



# 我国频谱高速公路系统研究

周钰哲

(中国电子信息产业发展研究院无线电管理研究所, 北京 100846)

**摘要:**在无线电频谱资源供需矛盾不断深化的背景下,欧美国家加快研究高效的频谱管理政策和利用技术,其中美国最早提出了“频谱高速公路”概念。在借鉴国内外频谱管理研究成果的基础上,定义了我国频谱高速公路的基本含义和特征,阐述了主要应用领域,进而提出了我国频谱高速公路的系统功能架构、网络组织架构和对应的系统工作流程,并提出了构建我国频谱高速公路系统的相关建议,展望了建设过程中需要应对的问题。

**关键词:**频谱高速公路;系统架构;频谱共享;频谱切换;频谱市场

**中图分类号:** TN915.9

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2017006

## Research on the state's spectrum super-highway system

ZHOU Yuzhe

Radio Management Institution, China Center for Information Industry Development, Beijing 100846, China

**Abstract:** Under the background of profound contradiction between supply and demand of radio spectrum resource, the American and European countries are speeding up the research of efficient spectrum management policy and application technology. USA puts forward the concept of spectrum super-highway for the first time. On the basis of domestic and abroad research achievements in spectrum management, the basic meanings and characteristics of our state's spectrum super-highway were defined, its main application fields were indicated, and then the system function architecture, network structure, and the corresponding system working procedures were proposed. In addition, related suggestions for our state's spectrum super-highway system establishment were put forward, and outlook of issues in the process of construction was also provided.

**Key words:** spectrum super-highway, system architecture, spectrum sharing, spectrum handoff, spectrum market

### 1 引言

随着无线电技术的飞速发展和无线电业务的广泛应用,频谱资源稀缺与应用需求的巨大矛盾日益突出。在国际频谱权益不断争夺、频谱需求不断扩大化的背景下,美国作为全球领先的无线电技术应用国家,率先提出了“频谱高速公路(spectrum super-highway, SSH)”概念,旨在从国家战略的高度重视无线电频谱资源的高效利用问题<sup>[1]</sup>,

通过创新频谱管理手段,解决相当长一段时期内的频谱供需矛盾。

当前,我国正处在推动“中国制造 2025”“宽带中国”“互联网+”等战略实施的重要时期。这些国家战略的实施对频谱的需求已从传统意义上的公众移动通信扩大至物联网、工业互联网等多个新兴领域。为保证国家重大战略的有效实施,必须从我国国情和频谱管理的实际出发,通过改革频谱管理、使用模式,科学规划和研究构建我国的

频谱高速公路。频谱高速公路系统可实现多种业务、广泛区域内的大量用户通过频谱感知、频谱共享、频谱市场等技术和手段,利用有限的频谱资源完成高速率的信息传输,并相应地简化频谱监管工作。这将有利于引领无线电技术的创新应用,消除地区数字鸿沟,促进电子信息产业发展,推动经济转型升级,增强国家核心竞争力<sup>[2]</sup>。

## 2 国外研究现状

为抢占新一轮国际竞争的战略制高点,各国纷纷出台相关的发展战略、计划,通过政策指导激励、直接投入等措施,加快移动网络覆盖和提速,引领新科学技术和产业革命。作为无线电通信唯一载体的频谱资源的战略重要性愈发显现。主流国家均加大了对无线电频谱高效管理和利用技术的研究和投入。

### 2.1 美国研究现状

2010年6月,题为《释放无线宽带革命》<sup>[3]</sup>的美国总统备忘录建议在2020年之前回收500 MHz频谱用于无线宽带接入。然而,美国国家电信和信息通信管理局(National Telecommunication Industry Administration, NTIA)在推行这一计划的过程中发现成本高、耗时长、协调难,使该计划的可操作性十分低。为弥补现行政策的不足,2012年7月,美国总统科技顾问委员会(the President's Council of Advisors on Science and Technology, PCAST)提交报告<sup>[4]</sup>,首次提出了“频谱高速公路”的概念。

