

## 面向航空6G的频谱认知智能管控

刘东<sup>1</sup>, 吴启晖<sup>1</sup>, Tony Q. S. Quek<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 211106;  
2. 新加坡科技设计大学信息系统技术与设计学院, 新加坡 樟宜 487372)

**摘要:** 随着空天地信息网络一体化的发展, 卫星网络与地面移动网络作为常态化基础网络存在, 而以无人机为代表的各类空中平台组成了天地之间的机动网络。航空6G作为6G的一种重要形态将包含空-空、空-地与空-天等新型通信与组网技术, 需要解决的一个重要问题是如何高效利用频谱资源。基于航空6G与电磁频谱空间所面临的挑战, 提出了面向航空6G的频谱认知智能管控体系架构, 阐述了体系架构中频谱云、频谱控制链、设备用频软件定义、频谱传感网4个主要模块的功能作用。分析探讨了面向航空6G的频谱认知智能管控的3个关键技术, 即三维频谱空间数字孪生、3D频谱智能决策、频谱图谱化快速协同学习, 以期为后续航空6G与频谱智能管控的研究提供一些指导和建议。

**关键词:** 航空6G; 频谱认知智能管控; 频谱云; 数字孪生; 智能决策; 快速协同学习

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00153

## Spectrum cognitive intelligent management and control for aviation 6G

LIU Dong<sup>1</sup>, WU Qihui<sup>1</sup>, Tony Q. S. QUEK<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology on Electromagnetic Spectrum Spatial Cognitive Dynamic Systems, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China  
2. College of Information System Technology and Design, Singapore University of Technology and Design, Changi 487372, Singapore

**Abstract:** With the development of the ground-air-space integrated information network, satellite networks and ground mobile networks serve as space and ground fundamental infrastructures, respectively. While various aerial platforms such as drones constitute air mobile networks to connect space and ground infrastructures. As an important form of 6G, aviation 6G will include new types of air-to-air, air-to-ground and air-to-space communication and networking techniques. An important issue for aviation 6G is how to efficiently use spectrum resources. Based on the challenges of aviation 6G and electromagnetic spectrum space, a spectrum cognitive intelligent management and control architecture for aviation 6G was proposed, and the functions were elaborated of the four main modules in the architecture, namely spectrum cloud, spectrum control link, device spectrum software defined and spectrum sensor network. Three key technologies of spectrum cognitive intelligent management and control for aviation 6G were analyzed and discussed, namely intelligent three-dimensional spectrum space digital twins, 3D spectrum intelligent decision, and rapid collaborative learning of spectrum mapping. It is expected to provide guidance and suggestions for the subsequent research on aviation 6G and spectrum intelligent management and control.

**Key words:** aviation 6G, spectrum cognitive intelligent management and control, spectrum cloud, digital twins, intelligent decision, rapid collaborative learning

收稿日期: 2020-01-28; 修回日期: 2020-02-27

基金项目: 无人机频谱认知仪国家自然科学基金重大科学仪器项目 (No.61827801); 广域动态频谱态势基础理论与关键技术研究国家自然科学基金重点项目 (No.61631020)

**Foundation Items:** Development of Unmanned Aerial Vehicle Spectrum Cognitive Instrument (No.61827801), On the Fundamental Theory and Key Technologies of Large-range and Dynamic Spectrum Situation (No.61631020)

## 1 航空 6G 的研究背景

2018 年 9 月, 美国联邦通信协会 (FCC, Federal Communications Commission) 专员在世界移动通信大会上作报告指出: 6G 并不是大家想象得那么遥远的, 其三大关键技术主要有全新频谱、大规模空间复用、基于区块链的动态频谱接入<sup>[1]</sup>。

2019 年 3 月, 全球首届 6G 峰会在芬兰举办, 会议主旨内容是拟定全球首份 6G 白皮书, 明确 6G 发展的基本方向。同年 10 月, 《6G 无线智能无处不在的关键驱动与研究挑战》正式发布<sup>[2]</sup>。

