

· 专题一：双清论坛“电磁空间信息资源的认知与利用” ·

电磁空间信息资源的认知与利用^{*}

王雪松^{1**} 李健兵¹ 徐丰² 李刚³ 程强⁴

1. 国防科技大学 电子科学学院,长沙 410073
2. 复旦大学 信息科学与工程学院,上海 200433
3. 清华大学 电子工程系,北京 100084
4. 东南大学 信息科学与工程学院,南京 211189

[摘要] 电磁空间资源已被上升为国家重要战略资源,成为当代大国间竞争博弈的制高点之一。当前,我国在5G通信、先进探测、电磁大数据等方面取得了长足进步的研究成果,但从电磁空间信息技术总体框架来看,仍面临着构成要素相互作用机理认知不清晰、信息获取与处理手段比较孤立、信息资源的智能利用能力不足等瓶颈问题和挑战。本文立足于电磁空间信息技术发展和应用需求,对电磁空间信息资源认知与利用的技术现状和发展趋势进行了总结和分析,探讨了未来一段时间该领域发展中可能面对的技术挑战和重要科学问题,并对该领域的发展给出了一些政策性建议。

[关键词] 电磁空间;信息资源;信号作用与控制;智能感知;信息认知

1 电磁空间信息技术的战略意义

电磁波是人类迄今发现的用于陆、海、空、天的地理空间以及网络空间进行探测、信息感知、传播和处理的唯一高效载体^[1]。电磁空间是建立在统一时空基准上,以时间、空间、频率、强度、相位、编码、极化等形式承载和传递信息的电磁场与波的集合。在电磁空间中,有意或无意的电磁波在与目标/环境作用过程后,蕴含着目标/环境的时间、空间、形状/结构、材质、行为等海量信息,且这些信息相互交织融合,形成非常复杂的信息系统。人们在电磁空间传递信息、感知自然,并相应地控制实体行为,对电磁空间的认知和利用经历了单设备粗犷功能实现,到多设备多功能联合精细优化的过程,伴随着形成了雷达、通信、导航、物联网等先进技术,以极为颠覆性的方式影响人类的生产生活方式。当前,以电磁频谱为核心资源的电磁空间信息资源已被上升为国家战略资源,成为当代大国间竞争博弈的制高点之一。



王雪松 国防科技大学教授,长期从事雷达极化技术、电子对抗等方面的研究,获国家杰出青年科学基金和国防科技卓越青年人才基金的资助,入选国家“万人计划”科技创新领军人才,现为第八届国务院学科评议组成员、军委装备发展部某专业组副组长、军委科技委某领域专家、中国电子学会会士/理事。获国家科技进步奖二等奖2项、军队科技进步奖一等奖5项、二等奖4项、湖南省自然科学奖一等奖1项和中国电子信息科技创新团队奖1项,荣立个人二、三等功各1次,享受政府特殊津贴。

随着人类社会向以5G、物联网、天地一体化信息网络等为代表的信息时代迈进,通信、导航、物联、感知等领域对电磁空间资源的需求更趋急迫而紧张。在无序竞争发展模式下,地球表面电磁频谱辐射总能量将急剧增长,频谱冲突急剧增加,从而导致电磁环境急剧恶化,甚至可能改变生态环境、危及生理健康^[2]。比如,抗日战争期间,电磁空间环境比较纯净,琼崖纵队用15瓦的简易电台即可与2000多公里外的延安根据地实现短波通信;而在用频设备

收稿日期:2021-09-29;修回日期:2021-10-17

^{*} 本文根据第273期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者,Email:wxs1019@vip.sina.com

本文受到国家自然科学基金项目(61625108,61771479)的资助。

总数量和能量呈爆炸式增长的当今社会,每年仅全球通信基站和手机终端就产生与 180 颗广岛原子弹爆炸当量相当的微波辐射能量,使得电磁空间环境变得恶劣复杂,15 瓦功率的短波电台只能实现几十公里的通信。因此,如何科学开发利用电磁空间的信息资源,建立电磁空间“新秩序”,已成为重大科学和社会发展问题。