美国确定选取2 700~3 700 MHz联邦频谱建立第一个频谱高速公路,通过转变频谱管理手段,采用新的频谱结构,实施新的无线电系统架构,以便不同无线电业务在此频段内形成动态共享,从而极大提高频谱的使用效率<sup>[5]</sup>。随后,美国在2014年召开了专题讨论会,确定采用一种频谱资源管理网络——频谱接入系统实现小小区/微小区的低功率二次接入或一般授权接入。2016年4月,谷歌在美国进行了3 550~3 650 MHz频谱许可共享接入技术试验,借助路灯杆和其他建筑物部署天线提供无线宽带接入服务<sup>[6]</sup>。

### 2.2 欧盟研究现状

2011年,欧盟频率管理工作组提出了授权共享/许可共享接入(authorized shared access/license shared access, ASA/LSA)<sup>[7]</sup>方案,实现未用频谱的动态共享。2012年,欧盟提出“无线电频谱政策计划”,目标是通过协商分享的方法带来更大的移动网络容量,催生新的市场,以重新取

得移动和数据方面的全球产业领导地位。该计划确定在2017年左右可通过一般授权机制接入1 200 MHz带宽的频谱,在2020年确保每个欧洲人拥有高速和超高速宽带。随后,欧盟在全区范围内定义有益共享机会,并采用共享频谱接入权利作为面向全欧频谱资源共享接入的通用框架。此外,为促进频谱共享的实施,欧盟制定了允许无线局域网与雷达共享5 GHz频段的标准,还在部分地区进行了认知无线电技术通过位置定位信息来识别广播“白频谱”<sup>[8]</sup>的试验。

## 3 我国频谱高速公路的内涵

为应对经济社会发展和国防建设中频谱资源需求不断扩大的要求,有效缓解频谱资源紧张的矛盾,我国应积极借鉴国外先进的频谱管理经验,抓紧研究频谱资源高效管理和应用技术,构建适合我国国情的频谱高速公路系统。本节定义频谱高速公路的相关内涵。

### 3.1 基本含义和特征

早期的用频模式类似于公路系统中每种车辆独占一条道路,各类车辆彼此互不相干。而频谱高速公路系统类似于高速公路系统,车道并行、相互关联。频谱高速公路不单指加宽的“车道”,即一段大带宽频谱,还应包括一系列“道路交通规则”,即频谱分配、用户接入、共享等协议。频谱高速公路系统(spectrum super-highway system, SSHS)是指从国家战略出发,以缓解频谱供需矛盾、提高频谱使用效率、支撑经济社会发展为目标,在一个或多个大带宽的无线电频谱上,采用用户分级和动态系统准入等控制机制,实现不同业务、不同用户在空间、时间、频率等多个维度上高速、有序、高效共享频谱资源的智能管理系统。在不清除频段内原有用户、不对拥有执照的原用户产生有害干扰的前提下,通过频谱高速公路系统这种频谱管理节点可授权其他用户按规则接入相应频谱,实现频谱共享共用。频谱高速公路应具有以下主要特征。

#### (1) 大带宽划分(larger bandwidth division)

大带宽的频谱划分有利于容纳各种兼容性应用,并适应于各种工作带宽,实现多个业务、多个用户共享同一频段,适应不同用户的需求。同时,也是实现数据高速传输的基础,有效确保较高的用户服务质量。

#### (2) 频谱用户分级(spectrum user classification)

频谱高速公路系统面向的用户包括原有授权用户以及符合频谱高速公路框架协议的用户。由于各类频谱用户



的需求、数量和价值不同,因此频谱高速公路系统对不同的用户通过不同的授权进行区分,以实现各类用户根据优先级共用频谱资源。

### (3) 授权共享(authorized spectrum sharing)

通过对共享用户按优先级分级授权,实现不同业务、不同用户多维度动态共享频谱高速公路的频谱资源,既确保了原授权用户继续使用频段的权利,同时又给新用户提供了新的、更多的频谱接入机会。授权共享保障了频谱接入的有序性,防止用户间的干扰。

### (4) 无缝切换(seamless spectrum handoff)

通过动态共享授权,确保在每个频段上的用户接入或终止频谱使用时,其他用户能够根据授权无缝收缩或扩展使用相关的频段,防止产生过多的频谱空洞。这种无缝切换的频谱使用方式极大提高了频谱整体利用率,实现了频谱高效利用。

