

物联网的一种新范式：智能频联网

吴启晖，王然，黄振炎

(南京航空航天大学电子信息工程学院，江苏 南京 211106)

摘要：电磁频谱已成为信息时代不可或缺的国家战略资源。随着天地一体化信息网络、航空飞行器、电磁频谱空域作战等领域的迅猛发展，电磁空间面临着3个挑战：频谱资源日益紧缺、频谱安全日益严峻、频谱对抗日益激烈。为了应对这3个挑战，提出了智能频联网的基本概念和体系架构，分析了系统关键技术与未来应用方向。智能频联网的发展将为物联网提供一种新范式，为频谱资源供需矛盾的解决提供新的方案。

关键词：智能频联网；频谱监测设备；频谱使用设备；认知无线电；多域频谱感知；认知决策

中图分类号：TP393

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00039

New paradigm for Internet of things: intelligent spectrum-Internet of things

WU Qihui, WANG Ran, HUANG Zhenyan

College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: The electromagnetic spectrum has become an indispensable national strategic resource in the information age. With the rapid development of the world's integrated information network, aviation vehicles, and electromagnetic spectrum airspace operations, electromagnetic space faces three major challenges: the increasing shortage of spectrum resources, increasingly stringent spectrum security, and increasingly fierce spectrum confrontation. In order to deal with the three major challenges, the basic concepts and architecture of intelligent spectrum-Internet of things (IS-IoT) was proposed, and the key technologies and future application directions of the system was analyzed. The development of IS-IoT will provide a new paradigm for the Internet of things and a new solution to the conflict between the supply and demand of spectrum resources.

Key words: IS-IoT, spectrum monitoring device, spectrum usage device, cognitive radio, multi-domain spectrum sensing, cognitive decision

1 引言

物联网 (IoT) 最初是由 Ashton 在 1999 年的一次演讲中提出的^[1]。这场技术革命把人们带入一个新的无处不在的连接、计算和沟通的时代。根据 Machina Research 预测，到 2025 年世界范围内的物联网连接将达到甚至超过 270 亿，凸显出巨大的潜力。物联网用途广泛，遍及智能交通、环境保护、政府工作、公共安全、平安家居、智能消防、工业监测、环境监测、路灯照明管控、景观照明管控、楼宇照明管控、广场照明管控、老人护理、个人健康、花卉栽培、水系监

测、食品溯源、敌情侦查和情报搜集等多个领域，形成了丰富多样的专用物联网。按物的终端分，可分为机联网 (工厂机器设备的联网)、车联网、梯联网 (电梯设备联网) 等；按业务类型分，有“智慧环保”“智慧交通”“智慧电网”“智慧气网”“智慧油网”等。物联网正在向深度发展，进一步与行业、人工智能相结合，不断产生新的智能的形态^[2]。2017 年 12 月，DAPAR 官员发布了“海上物联网”项目，经费为 3 700 万美元，利用大量的智能漂浮传感器进行持久的广域海洋环境监测。智慧医疗 (WIT120)，是最近兴起的专有医疗名词，通过打造健康档案区域医疗信息平

台,利用最先进的物联网技术,实现患者与医务人员、医疗机构、医疗设备之间的互动,逐步达到信息化。2017年8月,IBM在智慧医疗的基础上提出了认知型医疗保健,认为认知系统可以帮助改善病患护理,促进发现并改进全球提供商的决策,需要开创这一新兴技术并对认知能力进行投资,从而实现医疗保健服务的复兴。2018年1月,加拿大滑铁卢大学沈学民教授提出了车联网大数据^[3],探讨了车联网与大数据的关系,一方面,通过车联网实现海量数据的获取、传输、存储与计算;另一方面,基于车联网大数据的分析与发掘,实现更智能高效的安全驾驶。

