

文章编号: 2095-4980(2023)06-0703-10

美国国防部电磁频谱应用现状与应对策略

王久龙, 蔡 盛*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 电磁频谱是继陆、海、空、天、网之后的第六维作战空间, 并贯穿于其他五维空间的作战中。为有效应对电磁频谱空间的挑战和威胁, 美国国防部提出了电磁频谱作战概念, 对未来作战样式乃至战争形态产生深远影响。本文从电磁频谱应用角度出发, 系统性介绍了美国国防部对电磁频谱的应用现状和代表性工作。首先, 系统性梳理了电磁频谱的传统军事应用, 如无线通信、雷达、信号情报、红外传感器、电子战、导航战; 其次, 重点介绍了电磁频谱的新兴军事应用, 如 5G 通信、人工智能应用、激光通信、定向能武器、反无人机系统以及新兴概念; 最后, 总结了美国国防部制定的电磁频谱战略和政策, 结合国内电磁频谱的发展水平, 提出了加强我国电磁频谱作战能力的对策建议。

关键词: 电磁频谱; 电子战; 信号情报; 定向能武器; 反无人机; 应对策略

中图分类号: TN914

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022178

Application and countermeasures of the U.S. Department of Defense electromagnetic spectrum

WANG Jiulong, CAI Sheng*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China)

Abstract: The electromagnetic spectrum is the sixth dimensional battle space after land, sea, air, space and cyber, and runs through the other five dimensional battles. In order to effectively deal with the challenges and threats of the electromagnetic spectrum, the US Department of Defense puts forward the concept of electromagnetic spectrum operations, which has a profound impact on future combat patterns and even war forms. From the perspective of electromagnetic spectrum application, the application status and representative work of the US Department of Defense on electromagnetic spectrum are systematically introduced. Firstly, the traditional military applications of the electromagnetic spectrum are systematically sorted out, such as communications, radar, signals intelligence, infrared sensors, electronic warfare, navigation warfare. Secondly, the emerging military applications of the electromagnetic spectrum are emphatically introduced, such as 5G communications, artificial intelligence applications, laser communications, directed-energy weapons, anti-UAV systems and emerging concepts. Finally, the strategies and policies of the electromagnetic spectrum made by the US Department of Defense are summarized, and some suggestions are put forward to strengthen the operational capability of electromagnetic spectrum.

Keywords: electromagnetic spectrum; Electronic Warfare(EW); Signals Intelligence(SIGINT); directed-energy weapons; counter-unmanned aircraft systems; countermeasures

现代战争中, 电磁频谱是信息获取、信息传输、信息应用、信息安全等依赖的重要作战空间, 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^[1]。2019~2021 年, 为应对中俄强势挑战, 美军加紧为电磁空间独立成域造势, 持续在新战略、新条令、新装备、新技术等方面寻求突

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-11-22

基金项目: 中国科学院青年创新促进会会员资助项目(2019226)

*通信作者: 蔡 盛 email:caisheng@ciomp.ac.cn

破,进一步调整、优化、扩充电磁频谱作战力量^[2]。作为最大的电磁频谱用户,美国国防部拥有众多频段使用权,以支持日常训练和军事行动。美国国防部不仅利用电磁辐射实现军事通信、导航、雷达、飞机及其他设备的非侵入性检查;还严重依赖电磁辐射执行情报、监视和侦察(Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, ISR)任务,如导弹预警、信号情报等。此外,为了应对中国、俄罗斯、伊朗等潜在对手反介入/区域拒止作战能力,美国国防部不仅加快定向能武器、人工智能、反无人机系统等新兴技术和系统的研究,还提出联合全域指挥与控制(Joint All-Domain Command and Control, JADC2)和“马赛克战”等新型作战概念,以寻求电磁频谱作战优势。本文以电磁频谱为研究对象,按照图1所示的框架^[3],系统梳理了美国国防部电磁频谱的军事应用现状、新兴军事应用、频谱战略和政策,并针对性提出应对策略。

