成工具、信息物理融合服务系统平台等。

3) 算法:包括数据清洗算法、数据分析与挖掘算法、物理—信息融合算法、可视化算法、面向电磁战动态决策优化的闭环控制算法、可配置智能优化算法等。

4) 可靠性与安全机制:包括电磁物理空间协同安全机制、电磁信息空间仿真一致性与可靠性验证、数据可靠传输与交互安全机制、系统平台运营安全机制、融合服务协作可靠性保障机制等。

2.3 智能电磁空间的技术框架

智能电磁空间瞄准的是电磁空间控制权的争夺,解决电磁信息应用智能化水平不高、电磁空间的物理域与信息域不能有效融合2大问题。在突破基于高维网格的多域电磁信息表达模型等关键技术的基础上,构建了智能电磁空间的技术框架,如图7所示。

智能电磁空间技术框架在物理世界中包括电磁多域感知,在数字虚拟空间以GeoSOT-ND张量空间为基础,利用高维电磁张量的存储、组织、计算与可视化技术,实现电磁认知与决策以及电磁服务与应用。

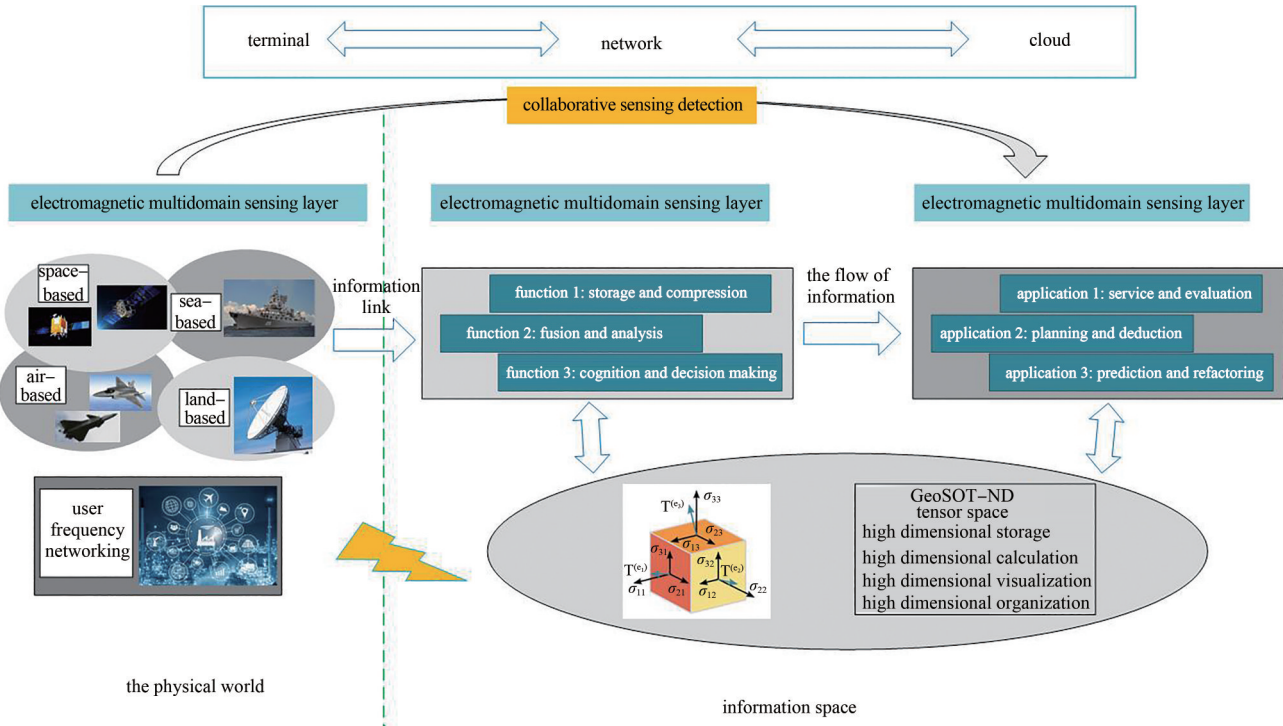


Fig.7 Schematic diagram of the technical framework of intelligent electromagnetic space
图 7 智能电磁空间的技术框架示意图