## 3.2 主要应用领域

频谱高速公路系统的建设应面向两大应用领域,即公网和专网应用。这些领域内的业务技术产品较为成熟,商业化运营时间较长,通过建设频谱高速公路系统,可提升行业运行效率,创造更大价值。如图1所示,根据应用的时间和空间维度的动态性特征<sup>[9]</sup>,频谱高速公路可以解决公网用户无线宽带的瓶颈问题,为用户提供高清多媒体通信、交互式娱乐、实时虚拟现实等服务。在专网方面,频谱高速公路可服务于公共安全、交通运输、抢险救灾、大型活动、协同作业等公共事业以及移动办公、信息传输等商业活动。

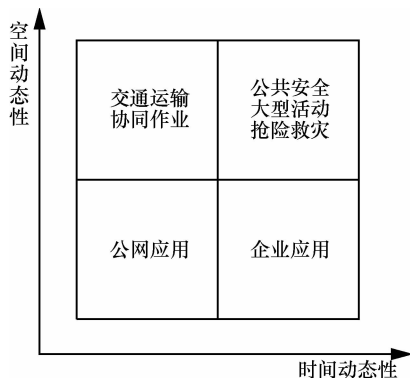


图1 应用的时空维度特征

## 4 我国频谱高速公路系统架构

频谱高速公路系统由频谱接入管理单元及其关联的

数据子系统等互联构成。该频谱接入网络采用认知无线电<sup>[10]</sup>、软件无线电<sup>[11]</sup>、频谱动态共享<sup>[12]</sup>和抗干扰等先进技术,通过环境感知、信息交互、决策生成、调整执行等方式完成频谱共享策略,实现不同行业、不同用户对无线频谱资源高效、有序、动态利用。本节基于国内对频谱高速公路的已有研究,从系统功能架构、网络组织结构和系统工作流程3个方面初步构建我国频谱高速公路系统。

### 4.1 系统功能架构

我国频谱高速公路系统应当由无线环境数据库、频谱数据采集子系统、频谱数据处理子系统和频谱接入管理子系统构成,如图2所示。

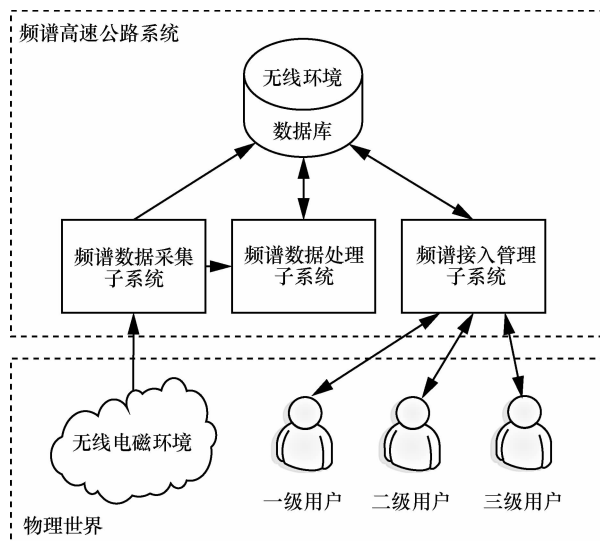


图2 频谱高速公路系统功能架构

#### (1) 无线环境数据库(radio environment database, RED)

包含本地频率数据库、台站数据库、设备数据库等、地理信息数据库、电磁兼容信息库、电波传播模型库、规则库等。此外,无线环境数据库还与各级无线电管理数据库、监测数据库以及政策法规数据库互联互通,为最佳频谱接入决策提供高效支撑。

#### (2) 频谱数据采集(spectrum data acquisition, SDA)子系统

由不同性能的感知器和感知管理模块构成,负责无线终端定位、数据采集和汇集。感知器采集的数据主要有:发射/接收机的特性参数、位置信息和活动情况,干扰情况,信号覆盖范围等。感知管理模块周期性地配置和管理感知器参数,启动感知过程。