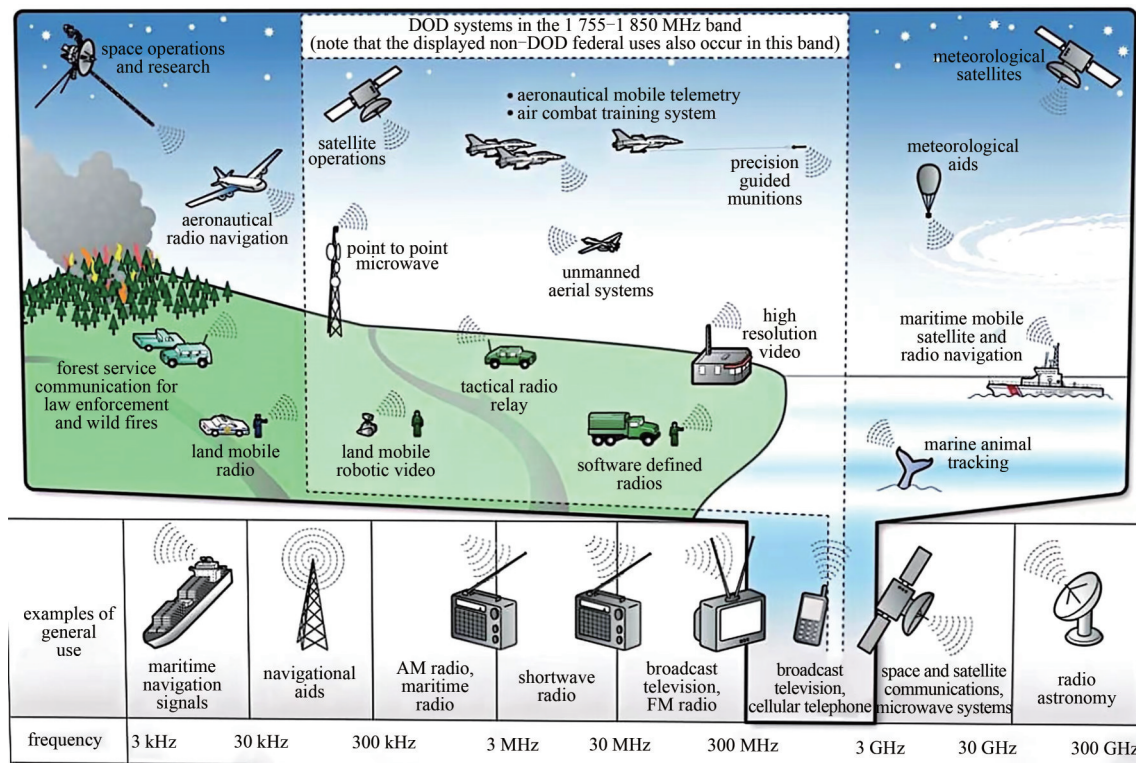


Fig.1 Use of radio spectrum in U.S. Department of Defense(DOD)

图1 美国国防部无线电频谱应用

1 电磁频谱概念

电磁频谱是指按电磁波波长(或频率)连续排列的电磁波族,频率从低到高分别为无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽马射线(如图2所示),光学频段只是电磁频谱中很小的一部分。

电磁波通常用频率、波长和光子能量这3个物理量来描述,它们之间的关系如下:

$$f = \frac{c}{\lambda}, f = \frac{E}{h}, E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

式中: f 为频率; λ 为波长; E 为光子能量; c 为真空中的光速; h 为普朗克常数。

从式(1)得出波长与频率成反比,波长越长,频率越低;反之,频率越高,波长越短,其乘积等于光速。另外,电磁波的能量与频率成正比,系数为普朗克常数,即频率越高,波长越短,能量越大。

各种频率的电磁波都能穿过大气,只是不同波长的电磁波通过大气时的衰减程度不同,见图3。从图中可知,不同的频段,大气的透过率不同。一般来说,波长越短(频率越高)的电磁波越容易被大气散射,到达地面的就越少,透射率高的波段称为大气窗口。