智能电磁空间技术框架总体可分为 4 部分：a) 电磁空间表征与计算：基于全域时空北斗网格剖分框架，设计多维智能电磁空间的模型结构，建立精细化、可变尺度的物理空间实体电磁属性和信息属性表征模型，实现电磁空间的多维标识及精准计算；b) 电磁空间感知和自组织：通过分布泛在的电磁空间主被动探测和感知设备，从时、空、频、能多维度实现对电磁信息和目标的精确测量监视，研究多类高维电磁数据的感知技术、融合技术、压缩技术与自组织技术，形成面向物理空间的电磁个体智能识别、行为推理和电磁事件的理解推断；c) 电磁空间重构与推演：利用有限的原始电磁数据，使用高维网格张量的数据挖掘技术进行复杂电磁分布的预测与推演；d) 电磁空间服务与应用：针对不同应用提供多类服务，可边缘和端部署应用，实现感知数据和场景应用知识的汇集，透视电磁空间各种行为和事件，支撑电磁空间感知、认知、利用、控制。

2.4 智能电磁空间的关键技术

结合技术框架体系，提出了 GeoSOT-ND 高维张量建模与计算、多域电磁空间感知与自组织、全维电磁态势智能重构与评估、基于网格数据驱动的应用等亟待突破的关键技术及实现思路。

2.4.1 GeoSOT-ND 高维张量建模与计算

基于全域时空网格剖分框架，将空间离散化为多个层级的多个网格体，每个网格体具有唯一的、有层次性的坐标表达，以此构建四维空间索引与编码基准；通过接受多源电磁信息属性的输入，将电磁信息抽象并与空间网格体相关联形成高维张量的形式，构建出适合于多维空间信息统一描述与表达，高效计算与分析的结构模型，如图 8 所示。

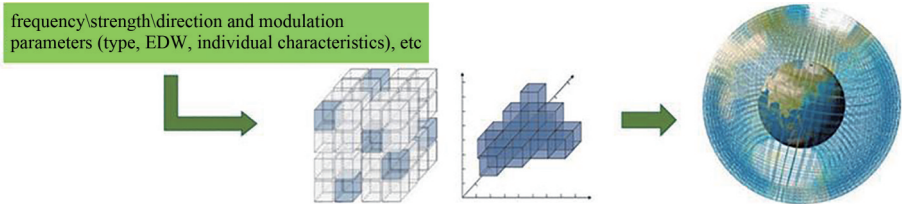


Fig.8 GeoSOT-ND multidimensional tensor modeling
图 8 GeoSOT-ND 高维张量建模

该电磁空间信息化模型将具备 5 大基本特性：a) 可承载：根据电磁场在时空域上的多种属性要素，对网格化的高维张量进行属性填充和统一管理；b) 可查询：电磁属性可通过高维网格张量进行快速检索、切片、重构等

操作；c) 可分配：高维网格张量空间的尺度可根据任务需求进行分配；空间范围根据任务目的进行划分；空间属性根据任务要求进行筛选；d) 可计算：高维网格张量可直接进行离散空间关系推导计算，张量化的矩阵数据便于进行线性代数计算和压缩降维计算；e) 可匹配：实时感知的电磁场数据和高维网格张量存储的电磁分布地图进行高效匹配和定位。