#### (3) 频谱数据处理(spectrum data processing, SDP)子

系统

通过结合频谱数据采集子系统新采集到的数据和无线环境数据库中的原有数据,通过一定算法,生成新的无线环境数据,并传输到无线环境数据库存储,实现信息交互。该子系统通过计算,更新设备列表、频谱状态数据、干扰分布信息和相应的地理位置信息等,并将这些信息提供给频谱接入管理系统作为决策参考。

#### (4) 频谱接入管理(spectrum access management, SAM) 子系统

由频谱决策模块和接入控制模块组成,负责做出频谱接入决策和决策的执行,达到频谱资源的高效利用和有序共享。频谱决策模块根据无线环境数据库中的最新信息和预定义的规则做出合理决策,在避免对已有高优先级用户的干扰的同时,满足待接入用户的通信需求,提高系统资源利用率。接入控制模块执行分级用户网络单元中用户的注册、鉴权和执照发放,完成频谱接入、参数修改和频谱切换等过程。

### 4.2 网络组织结构

我国频谱高速公路系统应当是一种集中控制式的网状网络。该网络采取类似于蜂窝网的覆盖模式,如图 3 所示。

本地无线环境数据库(local RED)存储了频谱数据采集子系统采集的以及经频谱数据处理子系统处理过的数据。这些数据主要包括本地台站数据信息、干扰保护列表、干扰场强分布、本地电波传播模型、已经接入系统的用户

数据等本地信息以及从上一级无线环境数据库获得的可用频段、接入价格、频段操作规则、政策法规等全局信息。频谱接入管理系统通过 local RED 提供的这些信息做出最佳的频谱接入决策。

区域频谱高速公路系统(regional SSHS)处理、整合、存储跨区域的频谱状态数据,协调跨区域用户的频谱使用。全局频谱高速公路系统(global SSHS)则处理、整合、存储全局的频谱状态数据,协调分配整个系统内的频谱资源。本地频谱高速公路系统、区域频谱高速公路系统、全局频谱高速公路系统通过相互交换信息,及时更新频谱的使用/空闲状态,做出最优的频谱接入决策。

### 4.3 系统工作流程

我国频谱高速公路系统包含 3 个主要工作流程,即频谱感知(spectrum sensing)、频谱接入(spectrum access)和频谱切换(spectrum handoff)。

#### (1) 频谱感知流程

频谱感知是频谱高速公路系统实现科学频谱共享的基础。频谱数据采集子系统首先按照一定规则和配置,采集无线电磁环境数据。如果采集到的是全新的无线电磁环境数据,则上传到无线环境数据库中;否则,由频谱数据处理子系统读取无线环境数据库中已有的信息,结合新采集的数据,经过计算,产生新的无线电磁环境数据,并更新无线环境数据库。具体流程如图 4 所示。

