

· 科学论坛 ·

发展我国自主电波事业的若干建议

许正文* 薛 昆 赵海生 吴 健

中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107

[摘要] 本文从国内外进展、政策与形势、问题与挑战等不同层面,分析了国家重大信息基础设施和应用系统对电波环境与电波传播的发展需求,分析阐述了电磁波领域发展面临的基础科学问题和关键技术,进一步探讨提出了“自主电波”的概念和内涵,包含三个层次,即:电波环境数字化,传播行为透明化,应用服务自主化。最后,提出了发展思路和建议,以期促进电波领域在新时代的跨越发展。

[关键词] 前沿信息技术;电磁波;电波传播;电波环境;电磁频谱

无线通信、导航定位、授时、对地观测等国家信息基础设施和应用系统,已广泛应用于生产、生活、科学研究以及国防等领域。其中,无线电系统的设计、试验、工作性能和运行状态无不依赖于无线电波的传播特性,而后者又受制于传播的媒质—电波环境。电波环境特性已成为影响各类无线电系统的关键要素,而且高科技系统对其响应愈加敏感。

电波环境与电波传播技术是信息化基础设施和应用系统设计运行的基石和保障,旨在形成适用于不同频段、不同体制和工作方式的电波环境与电波传播预测预报模式与服务保障能力。以往主要以地基探测与实验、确定性特性认知、统计经验建模、事后或近实时信息服务等为主。

信息化发展逐渐呈现智能化、无人化、自主化的特点。需要大幅提升电波环境与电波传播的感知、预报、服务保障和应用能力,以适应上述新特点。不断拓展数据获取范围、数据种类、提高时空分辨率,提升电磁大数据的管理、挖掘处理和应用能力;重点开展区域智能高分辨感知与天地一体化大范围监测结合,实时态势预报与精准服务兼顾,电波环境全频段建模仿真与重点频段服务保障兼备等前沿创新研究。

目前,电波信息服务保障水平,滞后于国家新时代需求。电波观测体系化能力不足,尤其“一带一



许正文 中国电波传播研究所研究员、副总工程师,重点实验室副主任,武汉大学兼职博士生导师,山东省“泰山学者”特聘专家,中国电子科技集团公司科技领军人才。主要研究领域为电磁环境与电波传播、电离层物理与电波传播,电离层对通信、导航、雷达等无线电系统效应研究与对策,发表论文130余篇,获授权专利30余项。曾获省部级科技奖三项、国际无线电科学联盟(URSI)青年科学家奖、英国皇家工程院研究交流奖、第五届电子学会优秀科技工作者等荣誉和奖励,国际期刊 *Radio Science* 和核心期刊《电波科学学报》副主编。

路”、远海、南北两极以及其他境外地区。因此,亟需建立天地一体化的立体观测体系。电磁波领域的基础性、前瞻性科学问题研究潜力不足,重大目标导向性不够,无法紧跟系统应用的发展步伐;全球或大尺度电波环境物理过程认知、监测预报、以及低纬/赤道地区强电离层闪烁等灾害性空间天气的监测预报和应对策略^[1,2],极端环境适应性、新频段/新传播模式、频谱资源智能利用、新型系统应用保障、射频机器学习等新问题研究深度不足,人工智能、大数据、数字孪生等新兴技术在电波领域的发展应用才刚刚起步。“哪里有需求,电波环境信息服务保障就到哪”,需从空域、频谱域、时域等多维度进一步提升电波环境认知和运用能力。

收稿日期:2021-08-04;修回日期:2021-11-06

* 通信作者,Email: xuzw@vip.sina.com

本文受到山东省“泰山学者”工程专项经费(No. ts20190968)和国家自然科学基金项目(61871352)资助。

1 国外进展

1.1 日本^[3,4]

日本国立情报通信研究机构(National Institute of Information and Communications Technology, NICT;早期为日本电波所),从1958年开始电波传播信息服务,在国际科学委员会(ICSU)框架下运行一个世界电离层数据中心。2017年,将境内四个垂测站测高仪升级为垂直入射脉冲电离层雷达2型(VIPIR2)并开始观测。日本地理空间信息局(Geospatial Information Authority of Japan, GSI)管理运行的密集全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)观测网(GNSS Earth Observation Network System, GEONET),由1 200多台全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收机组成。NICT利用其实现了日本全境的TEC监测,实时发布分辨率达经纬度 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ 的二维总电子含量(Total Electron Content, TEC)地图及其变化率指数(Rate of TEC Index, ROTI),以及GNSS信号失锁信息业务^[3]。揭示等离子体泡和行进式扰动(Travelling Ionospheric Disturbances, TID)等类似波动的电离层空间结构和时间演化,它们会降低单频和差分GNSS定位精度。为了扩展观测区域,NICT收集了世界上所有可能获得的GNSS接收机数据(2014年超过6 000个站),生成了区域和全球的高分辨率TEC地图。为了改善GNSS-TEC数据国际共享和交换(尤其亚大地区),建立了数据互换的新标准格式GTEX,2015年获国际电信联盟无线电通信组(International Telecommunication Union-Radiocommunication sector, ITU-R)批准(ITU-R Rec. P.311)。