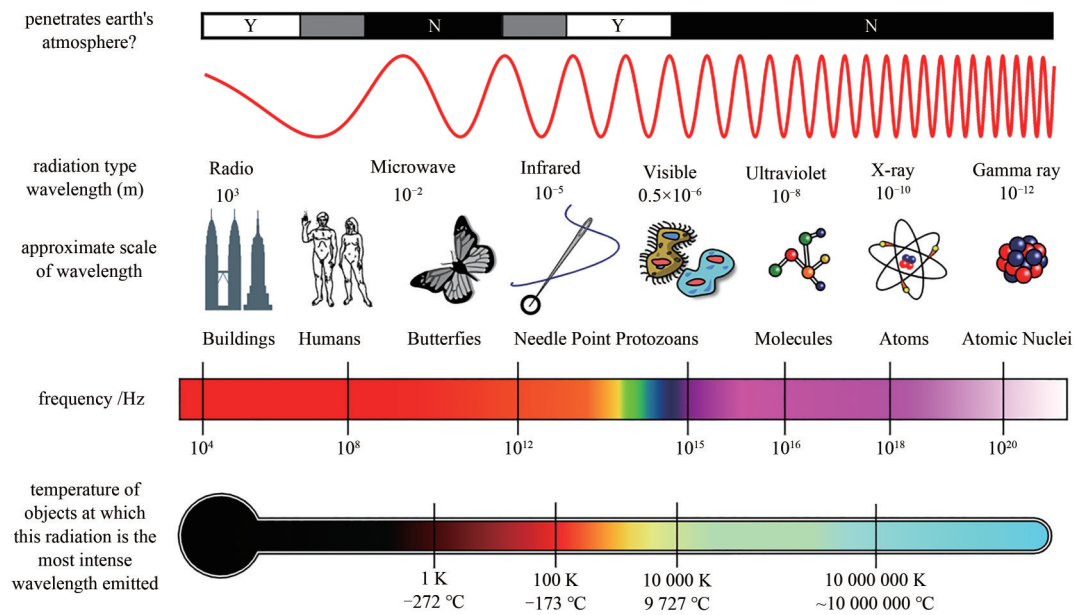


Fig.2 Classification of electromagnetic spectrum
图 2 电磁频谱的分类

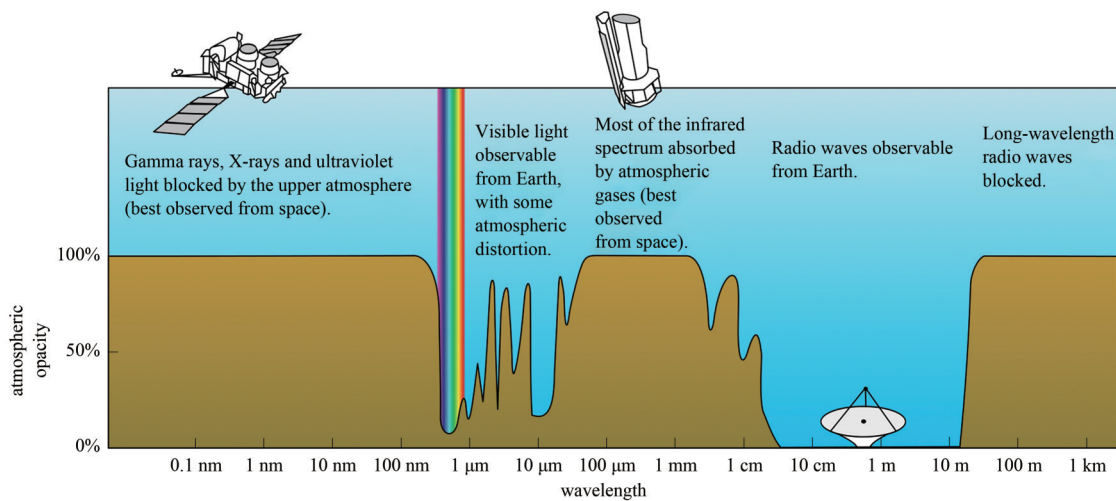


Fig.3 Atmospheric transmittance at different wavelengths
图 3 不同波长的大气透过率

2 电磁频谱当前的军事应用

2.1 无线通信

在地面无线通信方面，为满足数字化部队对通信速度、容量、互通性的要求，同时解决设备规范化、小型化、扩展频段、减少电台品种和数量等问题，美国国防部提出联合战术无线电系统(Joint Tactical Radio System, JTRS)^[4]计划，旨在开发一种适用于所有军种要求的电台系统，覆盖 2 MHz~2 GHz 频段，可进行话音、数据和视频通信，具有保密和抗干扰功能。为满足 JTRS 要求，美军研制了一系列手持、背负、车载战术通信电台，图 4(a)~(b)分别为 Harris 公司 AN/PRC-163 多频段手持电台和 AN-PRC-117G 多频段联网背负式无线电台，均正式列装使用。

AN/PRC-163 电台是一种装备美国陆军的现代化单兵手持无线电通信系统，整机采用小型化设计，频段范围 30~2 600 MHz，具有双通道通信能力，通过不同频段之间的转换支持组网通信。AN/PRC-117G 是多频段联网背负式电台，频段范围 30~2 000 MHz，具有突破性的宽带数据速度和传统的窄带性能，外形尺寸比当前任何其他同类产品小 30%，质量轻 35%，主要应用于美国国防部、联邦政府机构和美国主要同盟国。

此外，美国也积极发展散射通信技术，使地面装备提供超视距通信功能，图 5 为 AN/TRC-170 对流层散射微

波无线电终端,传输距离取决于天气条件,通常可达 100 n mile。目前,AN/TRC-170 是美军唯一装备的散射通信装置,虽然服役时间长,但仍在不断升级。在海湾战争中,百余部该型散射装备投入战场,取得了良好的效果。



Fig.4 Typical radio products of Harris Corporation
图4 美国Harris公司典型电台产品



Fig.5 AN/TRC-170 tropospheric scatter microwave radio terminal
图5 AN/TRC-170对流层散射微波无线电终端

在卫星通信方面,美国军方运营着多个全球卫星通信系统,包括先进极高频系统(Advanced Extremely High Frequency, AEHF)、宽带全球卫星通信系统(Wideband Global Satellite Communications, WGS)、移动用户目标系统(Mobile User Objective System, MUOS),除此之外还与 Inmarsat、Viasat、Iridium 和 Intelsat 等商业卫星公司签订合同。

2.2 雷达

雷达(Radar)和激光雷达(Light Detection and Ranging, LIDAR)是美军实现战场态势感知最常用的装备,这2种手段都是通过自身定向发射并收集反射回来的信号进行目标探测、定位和跟踪,以确定目标距离、速度和高度。根据不同的应用需求,雷达可以在不同的平台和微波频段上工作。低频雷达具备远距离作战能力,但由于杂波干扰,无法提供高质量的目标图像,常用于对舰船和飞机的远程监视;高频雷达可以提供高质量的目标图像,但作用距离有限。雷达和激光雷达常用于防空、军事航空、火炮和空间系统相关的场景中。美军雷达技术已经相当成熟,激光雷达正处于快速发展中。

无源雷达(Passive Radar)也是美军正在大力发展的另外一项技术。无源雷达直接利用空间中已存在的电磁波信号,通过检测、处理和分析来自于空中目标的回波信号,对可能存在的威胁物体进行监测、定位及最终跟踪^[5]。与传统雷达相比,无源雷达本身并不发射能量,而是被动地接受目标反射的非协同式辐射源的电磁信号,因此不易被敌方感知,一般不存在被干扰的问题。无源雷达的工作波段一般为 40~400 MHz,这有利于探测隐身目标和低空目标,如 B-2 轰炸机、F-35 战斗机。微电子器件的进步使无源雷达技术可以检测到传统无法捕获的其他频率(如蜂窝网络信号),从而有可能探测到更多类型的运动目标。2018 年,在柏林举办的航展上,德国亨佐尔特公司的 TwInvis 雷达通过使用蜂窝频率等技术,成功探测到了 F-35 战斗机,并且跟踪了 150 km^[6]。鉴于无源雷达潜在的军事应用前景,美国国防部资助 DARPA 进行了相关技术的研究^[7]。

2.3 信号情报

信号情报(SIGINT)^[8]系统是美军获得战场优势必不可少的手段,是随着军用无线电技术的发展而发展起来的情报技术,属于电子战的分支。美国国防部对 SIGINT 的解释为:从外国目标使用的电子讯号和系统(如通信系统、雷达和武器系统)所获得的情报,了解外国对手的能力、行动和意图,并提供给美国政府的高级文职和军事官员等,作为决策和行动的参考依据。SIGINT 系统主要用于对电磁频谱进行监测和收集,可以监听无线电和雷达频率,并监测人员、导弹、飞机、火炮和车辆的热辐射信号,可以部署在地面、车辆、舰船、飞机、卫星等多种平台上。