现代高科技战争是陆、海、空、天与电磁多维一体化的战争。电磁空间是国家主权安全的重要组成部分,是大国间军事对抗最重要、最关键的交战空间,贯穿战争全过程、涵盖战争各要素、主导战争主进程。中国科学技术协会于 2020 年 8 月发布的 10 个重大科学问题和工程技术难题中,“信息化条件下国家关键基础设施如何防范重大电磁威胁”指出了电磁空间安全对于国计民生的重大影响^[3]。因此,随着“星链”、超级算力等监视与破解技术的发展,电磁空间面临的安全问题愈发严峻,深入掌握电磁空间的规律,维护电磁空间安全已成为捍卫国家主权安全刻不容缓的重大使命。

如何保卫电磁空间的主权安全,保护好电磁空间的“绿水青山”,实现科学和可持续发展,核心问题是对电磁空间的发展规律和客观属性进行深度认知和科学利用,发展浸入式感知、主被一体探测、测算融合等电磁空间认知与利用的新模式和新理念,引领相关电磁信息技术的跨越式发展和颠覆式创新。当前,随着超灵敏接收机、新概念传感方式、超材料^[4]、电磁时空大数据、信息挖掘等技术的发展,人们对电磁波的认识逐渐从物理域(时域、频域、空域、码域、能量域、极化域)向认知域(辐射源类型、辐射/散射机理、传播规律)拓展,但离深刻认识并科学利用电磁空间还任重而道远。因此,加强电磁空间信息资源的认知、获取、处理和利用的相关研究,以智能技术赋能,建立电磁空间和信息空间的多学科融合平台,是当前信息科学领域亟待解决的重大科学问题,对服务国家工程和基础设施建设中的核心问题意义重大。

2 电磁空间信息技术的现状与发展趋势

在电磁空间中,电磁波在信号作用与控制机理主导下,与目标/环境的作用后蕴含着海量的信息。这些信息以电磁波为载体,可以被特定接收系统所感知,感知维度和能力受传感器数量/布局/灵敏度、接收技术、电磁感知算法、计算能力等约束。感知的电磁信号反映了信源、目标和环境的各种信息,对其

智能利用可为人们的生产生活水平提升和国防建设做出重要贡献。下面从这三个方面分别对电磁空间信息技术的现状和发展趋势进行介绍。

2.1 电磁空间的信号作用与控制机理

电磁空间信息资源的认知与利用的基础是对电磁空间信号与电磁空间各构成要素的相互作用与控制机理的分析与认知,核心问题是电磁波与复杂目标/环境的作用机理、电磁辐射与散射的多维特性认知与表征,以及对电磁特性调控的机理与方法。

首先,电磁波与复杂目标的作用机理是基于电磁空间信息资源的目标属性认知与理解的基础。复杂目标电磁理论建模技术为理解电磁波散射与传播特性提供了很好的支撑^[5]。其中,基于 Maxwell 方程组的电磁理论是开展特性认知和特征提取的准确工具,理论上适用于任何广义操作条件,但目前存在多尺度建模效率、材料准确表征、收敛控制等难题^[6,7]。散射中心模型作为 Maxwell 理论的近似描述,提供了高效率和分析、控制的便利性,但随着隐身目标表面复合涂覆材料以及人工超材料等新材料^[8]、新结构的引入,目标的散射行为会发生较大的改变,其散射中心的位置、幅度等信息会与频率、视角、极化等参数息息相关。此外,对非刚体和形变目标特征探测也对多机制耦合的宽角散射中心建模、散射中心的动态变化以及空间组合表征能力建模提出新的挑战。传统静态独立散射理论与方法无法适应新需求,需要发展适于高维动态相干散射中心及其组合的电磁波与复杂目标/环境相互作用机理理论。

其次,电磁空间信息源自电磁波辐射及其与多物理场的作用,因此多维度电磁特性的认知与表征是电磁空间信息资源认知与利用的基础。多维电磁特性包括电磁波信号与噪声的本征特征、背景环境电磁辐射多维特性、复杂环境目标电磁散射特性等。未来电磁空间信息技术需从对电磁波信号与噪声本征属性的再认知和探索开始,通过扩展电磁物理量维度探索颠覆性技术发展路线。背景环境电磁辐射场的深入认知和预报对复杂电磁环境下的探测、导航与通信具有重要意义。此外,复杂环境与目标电磁散射机理的研究还可通过对海量多源异构电磁观测数据的分析与重构,与现有机理模型中进行同化,实现数据与模型的相互融合增强。

