

· 专题一：双清论坛“电磁空间信息资源的认知与利用” ·

面向未来空间电磁信息技术的综合分析

金亚秋^{1,2*} 徐 丰^{1,2}

1. 复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433
2. 复旦大学 大数据研究院电磁大数据与遥感智能研究所, 上海 200433

[摘要] 以空间遥感、空间通信、空间导航为标志的空间电磁信息科技是国家社会发展和国家安全的重大战略科技,空间电磁信息形成了“制电磁权”的科技核心。本文论述空间电磁信息的总体形势、未来研究发展的主要科学任务与技术趋势,提出面向未来空间电磁信息技术的发展方向,构建遥—通—导一体化的空间电磁信息理论,这是麦克斯韦电磁学和香农信息论在空间信息技术时空尺度的延伸,发展电磁大数据表征同化与知识挖掘技术,深化电磁波与天空地海环境目标相互作用机理研究,为发展空间电磁信息技术提出研究计划。

[关键词] 空间电磁信息;遥通导一体化;电磁大数据;物理智能;微波视觉;天空地海目标

1 空间电磁信息技术研究的战略意义

20世纪下半叶,卫星与电子技术产生了空间通信、空间遥感、空间导航,麦克斯韦(Maxwell)经典电磁学进入了空间电磁信息时代,人类开始在广袤的天空地海尺度空间获取观测、感知、传输、定位等各类电磁频谱信息。进入21世纪以来,以信息时代为标志,一个国家全方位的战略先导信息技术包括了微观尺度的量子物理信息和宏观尺度的空间电磁信息。空间电磁信息科技以遥感、通信、导航、深空探测为代表。自麦克斯韦经典电磁场方程和爱因斯坦相对论以来,人类跨入空间电磁信息的时代,构成了电磁信息理论、电磁信息实验、电磁计算、电磁大数据与人工智能,对应理论、实验、计算、数据智能四大科学支柱。它所涵盖的科学理论与应用领域,通过工程技术力量真正改变人类社会认知和行为方式。

图1描绘了电磁信息的空间形势,每天地球上空数以千计的各类卫星在轨运行,以及其他空间飞行器和电磁网络的数据传输处理存储交换等,构成了今天和未来的空间电磁信息新格局。

空间电磁信息是电磁频谱支配管控的“制电磁权”的科学核心,如同制空权、制海权、制网络权一



金亚秋 复旦大学教授,中国科学院院士。主要从事复杂自然环境与目标电磁散射辐射传输、空间微波遥感和计算电磁领域的研究。获国家自然科学基金二等奖、上海市科技功臣奖、IEEE GRSS杰出成就奖等奖项。

样,“制电磁权”是国家主权利益所在。2017年,美国曾发布《决胜灰色地带—运用电磁战重获局势掌控优势》报告^[1],提出电磁战的概念,随后又推出《联合电磁频谱作战》条令等等,凸显了空间电磁信息技术的国家安全形势。对于实施我国国家科技发展战略、实现创新驱动的社会发展、保卫国家安全、空间电磁信息技术具有极为重要的作用。

空间电磁信息日益深入我国经济、社会发展的各个方面,为广大用户提供遥感、通信、导航等产品与服务。随着实际应用对空间电磁信息的覆盖广度、服务精度、数据维度、响应速度、安全程度等诸多方面需求的不断增长,空间电磁信息技术开辟产业发展,将对科技产业格局,以及社会经济发展产生重大深远的影响。

空间电磁信息科技提供了多源大数据,如何处理、感知、认识与利用,是信息时代国家科技能力的

收稿日期:2021-01-30;修回日期:2021-06-07

* 通信作者,Email: yqjin@fudan.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(61822107)的资助。