#### (2) 频谱接入流程

通过频谱决策和接入控制可以为各级用户动态分配

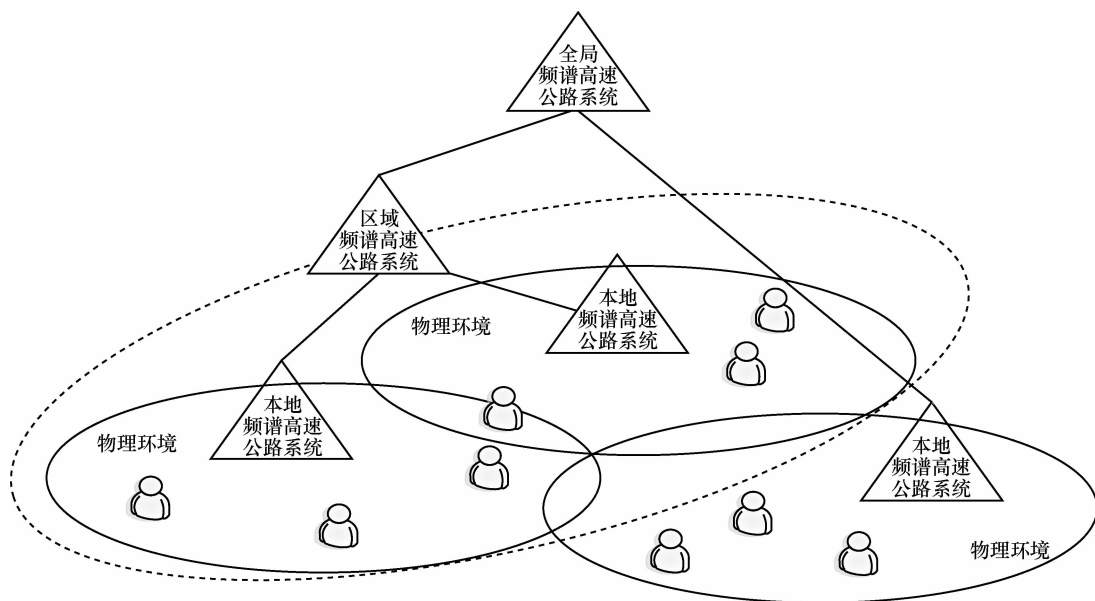


图 3 频谱高速公路网络组织结构

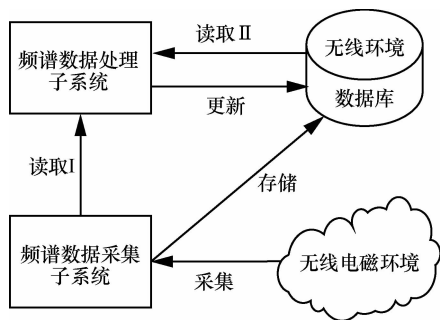


图4 频谱感知流程

最合适的频谱资源,提升系统资源利用率。首先,用户向频谱接入管理系统申请频率资源;然后,频谱决策模块根据用户参数和无线环境数据库中的信息求解出最合适的频率分配方案,并交由接入控制模块指导用户接入系统;最后,频谱接入管理系统将用户接入后的频谱使用参数上报至无线环境数据库进行更新。具体流程如图5所示。

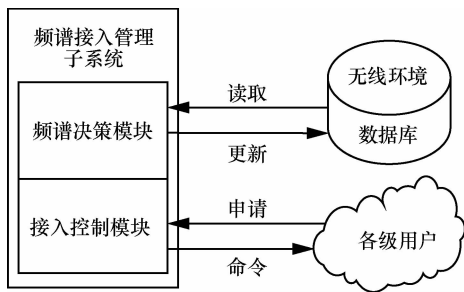


图5 频谱接入流程

### (3) 频谱切换流程

频谱切换<sup>[13,14]</sup>是指当高优先级用户需要占用频段资源时,通过降低次优先级用户服务质量 (quality of service, QoS),保障高优先级用户的通信需求,平衡系统资源分配。首先,高优先级用户向频谱接入管理系统申请频率资源。然后,频谱决策模块查询无线环境数据库,若频率未被占用,则按频谱接入流程操作;否则,查询是否有适合次优先级用户通信的其他频率资源,进而由接入控制模块命令次优先级用户通过停止发射或降低发射功率、转移到其他频段通信等方式让出被申请频率资源。之后,由接入控制模块指导高优先级用户接入系统。最后,频谱接入管理子系统将改变后的各级用户的频谱使用参数上报至无线环境数据库进行更新。具体流程如图6所示。

## 5 构建我国频谱高速公路建议

构建我国频谱高速公路系统,需正确认识当前我国频

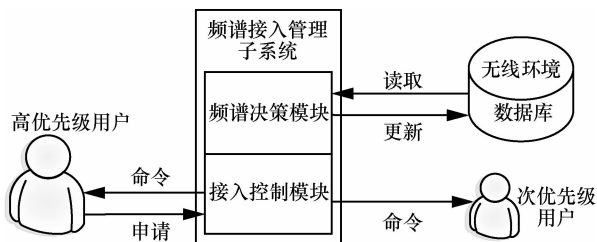


图6 频谱切换流程

谱资源管理面临的新问题:一是独占频谱资源闲置浪费,各部门管理协调难度大;二是传统和新兴用频行业需求持续扩大,频谱资源供需矛盾更加突出;三是频谱资源价值没有充分体现,技术创新动力不足。为有效解决上述问题,应当把构建频谱高速公路战略作为解决频谱资源供需矛盾的重要举措,深化普惠安全发展的有效途径,推动产业结构升级的重要保障,提升国际科技竞争力的重要引擎。为保障我国频谱高速公路系统架构的实现,相应的政策建议如下。