1) GeoSOT-ND 高维张量拓展的框架技术

基于 GeoSOT-ND 时空网格编码框架，对不同尺度下网格体内的高维张量进行扩展，同时不改变扩展后高维张量的性质，实现高维张量的可延展性。

2) 数据关联约束和元数据描述技术

不同网格体内的高维张量存在地理空间的拓扑关系与数据之间的关联约束，加强对元数据的描述技术，可用于分析高维张量元数据之间的关联关系。

3) 多维电磁数据的统一转换和张量索引技术

多维电磁数据在各维度上的量纲以及数据格式之间存在差异，对多维电磁数据的整体操作需要先进行统一转换，并支持张量索引，即对多维电磁数据各个维度都能保持独立的索引。

4) 高维网格高效电磁计算方法

解决传统基于线性追踪的电磁计算不精确、难理解、效率低问题，基于空间网格重构电磁环境和传播模型，实现电磁空间可观测展示、电磁效应多尺度精确分析。

2.4.2 多域电磁空间感知与自组织

1) 高维多域频谱感知技术

使用机载、车载、基站部署传感器等方式，对目标电磁频谱及其属性进行探测和记录，作为智能电磁空间的多类数据源。该技术将具备 2 种主要的区别探测能力：能有效区别自然电磁辐射、一般公共辐射、干扰性电磁辐射等，具备连续时间内指定波长或波段区间的精密探测能力；能探测基本的电磁波属性，如电场强度、磁场强度、频率或波长等。

2) 多源探测数据融合技术

利用传感器等方式获取的多源探测数据在结构上差异较大，需要利用多源数据融合模型与算法对多源数据进行融合统一，获得对多源探测数据的一致性解释，为进一步的决策和分析提供依据，使系统获得比其各组成部分更充分的信息。

3) 高维电磁张量压缩技术

基于网格化张量组织的海量电磁数据，具备空间域、时域、属性等高维信息，可使用较为成熟的张量分解技术，如平行因子分解(Parallel Factors, PARAFAC)、Tucker 等，从高维数据中提取时间、空间及属性的耦合关系，可构建主张量特征矩阵，可很好地用于海量数据的低损压缩。同时，利用规整有序的张量组织形式，全量的原始数据皆可基于高维张量进行维度切片、维度重组、维度遍历等分层索引下的快速操作，可进一步探索 GeoSOT-3D 向 N 维空间的编码拓展形式。

4) 电磁张量的编码拓展和组织技术

基于 GeoSOT-ND 剖分编码对不同层级下空间网格体内的电磁张量实现编码扩展，并保证不同层级网格体内的高维张量在特征上具备关联性，按照编码的唯一性对高维张量进行组织和存储。

2.4.3 全维电磁空间的智能重构和评估

基于感知获得的有限的原始电磁数据，使用高维网格张量的数据挖掘技术进行复杂电磁分布的预测与推演，解决大多数探测条件下的场景重建及评估问题。

1) 电磁空间的频谱空洞预测技术

由传感器实时截获的电磁点位数据，包含电磁基本属性等，对离散空间进行有冗余的高维映射，再进行基于算法插值或机器学习的空洞填补。

2) 辐射传播方程的网格化推演技术

已知辐射源位置及功率等，则研究麦克斯韦传播模型在三维网格空间的快速填充技术，研究常见遮挡与干扰对多波段电磁信号的影响。

3) 电磁态势智能重构技术

未知辐射源位置及功率等，则研究通过多个传感器数据和地形、建筑等时空网格数据进行辐射源空间融合定位的技术，借助整个空间电磁分布的推演(如图 9)，动态生成电磁态势。

建立电磁态势“指标体系构建→指标权重优化→指标数据采集→评估计算及结果展示”一整套严谨且完善的评估程序自主运行机制，是实现电磁态势智能评估的关键。

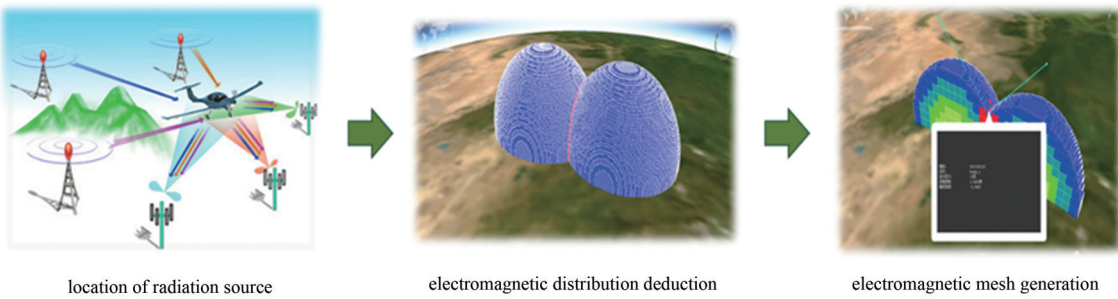


Fig.9 Electromagnetic situation intelligent reconstruction technology
图9 电磁态势智能重构技术示意图