通过国际合作,NICT建立了东南亚低纬电离层观测网(SEALION),新建了沿 100°E 磁子午线的清迈和春蓬(泰国)、薄寮(越南)、宿雾(菲律宾)、科托塔帮(印尼)等五个观测站,除了调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)测高仪,还布设了GPS接收机、闪烁观测仪和磁强计^[4]。SEALION可开展磁共轭观测,这是研究等离子体泡等严重赤道电离层现象的理想条件,产生了很多科学成果。2016年,开始研发基于软件无线电(Software Defined Radio, SDR)平台的新型调频连续波测高仪^[3]。2017年,山川站开始 $70 \sim 9\,000$ MHz的太阳射电观测,还接收深空气候观测卫星

(Deep Space Climate Observatory, DSCOVR)等射电观测数据。为了理解GNSS定位的可用性,名古屋大学在印尼、尼加拉瓜、挪威等地也布设了高性能GNSS接收机、法布里—佩罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer, FPI)和VHF雷达等,开展赤道等离子体泡和高纬极光有关的电离层场向不规则体和闪烁观测研究。观测站网如图1所示。

2015年,在日本科学研究创新领域资助下,建立了名为“日地环境环境预报计划(PSTEP)”新研究框架,旨在建立一个集日地环境变化的用户需求、预报业务和科学研究的协同作用联合体,研究下一代空间天气预报的基础^[4]。计划构建四个用户产品:电波传播模拟器、定制空间天气、地磁感生电流预警系统和人体照射估计系统。为了提升预报精度,NICT建立了经验的、统计的和物理的电离层模拟代码,并为航空等应用提供预报服务。为了满足当前用户需求,NICT的经验模式可提供日本周边每小时TEC分布和提前24小时预报信息。为了实现未来业务应用服务的目标和先进空间天气预报,正在构建数值模式,但对空间天气过程的理解仍然不足。众所周知,等离子体泡影响卫星定位,但仍难以数值地预报其发生。目前正在建立地面至顶部电离层的大气和电离层模式(Ground-to-Topside Model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy, GAIA),并研发利用神经网络的等离子体泡经验预报模式。

1.2 欧洲^[5-7]

在欧洲科学与技术合作框架支持下,COST 296计划开展无线电系统电离层效应补偿研究(MIERS)^[5],目的是增加电离层对实际无线电系统效应知识积累,以电离层监测建模为重点,并实现系统有害效应的补偿技术。COST 296计划建立了电

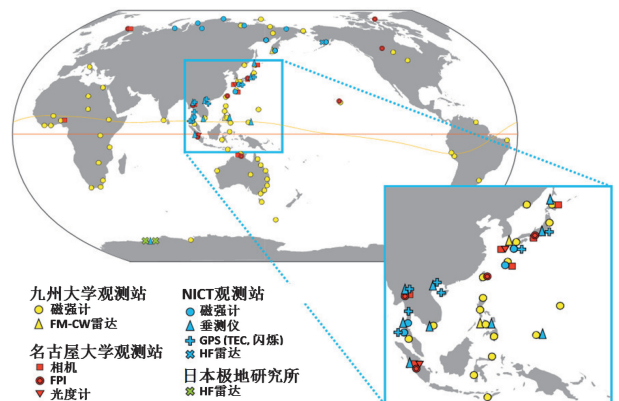


图1 日本电波环境和空间天气地基观测站网^[4]