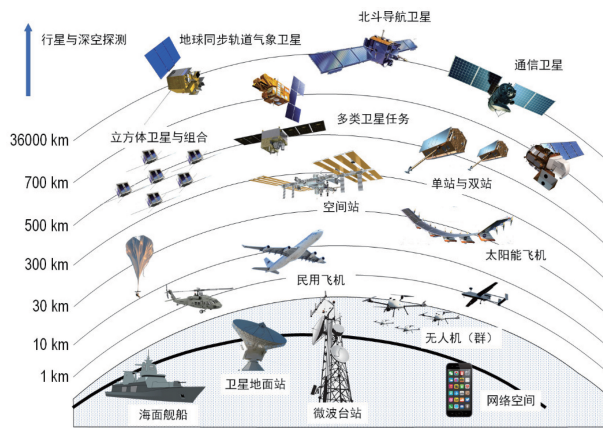


图 1 电磁空间形势

重要挑战。人工智能技术的发展为空间电磁大数据带来了新的格局。无论是遥感、通信、导航,或是深空探测、目标识别、环境态势监测等,都是空间电磁波散射辐射传输的电磁波信号测量。在大数据获取能力达到一定的高度,我们必须由大数据的物理信息进一步进入到其物理世界背后的语义空间中,发展面向电磁大数据的人工智能技术,揭示电磁数据中的结构模式,实现对抗式的智能感知、处理、推演、决策技术,在未来智能科技时代占据领先优势^[2, 3]。因此,基于电磁大数据的人工智能技术是新型空间电磁信息的内核。

空间电磁信息技术代表着未来人类信息能力的发展,空间电磁信息科技的发展将带动一系列相关科技的发展,如:卫星技术、电子与材料、空间科学、地球科学,自动控制、计算机与计算科学、大数据与智能技术等相关科技,甚至于社会信息的管理决策治理模式等。

因此,无论是对于遥感、通信、导航科学技术与工程的未来实施计划,还是从国家战略科技发展和经济社会全面发展来说,未来空间电磁信息技术的研究都是一个极为重要的科学研究方向。

2 空间电磁信息技术的发展

2.1 空间遥感

卫星技术的发展使得人类能从空间来观测自身所处的地球环境,这就是空间遥感。自 20 世纪 70 年代以来,从光学、红外频段发展到全天候全天时的微波遥感,从被动辐射遥感发展到高分辨率主动雷达成像遥感,在气象、海洋、陆地水文与环境的业务性遥感监测等都取得了广泛的进展^[4]。

未来的遥感发展要求多源多模式空间遥感的实时准实时与立体多维度的精细信息及其服务,包括:

(1) 发展新一代遥感卫星系列:精细通道、高频次重访、毫米波地球同步卫星等;

(2) 多系列卫星的数据定标与验证,包括机理模型、反演、融合、协同,形成多系列高效信息产品如温湿、降水、旱涝、积雪、土壤、水文、环境、海风、海浪等;

(3) 反演三维热力场、动力场信息的遥感卫星技术和灾害性天气的卫星监测信息网;

(4) 遥感大数据与全球变化研究、智慧城市与区域变化信息及其服务。

多源多模式高分辨率合成孔径成像雷达 SAR 遥感卫星是一个快速发展的领域,包括:

(1) 新体制合成孔径雷达:双站、干涉、层析、宽幅、高轨地球同步、逆 SAR 与反 SAR 等;

(2) 群卫星、编队、组网卫星,小卫星与微卫星,低轨遥感星座与全球实时视频实现,光学与微波卫星群的数字化融合信息;

(3) 多维度精细信息获取的识别、反演与态势重构,完成大数据集—学习算法模型—感知识别—反演重构的新理论与应用技术;

(4) 智慧城市、区域环境—目标—生态—信息与变化信息,服务平台运行与产业化发展等。

随着多源多模式高分辨率合成孔径成像雷达的发展,智能监视侦察 ISR 目标识别 ATR (Automatic Target Recognition) 将成为天空地海目标识别、要点形势侦察等“制电磁权”中一个重要的技术领域,其中包括了发展新的聪明的类脑功能,适于目标散射成像的目标分类与识别等人工智能—反演的新模型—新算法等。