2.4 红外传感器

在跟踪和瞄准敌方飞机与地面车辆方面,美国军方长期以来一直使用基于红外制导的方式,如 AIM-9X 空对

空和 AGM-114 Hellfire 空对地导弹。在探测隐身飞机、下视搜索海面、探测反舰巡航导弹等方面，由于雷达面临着许多问题，红外搜索与跟踪(Infrared Search and Track,IRST)吊舱变得越来越重要。近年来美国空军一直在为 F-15C Eagle 部署IRST能力，海军也正在资助洛克希德·马丁公司为 F-18E/F 超级大黄蜂开发IRST吊舱。在天基导弹预警方面，美国军方部署或正在研发多种天基红外预警系统，典型系统有国防支援计划(Defense Support Program, DSP)^[9]、天基红外系统(Space Based Infrared System, SBIRS)^[10]、下一代持续过顶红外预警卫星(Next Generation Overhead Persistent Infrared, NG-OPIR)^[11]、空间监视和跟踪系统(Space Tracking and Surveillance System, STSS)^[12]、高超声速和弹道跟踪天基传感器(Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor, HBTSS)^[13]等。图6展示了美国现有的和规划中的天基高轨导弹预警系统，由多颗部署在地球同步轨道和大椭圆轨道的预警卫星构成星座，左侧为现役SBIRS和DSP，右侧为规划中的NG-OPIR。

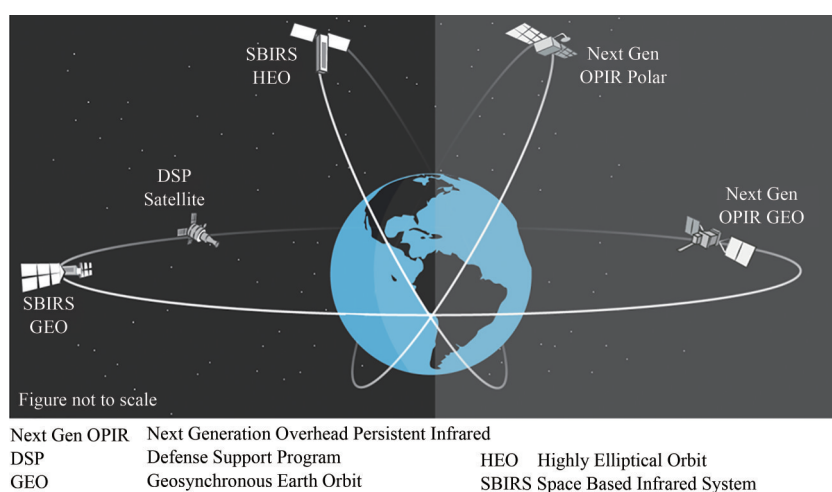


Fig.6 US space-based infrared early warning system

图6 美国天基红外预警系统

2.5 电子战

电子战(EW)^[14]，也称为电子对抗，是指敌对双方利用电子技术、设备和器材进行电磁波斗争，以获得并维持军事控制，涉及陆、海、空、天、网等所有作战域。作为世界上电子战装备最先进的部队，美国国防部高度重视电子战装备的建设与发展，专门成立电子战执行委员会，从战略层面制定电子战装备的发展规划。近年来，美军持续加大电子战的建设投入，通过电子战理论的创新和在军事行动中的不断实践，塑造全新的作战能力，巩固其在电子战领域的绝对领先优势。美国各军兵种具有不同的电子战能力和计划，如美陆军拥有电子战装备上千部、电子战直升机数十架；海军的10个航母编队均编配4~6架EA-18G电子战飞机；空军装备EC-130H通信干扰机、F-16CJ/DJ防空压制飞机等电子战飞机200余架，形成以战役力量为主、空中力量为依托的格局，满足其全球作战、进攻作战、高机动作战的需求^[15]。

2.6 导航战

1997年，美军正式提出导航战(Navigation Warfare, NAVWAR)^[16]概念，并将其定义为：通过协调运用空间、网络和电子战能力，阻止敌方使用卫星导航信息，保证己方和盟友部队可以有效地利用卫星导航信息，同时不影响战区以外区域和平利用卫星导航信息。导航战可划分为进攻性导航战和防御性导航战2类，进攻性导航战采取主动性手段，干扰、破坏甚至摧毁敌方导航系统和设施，从而破坏敌方对于现代导航定位服务的获取能力，从根本上降低敌方作战效能；防御性导航战采取被动性手段，有效抵抗、化解相关破坏与干扰，从而保障己方准确、可靠地使用导航定位服务。美军高度重视导航战的顶层规划，2004年成立联合导航作战中心，并于2007年分配给美国战略司令部/太空联合职能司令部，作为参谋部门，负责计划、整合和支持全球一体化的导航战，其首要任务是“为国防部、跨机构合作伙伴和联盟提供作战导航支持，创建、维护导航作战知识，实现定位、导航和授时优势”。近年来，美军为验证导航战相关技术进行了多次测试。2018年美国空军举行的“红旗”演习中将演习场附近的GPS服务关闭，以演练如何在没有GPS信号的环境下作战；2018年8月和2019年2月，美国海军航母打击小组对美国东南海岸进行了大规模GPS干扰；此外，2019年8月30日、2019年9月5日、2020年1月16日至24日，美军海军在美国东南海岸125 000平方英里范围内进行了大范围GPS干扰试验。