物联网向着频谱领域延伸,同时为频谱领域所面临的挑战提供解决方案。电磁频谱已成为信息时代不可或缺的国家战略资源,《国家无线电管理规划(2016-2020年)》指出电磁频谱是国有并具战略意义的稀缺资源。随着天地一体化信息网络、航空飞行器、电磁频谱空域作战等领域的迅猛发展,电磁空间面临着3个挑战。一是频谱资源日益紧缺,2012年,美国提出了频谱危机的概念,据思科公司统计预测,全球月移动数据业务量将从2012年的0.9 EB快速增长到2020年的30.6 EB^[4],而频谱资源供给仅增长约1倍。同时,随着气球、飞艇、飞机、滑翔机、旋翼机、直升机、扑翼机、倾转旋翼机等航空飞行器的迅猛发展,频谱资源紧缺性还向着空、天域发展。二是频谱安全日益严峻,伪基站、黑广播、卫星电视干扰器、北斗干扰器、无线电作弊装置等严重危害国家通信安全、航空安全、重大活动安全、人民群众财产安全。2017年,查处“伪基站”案件725起、“黑广播”案件3054起,各类干扰民航、铁路无线电专用频率案件2500余起^[5],这些非法无线电活动已对空域频谱安全(如民航)造成严重影响,而无人机等航空器的非法用频以及“黑飞”等导致频谱安全形势更加严峻。三是频谱对抗日益激烈,2015年12月,美国发布了《电波制胜:重拾美国在电磁频谱领域的主宰地位》报告,指出失去制电磁权,必将失去制海权、制空权^[6]。随着无人机群等航空飞行器在未来作战中作用的日益凸显,频谱对抗将日益激烈。

为了应对这3个挑战,急需将频谱大数据海量获取、分析认知、智能利用交叉融合在一个体系中。本文正是瞄准这样一种交叉融合,提出了智能频联网新概念。

2 智能频联网的基本概念与体系架构

2.1 智能频联网的基本概念

顾名思义,智能频联网(IS-IoT, intelligent spectrum-Internet of things),就是桥接频谱监测与利用设备,利用先进的人工智能技术,实现频谱资源的高效监管与利用。从物的终端来考虑,主要指频谱设备。频谱设备可以分为2类:频谱监测设备(SMD, spectrum monitoring device)和频谱利用设备(SUD, spectrum usage device)。SMD负责监测或感测各种频段的状态,而SUD则利用频谱作为媒介传输数据。在传统的1G/2G/3G/4G移动无线通信系统中,SMD和SUD通常是相互分离的,因为频谱使用的是固定的授权频段,蜂窝网络中的频谱分配通常是预定义的。5G蜂窝网络存在着1000倍移动流量增长的挑战^[7],为解决这个问题,全球提倡消除对频谱资源利用的限制,向资源动态共享转变,这被认为是一个有前景的无边界频谱和无边界网络,需要将所有监测与用频设备连接在一起,获取海量的电磁频谱空间状态信息、频谱资源需求信息等。仅仅连接在一起还是远远不够的,还需要引入人工智能理论技术,对海量数据进行认知处理,使频谱资源的动态利用与监管更加智能、更加优化。因此,智能频联网有2个重要特征。

1) 异构连接:2类多样的频谱设备连接在一起,2类主要是指频谱监测设备与频谱利用设备,而每一类频谱设备形态多样。通过联网SMD,可以获取海量频谱信息,包括专用频谱监测设备和嵌入式频谱传感器(如智能手机、平板电脑和车辆传感器),这些传感器可以用专用方式部署或随机调用,以执行特定的频谱监测任务。通过联网SUD,可以将频谱资源需求信息集中处理并可视化。通过联网SMD和SUD,可以将频谱监测与管控有机地融合成一个整体。

2) 认知决策:通过频谱云、数据分析、认知计算、智能决策等技术,实现频谱大数据的价值挖掘与频谱资源的高效管控,提供多种多样的频谱服务与频谱秩序维护。

2.2 智能频联网体系架构

传统的物联网分为3层:感知层、网络层、服务层。本文基于传统的物联网分层结构,提出了智能频联网体系架构,以支持未来智能频谱感知与管控。智能频联网体系架构在传统的物联网第二层与第三层之间增加了一层,即认知决策层,对应的具

体实体是频谱云，如图 1 所示。

1) 频谱多域感知层

通过异构多样的 SMD 传感器或监测设备（包括专业频谱监测设备和群智频谱感知模块），感知电磁频谱空间的状态或电磁频谱环境，包括噪声、频谱空穴、干扰源等，形成频谱地理数据库。

2) 频谱数据传输层

该层任务分为 2 类，一是自下而上将频谱感知设备（SMD）获取的数据向频谱云（SC）汇聚，继而将频谱云（SC）决策控制指令向频谱服务层的用频设备（SUD）发布；二是将 SUD 的用频需求和评估信息返回 SC，继而 SC 反向控制 SMD，实现面向任务的频谱感知，从而实现闭环自主调整。