2.4.4 基于网格数据驱动的应用

1) 基于网格数据驱动的任务部署和演练技术

通过实时探测多波段电磁场频率、场强、通信信噪比等因素，基于时序信息对干扰场的空间分布进行有效推断，如电磁空洞区域预判、强干扰区域规避、辐射源位置推算(溯源)，在得出空域安全电磁走廊基础上，对无人平台全局的任务部署以及航迹规划做出约束性修正，如图 10 所示。

2) 基于网格数据驱动的电磁目标活动规律分析

基于网格数据基础，尤其是频段区间、信号类型、特征参数和测量精确度等，采用态势重构和智能推演技术，推理出电磁活动与行动之间的行为因果关系、行动与计划企图及其威胁之间的结构耦合关系等，形成面向物理空间的电磁个体智能识别、行为推理和电磁事件的理解推断，生成电磁目标活动图。

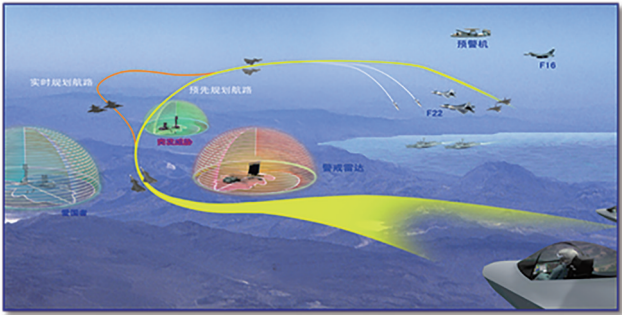


Fig.10 Schematic diagram of electromagnetic safety corridor
图 10 电磁安全走廊示意图

2.5 智能电磁空间的特性实验

将电磁空间以张量结构为基础进行离散化表达，按多尺度的层次结构构建新型电磁信息存储关系，使数据结构化形成电磁环境数据场，可有效解决电磁环境数据全球划分时间、空间一致性的问题，为高效组织、计算和表达电磁环境数据提供基础性支持。

2.5.1 张量化存储的效率对比实验

原始电磁数据采用 excel 表存储，而张量数据模型对原始数据进行空间划分后进行网格化管理，存储效率受划分网格尺度(层级)的影响；同时稀疏张量方便进行无损算法的压缩处理，可反映真实场景下对计算机磁盘空间的需求。

图 11(a)为张量存储效率对比实验图，原始数据文件大小为 66.3 Mb，原始张量文件大小受网格尺度的影响较大。当网格小于数据空间采样率后，张量稀疏度迅速增大，占用空间也指数级增大，压缩张量文件大小始终保持较低水平，在 1' 尺度下对原始数据文件压缩率达到 96.6%。

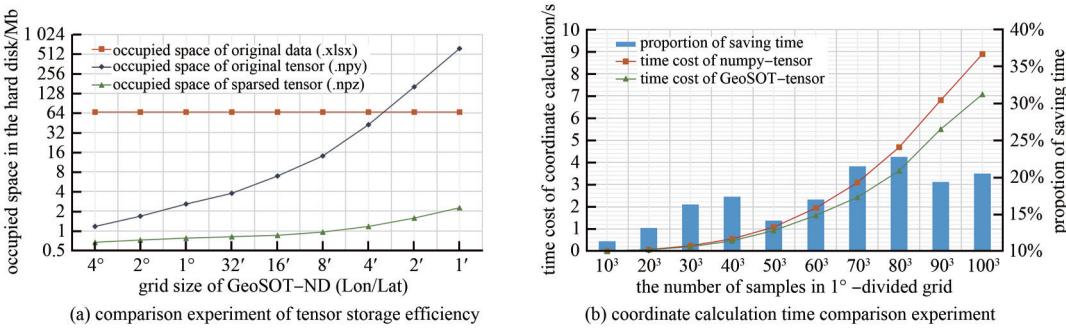


Fig.11 Comparative experiment of intelligent electromagnetic space characteristics
图 11 智能电磁空间特性对比实验