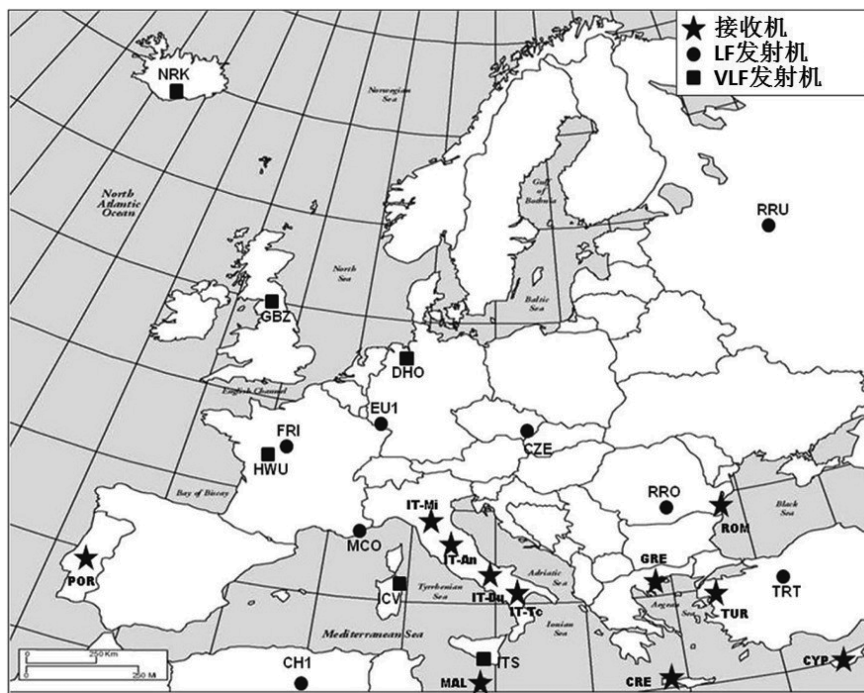


图2 欧洲 VLF/LF 电波观测网^[6]

高层监测与建模、先进地基系统、天基系统三个工作组,26个国家的40多个研究结构之间建立起了电离层研究和应用的强合作关系。但是,对于GPS和伽利略系统的新应用,增加的商业飞行器HF通信系统,以及跨极区通信导航,都呼唤应对灾害性空间天气事件中的更优电离层模型。

VLF信号利用地球—电离层波导信道传播,用于授时、导航和通信;LF信号用于长波广播,传播特性为地波和天波传播模式。针对地震和无线广播扰动之间关系开展了数年研究,国际上建有日本太平洋VLF电波观测网和欧洲VLF/LF电波观测网^[6](图2)。欧洲从1996年在意大利中部布设2台LF接收机开始建设。目前,11台能够从10个无线电信号中提取VLF和LF强度的新型接收机,在多个欧洲国家投入观测。数据中心节点位于意大利巴里大学,每天更新数据,利用小波谱自动分析处理每天数据,如发现强异常,预警系统对中心节点给出处理建议。

电离层估算对于新型多频定位算法越来越重要。意大利国际理论物理中心(Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics,ICTP)牵头研发了NeQuick 2电离层模式的新版本NeQuick 2,生成合成数据和验证方法,提出了一个名为“欧空局统一GNSS电离层(ESA UGI)”开源

工具^[7],用于估算精确的电离层参数,验证表明具有较好的性能,欧洲区域垂直TEC均方根误差($vTEC$ RMSE)低于1 TECU (Total Electron Content Unit,电离层总电子含量单位)。

1.3 美国^[8-11]

在前期建立了闪烁网判定系统(SCINDA)、通信/导航中断预报系统(C/NOFS)、空间环境网络发布系统(OpSEND)和空间环境效应融合系统(SEEFS)、大气折射效应预报系统(AREPS)等诸多系统,美国具备了对全球电离层环境影响的评估、短期预报和灾害性事件警报能力,并对电离层扰动引起的卫星导航定位误差、卫星通信、短波通信等进行评估。

2019年3月,美国发布了新版《国家空间天气战略和行动计划》^[8],更加聚焦于空间天气效应的恢复力,极端空间天气效应是其关注点。战略目标是保护资产和业务免受空间天气效应,产生准确、实时的空间天气预报和建立从空间天气效应响应和恢复的计划 and 手段^[9]。报告指出诸如航天器测控、远距离无线通信等会面临空间天气事件的挑战^[8-9]。

2019年10月,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了“电离层连接探测器(ICON)”卫星^[10,11],是首个可以同时跟踪地球高层大气和空间动态环境及其相互影响的探测器,可直接测量电离层中粒子及其

运动速度。通过当地测量和遥测,研究电离层环境物理特性,有助于减轻其对通信和卫星导航系统的影响。

2 政策与形势

(1) 国家重大需求。电波领域总体能力和发展技术水平,与美国、欧洲等发达国家还存在较大差距,无法满足新时期国家安全和信息化建设的重大需求。

(2) 行业无序竞争。向强国迈进,必然要提升国际竞争力,依赖于自主创新水平;国内的观测实验条件分布于不同部门,需要更好地统筹协调。

(3) 技术发展推动。借助探测、航天平台、观测实验等技术发展,使得在现有基础上实现跨越提升成为可能。

(4) 政策引导利用。国家科技创新和多领域融合等政策使技术快速发展拥有了难得的机遇期。发挥电波领域固有的军地两用性优势,在“四个面向”方针指引下,以国家自然科学基金牵头聚力,突破关键基础问题,谋求跨越发展。

3 问题与挑战

目前,我国电波领域发展迅速,尤其经过“十三五”的发展,电波环境观测研究能力大幅提高。但是,与发达国家的发展水平相比,还存在较大差距,不能满足新时期国家重大战略需求。