2.2 空间通信

从 20 世纪 80 年代起,国际上相继开始的低轨通信卫星有铱星计划、全球星、轨道通信等系统。在低成本火箭和微纳卫星技术推动下,近年来各国开展新一轮的低轨通信卫星发展计划,如英国的“一网”计划 (OneWeb) 和美国的“星链”计划 (StarLink)。“一网”计划发射 600 个低轨小卫星创建覆盖全球的高速通信网络。而“星链”计划最终发射上万颗卫星构成巨型星座,提供全球互联网接入服务,并已经得到初步试验验证^[5]。大规模低轨卫星星座将成为电磁空间对抗和制电磁权争夺的一个焦点。

空间通信发展的另一个趋势是朝着“全频谱、大尺度、超高速和大容量”方向发展。“全频谱”通信载体拓展到涵盖毫米波、太赫兹、可见光、紫外和红外波段等全电磁频谱;“大尺度”通信场景则从无线局域网覆盖、光纤网发展到天、空、地全方位、大尺度和跨

空间覆盖。未来 6G 光子无线通信、新一代星链网络、空间智能感知通信、海洋信息化等建设,亟需空间通信在电磁信息传输理论、核心器件和关键系统方面取得突破性进展。“大容量”通信构建全球范围内任意时间、任意地点、任何用户均可联通的陆、海、空、天一体化超大容量宽带卫星通信网络,来保证国家利益在不断向纵深拓展^[6-10]。

因此,空间电磁技术的遥导大数据融合、空间环境、空间微电子芯片等方面基础理论都将应用与未来空间通信技术的发展中,服务于未来空间通信及 6G 网络提供支撑。我国将加强空间通信基础设施建设,推动空间通信与 B5G、云计算、人工智能、大数据等技术的融合,如:低轨卫星通信的“鸿雁”星座系统为宽窄带融合通信系统,由 300 多颗低轨卫星组成;“虹云”星座由 156 颗低轨卫星组成遥导一体化网络^[11]。

针对未来无线通信传输容量爆发式增长以及大功率远距离传输的重大需求,为国家下一代无线通信技术转型奠定基础,需拓展新型频谱载波资源(太赫兹、可见光、紫外和红外波段),并开展 6G 泛光基站和终端设备科研试验样机研发,探索关键收发器件核心技术,研究未来广覆盖多场景多模式超高速 6G 泛光通信网络。

将来的空间通信天上的卫星用激光和毫米波与地面基站进行通信,地面基站用光纤组成一个光网络进行通信;卫星与卫星之间的空间通信因为没有大气吸收采用太赫兹波或激光进行通信。通过一星多用、在轨处理和星间链路传输等关键技术,实现高中低轨卫星组网、天网地网融合,结和云计算、智能技术等,提升空间电磁信息的智能服务能力。

2.3 空间导航

未来空间导航发展,一方面解决卫星导航的“完好性”,即导航信号传播段地球电离层物理模型及其复杂路径环境的信号干扰等;另一方面,解决空间导航的“覆盖性”,如电离层扰动期间赤道与极区、缺少基站海洋区域等定位问题。空间天气与电离层环境的多变性直接影响综合定位导航授时(Positioning Navigation Timing, PNT)系统和信号质量,需要实现电离层四维层析反演提供的大数据平台,形成服务综合 PNT 的空间电离层环境信息感知与预报,实现全球精准的导航时空定位一体化。包括:

(1) 综合 PNT 的电离层物理重构及其反演精度评估,建立 PNT 系统传播段电离层环境精准感知

层析预报能力、量化安全可信度预报;

(2) 研究电离层环境扰动的信息源分类,建立 PNT 数据增强系统质量评估;

(3) 以北斗导航为主的 PNT 综合定位与导航增强系统,与低轨卫星通信、紫外探测、星载雷达等数据融合方式,实现电离层全景实时监测和感知精度的增强;

(4) 广域空间电离层多维模型仿真,高分辨电离层四维成像;

(5) 空间电离层扰动异常分类与信息提取,广域多尺度多层异常变化与威胁,预报及实时预警。

空间电磁信息研究目前仍局限于现有的单一系统的数据层面究,缺少在空间电磁信息的多物理多机制多系统架构的融合创新研究,发展一个支配各类空间电磁信息模式的固有的基本里论。