2.5.2 基于 GeoSOT-ND 的张量坐标解算对比实验

以 Numpy 为底层结构进行张量数据的存储是有效的,但 Numpy 对应的空间范围是人为定义下的局部网格坐标索引,对于经纬坐标反算和全球空间索引的实现较为不利。因此引入辅助的编码寻址单元,形状与原始张量保持一致,发挥 GeoSOT 编码位移运算的优势。

图 11(b)为张量坐标解算对比实验图,以 1° 划分实验区域,共约有 100 万个网格(张量)单元,对所有网格单元随机进行 103~1 003 次的点采样,分别对基于偏移量和基于编码代数的坐标反算过程统计耗时,通过实验验证,在进行大量数据点的坐标反算时,使用基于 GeoSOT 编码代数的方法可节省约 20% 的时间成本。

3 应用前景

智能电磁空间是为电磁空间智能化应用服务的,解决如何从各种电磁观测数据中智能地提取信息和知识,从而实现“数据-信息-知识-决策”的自动转化,着重提升电磁信息的智能化应用水平,高效支撑未来作战中的电磁战筹划、指挥与行动,以及全球电磁态势智能监测。

近期,提出基于 GeoSOT-ND 电磁数据标准,达到数据一体化,构建满足电磁信息表征、理解、预测和决策需求的统一语义标准。

中期,推广和完善数据标准,达到电磁空间信息一体化,实现电磁感知一张网,电磁态势一张图,电磁表征、理解、预测和决策一张表(语义,同一个标准),使电磁空间的侦、干、打、评等行动信息一体化。

远期,实现电磁空间多平台、系统与体系信息融合,实现物理世界的电磁空间与信息空间深度融合。

3.1 基于高维网格的强噪声下电磁信息还原

特定接收频段容易受自然背景噪声的干扰,使用自编码器模型进行真实信号的还原。算法流程如下:

1) 样本生成:使用张量数据模型 GridMap3D,初始化 $100 \times 100 (1^\circ)$ 的平面网格空间;在区域内随机生成 1~10 个辐射源,并使用高斯核函数($\mu = -130$ dBm、 $\sigma^2 = 20$)模拟电磁分布;对于区域内每个格网,注入带比例系数($\alpha = [-0.5, 0.5]$)的均匀随机噪声。如图 12 所示,在横坐标为 $0 \sim 100^\circ$ 、纵坐标为 $0 \sim 100^\circ$ 的平面网格空间内,生成了强噪声背景下的电磁信息。

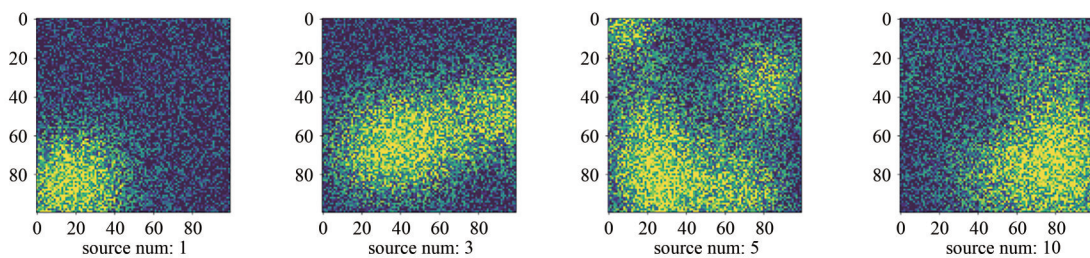


Fig.12 Electromagnetic information under strong noise
图 12 强噪声下的电磁信息

2) 数据集生成:按上述方法,生成 5 000 个模拟区域内的正常电磁样本与带噪声电磁样本。

3) 问题描述:正常的原始电磁分布为 X ,带噪声的电磁分布为 $\tilde{X}$,模型通过学习 $\tilde{X} \rightarrow Z$ 的映射关系,使得还原值 Z 与 X 的误差最小。