3.1 观测的体系化能力不足,滞后于国家重大需求

(1) 境外。建站慢、分布零星,受制于占地和电磁发射管控等条件限制,主要以小型化无源接收设备为主,探测手段和数据种类单一,数据分析研究和服务产出效益不显著。尤其其中远海、“一带一路”沿线、南北两极和其他有关地区观测能力更显不足,甚至空白。

(2) 境内。同类手段国内多个部门和单位建设和管理,资源获取、设备和数据共享利用率有待进一步提高。电波观测站网的体系化布局和统筹拓展也有待进一步提升,尤其是大范围、高分辨的天地一体化观测体系。

(3) 观测手段。大范围、多参数、持续协同观测能力不足,需兼顾电波环境和电波传播的时空广延性、多尺度、高分辨等特点和需求,尤其表现在传播效应试验测量手段等方面发展缓慢。

要解决上述问题,在继续拓展观测范围,提升地基观测能力的基础上,进一步发挥“张衡系列”等现有星座资源的作用^[12],更要大力发展电波观测领域

所需专用卫星或星座等天基手段^[1],建立天地一体化的立体电波观测体系。

3.2 基础性、前瞻性研究不足

(1) 环境方面。全球或大尺度物理过程认识、监测建模预报、空间等离子体不稳定性及非线性问题、主动利用等基础问题研究深度和交叉领域广度不够;深远海、“一带一路”沿线、南北两极等境外地区模型等基础问题研究欠缺,甚至刚起步。

(2) 传播方面。基础问题和前沿技术总体缺乏重大突破,效应评估、极端环境适应性、新频段/新传播模式^[13]、频谱资源认知利用^[14,15]、新体制系统^[16]、射频机器学习等新问题研究不足;此外,人工智能、大数据、数字孪生等新兴技术在电波领域的发展应用不足,没有及时向新兴信息技术借力。

目标导向性不够,重大理论突破潜力不足,不能紧跟系统应用发展步伐,引领作用更需加强。

3.3 支撑国家信息化建设的能力需进一步提升

(1) 空域。空域覆盖是实现电波环境建模预报和信息服务需求的基础。确保水平维覆盖境内(周边、南海等)、境外(“一带一路”沿线、南北极,乃至全球);垂直维覆盖空天地海(水下、地/海面、对流层、临近空间至电离层环境甚至深空)。

(2) 频谱域。覆盖电磁波全频段,从超低频(Ultra-Low Frequency, ULF)至太赫兹(THz),特别是出现的电磁频谱开发应用新需求,比如5G/6G移动通信频段^[14](参见ITU-R P. 1411-10^[17])和太赫兹频段^[13],以及用于碳循环等地球观测的低频段新体制星载合成孔径雷达^[16],卫星Q/V/W频段等。

(3) 时域。覆盖信息基础设施和信息化系统论证、设计、试验、运行等重要环节直至全生命周期。

(4) 应用服务对象。基础研究状态、技术发展水平、系统建设与服务能力,与广大用户的需求不对应。尤其是电波科技发展引领、重大支撑作用未充分凸显,主体地位不够,系统中的缺失感不强。

3.4 电波环境对现代电子系统的影响—以电离层闪烁为例

为了更好地理解和认识,限于篇幅,本文只选择具有代表性的电离层闪烁对现代电子系统的效应为例说明。

电离层强闪烁对通信导航卫星系统的影响严重。北京大学利用深圳和香港的观测数据,统计分析了电离层强幅度闪烁导致香港小冷水台站(HKSL)GPS的L1、L2信号失锁,如图3所示^[18]。

武汉大学和香港工业大学分析了低纬地区电离层闪烁对北斗卫星导航系统 BDS 精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 的影响^[19]。该文分析了 2015 年香港沙田站 (22°25'N, 114°12'E; 地磁: 12°40'N, 173°32'W) 闪烁监测仪和香港卫星定位参考站网 (SatRef) 15 个站点的北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 数据。闪烁发生时, BDS 静态 PPP 定位的码和相位残差最大值达 7.096 和 0.469 m; BDS 动态 PPP 定位显著变化, 在东向、北向和向上的方向上可达几米。统计结果表明, 闪烁条件下 BDS PPP 三维均方根误差 RMS (均方根值 (RMS)、均方根误差 (RMSE)) 为

1.842 m, 远远大于无闪烁时的 0.155 m, 如图 4 所示^[19]。

此外, 电离层闪烁导致卫星通信信号衰落, 误码率上升, 时有中断。美军在阿富汗的一次战斗, 曾因电离层闪烁导致直升机和陆战队之间经 UHF 通信卫星的通信中断而惨败^[20]。