再者,近些年来信息超表面等新型技术得到了快速发展,这为电磁空间信息技术蓬勃发展注入了新的活力^[9]。智能超表面通过对目标表面和环境中的

反射回波的幅相特征进行“智能化”调控,不再仅仅依靠收发天线实现电磁信息的处理和传递,使得对环境中的电磁信息的操控和利用从频率、幅度、相位等物理域跨越到信息域,极大提高电磁信号的调控能力和信息利用效率。超表面单元设计机理和工艺实现方法,高效率、大尺度、复杂场景下的超表面电磁仿真计算方法,优化单元特性实现对电磁波调控维度的扩展、调控性能的提升以及控制方式的升级是当前研究的热点。

2.2 电磁空间信息智能感知与处理

电磁空间信息感知是利用电磁空间各要素作用机理,通过特定物理器件和数理模型获取和解释电磁空间观测数据的过程,包含建模、采样、变换、映射等形式。为了实现“疏而不漏”的电磁空间信息获取,需要基于电磁空间要素特征,有针对性地设计感知函数/模型,并进行感知系统物理实现,优化和提升感知系统的信息获取能力,为电磁空间信息资源的智能提供支撑。

首先,物理世界中的电磁空间是基于电磁波散射传播特征的信号与噪声(包括杂波)对抗的结果,信息获取的主要任务是最大可能地甄选出信号来,往往需要从几个方面努力。一方面,着力对信号和噪声的本征结构进行分析,在更多的维度上将信号和噪声区分开来,以达到提升信号和抑制噪声的目的;另一方面,信号和噪声都是电磁波与物理世界相互作用的产物,它们在不同应用背景下可能相互转换,所以在实际处理中应辩证对待。但无论是信号还是噪声,要变成可处理的信号就要进行探测。如何在极低信号强度情况下实现目标或环境的有效探测,这对传感器的探测能力极限提出了很高的挑战,以里德堡原子接收机为代表的超高灵敏度探测技术是一个极为重要的发展方向。

其次,在雷达通信导航等大的应用背景下,电磁空间信息获取需要解决广域覆盖和多任务等问题,对多源异构电磁传感器在海、陆、空、天、岛等多个空间域的分布和协同探测能力提出了需求。为灵活应对电磁空间信息获取的多层次多任务(如检测、跟踪、成像、识别、异常状态感知等),并提升电磁空间信息获取的稳健性,人们在电磁感知系统的节点跨域弹性组网、资源分配与信息协同获取机制等方面开展了深入研究,包括多任务一体的主/被动复合,多源分布式交互式信息获取与感知,以及电磁信息空间数字孪生系统等。其中,为满足雷达、通信、导航、干扰、侦察等复杂多样任务对电磁空间资源的需

求,一个工作的重点是将时、频、空、能、码、极化等多维电磁资源进行协同统一管控,提高资源复用性,并完成所需多任务和多功能的一体化。

2.3 电磁空间的信息利用

当前,随着人类迈入信息时代,电磁空间信息技术在国民经济发展和国防建设中扮演着越来越重要的角色,具有极大的应用潜力。信息资源的利用涉及领域非常广泛,本文重点以海洋环境感知和重大基础设施监测为例进行阐述。

近些年来,基于电磁空间信息技术的海洋观测能力提升是国家极为重视的科研领域。“关心海洋、认识海洋、经略海洋,推动海洋强国建设不断取得新成就”,是习近平总书记对科技工作者的殷切期望。为保障海洋环境和海洋经济的可持续发展,亟需发展海洋环境(风、浪、流、内波等)和目标(船只、海冰、溢油、绿潮等)的监视监测能力。但是,当前的海面电磁机理和信息探测模型不适应于海上大范围、高动态的监视监测需求,导致高海况、复杂海况等条件下海洋动力环境和目标的探测精度低、信息反演能力弱。浮空平台、无人机、无人艇等高空无人多平台智能集群技术被认为是海洋观测能力提升的关键技术之一,然而在开放、对抗、多任务、信息不完备的工作背景下,无人机/艇(集群)信息获取、广域覆盖、多类异构艇敏捷协同、多维度高效协同的要求非常严苛,因此,需要重点加强多平台智能协同、目标特征智能认知和态势精准预判等方面的研究。从国防建设的角度来看,现代海战场作战单元种类多(岸基、舰船、飞机、天基、潜艇等),新型电子设备不断涌现,加之干扰性、欺骗性等攻防战术复杂,海量战场数据高速流转,电磁态势生成正面临种种挑战。面向指挥层级差异、平台差异、专业差异和任务差异等动态信息需求,电磁态势认知需充分挖掘目标在时、空、频、能、谱等多维度的关联特性,以满足信息全面性、易用性、时效性要求,并且能够预测未来电磁空间的变化形势,获取特定目标的活动规律、行为意图,为态势聚焦生成和局势推演预测提供关键支撑^[10]。