### 5.1 调整频谱划分规则

宽带化、低功率是未来无线通信发展趋势,频谱高速公路的理念就是将多个独立使用的小频段整合成共享使用的大频段<sup>[15]</sup>。通过表1的比较,将原有的窄带划分转变成大频谱带宽基础上的动态频谱共享模式,将频谱的使用作为一项集体活动来替代个体活动,为未来的新无线宽带技术创新提供足够的资源保障,进一步提升各种宽带无线通信业务的兼容性,有效减少干扰,为动态频谱共享提供可行性支持。

表1 频谱管理模式的比较

| 类别   | 传统模式      | 频谱高速公路模式 |
|------|-----------|----------|
| 频谱划分 | 窄带        | 大带宽      |
| 频谱利用 | 独占、专享     | 动态、共享    |
| 承载能力 | 单一用户或业务   | 多样化用户和业务 |
| 性能平衡 | 可靠性强,有效性低 | 频谱高效利用   |

例如,美国频谱高速公路计划的新频谱分配规则一般以百兆赫兹为单位,通过功率控制、动态频谱共享、微蜂窝<sup>[16]</sup>等技术,增强频谱的承载能力。此外,新频谱分配规则也将为设备商研制具备低速率、低功率特点的次级接入设备提供指导,激励相关部门和企业在技术研发、设备研制和应用试点等方面的投入,促进技术创新和产业链发展。

### 5.2 改变频谱接入方式

频谱高速公路系统要求对不同类型的无线电业务和设备实行有序管理。频谱资源的高效利用是以干扰可容忍

为前提条件的。这就需要转变传统的频谱接入与管理方式,针对不同用户制定一系列频谱接入、切换、转变、退出等标准规则,实现在有序基础之上的动态频谱共享。参考美国频谱高速公路的用户主体设定,我国频谱高速公路系统对用户的分级见表 2。我国的用户分类更为广泛,接入方式更加科学,以实现对不同等级的用户接入进行有效和平衡管理。例如,高级和次级用户需在无线环境数据库进行预先登记。高级用户在实际使用频谱时具备对频谱的独占权。在保证其他用户不对高级用户造成有害干扰的前提下,充分考虑了应急通信的需求。次级和末级用户具有动态感知接入、实时频谱移动和切换、抗干扰等能力,管理者可能根据实际情况对其收取一定的费用。一旦发生频谱资源紧缺,则通过降低自身通信  $QoS^{[17,18]}$  来保证该系统内高一级用户的正常通信。

表 2 分级接入方式的分类

| 优先级 | 用户种类            | 用户数目  |
|-----|-----------------|-------|
| 高级  | 原用户、应急用户、国家要害部门 | 单个或少量 |
| 次级  | 一般国家机关和企业等用户    | 多个共存  |
| 末级  | 个人、家庭等消费群体      | 大量共存  |

5.3 提升技术研发水平

频段的特性在一定程度上决定了无线电系统的适用范围。例如,6 GHz 以下的低频段中包含的业务种类和用频单位较多,因此适宜通过频谱共享技术利用资源,但需要解决业务共存管理、协调困难等问题。同时,无线电通信技术的立体化、多元化、动态化发展趋势也将增加未来无线电系统的技术复杂性,因此积极开展相关技术的研发具有重要意义。

在频谱高速公路系统中,一方面可在有限的频谱资源和带宽上,通过高效的编码、复用、多址等技术单纯提升数据速率和系统容量;另一方面,还可通过利用动态频谱共享、干扰和拥塞处理、功率控制等技术,提升无线电业务、用频单位利用频谱资源的灵活性、实时性,实现多种用户的高速率、低延时信息传输,即利用技术手段解决无线电系统的监管与相互协调<sup>[19]</sup>的复杂性问题。因此,频谱高速公路系统的构建必须以支持促进无线通信系统物理层、接入层和网络层以及先进计算等技术的研究与发展为前提。其中,在一定计算复杂度的前提下,提升频谱高速公路系统的感知可靠性、分配有效性以及决策实时性的技术将成为该领域的研究重点。