3) 频谱认知决策层

频谱云是 SMD 和 SUD 之间的桥梁，更重要的

任务是实现频谱大数据的认知分析、频谱资源的智能管控以及频谱服务质量的评估。认知分析中包括 2 个挑战：一是频谱大数据的价值挖掘，二是电磁频谱空间新机理的发现，主要研究内容包括群智频谱感知数据分析、主动频谱感知数据分析、频谱地理数据库构建与分析。频谱资源的智能管控是以频谱大数据认知分析为基础，实现智能决策，主要研究内容包括分层频谱决策、虚拟频谱决策与安全频谱决策。频谱智能服务质量评估是实现智能决策不可缺少的一个环节，没有反馈是不可能实现智能的，主要研究内容包括设备级服务质量评估与系统级服务质量评估。

4) 频谱智能服务层

通过频谱功能虚拟化，实现对用频的远程控制以及频谱服务质量数据的反馈^[8]。

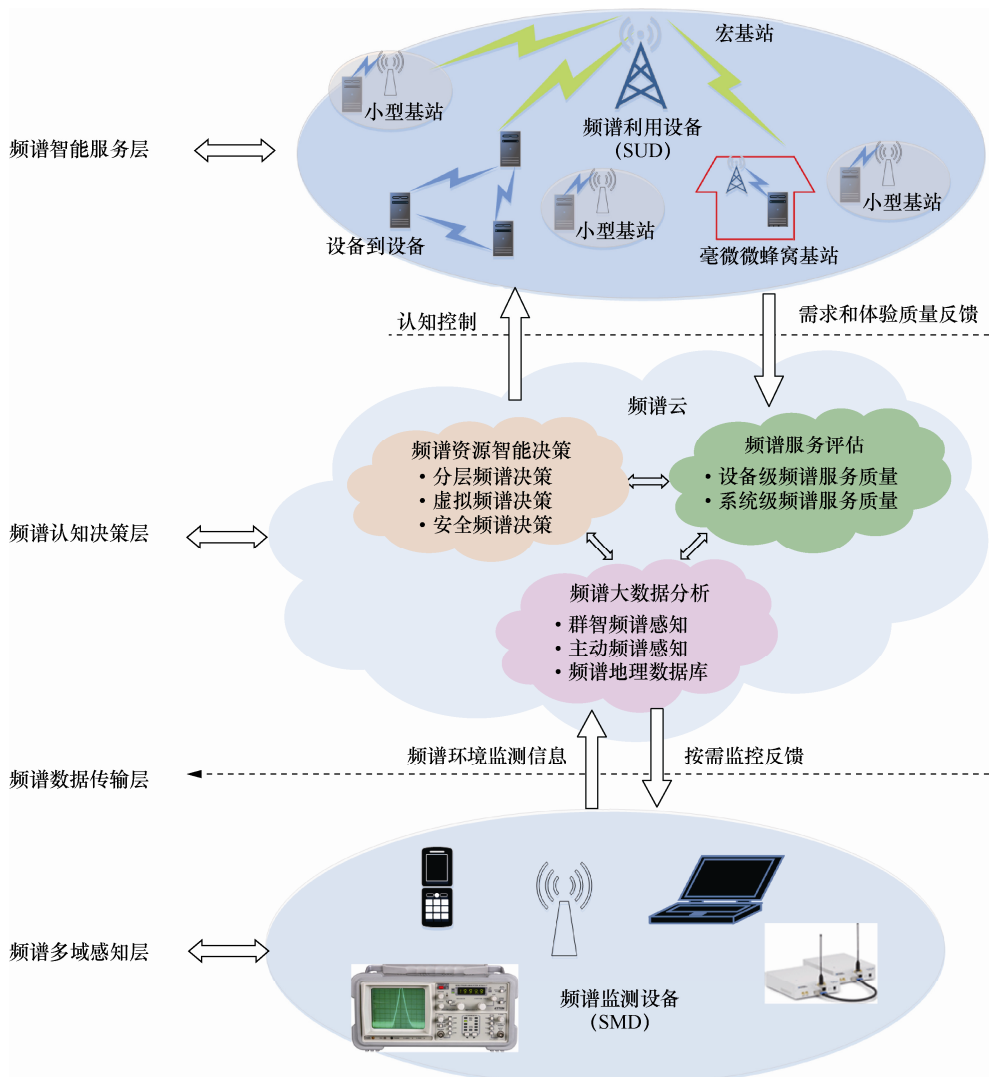


图 1 智能频联网体系架构

3 智能频联网的前沿技术研究

智能频联网研究是认知科学、人工智能、频谱域专业的交叉融合，将产生许多创新性的前沿技术研究课题。本文主要突出 3 个方面：三维立体多域频谱感知、频谱大数据图化预测以及分层分布虚拟式频谱决策。