2019 年 11 月, 我国科学技术部会同国家发展和改革委员会、教育部、工业和信息化部、自然科学基金委员会、中国科学院在北京组织召开了 6G 技术研发启动会, 会议宣布成立国家 6G 技术研发推进工作组和总体专家组<sup>[3]</sup>。该会议的召开标志着我国 6G 技术研发工作正式启动。同月, 工业和信息化部成立 IMT-2030 推进组, 在需求、无线技术、网络技术、频谱、标准化及国际合作等方面下设立了 6 个子组开展工作。

6G 的显著特征为全频谱、全覆盖、全应用、强智能、强安全。全频谱与全覆盖等特征对未来航空 6G 以及频谱空间管控提出了刚性需求。《6G 无线智能无处不在的关键驱动与研究挑战》白皮书中提出了未来 6G 指标<sup>[4]</sup>, 如每立方米通信设备密度、空间定位精度、动态频谱效率、可靠性、信息传输时延、续航时间、能量效率等指标, 这些指标与空天地信息网络一体化或电磁频谱空间密切相关, 与 5G 相比, 信息传输速率、时延等指标性能将会提高 10~100 倍<sup>[5]</sup>。随着空天地信息网络一体化的发展, 卫星网络与地面移动网络作为常态化基础网络存在, 而以无人机为代表的各类空中平台组成了天地之间的机动网络。航空 6G 作为 6G 的一种重要形态将包含空一空、空一地与空一天等新型通信与组网技术, 需要解决的一个重要问题是如何高效利用频谱资源。因此, 在展开 6G 研究的同时, 需要同步推进对航空 6G 与频谱空间的研究。

## 2 航空 6G 与频谱空间面临的挑战

飞行器的飞行空间按海拔高度可划分为航空空间 (航空器飞行领域)、临近空间和航天空间 (航天器飞行领域), 飞行器的飞行空间划分如图 1 所示。其中, 航空空间又可划分为: 超低空  $0 < h \leq 100 \text{ m}$ ;

低空  $100 \text{ m} < h \leq 1 \text{ km}$ ; 中空  $1 \text{ km} < h \leq 7 \text{ km}$ ; 高空  $7 \text{ km} < h \leq 15 \text{ km}$ ; 超高空  $15 \text{ km} < h \leq 20 \text{ km}$ 。临近空间为距地面 20~100 km 的飞行空间, 距地面 100 km 以上的飞行空间为航天空间。其中, 100 km 为空天分界卡门线<sup>[6]</sup>,  $h$  为海拔高度。

航空器飞行速度划分为: 低速  $0 < M \leq 0.3$ ; 亚音速  $0.3 < M \leq 0.8$ ; 跨音速  $0.8 < M \leq 1.2$ ; 超音速  $1.2 < M \leq 5.0$ ; 高超音速  $5.0 < M \leq \infty$ 。其中,  $M$  是指马赫。

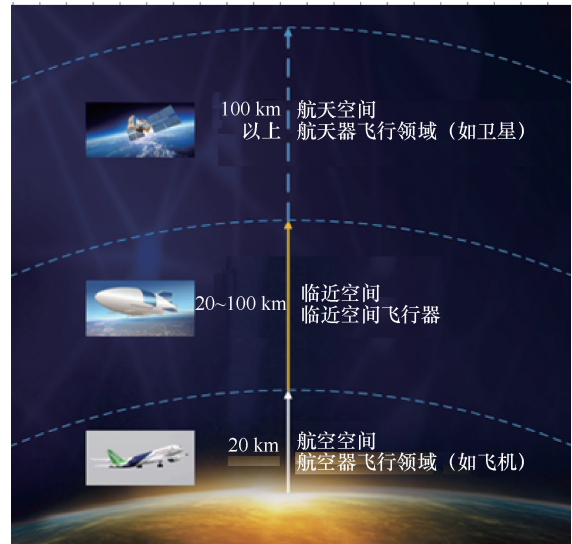


图 1 飞行器的飞行空间划分

航空 6G 主要解决面向海拔高度为 0~100 km 广域范围内高速运动的航空器与卫星、地面及自身信息的传输问题。由上述内容可知, 航空 6G 将面临诸多挑战。

1) 立体无缝覆盖。未来航空 6G 通信网络中拥有超海量的异构无线网络接入节点, 如无人机、民航飞机、飞艇等, 这些网络节点形态各异、距离不定、功率不一, 均会给未来通信的立体无缝覆盖提出新的挑战。