4 发展建议

4.1 总体思路

面向国家重大需求、重要设施或关键系统, 突出目标导向, 发挥电波领域固有的军民两用性, 多学科领域交叉融合, 部署近中远期着力点, 聚焦体系化能

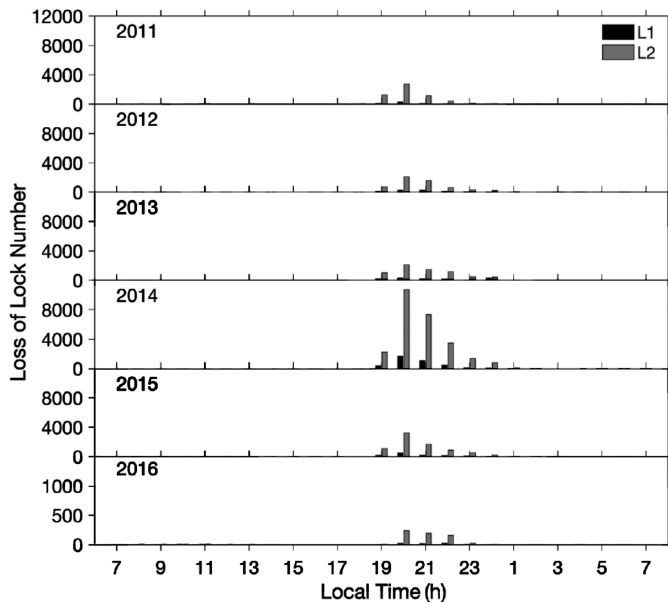


图 3 电离层强幅度闪烁导致香港小冷水台站 (HKSL) GPS 的 L1、L2 信号失锁^[18]

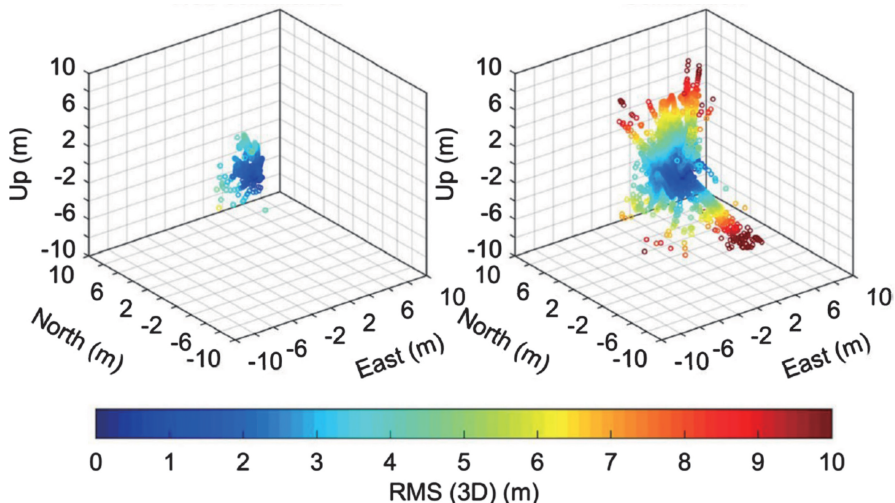


图 4 无闪烁 (左图) 和闪烁发生时 (右图) BDS 定位在东向、北向和朝上方向上的误差分布^[19]

力提升,凸显电波的重大基础支撑、引领、驱动作用,提升体系化的电波科技应用服务能力和国家影响力。

4.2 总体目标

通过布局开展“自主电波”科学问题和关键技术研究,即:电波环境数字化,传播行为透明化,以及应用服务自主化,促进电波领域在新时代的跨越式发展(图5)。建设一个战略性、综合性的科技协同创新平台,巩固电波环境与电波传播在技术基础领域的地位,提升综合应用服务的体系化能力。

逐步实现:电波领域国际影响力和引领驱动作用,迈上新台阶;通过外部泛源数据接入和观测能力提升,逐步实现全球电波环境的天地一体化感知能力和数字化能力;电波科学及应用技术研究,引领驱动能力大幅增强;复杂电波传播行为,更加清晰“透明”,数值化能力提升;基于泛源大数据驱动的电波态势认知能力大幅提升;电波综合应用服务,体系化和自主化应用服务能力提升。

4.3 发展重点

(1) 电波环境数字化技术。

能力提升:实现地基为主向天地一体化的跨越,逐步实现全球电波环境信息获取、处理和分发能力。

研究重点及关键技术:“编织两张网,构建一个体系”。

1) 拓展提升地基电波观测站网。发展低纬地区和南海海域、周边、南北极地区的先进观测手段,形成多维度(时/空/频谱域)、多尺度联合观测能力,尤其加强传播效应观测测试能力。主要包括地基大范围、高分辨电波环境观测技术(多维度、多尺度、多物理场;单站大型设施、基线、阵列、组网),电波传播效应观测和测试技术(超视距、星地/地空链路)等关键技术。