3.1 三维立体多域频谱感知

频谱感知隶属于物理层和 MAC 地址技术，相应地存在物理层的频谱感知算法和 MAC 地址层的频谱感知策略。经典的频谱感知算法主要有 3 种：匹配滤波检测、能量检测、循环平稳特征检测。由于经典算法都存在相应的缺陷或不适用的场景，一些对经典算法的改进方法不断地被提出。同时，出现一些针对特定的场景或应用的新型感知算法。然而这些理论方法还难以适应向空域发展的需求，或时域与频域二维的频谱感知尚未与空间频谱采样紧密联系起来。时间、频率与空间构成了三维，而空间又包含了经度、纬度和高度，是立体的感知，同时辐射源也是电磁频谱空间变化的“风眼”，其行为变化对电磁频谱空间状态的影响极大。三维立体的频谱同步感知以及与辐射源密切相关的多域感知交织在一起，形成了频谱感知的新前沿——三维立体多域频谱感知，例如，三维立体辐射源定位。定位观测量是指从接收信号中提取的一些含辐射源位置信息的特征量，如到达时间（TOA, time of arrival）、到达角度（AOA, angle of arrival）、到达时间差（TDOA, time difference of arrival）、到达频率差（FDOA, frequency difference of arrival）等。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，将给一系列定位方法带来新的自由度与创新。

3.2 频谱大数据图化预测

频谱数据将成为未来无线网络中重要的大数据类型^[9]。多维立体定位示意如图 2 所示，如果将给定的地理空间感兴趣区域作为一个图像帧处理，并且每个光谱数据对应一个像素，那么随着时间的推移，可以获得一个 3D 频谱视频。这种演变类似于数字宇宙中无处不在的监控视频，频谱视频数据构成了频谱大数据。

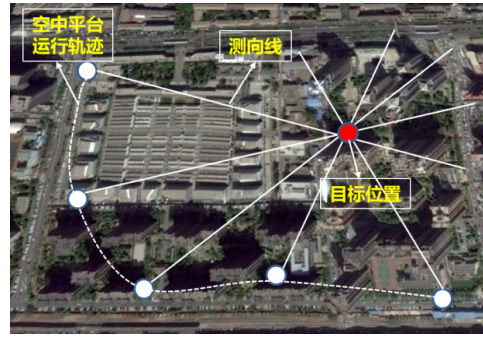


图 2 多维立体定位示意

更具体地说，如果进一步使用 1 B 来表示 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的地理空间网格中的频谱数据， 100 kHz 的分辨率频带和 100 ms 的时隙，一周后，总数据大小为 $0\sim 5\text{ GHz}$ 的频带和 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$ 的地理空间面积可以达到

$$\begin{aligned} & 7 \times 24 \times 3600 \times \frac{1}{100} \times \\ & \frac{5\text{ GHz}}{100\text{ kHz}} \times \frac{100\text{ km} \times 100\text{ km}}{100\text{ m} \times 100\text{ m}} \times 1\text{ B} \\ & = 3.024 \times 10^{17}\text{ B} \\ & = 3.024 \times 10^5\text{ TB} \end{aligned} \quad (1)$$

相比之下，Facebook 是著名的大数据范例之一，每周大约吸收 $3.5 \times 10^3\text{ TB}$ 数据量。Facebook 数据量在同一时间段内不及上述频谱数据量的八十分之一。此外，频谱状态数据量随着持续时间、频率范围和感兴趣的空间尺度以及每个维度中的相应分辨率而增长。此外，如果考虑间接光谱数据，如用户数据、地形数据、气象和水文数据，数据量将会变得更大。