3 电磁频谱新兴的军事应用

3.1 5G 通信

第五代移动通信技术(5G)具有高速率、低时延、低功耗、海量连接等特点,在战术通信、指挥控制、情报监视侦察等军事领域具有广阔的应用前景。近年来,美军通过探索 5G 国防应用前景,加强顶层规划与管理,推进 5G 技术研发与应用,注重风险防范等举措,积极推动 5G 技术在国防领域的应用落地,为美军联合作战提供更高性能、更可靠的信息保障。5G 网络频段主要分为:24~300 GHz 的高频段(即 5G 毫米波, Millimeter Wave, MMW)、1~6 GHz 的中频段、小于 1 GHz 的低频段,中频段和低频段通常被称为 Sub-6 GHz 频段^[17]。5G 毫米波拥有超大的带宽,具备高速率、低时延、海量连接等优势,但存在信号易衰减,穿透能力差,覆盖范围有限,易受到干扰的缺点。Sub-6 GHz 虽然在高速率、低时延、海量连接等特性上比 5G 毫米波频段弱,但其在信号衰减、穿透力、覆盖范围等方面更具优势。美国军方主推使用毫米波技术发展 5G 通信网络,并在自动驾驶、指挥控制、AR/VR、ISR 系统广泛运用。2013 年,美国 DARPA 启动毫米波通信、移动热点等前沿技术研究,并完成关键技术演示验证,探索将 5G 毫米波技术用于移动、机载和卫星链路通信。为进行 5G 网络的测试和应用,美国国防部选定以奥尔巴尼海军陆战队后勤基地为代表的 12 个军事基地,聚焦 5G 与机载雷达系统频谱共享、智慧仓库、增强/虚拟现实训练、5G 与军用通信网络频谱共享、前线部队与指挥中心互联互通、任务规划等测试。为推动 5G 军事应用,2020 年 5 月发布《美国国防部 5G 战略》^[18]。2020 年底至 2021 年初,美国国防部又推出了一份《美国国防部 5G 战略实施计划》^[19],提供了实施 5G 战略的更多细节,为美国国防部对 5G 技术的使用和推进提供了路线图。2021 年 3 月 5 日,美国太空军太空与导弹系统中心发布了“5G 太空数据传输”项目的信息征询书,向业界寻求在太空网络中利用 5G 通信技术实现军队与指挥机构间快速且安全的数据传输方法。此外,美国国防部还和国家标准与技术研究院合作,力求在 5G 未来标准制定中抢夺话语权。

3.2 人工智能应用

随着战场电磁频谱环境越来越复杂,未来作战空间中必然包含许多未知的威胁信号,为取得制电磁权优势,各平台必须实时执行决策算法。为此,美国国防部正在研究认知电子战系统^[20],以加强人工智能技术(Artificial Intelligence, AI)在频谱作战中的运用,解决复杂电磁环境下精确态势感知问题。认知电子战系统是一种具有通过先验知识以及自主交互学习来感知并改变周围局部电磁环境能力的智能、动态的闭环系统,可在实时感知电磁环境的基础上,高效自主地调整干扰发射机与接收机以适应电磁环境的变化,提高干扰的快速反应能力与可靠性^[21]。2010 年以来,美国 DARPA 和陆海空三军实验室先后启动了系列认知电子战系统,典型项目包括自适应电子战行为学习(Behavioral Learning for Adaptive Electronic Warfare, BLADE)^[22]、认知干扰机(Cognitive Jammer, CJ)、极端射频条件下通信(CommEX)、自适应雷达对抗(Adaptive Radar Countermeasures, ARC)、先进电子战组件(Advanced Components for Electronic Warfare, ACE)、自适应认知电子战、破坏者 SRx 系统等。此外,为了解决传统频谱管理难以适应频谱需求的爆炸性增长的难题,美国国防部正在探索基于 AI 的动态频谱共享技术,典型项目是 DARPA 赞助的频谱合作挑战赛(Spectrum Collaboration Challenge, SC2)^[23],利用 AI 技术和机器学习算法开发动态频谱共享模块,确保呈几何级数增长的军用和民用无线电设备充分使用日益拥挤的电磁频谱。

3.3 激光通信技术

目前,美国国防部正在对激光通信系统进行测试和部署,以提高数据通信速率,降低对手干扰或破坏通信链路概率。在地基激光通信方面,典型代表为自由空间光(Free Space Optics, FSO)^[24]系统,使用红外激光传输数据,具有抗干扰、传输数据量大、传输速度快、传输精确度高等优点,图 7 展示了美国海军陆战队正在对 FSO 系统进行现场安装调试。

在天基激光通信方面,美军一方面积极为低轨卫星星座建立激光通信链路,确保卫星与卫星、卫星与地面之间时刻互联互通;另一方面正在开发机载激光通信吊舱,实现军用飞机与卫星之间的高速安全通信。2020 年 4 月,美国太空和导弹系统中心与美国太空微公司(Space Micro)签订激光通信开发合同,拟开发一种“天对空”激光通信吊舱,传输速率达到 10 Gbps,实现军用飞机和地球静止轨道卫星之间的无阻碍安全通信。美国太空发展局正在开发和部署“下一代太空体系架构”,传输层作为骨干,2022 财年计划部署 20 颗卫星,2023 财年计划部署星间光链路(Optical Inter-Satellite Links, OISL)系统,2024 财年计划部署 150 颗卫星,到 2026 财年部署近 1 000 颗卫星,为全球范围内的作战人员提供可靠、灵活、低延迟的军事数据和连接^[25]。2020 年 8 月 31 日,美国太空发展局与洛克希德·马丁公司和约克空间系统公司签订传输层 0 期建设合同,2 家公司各自负责提供 10 颗卫星,每批 10 颗卫星分成 2 种类型:7 颗配备 4 条光学交叉链路,另外 3 颗配备 2 条光学交叉链路和 2 条下行链路。

3.4 定向能武器

美国国防部将定向能武器(Directed-Energy Weapons, DEW)^[26]定义为：利用聚束电磁能打击敌方设施、装备或人员，产生拒止、降级、破坏、摧毁和欺骗等作战效能，并可与其他动能武器配合使用的一类武器。与常规武器相比，定向能武器具有射速快，精确度高，反应灵活，杀伤效率高，附带毁伤小、无污染等特点，既可用于进攻，也可用于防御，能够大大提高部队和设施的防护能力^[27]。近年来，美军高能激光武器已进入实战应用阶段，成为防空防天和导弹攻防作战的利器。2014年，美国海军在“庞塞号”军舰上部署了第一款初始具备作战能力的定向能武器，即LaWS激光武器系统，输出功率为30 kW，成功击落“扫描鹰”无人侦察机^[28]。2022年8月，洛克希德·马丁公司向美国海军交付首款高能激光武器系统，即高能激光与一体化光学致盲与监视系统(High Energy Laser with Integrated Optical-Dazzler and Surveillance, HELIOS)，输出功率60 kW，作为部署在海军舰艇上的首款战术激光武器系统，旨在对抗无人机和小型船只。美国陆军计划于2022财年在“斯特里克”装甲车上部署首个50 kW的定向能机动近程防空系统。除此以外，美国陆军、海军、空军和DARPA都在进行其他多个定向能武器研发计划，旨在将功率水平从目前的150 kW提高到300 kW左右，预计到2024财年将功率提高到约500 kW左右。