电磁空间信息资源利用的另一个重要应用方向是重大基础设施电磁空间信息监测与预警。重大基础设施主要包括:大型桥梁、高层建筑、地下工程、高坝、输电塔线、输油/气/水管道、铁路轨道等,它们是我国经济社会发展的重要基石。随时间推移、自然灾害和人为因素的影响,重大基础设施伴随的病害安全隐患问题愈发突出,亟需发展有效的监测与预

警技术手段,以保障城市基础设施安全,提升多灾害作用下的城市韧性。重大基础设施最为关注的病害问题包括形变移位、内部缺陷、腐蚀失效等,当前缺乏精确快速有效的检测手段。电磁空间信息技术具有大范围、高精度、长时间、非接触探测等优点,综合利用电磁信息中极化、频率、角度和时相等多维度数据,对现有差分干涉、极化相干层析等相干处理技术进行完善和发展,将有望为重大基础设施病害监测提供有效的技术手段。合成孔径雷达是一种具有代表性的形变特征监测手段,可以将复杂基础设施几何结构及其微小变化信息通过电磁空间的映射过程以微波图像的形式呈现,辅以目标散射中心语义结构等方法,可以对特征进行有效解释。结合电磁信号与病害作用机理、信号调控与处理等关键科学技术问题研究,可望为城市基础设施系统的防灾韧性评估、病害监测预警、应急处置和快速康复能力提供有力的科学技术途径。

需要注意的是,电磁大数据是电磁空间信息资源认知和利用的重要基础和发展源泉。面对日益复杂的电磁空间环境,单纯基于实测或理论计算驱动的目标/环境感知和认知模式难以满足实用需求。大数据技术与智能化数据分析方法的发展,为电磁空间认知带来了新的机遇,促进基于数据驱动的电磁空间建模成为极为重要的一个研究方向。因此,通过数据和知识模型表达的结合,有望从多源异构电磁空间感知数据中准确反演并认知战场态势,利用多源异构电磁数据融合提升广域精细遥感能力,通过无人平台多源异构电磁数据的自主实时融合处理提升应急快速响应能力。

3 电磁空间信息获取与处理中的主要挑战和关键科学问题

未来一段时期,电磁空间信息认知与利用的发展目标是将主动电磁探测、被动电磁感知和电磁资源智能利用相结合,通过融合发展,颠覆传统雷达探测、电子侦察、微波遥感等电磁空间信息感知系统的物理形态和处理模式。在体系架构上,海量电磁信息节点跨域组网,弹性共享,动态调控,牵引多源异构电磁空间信息智能感知与融合处理;在感知能力上,通过对目标和环境的时域无缝、频域宽谱、空域多视角观测,实现时空分辨力提高一个数量级,通过里德堡原子接收机等技术实现感知灵敏度提升一个数量级;在认知能力上,通过电磁空间环境/目标的清晰透明描述与辨识,发现电磁空间

信息资源要素相互作用的新现象、新机理,揭示新规律。

3.1 电磁空间构成要素及作用机理

为了对电磁空间信息资源进行更好地认知与利用,首要的工作是明晰电磁空间构成要素以及相互之间的作用机理。随着科技的发展和人们认识范围的延拓,电磁空间关注的对象向着更细和更大两个极端方向扩展,并随着新材料、电磁调控等手段的发展和应用,涌现出一系列挑战和科学问题。

从通常雷达和通信等应用来看,在这种发展趋势下,电磁波与复杂目标/环境的作用机理更加复杂,主要挑战和科学问题包括:面向复合材料与功能材料的电磁特性物理等效模型及其散射中心模型,复合材料与功能材料超电大尺寸目标的电磁缩比测量理论,非刚体/形变目标高维动态相干散射中心模型,复杂地海和非均匀大气等复杂环境杂波建模,目标、环境及干扰等多要素动态耦合建模,器件级、目标级和环境级电磁对象的多尺度一体化建模理论和方法等等。在这个过程中,数据和模型驱动相结合的分析方法值得特别关注,比如电磁数据与物理模型的多尺度同化机制研究,电磁辐射与散射大数据挖掘理论与方法等。