频谱数据预测算法主要有面向二维的矩阵完成以及面向三维的张量生成。首先，将时—频—空频谱数据建模为频谱图像时间序列，以每一帧图像作为一个时间切片，基于时、频、空多维度的相关性，通过统计推理设计“以图推图”的图像化频谱预测技术，如图 3 所示。

3.3 分层分布虚拟式频谱决策

在未来的天地一体化信息网络中，大规模 SUD 中将存在差异化的需求和频谱使用优先级。以 2 层毫微微蜂窝网络为例，一般认为宏观用户的优先级高于毫微微用户，并且首先要保证他们的需求。因此，需要针对动态和复杂环境中的大规模异构和分层网络进行更智能的多层频谱资源优化^[10]。在数学上，可以应用分层决策模型（例如，以 Stackelberg

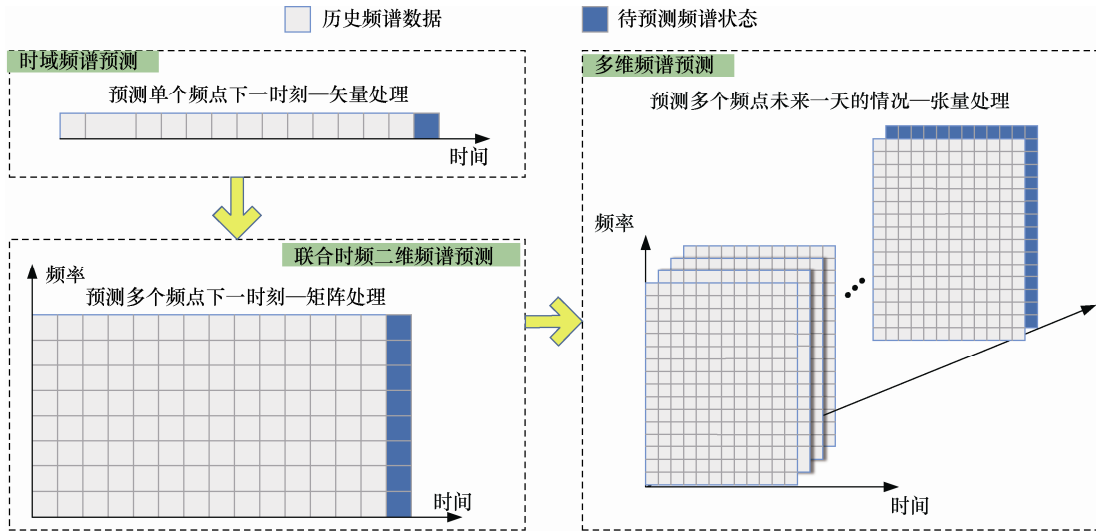


图 3 时、频、空多维空间中的频谱数据预测

博弈为特征的领导者—跟随者模型)来描述层之间的复杂和耦合关系。每个 SUD 都是决策者,并根据其优先级,由频谱需求和网络状态自主决策。与较低层相比,较高层的 SUD 具有较高的频谱使用优先级,也就成为领导者(leader)。同一层中的 SUD 考虑混合信息,包括来自上一层的指令与下一层的信息和来自信息库的可用多维上下文信息(如频谱状态、信道状态、位置和能量等)。为了捕捉复杂的环境和网络状态,决策者可以在动态场景中利用在线学习和统计学习等机器学习方法,使决策更加灵活、高效和智能。

在所提出的智能频联网体系结构中,每个物理 SUD 与云平台连接并映射到特定的虚拟认知代理(即虚拟频谱设备(VSD))中。图 4 为在 2 层小型基站网络中的虚拟分层频谱决策示意,物理实体只需要执行相应虚拟实体的反馈决策。与物理实体做出的决策相比,虚拟决策中最显著的差异是数据、信息和知识的使用不再消耗通信资源,这可以缩短决策周期并提高系统效率,特别是在高密度网络场景中。同时,每个虚拟的 SUD 都被认为是一个智能体,相互之间进行大量的数据、信息与知识交互,各自完成决策,达到系统最优。主要理论方法有分布式优化与博弈理论,虽然在频谱云中进行决策,但采用的是并行的分布式决策。当然,当系统规模不大时,也可用集中式决策方法。