最后,未来空间电磁信息技术发展还期待应用模式的突破,在新的理论体系和技术架构上,需要创新发展应用模式,由应用来驱动技术的进一步发展,才能实现健康的技术迭代更新。

3 未来空间电磁信息科技的关键科学问题

3.1 空间电磁信息理论

未来空间电磁信息科技的一个基础科学问题是构建新型空间电磁信息论:以空间遥感—空间通信—空间导航为主要技术支撑的麦克斯韦电磁学与香农(Shannon)信息理论,并辅于大数据与人工智能的信息融合理论与方法。

电磁空间来自于遥感、通信、导航等同一电磁时空频域,空间遥感是电磁波散射和辐射,空间通信是电磁波的传输,空间导航是电磁波的时空基准定位,它们的物理基础都是麦克斯韦电磁物理。空间遥感通过散射回波来估计环境目标特征信息,其理论极限是参数估计的克拉美—劳界。空间通信是通过电磁波信号传播来传输调制信息,其基础是香农信息论,其理论极限是香农信道容量限。空间导航用电磁波传播速度实现时空定位,其基础理论是相对论,理论极限是光速(图 2)。

此外,近来迅速发展的分布式或网络化信息技术则需要进一步考虑多站协同、网络对抗等博弈论范畴的问题。新一代空间电磁信息技术将综合考虑各种不同模式的空间电磁信息技术的理论相通,在新边界定义下的麦克斯韦电磁物理上构建统一的新理论架构,将传统的各不同基础理论容纳在内,从而产生新技术体系,突破原有理论界限。

可以试图从不同模式(遥感—通信—导航)对应

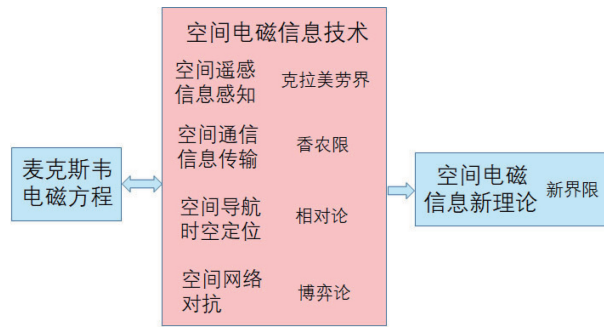


图 2 统一的空间电磁信息新理论

的电磁信息出发,在物理层面上推演至统一共同架构上。将时空基准、信息传输和信息获取的物理层面模型联合组成一个新的电磁时空信息方程组,通过联立求解同时实现时间频率相位同步、空间定位、编码信息解调、环境传播路径信道的反演,从而在物理层上实现遥感—通信—导航相互信息增强,并进一步挖掘该层面上新的理论界及其与传统理论界的关系。

可以将多体收发的电磁空间表征为一个通用的自由空间格林函数模型(图 3),其中分别包含了信息的调制、电磁波的传播、时空关系等,也包含了通信、导航、遥感等电磁信息技术模式。在这一新理论体系指导下,可以构建未来空间电磁信息技术架构,实现多模式融合、广域协同,进行大时空尺度的电磁信息感知传输与计算一体化。需要重点设计统一的时空基准体系,实现互联信息网络,开展协同信息获取等。

3.2 电磁大数据表征同化与挖掘

在新的空间电磁信息技术体系下,实现多模式技术融合的电磁信息感知传输与计算一体化,其中一个需突破的关键技术问题是空间电磁大数据的表征、同化与挖掘。需要研究多源异构电磁大数据的统一表征框架,电磁空间大数据对电磁物理模型的同化机理,以及各类电磁大数据智能挖掘、学习与信