5.4 转变资源配置政策

我国通过频谱资源管理,使有限的频谱资源在服务经济社会发展和国防建设、促进无线电相关行业发展等方面发挥了重要作用,这得益于我国以行政审批手段为主的频谱管理模式。目前,无线电管理部门正积极探索和推动市场在无线电频谱资源配置中发挥主导作用,构建包含频谱市场的现代频谱管理体系。美国的经验表明:虽然构建频谱高速公路与通过市场配置频谱资源并不矛盾,但是采用纯市场手段构建频谱高速公路系统难度较大。由于需要在现有频率分配的基础上对相关频段进行二次分配,因此建议我国无线电管理部门以频谱高速公路为契机,充分利用行政手段的协调优势,建立频谱资源二次交易市场。无线电管理部门和原用户作为频谱资源的定价者,一方面可使授权用户从频谱高速公路系统的建设中获益,另一方面无线电管理部门可从市场的合作与竞争<sup>[20]</sup>中发掘新的频谱共享机会。此外,各类用户则能收获相应的频谱共享红利、改革红利,进一步可为频谱资源市场化配置模式的推广增加经验。

6 结束语

我国在频谱资源共享方面已有一定的技术基础。但是,频谱感知、频谱接入、频谱切换过程中的一些关键技术问题,如大范围实时认知无线电技术、动态决策优化算法、干扰预测与协调、机会频谱接入技术、自适应频谱移动和切换技术、用户激励和博弈行为模式、大数据分析 with 挖掘技术、关联区域的云计算等,仍然需要进一步研究和解决。此外,从管理者的角度出发,急需通过一系列政策转变,如将频谱高速公路纳入国家发展战略、推进基础设施和设备开发与建设、精心组织试点示范工作和产业布局等,来促成我国频谱高速公路系统的广泛实施,抢占频谱战略与技术的国际制高点。

参考文献:

[1] 田振和,周阳. 加快构建我国的“频谱高速公路”[EB/OL]. (2015-08-06)[2016-07-22]. [http://news.xinhuanet.com/info/2015-08/06/c\\_134483389.htm](http://news.xinhuanet.com/info/2015-08/06/c_134483389.htm).  
TIAN Z H, ZHOU Y. Accelerating the establishment of our country's spectrum super-highway [EB/OL]. (2015-08-06)[2016-07-22]. [http://news.xinhuanet.com/info/2015-08/06/c\\_134483389.htm](http://news.xinhuanet.com/info/2015-08/06/c_134483389.htm).  
[2] 田振和,周阳,杨露,等. 浅谈构建我国“频谱高速公路”的重要意义[J]. 中国无线电, 2015(8): 15-17.