频谱云中的信息数据库和频谱池能够及时收集和更新与 SUD 的频谱状态(空闲或占用)、用户需求 and 上下文有关的信息。受益于海量数据,尽管

存在相当大的不确定性和不准确性,但频谱云中的信息库可以通过数据挖掘来分析和发现 SUD 的行为。建立维护安全的无线生态系统信用框架至关重要,每个 SUD 都应遵循频谱管理员制定的政策。频谱云根据其频谱使用的历史记录为每个 SUD 分配一个信用评分,违反规则的人将被处罚并记录在信息数据库中。该信用记录可以为正常和恶意 SUD 分类提供有价值的信息,这有助于频谱管理人员识别潜在威胁并保持通信安全。

4 智能频联网的应用领域

智能频联网具有广阔的应用场景,如频谱资源共享、频谱秩序安全与频谱作战。

4.1 频谱资源共享

频谱资源是国家战略基础资源,与以往的水资源、土地资源等具有同等的重要地位。随着天地一体化信息网络的迅猛发展,“频谱共享”已成为解决供需矛盾的重要手段。当前频谱资源危机除了通过 IMT 划定开放新的频段外,还提高现有使用频段的动态利用率。为解决频谱资源供需紧张的问题,可以通过频谱在时间、空间等维度实现复用共享。而频联网通过依托频谱云层技术对频谱进行状态分析、频带规划、智能管控,进而实现频谱的高效利用。可见天地一体化信息网络建设与运营具有重要意义。

4.2 频谱秩序安全

由于电磁频谱空间的开放性,使无线电秩序的高效管理难度加大,存在许多安全隐患,例如

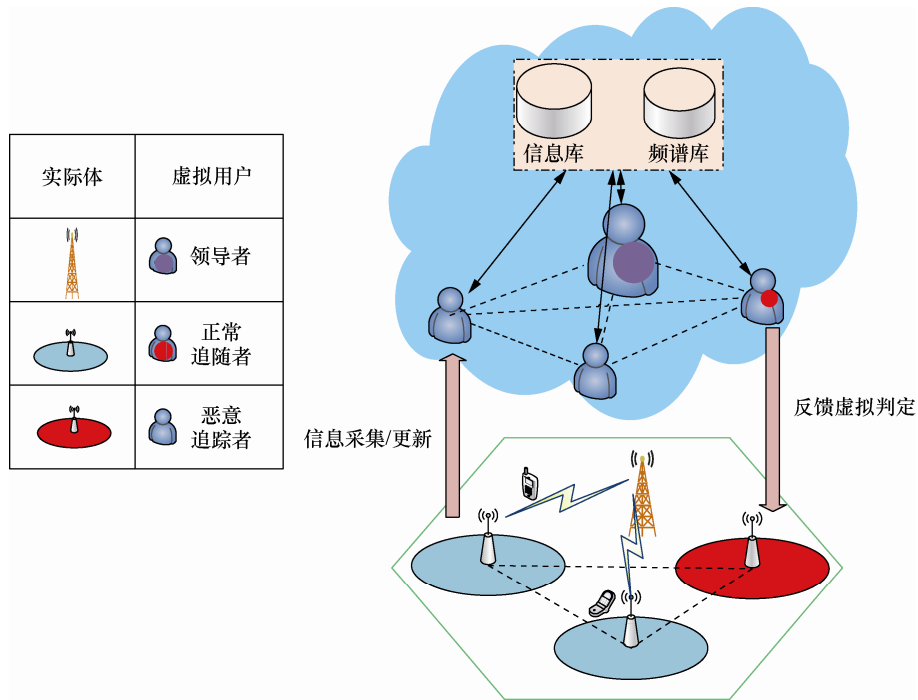


图 4 分层分布虚拟式频谱决策示意

伪基站、黑广播、干扰源等。随着认知无线电技术的发展，又出现了新的安全问题。1) 模仿主用户攻击。正常通信模式下，当认知用户感知到主用户存在时会退出当前信道，以防止对主用户通信造成干扰。而信道中攻击者通常会在主用户空闲状态下伪装成主用户来发送信号，以此占领该频段致使其他认知用户无法正常访问。2) 干扰认知用户。认知节点需要准确感知测量、接收控制信息，从而获得主用户忙闲信息。攻击者会通过干扰认知用户使其无法正常感知主用户状态，进而诱导认知用户发送信号，影响主用户正常工作。3) 攻击频谱管理员。频谱管理员类似现实生活中的交通指挥中心管理员，它掌管着频谱的调度和使用。一旦管理员发送的调度策略被攻击者截获，就可能导致认知用户接入策略数据库这一过程受阻，同时也可能会发送伪策略给认知用户，更严重的情况下将会造成无线通信系统的瘫痪。智能频联网可在很大程度上解决上述存在的问题，为国家无线电管理局、监测中心以及各省通信管理局和监测中心服务。