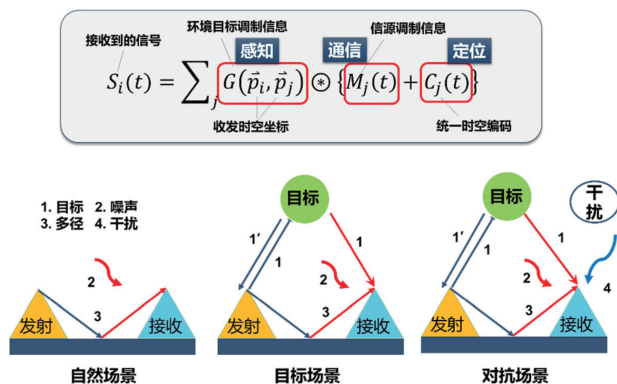


图 3 遥通基础问题的通用表述形式

息定量提取理论与方法^[12, 13]。

麦克斯韦电磁学描述和求解局部均质的电磁波散射传输问题,空间遥通多模式技术构成新的物理架构和新边界条件,对空间电磁学提出了新要求。面对所产生的电磁大数据,需要发展该物理架构下的电磁大数据同化理论,还有电磁大数据的预处理与清理、线性和非线性降维、多层次表征与关联、高动态管理与可视化等。

进一步发展增量式同化新观测电磁数据的智能系统,包括:复杂天空地海环境多尺度电磁信息形成机理及其理论建模技术、复杂目标电磁散射特性形成机理及其高效特征化数值理论建模技术、多源多类电磁信息耦合信道相关性及其建模技术、增量观测电磁数据同化技术和建库技术等。

电磁大数据智能感知是电磁物理理论为指导,将大数据处理理论和方法引入电磁信息感知,有机地结合形成空间电磁信息感知的新理论、新方法和新体制。以电磁物理理论为指导,采用大数据处理方法,寻找被测目标对象表征域,在空间、时间、频谱或极化域,获取被测目标对象的空间位置、散射特征和运动特性等几何和物理特征。研究电磁信息处理大数据处理方法和主要应用技术,对进一步研究开发电磁领域大数据应用技术、提高空间电磁信息应用能力有支持作用。

电磁大数据技术的突破紧密地联系智能科学理论与方法的进展。新生的智能科学与各信息科技学科的交叉,如:智能与物理交叉的“物理智能”是结合物理规律来研究、处理和适应物理世界的人工智能技术。针对空间电磁数据(特别是雷达数据),我们提出发展电磁物理与人工智能交叉的“微波视觉”技术,即形成适应微波电磁信息的新型类脑认知智能技术^[12, 13]。

“微波视觉”所面临的三个基础问题:(1)智能体与电磁世界的交互机理,及其对智能演化和意识产生的作用;(2)面向智能的电磁学正逆问题解法;(3)面向电磁信息认知的新型智能算法。通过这些基础问题的突破,微波视觉将成为新的电磁信息处理方式,如雷达目标识别、自主定位导航、电子侦查对抗等电磁波技术,直接对散射辐射场的视觉语义概念生成、推理、决策和交互,进一步改变现有雷达、通信、导航、侦查、对抗等技术形态。

图 4 展示了微波视觉技术^[2]可能的发展路线。现阶段主要应用场景为雷达目标识别,但通过电磁物理与人工智能的深度融合,发展新型电磁信息感

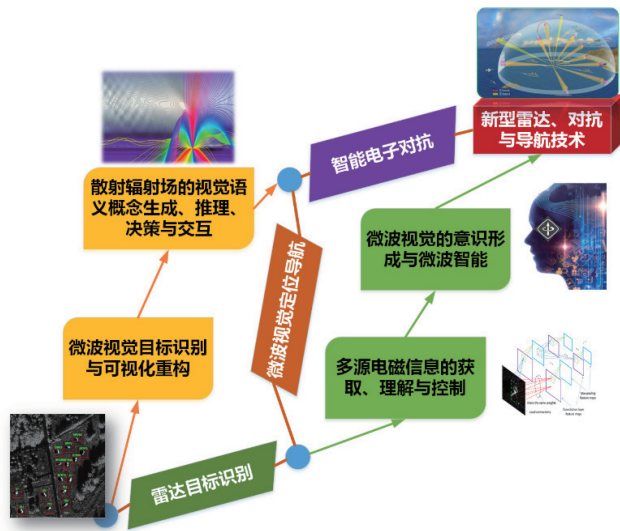


图 4 微波视觉引领空间电磁信息技术的变革与发展^[2]