2) 新建示范级天基电波观测试验网。发展电波观测试验星座(一星多用、多星组网、星座),利用和发展观测试验载荷技术,加强“一带一路”沿线、北

极地区和两航航线(航空、航海)等观测能力。主要包括天基电波观测技术,电波观测试验卫星和业务系统,极低地球轨道(LLEO)短寿命电波试验平台等关键技术。

3) 构建天地一体化的泛在电波观测体系。利用“子午工程”、国际子午圈、“张衡系列”空间电磁试验卫星等平台,通过国际国内合作共建。主要包括天地一体化电波观测体系设计,利用北斗等GNSS星座和地面接收机网络的地海面散射机会信号获取电波环境特性^[21],利用飞机和船舶自动识别系统(ADS-B、AIS)机会信号大范围电离层测量和层析成像^[21, 22]等天地联合电波观测关键技术。

4) 全球电波环境数字化。建立空天地海电波大数据中心,多源数据融合,研究“物理过程启发+数据驱动”的电波环境深度认知和全球电波环境现报预报模型,以及针对典型地区基于高分辨数据实时获取和建模、现报的局域电波环境数字孪生技术。主要包括空天地海电波大数据,数据驱动的空天电波环境深度认知,全球电波环境数字化技术(电离层、临近空间、对流层、海洋),以及全球电波信息现报预报技术等关键技术。其中,数字孪生技术可以先围绕观测条件较为齐备的局部地区开展,比如云南昆明电磁波环境野外科学观测研究站等。

(2) 电波传播行为透明化技术。

能力提升:通过复杂环境中电波传播行为模型化,效应机理清楚、预测量化。提升电波应用服务体系传播基础的支撑能力,复杂电磁波的数值化能力,电磁频谱的智能应用能力。

研究重点及关键技术:构建支撑电波应用服务体系的复杂电波传播理论。

1) 空天复杂电波传播理论及量化预测模型。研究建立电离方面和非电离复杂环境中的电波传播特性及量化预测模型。主要包括多频段卫星信号电离层闪烁传播模型(北极、中低纬),高超声速及再入飞行器局部等离子体环境传播特性,复杂场景宽带毫米波传播特性,Ka/Q/V/W频段地空链路对流层传播特性,以及航天系统(空天系统、北斗、高分等)电波保障的支撑理论等关键技术。

2) 计算电磁波。发展复杂环境下电磁波高效计算方法,建立更为准确的系统级效应评估模型和量化评估方法(均值+ σ),研发面向应用服务的计算电磁波模型算法库及工具包。主要包括对流层、电离层电磁波传播数值计算技术,卫星链路电波传播效应研究,海面电磁波传播数值计算,以及等离子体

自主电波



图5 “自主电波”概念和技术体系

电磁波数值计算等关键技术。

3) 空天电磁波调控利用的传播理论基础。电磁波与环境的相互作用机理及模型研究,开展电离层闪烁效应减缓,空间特殊层结超视距传播等研究。主要包括卫星链路电离层闪烁效应减缓研究,大气层中电离和非电离不规则结构超视距传播特性,高超声速飞行器环境监测、多源数据融合及甄别等关键技术,以及认知利用新原理新技术(空间等离子体透镜等)。

4) 智能电波技术。人工智能、深度学习等新技术在电波领域的应用。主要包括电磁波信息的解析技术(地球物理信息^[23],系统、人文信息等),电磁认知、射频机器学习,以及智能频谱管理技术^[24]等关键技术。

(3) 自主化的电波应用服务体系。

能力提升:电波应用服务由被动应对向主动应用跨越;逐步实现电波应用服务自主化、体系化能力。

研究重点及关键技术:应对策略、调控利用自主化的应用服务体系,构建电波应用服务体系综合示范区/系统。有关系统研发和示范牵涉到多方面协同创新,如图 6 所示。该系统主要包括以下四方面的应用服务示范:

1) 全球电波环境信息服务系统。

重点围绕着“一带一路”沿线、国际子午圈、北极“两航”等全球电波环境信息国际服务,实现空天地海电波大数据及应用服务示范,主要包括全球电波环境信息服务,电波环境信息国际服务等。系统组