2) 波束快速搜索跟踪。航空平台作为网络节点基本处于运动状态, 平台之间的高速通信将会采用波束模式。空一空、空一地、空一天间平台不规则运动轨迹下的波束对齐、波束切换、空间路由、多普勒频移等将带来新的难题。

3) 多样化业务节能通信。未来航空平台不仅是通信节点, 也是多域感知节点, 将带有高清数码相机、红外摄像、机载雷达、频谱探测等感知设备, 感知与通信均受能耗限制, 而能耗关系到航空平台

的巡航时间，因此，多样化业务与节能成为航空 6G 的重要需求。

4) 超低时延、高可靠通信。航空平台飞行速度快，其依托的航空 6G 通信时延需要达到微秒级别，通信时延长、可靠性低将会造成飞行器远程控制困难。因此，对于航空平台而言，超低时延、超高可靠通信尤为重要。

频谱作为航空 6G 最重要的无线资源，同样面临着诸多挑战。

1) 频率全谱化。航空 6G 通信频率可能包含 Sub-6G、毫米波、太赫兹、可见光等，如何机载实现多频段、多体制频谱共享、共存是当前面临的难题之一。

2) 干扰立体化。随着空天地一体化，特别是航空通信的快速发展与频谱资源的日益短缺，原来的频谱资源静态划分为卫星与地面通信频率的界限更模糊了，频谱间的干扰关系从平面拓展到 3D 空间。

3) 频谱碎片化。受环境、信道、平台、体制、运动等多方面因素影响，可用频谱日益碎片化，不同的空间，碎片化程度不相同，这将会给频谱优化算法的使用带来维度诅咒与速度要求。

### 3 面向航空 6G 的频谱认知智能管控体系架构

为了应对航空 6G 所带来的频率全谱化、干扰立体化、频谱碎片化等挑战，需要频谱资源划分从静态规划模式向动态智能模式转变。当前，人工智能正从计算智能、感知智能走向认知智能，认知智能<sup>[7]</sup>最核心的特征是需要感知基础上进行深刻理解、自主学习与智能推理。本文以认知物联网<sup>[8]</sup>、频谱云 (SC, spectrum cloud)<sup>[9-10]</sup>、无人机智能管控<sup>[11]</sup>为基础，结合认知智能的最新进展，构建了由感受器、类脑器与效应器构成的、具有认知智能能力的频谱管控体系架构，频谱认知智能管控体系架构如图 2 所示。

体系架构的主要功能模块可分为以下 4 部分。

1) SC: 是体系架构中的类脑部分，执行云计算或边缘计算功能，包含频谱大数据分析、频谱智能决策与频谱认知学习，是自主分析、自主决策、自主学习、自主管控的核心模块。

2) 频谱控制链 (SCL, spectrum control link): 是体系架构中的效应器部分，该控制功能与航空通信业务相分离，实现对航空平台频谱域功能的远程管控。