Fig.7 U.S. Marine Corps Free Space Optics Communications System
图7 美国海军陆战队自由空间光学通信系统

3.5 反无人机系统

美国国防部不断加强反无人机战略地位，以应对无人机带来的新兴威胁。2017年，美国陆军发布《反无人机系统技术手册》^[29]，旨在对各陆军机动部队运用反无人机战术、技术和流程进行协助训练和教育，以此来指导美国陆军应对无人机威胁。2019年，美国国防部精简了各种反小型无人机的项目，并指定陆军作为执行机构负责监督国防部所有反小型无人机项目的研发工作。2020年，美国国防部长批准成立反小型无人机联合办公室，对40多个已经部署的反小型无人机系统进行了评估，并计划研制7个无人机防御系统和1个标准化指挥控制系统。2021年1月，美国国防部发布《反小型无人机战略》^[30]，旨在应对小型无人机系统指数级增长和武器化给美军带来的巨大风险。这意味着美军对反无人机的定位已经从战术层面提升至战略层面。此外，美国国防部还通过增加预算经费、改革采办流程、加强演习演练等方式，不断提升其反无人机能力水平。

3.6 新兴概念

美国国防部正在开发一系列基于人工智能的新概念，用于提升多域指挥控制系统的效能，以支撑国防战略的有效执行。2016年，美国空军提出先进作战管理系统(Advanced Battle Management System, ABMS)^[31]，旨在通过人工智能、大数据、云计算等手段建立军事物联网，使美军联合部队在空、天、网、海、陆等全域实现快速互联与作战协同，缩短决策与行动周期。2017年，美国DARPA提出了“马赛克战”^[32]的新构想，旨在将人工智能用于网络和传感器，实现快速的、编队级别的综合态势感知、态势评估、作战效果评估、决策规划管理和作战资源管控。2019年，美国国防部提出JADC2^[33]概念，旨在运用人工智能和机器学习技术，把各军种指挥控制系统连接成一体化指挥控制网络，以跨域指挥空、天、地、海、网等部队，计划到2035年达到全面作战能力。

4 美国国防部电磁频谱战略和政策

自2018年以来，美国国防部已认识到电磁频谱在军事行动中的重要性，创建了新的组织机构，并正在制定新的战略和政策。2020年5月，美军联合参谋部发布了《JP 3-85：联合电磁频谱作战》^[34]条令，提出国防部的联合电磁频谱作战理念，并明确指出电磁战是联合电磁频谱作战的关键功能，对联合部队在动态电磁作战环境作战并获得胜利至关重要。2020年9月，美国国防部发布《电磁频谱企业政策》^[35]，指定美国国防部首席信息官负责频谱管理政策；负责采办和维持的美国国防部副部长办公室负责电子战计划；负责研究和工程的美国国防部副部长办公室负责开发频谱管理和电子战技术。2020年10月，美国国防部发布《电磁频谱优势战略》^[36]，要求发展电磁频谱能力优势，建设敏捷、集成的电磁频谱基础设施，加强部队电磁频谱战备，建立持久的合作伙

伴关系,建立有效的环境管理体系。2021年7月,美国国防部部长签署《电磁频谱优势战略实施计划》^[37],旨在为国防部提供构建全部门电磁频谱的愿景、计划、领导力和工具,并建立联合电磁频谱行动中心。由一名二星上将或海军上将领导,主要职责是向国防部首席信息官办公室提供操作风险评估,并确定需求和差距。

5 应对策略分析

当前电磁频谱空间已成为制信息权的战略要地,与以往在物理域发生的冲突相比,信息域的斗争更加激烈和隐蔽。美军提出的电磁频谱战新理念正在促进新一代电磁频谱作战能力的生成,推动美军电磁频谱战向技术智能化、装备无人化及作战联合一体化的方式演变。与国外相比,我军虽然初步建立了完整的电子战体系,某些单项装备和技术已经达到世界先进水平,但整体的系统集成和体系作战能力与美军相比仍有差距,为提升我军在未来战争中的制电磁权能力,提出以下几点应对策略。

5.1 加强组织机构建设,优化电磁频谱顶层设计

借鉴美军重视政府跨领域多部门协作做法,针对我军电磁频谱领域职能相对分散的实际情况,加强电磁频谱领域组织机构建设,优化电磁频谱作战能力体系建设与运用^[38]。研究制定国家层面电磁频谱战略,推进重大项目和计划,提升面向未来战争需求的电磁频谱战略的定制和实现能力,牵引未来电磁频谱发展方向;建立完善跨部门、跨领域、跨行业的高规格机构,整合电子战和电磁频谱管控职能,从战略层次向战役、战术层次逐级设计、分解;同时,建立合作共享机制和平台,促进电子战、信息对抗、电磁频谱管理等领域专家学者合作交流。

5.2 面向实战应用需求,发展电磁频谱作战装备

电磁对抗已经成为现代战争的重要作战手段,2022年俄乌冲突中,北约不断通过电磁频谱作战介入俄乌冲突,利用“星链”等卫星对乌克兰进行电子支援,以提供俄罗斯军队调动、军事集结、难民流动等方面的情报,有效削弱了俄军战略和战术推进。结合军事战略需求和自身特点,应发展符合我军特色的电磁频谱作战装备体系,优先发展机载和舰载电子战装备,重点发展具有强大拒止强敌介入的成体系的战略型地面电子战系统和太空电子战装备,为未来制胜高端战争打好基础。