4) 模型选择:深度学习模型适合于解决复杂的数值映射问题,同时考虑到样本无标签的特性,因此选择降噪自编码器(Denoising Autoencoder, DAE)作为 Base 模型, $\tilde{X} \rightarrow Z$ 可进一步描述成 $\tilde{X} \xrightarrow{f_\theta} y \xrightarrow{g_\theta} Z$ 。

5) 模型结构:Encode 模块由多层 Conv2d+BN2d+MaxPool2D+Relu 组成,用于模拟 $f_\theta(f_\theta)$ 的非线性降维映射操作,输出的 h 为 $25 \times 25 \times 256$ 的低维多通道特征;Decode 模块由多层 ConvTrans2d+BN2d+Relu 组成,用于模拟 $g_\theta(\hat{\theta})$ 的还原映射操作,输出的 Z 为去除噪声的目标信号。

6) 训练与评估:使用批量梯度下降法(Adam)进行训练, Loss=MSE、BatchSize=16、Learning_rate=0.002、Learning_rate_decay=0.5(γ)/3(step)、Epoch=30。实验训练与验证 Loss 曲线如图 13 所示。直观效果如图 14 所示,横纵坐标为 $0 \sim 100^\circ$ 的空间区域。

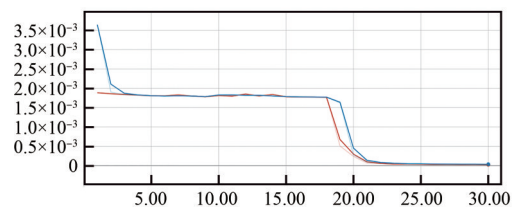


Fig.13 Training and validation of Loss curves
图 13 训练与验证 Loss 曲线

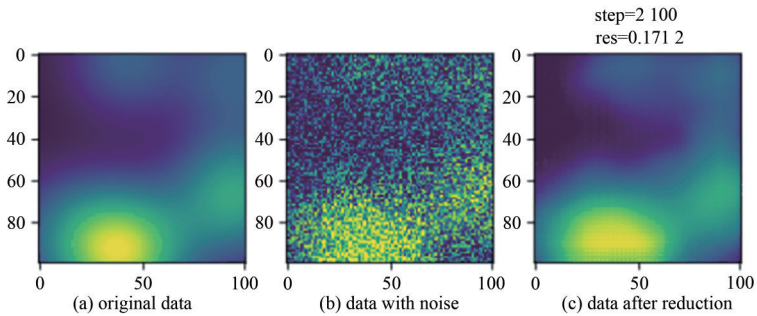


Fig.14 Visual effect of electromagnetic information reduction experiment
图 14 电磁信息还原实验直观效果

3.2 基于高维网格的高鲁棒性雷达回波时序推演

通过气象雷达特定频谱的历史数据，进行雷达回波时序外推，为政府部门防灾减灾提供强降水决策的支撑依据。算法流程如下：

数据来源：该数据集由深圳市气象局在 2020 年通过数据质量控制、雷达数据脱敏等处理和开发 (SRAD2020)，以灰度图 PNG 格式进行存储。雷达数据个案样本：每个雷达数据个案样本覆盖时长为 4 h，时间间隔为 6 min，共 41 个时次；垂直层次：共 1 层，海平面高度 2.5 km；水平网格点范围：雷达数据样本水平分辨力为 0.01°(约 1 km)、网格数量为 256×256(即约 255 km×255 km 的区域)。

数据清洗：真实雷达回波数据存在各类型缺失与干扰。

模型设计：基于 ConvLSTM 的解码器网络如图 15 所示。使用 ConvLSTM 作为 Cell，采用时序预测的经典 Encoder-Decoder 模式，在多层次特征图上学习时空变化规律，通过反卷积逐步复原出预测回波。模型预测效果如图 16 所示。