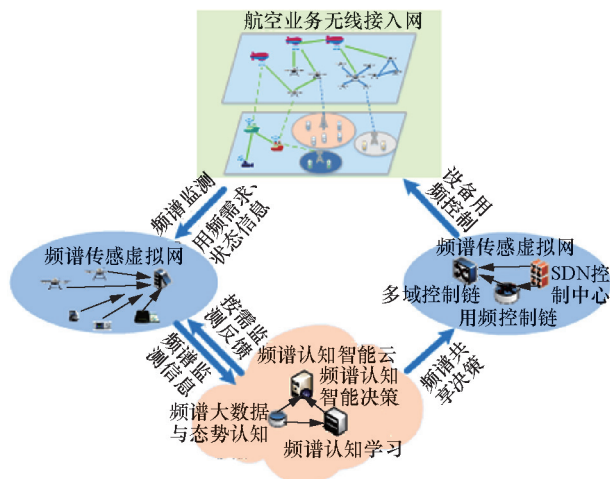


图 2 频谱认知智能管控体系架构

3) 设备用频软件定义 (DSSD, device spectrum software defined): 是体系架构中的末梢，使航空平台频谱域实现软件可定义与远程被控制。

4) 频谱传感网 (SSN, spectrum sensor network): 由航空通用平台或航空专用频谱监测平台构成的 SSN 是体系架构中的感受器，为 SC 提供数据支撑。

由图 2 可知，频谱认知智能管控体系架构集业务传输、频谱感知、用频控制、认知智能于一体，核心指标包括感知与控制数据传输的可靠性；从感知、认知、决策到控制整个闭环的运行时间等，对智能的算法提出了除性能以外的速度与稳健性要求，能以虚拟化或网络切片的形式存在。

### 4 频谱认知智能管控关键技术

#### 4.1 三维频谱空间数字孪生

认知智能是以感知数据为基础的。面向航空 6G 的频谱感知与传统频谱感知的重要区别之一是频谱数据获取需拓展到广域立体空间，需研发机载频谱监测设备进行频谱数据采集并回传汇聚至 SC。同时，除了频谱能量、频谱带宽、来波方向等频谱核心数据外，采样时间、无人机平台经度/纬度/高度、视频等频谱相关数据，亦需同时回传至 SC，结合 SC 所装载的地理信息系统，构成频谱大数据库。为了更好地揭示电磁频谱空间的各种关联关系、演化机理规律，创新频谱认知数据分析处理需要构建高精度数字孪生频谱空间。三维频谱空间数字孪生的关键技术主要有如下 3 个。

##### 4.1.1 基于张量或 3D 压缩感知的频谱数据补全

电磁频谱空间渗透了陆、海、空、天等广域空

间，三维立体频谱空间数字孪生受限于节点的空间部署、监测频段以及时间粒度等因素，具有时域、空域、频域感知数据不完备的特征。为了形成完整的频谱态势，需要进行频谱数据补全<sup>[12-14]</sup>。频谱数据补全方法主要可分为数据驱动型和模型驱动型，实测获得的频谱数据一般是缺失的、不完整的。数据驱动型数据补全是将立体区域进行栅格化，建模为张量。对于一个  $n$  维的张量，可以定义为  $X \in R^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n}$ ，其中， $x_{i_1, i_2, \dots, i_n}$  表示张量中第  $(i_1, i_2, \dots, i_n)$  个值。给定一个子集  $\Omega$ ，在集合  $\Omega$  中的元素对应  $X$  中的观测值，而其他值则设置为 0，子集  $\Omega$  的定义见式(1)

$$X^\Omega = \begin{cases} X, & (i_1, i_2, \dots, i_n) \in \Omega \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

将不完整的频谱张量数据的补全问题建模成一个优化问题，具体建模可用式(2)表示

$$\begin{aligned} \min \|X\|_* \\ \text{s.t. } X_\Omega = \Gamma_\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $X, \Gamma$  是在每个维度都有相同大小的两个频谱张量。若  $\Gamma$  的元素属于子集  $\Omega$  则表示已知值，不属于该子集的元素则是缺失值。而  $X$  就是需要被补全的频谱张量，为了解决张量的补全问题，引入迹范数的定义，见式(3)

$$\|X\|_* := \sum_{i=1}^n \lambda_i \|X_{(i)}\|_* \quad (3)$$

其中， $\lambda_i \geq 0$ ，并且  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ ， $\|X_{(i)}\|_*$  表示按维度  $i$  展开的矩阵  $X_{(i)}$  的范数。对于张量来说，其迹范数就是所有维度展开的矩阵的迹范数组合。所以，张量补全的优化问题就可以写成式(4)的形式。

$$\begin{aligned} \min_X \sum_{i=1}^n \lambda_i \|X_{(i)}\|_* \\ \text{s.t. } X_\Omega = \Gamma_\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