成主要包括:天地一体化电波观测体系(泛在立体电波观测体系)、空天地海电波大数据中心、信息服务系统或服务平台等,系统总体框架如图 7 所示。

2) 空天电波认知利用及综合保障系统。

以我国广大中低纬地区和东南海域为场景,主要包括天基电波环境监测和认知利用,短波通信、卫星通信导航链路灾害性空间天气效应监测预报、中断预警和快响主动恢复等;海洋远距离通信(远海、应急救援等)^[25],尤其针对核、灾害性空间天气等极端环境;天基电磁频谱监测利用等关键技术。主要包括多功能综合通信系统技术,涉及自主可重构的远程通信技术,大气特殊结构(电离和非电离)超视距通信技术,卫星链路电离层闪烁效应减缓技术等;天基电磁环境认知利用技术,天基电磁频谱感知利用技术等;航天系统和航天工程地基电波保障系统技术(北斗、高分、折射修正等),载人航天工程电波保障技术,发展电波效应天基伴随实时修正及载荷/嵌入式模块等关键技术。

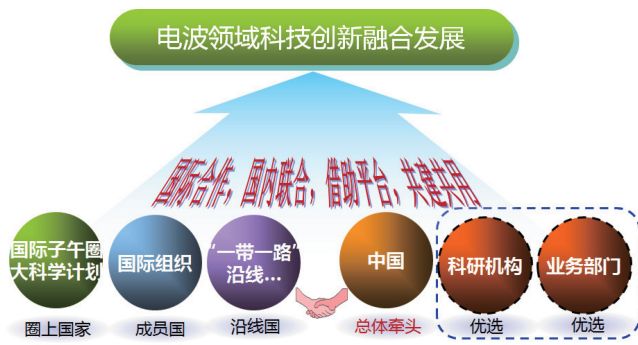


图 6 电波领域科技创新融合发展思路

天地一体化电波观测体系 (泛在立体电波观测体系)

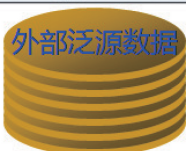
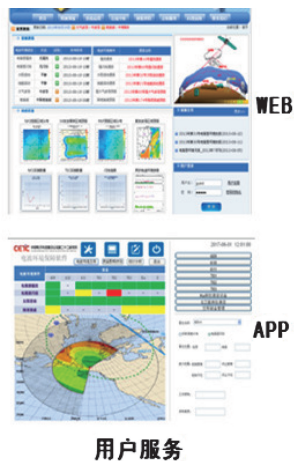
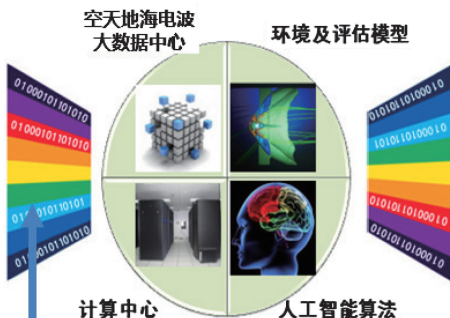
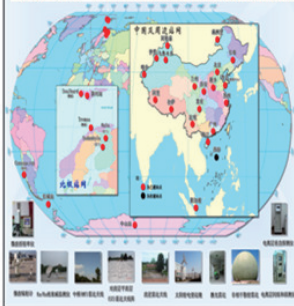


图 7 全球电波环境信息服务系统总体架构示意图

系统组成主要包括:天地一体化立体监测网络(天基主被动电波环境监测、外部辐射源天基电磁环境监测等)、泛源大数据中心;泛源数据融合和深度学习的电波环境态势认知利用系统(电磁频谱感知利用等);卫星链路:区域性天地一体化立体监测网络、效应预报预警系统、快响应对决策系统、主动恢复系统等;组合远程通信:自主可重构远程通信系统、自然电离层特殊结构超视距通信系统、对流层超视距探测/通信系统。

3) 北极(远海)两航通信保障系统。

主要包括北极(远海)两航(海空、航海)的通信保障能力;北极电波环境感知能力、信息服务能力等示范。涉及北极(远海)两航业务,民航、远洋、渔业,以及潜在的远洋演练、护航、撤侨等。

系统组成主要包括:天地一体化北极电波立体观测网络、北极(远海)两航通信保障系统(短波、超短波、卫星组合通信方式)、北极电波信息数据中心、北极电波信息综合管理服务系统。