5.3 适应未来作战场景,开发电磁战斗管理工具

失去电磁频谱的掌控权即意味着失去战争的主动权和制胜的基础^[39]。针对未来台海、南海、中印边境等重点地区高强度电磁频谱对抗需求,充分吸取美俄等强敌经验,突破智能化处理技术群,充分利用现有指挥控制基础架构、通用数据标准和通信协议,构建完善的联合电磁频谱作战数据库,与现有电子战作战装备充分融合,研发能够智能指挥控制全军电磁频谱装备作战,并能与火力打击装备联合作战的电磁作战管理工具,形成强大的电磁支援、电磁防护、电磁攻击等作战能力,获取电磁频谱作战优势,达成联合作战最优作战效果。

5.4 发挥军民融合效能,建立高效频谱管理机制

建立高效的电磁频谱管理军民融合机制,推进频谱管理军民融合式发展。一是建立全方位的军民融合领导机制,加强军民融合管理体制的顶层设计,形成军队和地方电磁频谱管理互为补充、互为支撑的良好发展局面;二是建立科学合理的军民融合组织体制,提高军民一体的电磁频谱管理整体效能;三是健全电磁频谱标准规范和法规制度,制定军民通用新技术、新业务频率规划等标准,制定军民融合技术设施建设、运行和维护标准规范,推动军民全面协调一体化发展。

6 结语

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。为争夺战场电磁频谱优势,破解反介入/区域拒止困局,达成新的抵消战略,美国国防部通过颁布国家战略与军队条令,集成作战力量与机构,研发新型系统与装备技术,以保持其在该领域的领先地位。我国应加快推进电子战向电磁频谱作战的发展,从建立电磁频谱作战研究组织、加强电磁频谱作战理论研究、发展电磁精准对抗前沿技术、研发电磁频谱域综合作战系统以及加强面向作战流程的闭环验证能力等方面,充分开发电磁频谱作战能力,以赢取未来信息化战争的制胜权。

参考文献：

- [1] 李泓余,韩路,李婕,等. 电磁空间态势研究现状综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):549-555,595. (LI Hongyu, HAN Lu, LI Jie, et al. A summary of the present situation of electromagnetic space situation research[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(4):549-555,595.)
- [2] 姜福涛,赵禄达. 美军电磁频谱战发展及现状[J]. 航天电子对抗, 2021,37(4):60-64. (JIANG Futao, ZHAO Luda. Development and current situation of US military electromagnetic spectrum warfare[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021,37(4):60-64.)
- [3] GOLDSTEIN M L. Spectrum management: federal relocation costs and auction revenues[R]. United States Government Accountability Office, 2013.
- [4] PLACE J, KERR D, SCHAEFER D. Joint tactical radio system[C]// 21st Century Military Communications. Architectures and Technologies for Information Superiority. Los Angeles, CA: IEEE, 2000:209-213.
- [5] 卢开旺. 基于外辐射源信号的无源雷达关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014. (LU Kaiwang. Research on key technique of passive radar based on external[D]. Wuhan, Hubei, China: Wuhan University of Technology, 2014.)
- [6] C4ISRNET. Stealthy no more? A German radar vendor says it tracked the F-35 jet in 2018 — from a pony farm[EB/OL]. (2016-02-08)[2022-11-09]. <https://www.militaryaerospace.com/commercial-aerospace/article/14230672/twinvis-radar-f-35-tracked>.
- [7] Military Aerospace Electronics. New frontiers in passive radar and sonar[EB/OL]. (2019-09-30)[2022-11-09]. <https://www.c4isrnet.com/intel-geoint/sensors/2019/09/30/stealthy-no-more-a-german-radar-vendor-says-it-tracked-the-f-35-jet-in-2018-from-a-pony-farm>.
- [8] WEINBAUM C, BERNER S, MCCLINTOCK B. SIGINT for anyone: the growing availability of signals intelligence in the public domain[R]. Rand National Defense Research Institution, 2017.
- [9] 胡磊, 闫世强, 刘辉, 等. 美国 GEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. 空军雷达学院学报, 2012,26(6):404-408. (HU Lei, YAN Shiqiang, LIU Hui, et al. Analysis of coverage performance of US GEO early warning satellites[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012,26(6):404-408.)
- [10] LI Wenjie, YAN Shiqiang, WANG Chengliang, et al. SBIRS: Missions, Challenges and Opportunities[C]// 2019 IEEE 4th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis. Chengdu, China: IEEE, 2019:363-367.
- [11] 王久龙, 王潇逸, 胡海飞, 等. 美国“下一代过顶持续红外”(OPIR)预警卫星研究进展[J]. 现代防御技术, 2022,50(2):18-25. (WANG Jiulong, WANG Xiaoyi, HU Haifei, et al. Research progress of the US "Next Generation Overhead Persistent Infrared" early warning satellite[J]. Modern Defence Technology, 2022,50(2):18-25.)
- [12] 汤绍勋. 天基预警低轨星座星载传感器资源管理与预警探测任务调度问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. (TANG Shaoxun. Research on satellite sensor resources management and detection tasks scheduling problem for LEO constellation of space-based early warning system[D]. Changsha, Hunan, China: National University of Defense Technology, 2011.)
- [13] 熊瑛, 齐艳丽. 美国区域高超声速导弹防御方案未来发展分析[J]. 战术导弹技术, 2022(2):9-14. (XIONG Ying, Qi Yanli. Analysis of US future regional hypersonic missile defense concept[J]. Tactical Missile Technology, 2022(2):9-14.)
- [14] 梁百川. 电子战装备一体化技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(4):397-400,440. (LIANG Baichuan. Integration technology of electronic warfare equipment[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(4):397-400,440.)
- [15] 王裕, 陈磊. 美军电子战装备发展运用分析[J]. 电子信息对抗技术, 2021,36(6):27-29,57. (WANG Yu, CHEN Lei. Development and application analysis of US Army's electronic warfare equipment[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2021,36(6):27-29,57.)
- [16] 任思衡, 娄艺蓝, 杨娜, 等. 导航战及其应对策略[J]. 导航定位学报, 2020,8(3):100-104. (REN Siheng, LOU Yilan, YANG Na, et al. Navigation warfare and its countermeasures[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020,8(3):100-104.)
- [17] GALLAGHER J C, DEVINE M E. Fifth-Generation(5G) telecommunications technologies: issues for congress[J]. Congressional Research Service, 2019,1(30):1-39.
- [18] Department of Defense. Department of Defense(DoD) 5G Strategy(U)[EB/OL]. (2020-05-02)[2022-08-25]. https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2020/05/DoD_5G_Strategy_May_2020.pdf.
- [19] EVANS J B. Department of defense 5G strategy implementation plan[R]. Office of the Under Secretary of Defense, 2020.
- [20] 费华莲. 人工智能在电子战领域的应用[J]. 飞航导弹, 2020(4):41-45. (FEI Hualian. The application of artificial intelligence in the field of electronic warfare[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(4):41-45.)
- [21] 安红, 张朔, 赵耀东, 等. 面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(2):133-