模型驱动型的频谱数据补全基于电波传播规律、计算电磁学理论与方法的数据补全方法。随着计算电磁学研究的迅速发展，通过数值模拟精确地量化研究电磁波与目标/环境相互作用的物理原理与相关规律已成为可能。基于这些物理原理与相关

规律，可以构建相应的数据补全模型<sup>[15]</sup>。结合传播规律的 3D 压缩感知将成为频谱数据补全具有前景的研究新方向。

#### 4.1.2 3D 频谱数据预测与预警

频谱数据空间补全仅实现了频谱空间当前状态的数据完备，分析预测未来演化趋势对于频谱资源预先决策与预先管控至关重要。随着空域频谱监测的展开，预测推理需要从时间维度的预测推理拓展到空域、频域等多维度的预测推理。通过频谱态势可视化，构成了立体的频谱图。对于频谱预测机理的研究，需要从基于数据的预测向基于频谱图的预测发展。基于频谱图的预测与其他基于图像的预测相比，具有自身的特点：1) 频谱状态变化的高动态，它不是随机无序也不是周期平稳，而是在不同时间尺度内都具有一定规则性，同时也具有一定的爆发性或突变性；2) 频谱状态变化的环境作用，它的变化与周边环境密切相关；3) 频谱状态变化受目标行为的影响。环境、目标行为与电波的作用机理将为频谱预测提供新的维度，同时通过预测结果与实测结果对比，可实现自动预警，增强预测预警的能力<sup>[16]</sup>。深度学习中的长短期记忆 (LSTM, long short-term memory) 神经网络已被证实解决时间序列问题的能力很强。而频谱数据正是时间顺序强相关的一串序列，所以，可以利用 LSTM 对未来频谱进行更有效的预测。

#### 4.1.3 双移动辐射源测向与定位

6G 时代用频设备将大量存在，人为或者无意的异常用频容易造成对通信系统的干扰，为了尽快恢复通信秩序，需要快速找到并排除干扰源，同时也需要知道用户的位置信息，因此，对辐射源测向与定位的需求将与日俱增。航空 6G 测向存在小体积、小重量、小功耗问题，基于阵列信号处理的空间谱估计技术，可以有效适应同频辐射源的测向，从空域将其分离。为了获得较高的分辨率以及辨识更多的信源数量，一般需要较大的阵列孔径和阵元数，这使得机载平台无法达到载荷与功耗要求，稀疏轻量化阵列结构设计技术为该问题提供了解决途径<sup>[17]</sup>。航空 6G 中的定位，具有锚节点运动与集群的特征。传统基于地面观测站和机动车的辐射源定位平台容易受地面杂波和地理因素的影响，定位效率低、定位精度差。基于多无人机的移动分布式辐射目标定位可以从空中进行观测，具有如下优势：1) 观测域广、受地面杂波干扰少、灵活性高；

2) 成本低、速度快, 结合智能化处理方法, 能够节省大量人力、财力、物力; 3) 通过无人机蜂群进行配合, 飞行路径进行自适应规划, 可有效提升干扰源定位效率、准确率及干扰源的辨识数目。基于多无人机飞行的 M-AOA、M-TDOA、M-FDOA 的定位算法, 将频谱测量与时间、经度、纬度、高度、姿态紧密结合起来, 将会给一系列定位方法带来新的自由度与创新<sup>[18]</sup>。

## 4.2 3D 频谱智能决策

航空 6G 的发展使得频谱决策越来越困难, 主要是存在平行和垂直频谱共享, 多体制系统之间频谱信息缺少交互, 不同设备间使用频谱资源优先级不同导致频谱共享出现马太效应, 多设备间频谱干扰严重, 设备多样化、业务差异化、频段多维化导致协同复杂, 系统动态特性更强, 如何保证频谱决策的时效性、动态性与系统最优性是一个关键难题。3D 智能频谱决策主要分为如下两个方面。