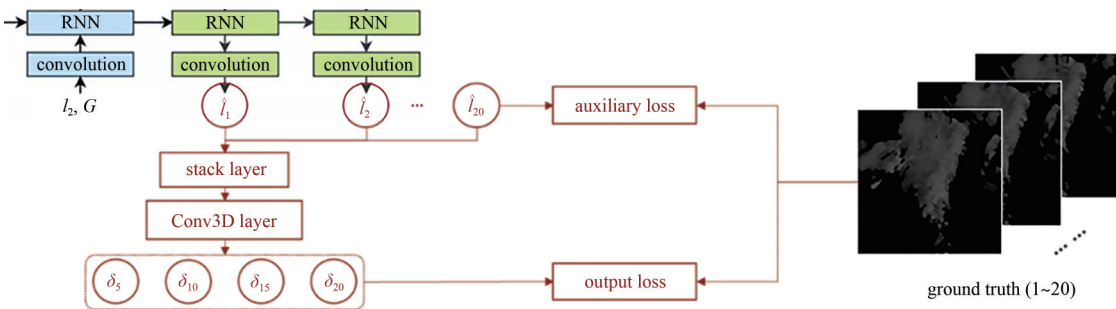


Fig.15 Schematic diagram of the decoder network based on ConvLSTM
图 15 基于 ConvLSTM 的解码器网络示意图

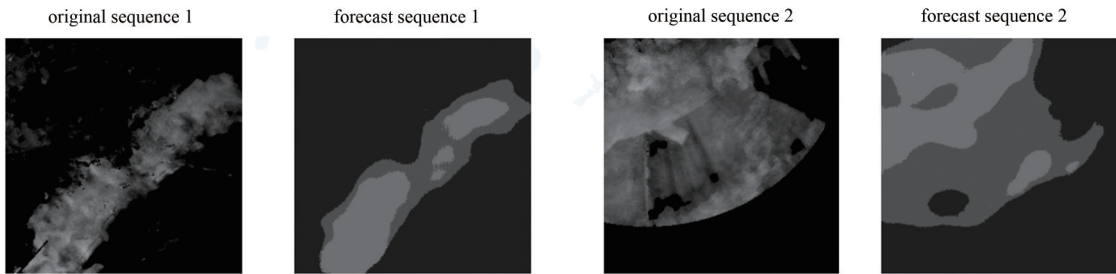


Fig.16 Model prediction rendering
图 16 模型预测效果图

3.3 基于高维网格的空间域电磁异常监测深度学习

电磁探测易受到异常信号的干扰，判断电磁区域内是否存在信号异常，属于二分类问题。算法流程如下。

1) 样本生成：正样本：初始化 100×100(1°)的平面网格空间；在区域内随机生成 1~5 个辐射源，并使用高斯核函数($\mu=-130$ dBm、 $\sigma^2=20$)模拟电磁分布。负样本：针对正样本加入异常数据，将异常点值设置为 0，异常区域的生成方式为随机生成一个中心点，向四周扩散，达到指定数量后停止生长。

2) 数据集生成: 训练集: 验证集: 测试集=6 000: 2 000: 2 000, 每个数据集正负样本比例基本相同。

3) 模型结构: 模型选择 CNN 卷积网络, 由 4 层 Conv2d+BN2d+Relu+MaxPool2D 以及 3 层 Linear 全连接组成, 用于提取电磁区域的高维特征并对特征进行组合输出, 输出的结果为 2 个值, 表示区域正常和异常的概率。CNN 卷积网络模型结构如图 17 所示。