139. (AN Hong,ZHANG Shuo,ZHAO Yaodong,et al. Design of learning training and simulation evaluation system for cognitive electronic warfare[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(2):133–139.)
- [22] DARPA. Behavioral learning for adaptive electronic warfare[R]. 2010.
- [23] KURIEN B. DARPA SC2 spectrum collaboration challenge[R]. MIT Lincoln Laboratory, 2018.
- [24] KIM I I,KOREVAAR E J. Availability of Free–Space Optics(FSO) and hybrid FSO/RF systems[C]// The International Society for Optical Engineering. Denver,CO,USA:SPIE, 2001:84–95.
- [25] 胡旖旎,钟江山,魏晨曦,等. 美国"下一代太空体系架构"分析[J]. 航天器工程, 2021,30(2):108–117. (HU Yini,ZHONG Jiangshan,WEI Chenxi,et al. Analysis of US next generation space architecture[J]. Spacecraft Engineering, 2021,30(2):108–117.)
- [26] Joint Chiefs of Staff. JP3–85:joint electromagnetic spectrum operations[R]. 2020.
- [27] 郭继周,沈雪石. 定向能武器技术的发展动向[J]. 国防科技, 2014,35(3):32–35. (GUO Jizhou,SHEN Xueshi. Development trend of directed energy weapon technology[J]. National Defense Science & Technology, 2014,35(3):32–35.)
- [28] 程立,童忠诚,柳旺季. 国外激光武器的发展现状与趋势[J]. 舰船电子对抗, 2019,42(2):56–58,83. (CHENG Li,TONG Zhongcheng,LIU Wangji. Present status and tendency of foreign laser weapon[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019,42(2):56–58,83.)
- [29] KOWRACH J M. US army counter–unmanned aerial systems:more doctrine needed[R]. US Army School for Advanced Military Studies Fort Leavenworth United States, 2018.
- [30] MILLER C C. Counter–small unmanned aircraft systems strategy[R]. US Department of Defense, 2021.
- [31] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Advanced battle management system: needs, progress, challenges, and opportunities facing the department of the air force[R]. 2022.
- [32] 潘琦,马志强. 马赛克战研究发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021,16(7):728–736. (PAN Qi,MA Zhiqiang. Research and development of Mosaic Warfare[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2021, 16(7): 728–736.)
- [33] HOEHN J R. Joint all domain command and control(JADC2)[R]. Congressional Research Service, 2020.
- [34] Department of Defense. JP 3–85 joint electromagnetic spectrum operations[EB/OL]. (2020–05–22)[2022–08–25]. https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/jp3_85.pdf?ver=2020-07-21-114233-010.
- [35] Department of Defense. Electromagnetic spectrum enterprise policy[EB/OL]. (2020–09–04)[2022–08–25]. <https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/DD/issuances/dodd/361001p.pdf?ver=2020-09-04-112353-317>.
- [36] Department of Defense. Electromagnetic Spectrum Strategy[EB/OL]. (2020–10–29)[2022–08–25]. https://media.defense.gov/2020/Oct/29/2002525927/-1/-1/0/ELECTROMAGNETIC_SPECTRUM_SUPERIORITY_STRATEGY.PDF.
- [37] Department of Defense. Electromagnetic superiority strategy implementation plan[EB/OL]. (2021–06–16)[2022–08–25]. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2721086/departments-prioritizes-electromagnetic-spectrum-superiority-implementing-2020-s>.
- [38] 杨尧. 美军电磁频谱战内涵变化及现状浅析[J]. 网信军民融合, 2020(8):41–44. (YANG Yao. Analysis on the connotation change and current situation of the US Army's electromagnetic spectrum warfare[J]. Civil–Military Integration on Cyberspace, 2020(8):41–44.)
- [39] 武坦然,易楷翔,皇甫冬琦,等. 俄乌冲突中北约电磁频谱作战介入与俄军教训[J]. 航天电子对抗, 2022,38(3):1–4. (WU Tanran,YI Kaixiang,HUANGFU Dongqi,et al. The intervention of NATO electromagnetic spectrum operation in the Russia Ukraine conflict and the lessons learned by the Russian army[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2022,38(3):1–4.)

作者简介:

王久龙(1990–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为电磁空间、光电成像仿真. email: wangjiulong@ciomp.ac.cn.

蔡盛(1983–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为空地一体化光电对抗.