### 4.2.1 频谱高维优化决策

复杂电磁频谱环境与动态变化任务, 给高维状态空间、高维结果空间、高维行为空间造成了维度诅咒, 即最优解的搜索空间极大, 这就带来了最优性难以保证、收敛速度慢、实际部署困难等问题。为了解决上述问题, 需要运用频谱优化决策理论。将多用户系统中的众多优化变量解耦, 实现分布式优化, 解决大量优化变量联合优化导致的高计算复杂度问题; 利用随机优化、随机次梯度、基于决策后状态的在线学习, 实时优化数据分组调度及载波分配, 保障网络长期的服务质量 (QoS, quality of service); 通过分析 3D 频谱态势, 挖掘历史、现状和未来频谱状态演化之间的关联性, 实现由已知频谱数据来推演未来频谱状态, 对目标间相互关联的频谱行为进行推理预测, 提升决策速度<sup>[19]</sup>。

### 4.2.2 3D 频谱博弈决策

电磁频谱空间频谱资源共享与竞争中存在复杂多变的耦合关系, 主要体现在: 1) 空间耦合性, 由于电磁频谱空间的开放性和无线信号的衰落性, 节点间相互干扰强度随距离的增大而降低, 用频耦合关系不局限于直接干扰相邻用户, 且与地理环境密切相关, 导致用频耦合建模难; 2) 跨域耦合性, 由于电磁频谱空间的广域性, “时间—频率—空间—功率”跨域交织, 影响因素极度复杂, 导致用频

耦合求解难; 3) 动态耦合性, 由于无线频谱、传输信道、网络拓扑和业务需求的动态变化, 用频耦合关系是动态变化的, 导致传统静态方法难以适用。稳健博弈、QoE 博弈、局部互利博弈等智能决策方法, 针对不同环境, 能够调整自身用频决策收敛到稳定高效的博弈均衡解<sup>[20]</sup>。如在传统的博弈模型中, 博弈参与者总是按照“利己主义”来进行决策, 即只考虑最大化个体的回报。然而, 这种“自私的”方式难以保证实现全局最优, 而基于局部互利博弈的智能决策方法可以进一步提升博弈性能与决策速度。

## 4.3 频谱图谱化快速协同学习

随着空间信息的引入, 频谱信息图谱化将成为重要的发展方向, 电磁频谱空间学习算法正在从信号向图像转变, 同时与传统图像学习在动态性、协同性、异构性、信息不完全性等方面有明显区别。频谱图谱化学习算法主要有以下 3 种。

### 4.3.1 深度强化学习与协同强化学习

电磁频谱空间高动态性使得传统深度学习算法难以运用, 然而深度学习算法对于图像处理的优势推动了频谱图谱化后的应用。同时, 强化学习算法对于高动态性具有很强的适应性, 但频谱图谱化后却面临状态空间巨大的问题, 因此, 要将两者有机结合起来形成深度强化学习算法<sup>[21]</sup>。该算法将时频图作为深度神经网络的输入状态, 深度神经网络对状态的 Q 值函数进行拟合并输出, 基于输出的 Q 值函数, 使用强化学习算法进行智能选频决策。航空 6G 所包含的每一个平台均是智能体, 在高动态性电磁频谱空间下, 单个智能体采用独立的强化学习已不能处理所面临的任務, 尤其是具有相同目标的系统, 智能体之间必须协同求解。因此, 多智能体可通过采用协同强化学习的算法来进一步增强频谱认知与决策的性能。

### 4.3.2 分层联邦学习

联邦学习 (FL, federated learning) 最早是由 Google 公司于 2016 年提出的, 并应用于安卓手机客户端本地更新问题中<sup>[22]</sup>。其主要原理是在终端利用本地数据进行训练和学习, 而将学习参数上传至中心服务器, 中心服务器对许多并行终端上传的学习参数进行优化调整, 并返回终端, 提升终端学习能力。这种模式有效地保护了隐私数据并大幅度节省了数据传输量。FL 对于航空 6G 与频谱智能管控而言, 有两方面优势: 1) 可以保障优先级高的用户