除了认识对象的发展,多维电磁特性调控与电磁环境重塑方面也是电磁空间孜孜以求的目标,支撑电磁新基建以及绿色安全电磁空间发展,亟需突破的问题包括:新型电磁调控单元的原理与设计理论研究,低成本、低功耗、轻量化的高效电磁调控系统研制,多维电磁调控技术的电磁环境工程应用研究。

3.2 电磁空间信息智能获取与处理

长期以来,人们将电磁空间信号获取的本质归结为信号与噪声的对抗,但随着认识的进步,信号与噪声的本征特征更引起人们的关注,亟需利用电磁理论新成果对噪声的本征结构进行深入辨析,认识信号与噪声的辩证关系,为多维电磁空间的理解和信息获取提供基础支撑。

电磁空间信息智能获取是信息处理、理解与应用的基础。在信息获取时,首先要对承载信息的电磁波进行特征化和优化设计,以利信息获取性能的提升,主要包括智能感知模型以及多功能一体化波形设计、智能感知过程中的信息增益/损失以及时空分辨率极限分析等等。进一步地,基于 5G 和新型互联能力的进步,促进分布式多源异构跨域协同感知体系和能力提升,主要科学问题包括分布式多源

异构电磁传感器的协同机制、跨域弹性组网方法、分布式感知系统的资源分配方案、资源受限条件下的信息协同获取方法等。其中,雷达站与移动基站之间的自适应协同、雷达通信一体化波形设计、雷达通信一体化信号处理方法等问题是雷达通信协同感知需要解决的科学问题^[11]。以此类推,雷达导航一体化、导航通信一体化、雷达通信导航一体化均面临着同样的问题。

电磁空间信息智能处理是将智能技术与信息技术的结合,包括环境认知和目标认知。在基于多源异构电磁空间数据的环境认知方面,主要挑战包括基于多源异构感知数据的参数估计、广域精细遥感、态势认知方法、多维度信息联合映射与描述、结合地理信息和电磁模型的电磁频谱环境态势认知、无人平台多源异构感知数据的自主实时融合处理方法与技术等。在基于多源异构电磁空间数据的目标探测与认知方面,主要挑战包括分布式雷达协同探测目标的方法与技术、综合利用多种电磁辐射源信号探测目标的方法与技术、基于主被动电磁感知相结合的目标探测与认知方法、基于电磁模型和深度学习相结合的目标探测与认知方法、基于目标本体特征与痕迹信息智能融合的目标探测与认知方法等。

3.3 电磁空间资源智能利用

电磁空间资源的智能利用是国防建设和国民经济发展的重要问题。以海洋遥感和重大基础设施健康监测为例,电磁空间信息技术显示出迫切的应用需求和巨大的应用潜力,但仍面临诸多困难和挑战。

在海洋遥感方面,针对海上目标全域电磁信息智能认知、态势预测和自主决策技术的发展需求,主要挑战在于适于构建大范围、高动态的海洋环境条件的海面电磁机理和信息探测模型,发展海洋目标的凝视遥感监测技术,实现多平台快速组网、高效跨域探测、集群协同识别跟踪等。在重大基础设施病害智能监测与预警方面,主要挑战在于揭示电磁信号与基础设施多特征的动态作用机理以及基于电磁空间信息的基础设施健康状态反演机理,发展不完备监测条件下的基础设施不确定性和整体可靠性分析模式等。

4 促进电磁空间信息资源认知与利用发展的若干建议

电磁空间信息资源是国家重要的战略资源,如

何建立安全、绿色的电磁空间,并科学认知和利用电磁空间信息资源,已成为重大科学和社会发展问题。当前,我国电磁空间信息技术领域仍面临着构成要素相互作用机理认知不清晰、信息获取与处理手段比较孤立、信息资源的智能利用能力不足等瓶颈问题,这些问题的解决依赖于电磁空间基础科学的发展进步。提出以下建议:

(1) 在顶层规划上,针对多领域应用目标建立多学科融合平台,秉承“安全、绿色”的电磁空间信息技术发展模式,设计科学合理的多功能综合电子架构,形成“专一”和“共享”相结合的电磁空间信息资源智能认知与利用体系。在此体系基础上,把“电磁新基建”和我国土木工程等“新基建”创新结合,使电磁空间的规划与调控在初始阶段即融入国家基础建设的统一框架。

(2) 加强电磁空间信号作用机理与调控的机理探索,由常规尺度向更细和更大两个方向扩展,发掘微纳尺度上的电磁新机理,建立超大尺度上的电磁信号融合表征新理论,对电磁空间信息资源的产生、演变和利用规律形成更加完备的认知。

(3) 加强多特征域信号感知机理和新体制传感器理论的探索,将主动电磁探测、被动电磁感知和电磁资源智能利用相结合,发展雷达探测、电子侦察、微波遥感、通信导航等相融合的电磁空间信息感知系统新形态新模式,成量级提升多特征域电磁信号感知与处理能力。

(4) 以蓬勃发展的智能技术赋能,建立电磁空间大数据的物理模型同化、智能挖掘、定量提取等理论与处理框架,充分挖掘电磁大数据潜力,为基于电磁空间信息资源的态势分析、行为预测和智能利用提供支撑。

致谢 感谢何友院士、金亚秋院士和崔铁军院士对本文的殷切指导。

参 考 文 献

- [1] Amineh RK. Applications of electromagnetic waves: present and future. *Electronics*, 2020, 9(5): 808.
- [2] 姚富强. 天地一体化生态电磁环境的构建. *中兴通讯技术*, 2016, 22(4): 29—33.
- [3] 中国科学技术协会. 10个对科学发展具有导向作用的科学问题和10个对技术和产业有关键作用的工程难题. (2020-08-26)/[2021-10-09]. https://www.cast.org.cn/art/2020/8/16/art_90_130822.html.
- [4] Zhang C, Gao J, Cao X, et al. Multifunction tunable metasurface for entire-space electromagnetic wave manipulation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 68(4): 3301—3306.

- [5] “电磁计算”专刊编委会. 电磁计算方法研究进展综述. 电波科学学报, 2020, 35(1): 13—25.
- [6] Kong BB, Sheng XQ. A discontinuous galerkin surface integral equation method for scattering from multi-scale homogeneous objects. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4): 1937—1946.
- [7] Yang ML, Gao HW, Sheng XQ, et al. Parallel domain-decomposition-based algorithm of hybrid FE-BI-MLFMA method for 3-d scattering by large inhomogeneous objects. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(9): 4675—4684.
- [8] Wang HL, Ma HF, Chen M, et al. A reconfigurable multifunctional metasurface for full-space controls of electromagnetic waves. Advanced Functional Materials, 2021, 31(25): 2100275.
- [9] 刘峻峰, 刘硕, 傅晓建, 等. 太赫兹信息超材料与超表面. 雷达学报, 2018, 7(1): 46—55.
- [10] 吴启晖, 任敬. 电磁频谱空间认知新范式: 频谱态势. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 625—632.
- [11] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望. 雷达学报, 2020, 10(3): 467—484.

Cognition and Utilization of Electromagnetic Space Information Resources

Wang Xuesong^{1*} Li Jianbing¹ Xu Feng² Li Gang³ Cheng Qiang⁴

1. College of Electronic Science and Technology National University of Defense Technology, Changsha 410073

2. School of Information Science and Technology Fudan University, Shanghai 200433

3. Department of Electronic Engineering Tsinghua University, Beijing 100084

4. School of Information Science and Engineering Southeast University, Nanjing 211189

Abstract Electromagnetic space resources have been regarded as important national strategic resources and become one of the commanding heights of the competition among the contemporary great powers. At present, China has made great progress in 5G communication, advanced detection, electromagnetic big data and other related researches. But from the overall framework of electromagnetic space information technology, bottleneck problems and challenges still remain. The interaction mechanism of electromagnetic signals is not well recognized, the combination of information acquisition and processing is limited, and the utilization of information resources is not intelligent enough. For better development and application of electromagnetic space information technology, this paper summarizes the state-of-the-art of electromagnetic space technology, and analyzes the development trend and future technical challenges of the cognition and utilization of electromagnetic space information resources. Recommendations on the development of this field are also proposed.

Keywords electromagnetic space; information resources; signal interaction and control; intelligent sensing; information cognition

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: wxs1019@vip.sina.com