- TIAN Z H, ZHOU Y, YANG L, et al. Introduction to the significance of spectrum super-highway construction in our country[J]. China Radio, 2015(8): 15-17.
- [3] Presidential memorandum: unleashing the wireless broadband revolution [EB/OL]. (2010-06-30)[2016-07-22]. <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/presidential-memorandum-unleashing-wireless-broadband-revolution>.
- [4] DOCUMENTS G. Realizing the full potential of government-held spectrum to spur economic growth- PCAST [M]. New Jersey: IEEE Press, 2012.
- [5] 杨森, 方正, 李明明. 美国频谱高速公路计划浅析——转变频谱结构, 加强频谱管理, 实现频谱共享[J]. 数字通信世界, 2013(2): 23-26.
- YANG M, FANG Z, LI M M. Introduction to the United States' spectrum super-highway plan [J]. Digital Communication World, 2013(2): 23-26.
- [6] Google to test innovative 3.5 GHz wireless in Kansas city[EB/OL]. (2016-04-19)[2016-07-22]. <http://www.computerworld.com/article/3055998/networking/google-to-test-innovative-3-5ghz-wireless-in-kansas-city.html>.
- [7] Licensed Shared Access (LSA). ECC report 205[EB/OL]. (2014-02-27) [2016-07-22]. <http://www.ero.docdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCREP205.PDF>.
- [8] 王兴军, 程云笛, 黄星煜. 聚焦“白频谱”: 国外的管理法案与标准概览[J]. 电视技术, 2014(17): 47-53, 71.
- WANG X J, CHENG Y D, HUANG X Y. Focus on 'white space': overview of foreign management legislation and standards[J]. Video Engineering, 2014(17): 47-53, 71.
- [9] 周钰哲. 我国频谱共享的可行性研究与推进建议[J]. 电信科学, 2016, 32(5): 146-151.
- ZHOU Y Z. Feasibility research and suggestions of spectrum sharing[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(5): 146-151.
- [10] 张翊, 曾碧卿, 杨劲松, 等. OFDMA 认知无线网络中面向需求的频谱共享[J]. 通信学报, 2015(8): 192-206.
- ZHANG C, ZENG B Q, YANG J S, et al. Requirements-oriented spectrum sharing for OFDMA cognitive radio networks[J]. Journal on Communications, 2015(8): 192-206.
- [11] 郭永明, 李宁, 李军芳. 未来智能无线电将对频谱管理带来深刻影响[J]. 电信科学, 2012, 28(7): 94-100.
- GUO Y M, LI N, LI J F. A strong impact of smart radio on spectrum management in future[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(7): 94-100.
- [12] 冯岩, 孙浩, 许颖, 等. 动态频谱共享研究现状及展望 [J]. 电信科学, 2016, 32(2): 112-119.
- FENG Y, SUN H, XU Y, et al. Review and prospect on the research of dynamic spectrum sharing [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(2): 112-119.
- [13] 朱星宇, 周怀北, 黄俊园. 认知无线网络中基于信道感知排序的频谱切换[J]. 电信科学, 2013, 29(4): 51-56.
- ZHU X Y, ZHOU H B, HUANG J Y. Spectrum handoff with channel sensing sequencing in cognitive radio network [J]. Telecommunications Science, 2013, 29(4): 51-56.
- [14] 覃华忠, 鲜永菊, 徐昌彪. 基于分级的频谱切换技术研究 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(18): 118-121.
- QIN H Z, XIAN Y J, XU C B. Study of spectrum handover based on grading in cognitive radio systems [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(18): 118-121.
- [15] 田振和, 熊能, 杨露. 构建我国“频谱高速公路”的基本思路[J]. 中国无线电, 2016(5): 9-11.
- TIAN Z H, XIONG N, YANG L. The basic ideas to construct our country's spectrum super-highway[J]. China Radio. 2016(5): 9-11.
- [16] CANO L, CAPONE A, CARELLO G, et al. Cooperative infrastructure and spectrum sharing in heterogeneous mobile networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(11): 2617-2629.
- [17] 张磊, 罗涛, 刘蔚. 认知车载网络中基于 QoS 保障的频谱共享新策略[J]. 通信学报, 2011(11): 159-167.
- ZHANG L, LUO T, LIU W. Novel spectrum sharing strategy based on QoS support in cognitive vehicular network[J]. Journal on Communications, 2011(11): 159-167.
- [18] 朱冰莲, 裴光术, 张磊, 等. 认知无线电中基于 QoS 分级的频谱分配策略[J]. 计算机工程, 2012(10): 92-94, 98.
- ZHU B L, PEI G S, ZHANG L, et al. Spectrum allocation strategy based on QoS grading in cognitive radio [J]. Computer Engineering, 2012(10): 92-94, 98.
- [19] 黄丽亚, 刘臣, 王锁萍. 改进的认知无线电频谱共享博弈模型[J]. 通信学报, 2010(2): 136-140.
- HUANG L Y, LIU C, WANG S P. Improved spectrum sharing model in cognitive radios based on game theory [J]. Journal on Communications, 2010(2): 136-140.
- [20] 汤海冰, 胡志刚. 认知无线网络空闲频谱共享的竞争与合作定价[J]. 系统工程与电子技术, 2013(1): 173-178.
- TANG H B, HU Z G. Competitive and cooperative pricing for idle spectrum sharing in cognitive radio networks [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013(1): 173-178.

#### [作者简介]



周钰哲 (1989-), 男, 中国电子信息产业发展研究院无线电管理研究所工程师, 主要研究方向为无线电管理与监测、频谱资源管理、信息通信技术政策等。