周边频谱信息安全, 将感知数据存于本地; 2) 可以减少感知数据传递, 同时基于数据分离的 FL 架构在终端层利用本地数据进行感知算法的模型训练, 与 SC 计算中心或边缘计算中心进行模型参数的交换, 有效提高了异构设备间协作感知的安全性及可靠性。

### 4.3.3 频谱图谱化生成对抗网络

频谱可用信息、信道质量信息是频谱态势感知的重要环节, 但航空 6G 的高速率、高移动性特点导致的剧烈信道变化, 将严重影响信道的估计性能, 进而影响频谱态势感知的准确性。生成对抗网络通过对一对深度神经网络进行迭代对抗式训练, 来实现对真实数据分布的隐式建模<sup>[23]</sup>。因此, 生成对抗网络能够学习真实训练数据所隐含的分布, 并且生成可比拟真实训练数据的伪造数据。而由于传统基于训练序列的估计方法基本属于无偏估计或渐进无偏估计, 即如果存在足够多的导频训练数据, 则信道估计结果将会足够准确。但航空 6G 会面临数据量少且不完整的情况, 从而不可避免地造成估计结果的偏差, 影响通信性能。因此, 对于上述特性, 可开展基于生成对抗网络框架的无线网络频谱态势感知与决策的深入探索与研究。

## 5 结束语

本文基于航空 6G 与电磁频谱空间所面临的挑战, 提出了面向航空 6G 的频谱认知智能管控体系架构, 阐述了体系架构中 SC、SCL、DSSD、SSN 这 4 个主要模块的功能作用, 分析探讨了面向航空 6G 的频谱认知智能管控的 3 个关键技术: 三维频谱空间数字孪生、3D 频谱智能决策和频谱图谱化快速协同学习, 以期为后续开展航空 6G 与频谱智能管控的研究提供一些指导和建议。

### 参考文献:

- [1] WEISS M B H, WERBACH K, SICKER D C, et al. On the application of blockchains to spectrum management[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(2): 193-205.
- [2] 高芳, 李梦薇. 芬兰奥卢大学发布白皮书初步提出 6G 愿景和挑战[J]. *科技中国*, 2019(12): 94-97.  
GAO F, LI M W. The white paper released by Oulun yliopisto initially proposes 6G vision and challenges[J]. *China SciTechnology Business*, 2019 (12): 94-97.
- [3] 我国 6G 技术研发工作正式启动[J]. *新闻论坛*, 2019(6): 40.  
Chinese 6G technology research and development work is officially launched[J]. *News Tribune*, 2019 (6): 40.
- [4] ZONG B Q, FAN C, WANG X Y, et al. 6G technologies: key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 18-27.
- [5] ZHANG Z Q, XIAO Y, MA Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(3): 28-41.
- [6] 唐绍锋, 张静. 世界主要空天飞行器研制情况及未来发展趋势[J]. *国际太空*, 2017(10): 30-37.  
TANG S F, ZHANG J. Research and development trends of the world's major aerospace vehicles[J]. *Space International*, 2017 (10): 30-37.
- [7] HAYKIN S. Artificial intelligence communicates with cognitive dynamic system for cybersecurity[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2019, 5(3): 463-475.
- [8] WU Q H, DING G R, XU Y H, et al. Cognitive Internet of things: a new paradigm beyond connection[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(2): 129-143.
- [9] WU Q H, DING G R, DU Z Y, et al. A cloud-based architecture for the Internet of spectrum devices over future wireless networks[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 2854-2862.
- [10] 吴启晖, 王然, 黄振炎. 物联网的一种新范式: 智能频联网[J]. *物联网学报*, 2018, 2(1): 35-41.  
WU Q H, WANG R, HUANG Z Y. A new paradigm of Internet of things: intelligent frequency networking[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2018, 2 (1): 35-41.
- [11] SANTOSO F, GARRATT M A, ANAVATTI S G. State-of-the-art intelligent flight control systems in unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(2): 613-627.
- [12] ZHANG L, ZHAO Y, ZHU Z F, et al. Multi-view missing data completion[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2018, 30(7): 1296-1309.
- [13] XIE K, WANG X G, WANG X, et al. Accurate recovery of missing network measurement data with localized tensor completion[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(6): 2222-2235.
- [14] 吴启晖, 唐梦云. 基于张量补全的多维频谱地图构建[J]. *信号处理*, 2017, 33(S1): 47-52.  
WU Q H, TANG M Y. Multi-dimensional spectrum map construction based on tensor completion[J]. *Signal Processing*, 2017, 33(S1): 47-52.
- [15] YAN S, LIN C P, ARSLANBEKOV R R, et al. A discontinuous Galerkin time-domain method with dynamically adaptive cartesian mesh for computational electromagnetics[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 3122-3133.
- [16] GE C, WANG Z, ZHANG X. Robust long-term spectrum prediction with missing values and sparse anomalies[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 16655-16664.
- [17] IGNACIO E J, GONZÁLEZ D A M Á, RUBIO J, et al. Gradient-based aperiodic array synthesis of real arrays with uniform amplitude excitation including mutual coupling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 541-551.
- [18] HMAM H. Optimal sensor velocity configuration for TDOA-FDOA geolocation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(3): 628-637.