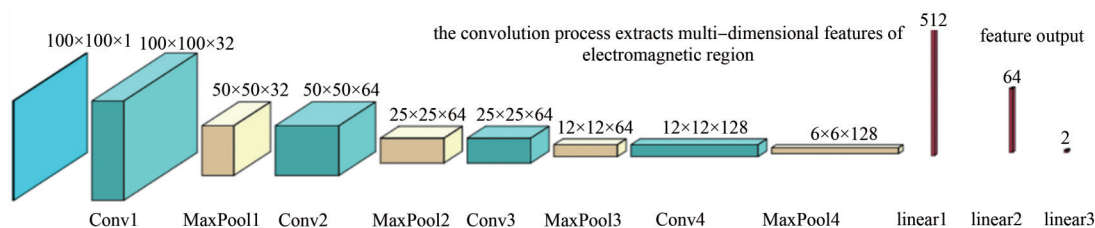


Fig.17 Model structure of CNN

图 17 CNN 卷积网络模型结构

4) 训练与评估: 使用批量梯度下降法(Adam)进行训练, Loss=Cross Entropy Loss(交叉熵), Epoch=30。异常监测实验识别结果如图 18 所示。测试结果: 验证集分类精确度: 98.3%; 测试集分类精确度: 98.2%。

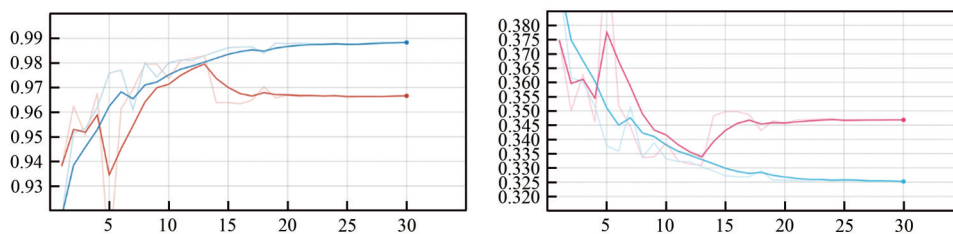


Fig.18 Abnormal monitoring and identification results

图 18 异常监测实验识别结果

4 结论

智能电磁空间作为电磁空间与物理空间的统一, 通过对时域、频域、空域等电磁环境信息离散化, 构建出统一的电磁环境数据场, 多域网格提供了电磁空间数据的基础组成形态和计算分析的数据结构, 可有效解决电磁空间数据全球划分时间、空间一致性的问题, 为高效组织、计算和表达电磁空间数据提供基础性支持。实现电磁空间的物理域—信息域的有效融合, 从而提升电磁信息智能化水平, 为获取电磁空间智能优势提供理论与技术支撑。

参考文献:

- [1] 张乃千,王扬,王方,等. 人工智能在美军电磁频谱作战的发展应用[C]// 第十届中国指挥控制大会. 北京:[s.n.], 2022:92-96. (ZHANG Naiqian, WANG Yang, WANG Fang, et al. The development and application of artificial intelligence in the electromagnetic spectrum[C]// The 10th China Command and Control Conference. Beijing:[s.n.], 2022:92-96.)
- [2] 童乐,梁涛,张余,等. 基于多智能体强化学习的动态频谱分配方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):573-580. (TONG Le, LIANG Tao, ZHANG Yu, et al. Dynamic spectrum allocation method based on multi-agent reinforcement learning[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):573-580.)
- [3] 吴明曦. 智能化战争时代正在加速到来[J]. 学术前沿, 2021(10):35-55. (WU Mingxi. The era of intelligent warfare is coming rapidly[J]. Frontier, 2021(10):35-55.)
- [4] 阙渭焰. 认知作战与战场电磁作战环境智能表征[J]. 强激光与粒子束, 2018,30(4):82-88. (QUE Weiyan. Cognitive operations and intelligentizing characterization for battlefield electromagnetic operational environment[J]. High Power Laser and Particle Beam, 2018,30(4):82-88.)
- [5] 刘铭,查淞,黄纪军,等. 基于多目标优化的联合作战用频规划方法[J]. 电波科学学报, 2022,37(3):434-442. (LIU Ming, ZHA Song, HUANG Jijun, et al. Frequency planning method for joint operations based on multi-objective optimization[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022,37(3):434-442.)