知与认知技术,将使得目前似乎看不见摸不着的电磁信号成为“微波视觉”中看得清、理解透的新形态,它将引领其他电磁信息相关技术的发展,如自主定位导航、智能侦查对抗等。

3.3 环境目标电磁辐射与散射特性与仿真

空间电磁信息技术的一个理论基础是对电磁空间中电磁波与目标环境相互作用机理的理论构造的进一步研究,空间电磁波的作用机理、理论建模、电磁散射辐射传输与传播的多维度特性表征等^[14]。图 5 展示了大型自然场景的建模与散射成像仿真。

复杂目标多维度属性散射中心模型为理解电大尺寸目标散射与成像特征提供了一个重要的处理手段。但随着隐身目标复合涂覆材料以及人工超材料等的引入,目标的散射行为会发生很大的改变,其散射中心的位置、幅度等信息密切地关联频率、视角、极化等技术参数条件。此外,对非刚体/形变目标特征(如集群目标、微动目标、目标变化态势、基础设施形变等),都会产生本质上的影响,对多机制耦合的宽角散射中心建模、散射中心的动态变化及空间组合表征能力建模等,都提出新的挑战。传统的静态独立散射中心理论与方法无法适应这些新的需求,需要进一步发展基于高维动态相干散射中心及其组合的电磁波与复杂目标相互作用机理、信息获

取的理论,及其技术实现方法。

复杂三维动态海洋环境中目标电磁散射机理是海面及目标电磁信息快速获取的基础。但是复杂的海洋环境对海面目标的探测和识别带来严峻挑战。如:海面背景复杂,存在岛屿、岛礁、陆海交界、强点源干扰、多目标等复杂情况;目标大量采用隐身技术,不同程度地表现出低可观测特性;由运动目标和动态海面随机/时变特征及相互影响机理不清;高动态、小样本、强对抗的复杂海洋环境导致传统目标特征识别方法适应性差。因此,从电磁波传播和散射机理出发,研究复杂海洋环境高逼真电磁数据生成及验证技术,进一步融合电磁大数据,结合人工智能等算法,进行电磁数据分类、诊断及挖掘,实现数据驱动的海杂波快速获取及目标特征提取,对提升环境感知能力及海面目标探测具有重要意义。

4 若干建议

(1) 空间电磁信息技术是未来信息科学技术的主要发展方向,在国家社会发展与国家安全领域的重要战略科技,应紧密结合人工智能和数据科学等新范式的出现,发展多物理多机制多模式融合的新型空间电磁信息技术体系。

(2) 随着卫星信息技术的发展,多源多模式高分辨率空间遥感多维度精细信息与自动目标识别、低轨卫星通信和全频段超高速大容量通信、综合 PNT 导航系统与电离层传播的精准时空定位,是空间电磁信息科技直接面临的挑战,已经成为近年来各国科学技术制电磁权竞争的焦点。必须发展系统的空间电磁信息基础理论、关键技术和创新应用模式的突破。

(3) 麦克斯韦电磁理论和香农信息论跨入了空间电磁信息时代。开展系统的原始创新研究,构建统一的电磁空间理论体系,从麦克斯韦电磁物理出发,重新审视各类经典信息技术的理论基础,研究包括电磁空间信息的感知、传输、定位等形态的联立方程及其信息论意义,研究基于物理层融合的遥通导一体化内涵与信息融合新极限理论与方法。

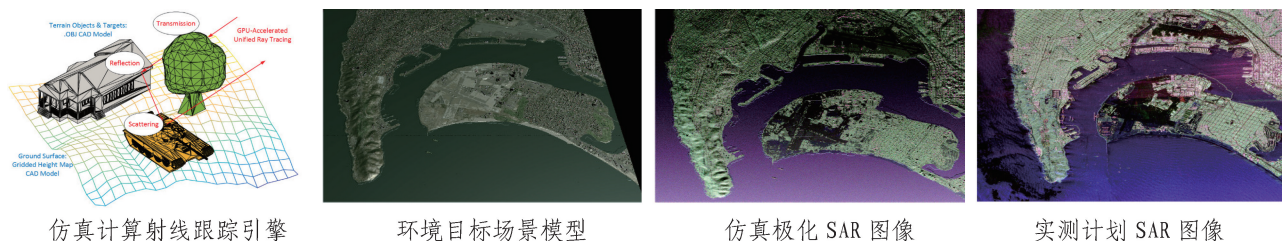


图 5 复杂目标与环境电磁散射与雷达成像仿真^[14]