致谢 感谢参与前期论证研讨的各位专家和领导的建设性意见和有益讨论,为本文提供了很好的素材。

参 考 文 献

- [1] 吴健. 用三频卫星信标测量电离层天气新方法. 中国科学(A辑), 2000, 30(S1): 111—114.
- [2] 王赤, 窦贤康, 龚建村, 等. 空间物理学最新进展与展望. 空间科学学报, 2021, 41(1): 1—9.
- [3] Ishii M, Hozumi K, Tsugawa T, Kubo Y. Activity for Space Weather Research and Operation in NICT// 2018 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC), Gran Canaria; IEEE, 2018, doi: 10.23919/URSI-AT-RASC.2018.8471342.
- [4] Ishii M. Japanese space weather research activities. Space Weather, 2017, 15(1): 26—35.
- [5] Bourdillon A, Ljiljana R, Zolesi B. COST 296 MIERS: mitigation of ionospheric effects on radio systems. Annals of Geophysics, 2009, 52(3/4), doi: 10.4401/ag-4561.
- [6] Biagi PF, Maggipinto T, Ermini A. The European VLF/LF radio network: current status. Acta Geodaetica et Geophysica, 2015, 50(1): 109—120.
- [7] Orus-Perez R, Nava B, Parro J, et al. ESA UGI (Unified-GNSS-Ionosphere): an open-source software to compute precise ionosphere estimates. Advances in Space Research, 2021, 67(1): 56—65.
- [8] National Science and Technology Council. National space weather strategy and action plan. (2019-03)/[2021-08-04]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/wp/content/uploads/2019/03/National-Space-Weather-Strategy-and-Action-Plan-2019.pdf>.
- [9] Knipp DJ, Gannon JL. The 2019 national space weather strategy and action plan and beyond. Space Weather, 2019, 17(6): 794—795.
- [10] Immel TJ, England SL, Mende SB, et al. The ionospheric connection explorer mission: mission goals and design. Space Science Reviews, 2018, 214: 13.
- [11] Huba JD, Heelis R, Maute A. Large-Scale O⁺ Depletions Observed by ICON in the Post-Midnight Topside Ionosphere: Data/Model Comparison. Geophysical Research Letters, 2021, 48(7): e2020GL092061.
- [12] Shen XH, Zhang XM, Yuan SG, et al. The state-of-the-art of the China Seismo-Electromagnetic Satellite mission. Science China Technological Sciences, 2018, 61(5): 634—642.
- [13] Kawanishi T, Inagaki K, Kanno A, et al. Terahertz and photonics seamless short-distance links for future mobile networks. Radio Science, 2021, 56(2): e2020RS007156.
- [14] 张平. 造福于人类社会的使能技术. 中国科学基金, 2020, 34(2): 125.
- [15] 夏海洋, 查淞, 黄纪军, 等. 电磁频谱地图构建方法研究综述及展望. 电波科学学报, 2020, 35(4): 445—456.
- [16] Xu ZW, Wu J, Wu ZS. Potential effects of the ionosphere on space-based SAR imaging. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(7): 1968—1975.
- [17] Salous S, Lee J, Kim MD, et al. Radio propagation measurements and modeling for standardization of the site general path loss model in International Telecommunications Union recommendations for 5G wireless networks. Radio Science, 2020, 55(1): e2019RS006924.
- [18] 张敏, 张东和, 郝永强, 等. 2011—2016年深圳地区L波段电离层幅度闪烁统计分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(12): 1570—1582.
- [19] Luo XM, Lou YD, Xiao QQ, et al. Investigation of ionospheric scintillation effects on BDS precise point positioning at low-latitude regions. GPS Solutions, 2018, 22(3): 63.
- [20] Kelly MA, Comberiate JM, Miller ES, et al. Progress toward forecasting of space weather effects on UHF SATCOM after Operation Anaconda. Space Weather, 2014, 12(10): 601—611.

- [21] Comite D, Dente L, Guerriero L, et al. Electromagnetic modeling of scattered signals of opportunity: Challenges and approaches. *URSI Radio Science Bulletin*, 2020, 2020(373): 28—39.
- [22] Cushley AC, Noël JM. Ionospheric sounding and tomography using automatic identification system (AIS) and other signals of opportunity. *Radio Science*, 2020, 55(1): e2019RS006872.
- [23] De La Jara C, Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks. *Radio Science*, 2021, 56(8): 1—15.
- [24] Struzak R, Tjelta T, Borrego JP. On radio-frequency spectrum management. *URSI Radio Science Bulletin*, 2015, 2015(354): 11—35.
- [25] 夏明华, 朱又敏, 陈二虎, 等. 海洋通信的发展现状与时代挑战. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47(6): 677—695.

Some Suggestions on Developing the Autonomous Radio in China

Zhengwen Xu* Kun Xue Haisheng Zhao Jian Wu

National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107

Abstract In terms of various aspects, such as both foreign and domestic progress, policies, situations, problems and challenges, this paper analyzed and summarized development needs on radio wave propagation and radio environment, from the view of the national major infrastructure and applied systems. The scientific problems and key technologies in the fields of electromagnetic waves to be solved were analyzed and expounded. As a result, a concept of “autonomous radio” was attempted to be put forwarded. It means that three aspects, such as digital radio environment, transparent radio wave propagation behavior, and autonomous application services. Finally, suggestions and ideas were given after some discussion. They are in the hope of helping leapfrog development of radio fields in the new era.

Keywords advanced information technology; radio wave; radio wave propagation; radio environment; electromagnetic spectrum

(责任编辑 魏鹏飞 姜钧译)