- [19] LI H, LYU Q, HUANG T. Convergence analysis of a distributed optimization algorithm with a general unbalanced directed communication network[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2019, 6(3): 237-248.
- [20] YUAN W, LEUNG H, CHENG W, et al. Participation in repeated cooperative spectrum sensing: a game-theoretic perspective[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(3): 1000-1011.
- [21] ZHANG Y, CAI P, PAN C, et al. Multi-agent deep reinforcement learning-based cooperative spectrum sensing with upper confidence bound exploration[J]. IEEE Access, 2019, 7: 118898-118906.
- [22] XU G, LI H S, LIU S, et al. VerifyNet: secure and verifiable federated learning[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 911-926.
- [23] WANG C Y, XU C, YAO X, et al. Evolutionary generative adversarial networks[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2019, 23(6): 921-934.

#### [作者简介]



刘东 (1995- )，男，河南商丘人，南京航空航天大学硕士生，主要研究方向为天地一体航空 6G 组网和认知物联网。



吴启晖 (1970- )，男，南京航空航天大学特聘教授、校长助理，教育部长江学者特聘教授，国家百千万人才工程入选者，国家有突出贡献中青年专家，工业和信息化部通信科学技术委员会委员，IET Fellow，电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室主任，中国电子学会理事，中国通信学会云计算与大数据专业委员会副主任，主要研究方向为认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络、无人机集群智能通信。主持无人机频谱认知国家自然科学基金重大仪器等国家级重大/重点项目 10 余项；发表 IEEE 期刊论文 100 余篇，ESI 高被引论文 10 余篇 (ESI 数位列认知无线电领域中国学者第 1 位)；获日内瓦国际发明展金奖 1 项；获国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技进步一等奖 3 项、二等奖 2 项、三等奖 7 项。



Tony Q. S. Quek (1973- )，男，新加坡科技设计大学信息系统技术与设计学院教授、院长，IEEE Fellow，主要研究方向为无线通信优化与统计理论的应用、网络信号处理和资源配置问题等；发表 IEEE 期刊论文 210 余篇；2016—2019 年连续 4 年获汤森路透高被引科学家称号，2018 年获得通信学会杰出讲师称号，并获得包括 2012 年度 IEEE William R. Bennett Prize 奖，2017 年通信理论技术委员会早期成果奖，2017 年 IEEE 通信学会亚太优秀论文奖，2016 年 IEEE 信号处理学会青年作者最佳论文奖。