(4) 在关键技术方面, 加快发展面向电磁大数据表征同化与挖掘的技术研究, 研究多源异构电磁大数据的统一表征框架, 电磁空间大数据对电磁物理模型的同化机理, 以及各类电磁大数据智能挖掘、学习与信息定量提取理论与方法。

(5) 进一步深化电磁波与目标和环境相互作用机理及其计算研究, 包括电磁波与复杂目标的作用机理、电磁波与复杂环境的作用机理、电磁辐射与散射的多维特性表征等。

(6) 围绕空间电磁信息认知与利用的几个方面, 建立空间电磁信息重大研究方向的项目群, 能在几年里开辟中国空间电磁信息科学研究的一片天地, 推进实现国家发展和国家安全的重要应用, 带动多科技的发展。改变过去一些重大项目是“一家主持、多家分摊”, 而成为“多家担当、共同完成”的合作并进的国家科研形式。

参 考 文 献

- [1] Center for Strategic and Budgetary Assessments. Winning in the gray zone: using electromagnetic warfare to regain escalation dominance. (2017-10-05)/[2020-12-24]. <https://csbaonline.org/research/publications/winning-in-the-gray-zone-using-electromagnetic-warfare-to-regain-escalation>.
- [2] 徐丰, 金亚秋. 从物理智能微波视觉技术到智能科学研究, 科技导报, 2018, 36(10): 30—44.
- [3] 金亚秋, 徐丰. 加强智能科学的交叉科学研究, 科技导报 2018, 36(17): 1.
- [4] 金亚秋. 微波遥感及其在中国的发展. 微波学报, 2020, 36(1): 1—6.
- [5] Handley M. Delay is not an option: low latency routing in space// HotNets'18: Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, 2018: 85—91.
- [6] 蒋罗婷. 美国商用低轨卫星的军事借鉴. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(9): 840—848.
- [7] 林仁红, 高军, 方超, 等. 国内低轨遥感星座密集组网现状及发展态势. 中国航天, 2019(5): 38—40.
- [8] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考. 国际太空, 2018(11): 24—32.
- [9] 于全, 王敬超. 探寻发展电磁感知低轨星座系统. 中国电子报, 2021-01-07(01).
- [10] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739—750.
- [11] 王艳峰, 谷林海, 刘鸿鹏. 低轨卫星移动通信现状与未来发展. 通信技术, 2020, 53(10): 2447—2453.
- [12] 金亚秋. 多模式遥感智能信息与目标识别: 微波视觉的物理智能. 雷达学报, 2019, 8(6): 710—716.
- [13] 徐丰, 王海鹏, 金亚秋. 雷达图像的智能解释. 北京: 科学出版社, 2020.
- [14] 金亚秋, 徐丰. 极化合成孔径雷达之眼, 科技纵览, 2019(9): 70—71.

General Analysis for Future Spatial Electromagnetic Information Technologies

Jin Yaqiu^{1, 2*} Xu Feng^{1, 2}

1. Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Shanghai 200433

2. Institute of Electromagnetic Big Data and Remote Sensing Intelligence, Academy of Big Data Fudan University, Shanghai 200433

Abstract Based on advances in space-borne remote sensing, communication, and navigation, the theories of Maxwell electromagnetics and Shannon information enter into a new era of spatial electromagnetic information (EM-I). It has become an important strategic Research & Development for societal development and national security. In this article, the EM-I development trend is introduced, and several research projects and missions for future EM-I are presented. Specifically, we propose to study a unified EM-I basic theory and develop new technologies of joint sensing, communication and navigation, electromagnetic big data representation, assimilation and mining, and computational modeling of electromagnetic wave interaction with environment and targets.

Keywords spatial electromagnetic information; integrated technologies of remote sensing-communication and navigation; electromagnetic big data; physics-intelligence; microwave vision; targets of space-sky-land-ocean

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: yqjin@fudan.edu.cn