4.3 频谱作战

随着信息技术的飞速发展，电子对抗等新兴信息化作战成为未来作战的主攻方向。现在，无论是从作战装备还是到作战系统，都对电磁环境

有着较强的依赖性，谁拥有电磁频谱领域的控制权，谁就掌握着未来战争的主导权。智能频联网对于频谱作战而言，可以为电磁频谱防御和电磁频谱进攻服务。电磁频谱防御侧重保护我方正常的作战通信；而电磁频谱进攻则是通过我方的电子设备对敌方设备进行干扰、入侵和打击，主要有以下几种方式，例如，伪装成主用户发送同频段的信号对敌方用频进行干扰，依托频联网系统渗透到敌方通信网中窃取敌方的军情信息，攻击敌方频谱管理中心，导致敌方频谱策略发送异常，瓦解崩溃敌方通信系统等。

5 结束语

本文从电磁频谱领域面临的 3 个挑战出发，提出了智能频联网的概念、特征、体系架构，并具体阐述了频谱多域感知层、频谱数据传输层、频谱认知决策层与频谱智能服务层这 4 层体系架构的结构与功能。探讨了智能频联网所面临的 3 个主要前沿技术研究课题：三维立体多域频谱感知、频谱大数据图化预测、分层分布虚拟式频谱决策。介绍了智能频联网的 3 个应用方向，包括频谱资源共享、频谱秩序安全、频谱作战。智能频联网为物联网的发展提供了一种新范式，也为频谱资源供需矛盾的解决提供了新的方案。

参考文献：

- [1] ASHTON K. In the real world , things matter more than ideas[J]. RFID Journal, 2009.
- [2] WU Q H, DING G, DU Z Y, et al. A cloud-based architecture for the Internet of spectrum devices over future wireless networks[J]. IEEE Access, 2017(4): 2854-2862.
- [3] XU W, ZHOU H, SHEN X M, et al. Internet of vehicles in big data era[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(1) :19-35.
- [4] INDEX C V N. 2016–2021 White Paper: global mobile data traffic forecast update[R]. 2017.
- [5] 国家无线电监测中心.2017 年无线电管理十件大事[R].2018. National Radio Monitoring Center. Ten major events of radio management in 2017[R].2018.
- [6] 美国战略与预算评估中心.电波制胜：重拾美国在电磁频谱领域的主宰地位[R]. 2015. American Center for Strategic and Budgetary Assessment. The American center for strategic and budgetary assessment wins: regain America's dominance in the field of electromagnetic spectrum[R]. 2015.
- [7] MURRONI M, PRASAD R V, MARQUES P, et al. IEEE 1900.6b :sensing interfaces and data structures for dynamic spectrum access and other advanced radio communication systems spectrum sensing in advanced radio systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49 (12): 118-127.
- [8] MITOLA J, GUERCI J, REED J, et al. Accelerating 5G QoE via public-private spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5):77-85.
- [9] DING G, WU Q, YAO Y D, et al. Kernel-based learning for statistical signal processing in cognitive radio networks: theoretical foundations, example applications, and future directions[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(4):126-136.
- [10] ZOU Y, ZHU J, WANG X, et al. A survey on wireless security: technical challenges, recent advances and future trends[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 104 (9): 1727-1765.

[作者简介]



吴启晖（1970-），男，南京航空航天大学教授、电子信息工程学院副院长，教育部长江学者特聘教授，国家百千万人才工程入选者，工业和信息化部通信科技委员，IET Fellow，江苏省有突出贡献专家，江苏省 333 工程中青年领军人才，中国通信学物联网专业委员会、无线电管理专业委员，中国电子学会通信分会委员、通信分会物联网专业委员会副主任，主要研究方向为认知无线电、电磁频谱空间、天地一体化信息网络。



王然（1990-），男，南京航空航天大学硕士生，主要研究方向为认知物联网与协同认知动态系统。



黄振炎（1995-），男，南京航空航天大学硕士生，主要研究方向为 FPGA 和认知物联网方向。