

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.05.002

电磁频谱空间认知新范式:频谱态势

吴启晖¹ 任敬²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016;2. 解放军理工大学通信工程学院,南京,210007)

摘要:电磁频谱已经成为信息时代不可或缺的国家战略资源,面对越来越复杂的电磁频谱环境所带来的重大挑战,电磁频谱空间研究对未来频谱共享、无线电秩序管理以及电磁频谱战有着重要意义。本文从频谱态势理论模型、广域频谱态势感知、动态频谱态势生成和频谱态势高效利用 4 个方面,综述了对电磁频谱空间认知基础理论和关键技术的研究现状,并指出将孤立、分散、静态的频谱数据整合成一个整体、动态、关联、可视的异构数据集是频谱态势未来的发展方向,为未来移动通信系统提升动态频谱效率、无线电秩序管理中提高恶意用户检测概率与虚警概率性能、对抗条件下增强频谱效能比,提供理论与技术支持。

关键词:电磁频谱空间认知;频谱态势感知;频谱态势生成;频谱态势利用

中图分类号:TN03

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2016)05-0625-08

New Paradigm of Electromagnetic Spectrum Space: Spectrum Situation

Wu Qihui¹, Ren Jing²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of
Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 210007, China)

Abstract: The electromagnetic spectrum has become an indispensable strategic resource for our country in this information era. Facing the major challenge brought by increasingly complex electromagnetic spectrum, the study of electromagnetic spectrum space has important significance for future spectrum sharing, radio order management and the war of electromagnetic spectrum. The paper focuses on theoretical model of spectrum situation, spectrum situation sensing in wide area, dynamic spectrum situation generating and efficient utilization of spectrum situation to study the basic theory and the key technology of electromagnetic spectrum space cognition. Moreover, it is pointed out that the integration of isolated, scattered and static spectrum data into a whole, dynamic, correlated and visible heterogeneous data set should be paid more attention to in the development of spectrum situation. It provides the theoretical and technical support for improving the dynamic spectrum efficiency, detection probability of malicious user, false alarm probability and the ratio of spectral efficiency.

收稿日期:2016-06-01;修订日期:2016-09-01

作者简介:吴启晖,男,教授,博士生导师,江苏省突出贡献中青年专家、江苏省“333”工程中青年科技领军人才,主要研究方向为认知无线电与智能频谱管控。曾获国际学术奖 3 项、国家科技进步二等奖 1 项、省部级一等奖 2 项、二等奖 2 项,授予国际发明专利 2 项、国家发明专利 20 项,发表 SCI 论文 90 余篇,IEEE 期刊论文 50 篇,ESI 高被引论文 6 篇。

通信作者:吴启晖,E-mail:wuqihui2014@sina.com。

引用格式:吴启晖,任敬. 电磁频谱空间认知新范式:频谱态势[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(5):625-632. Wu Qihui, Ren Jing. New paradigm of electromagnetic spectrum space; Spectrum situation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(5): 625-632.

Key words: electromagnetic spectrum space cognition; spectrum situation sensing; spectrum situation generating; spectrum situation utilization

随着信息时代的飞速发展,频谱资源越来越紧张,无线电秩序与频谱安全的隐患越来越严重,电磁频谱在现代战争中的地位越来越重要。在未来移动通信系统频谱共享、无线电秩序管理、电磁频谱战的需求牵引下,静态管理模式正向动态管理模式转型,电磁频谱空间认知与基于频谱态势的智能频谱管理已成为研究的核心课题。

对于频谱态势,目前还没有一种权威的定义,从态势概念本源出发可以这样理解:频谱态势是指电磁环境的当前状态、综合形势和发展趋势。频谱态势研究的核心是将复杂电磁环境映射到信息空间中,形成虚拟的电磁频谱空间,为未来移动通信系统提升动态频谱效率、无线电秩序管理中提高恶意用户检测概率与虚警概率性能、对抗条件下降低频谱降效比提供理论与技术支撑。

本文面向未来移动通信系统频谱共享、无线电秩序管理、电磁频谱战需求。首先,针对目前频谱态势研究缺乏整体性、针对性,从现代系统论出发,构建频谱态势体系架构与模型,从频谱态势体系模型、频谱态势数学建模、频谱态势优化机制3方面入手,通过模型假设、构成、分析、求解、检验、应用等步骤,运用数理逻辑方法和数学语言建构的一组频谱态势数学模型,精确描述频谱态势体系结构的特征及其内部关系或与外界联系;其次,分析广域频谱态势感知、动态频谱态势生成和频谱态势高效利用3个关键技术问题:(1)构建频谱态势体系架构、建立频谱态势数学模型、揭示频谱态势优化机理;(2)广域感知网络优化部署、大规模协作压缩感知、海量感知数据高效汇聚;(3)多维频谱空间态势补充、频谱态势多视角呈现、频谱态势数据可视分析和频谱态势演化预测。从不同层面,展开电磁频谱空间认知研究与分析。

1 国内外研究现状

如何构建电磁频谱图是电磁频谱空间认知研究首先遇到的难题。文献[1]首次提出了射频环境地图(Radio environmental maps, REMs)的概念与模型,随后,REMs又被进一步深化,从而提供一种可视化频谱环境地图。文献[2]通过提供时-空-频三维获取功率频谱密度图和局部信道增益图。除频谱态势图之外,目前学者们的研究重点在于频谱态势感知、生成、利用3方面,它们各自的研究现

状如下:

频谱态势感知是频谱态势生成与利用的基石,其主要目标是获取频谱空间的当前状态,包括频谱忙闲情况、频谱辐射功率、频谱调制方式、以及频谱接入协议等。

频谱态势生成是在频谱态势感知获取频谱空间的当前状态基础上,分析预测频谱空间的综合形势和未来发展趋势。文献[3,4]提出了基于隐马尔科夫模型和贝叶斯网络模型的态势估计方法。文献[5]梳理上述工作后提出了频谱状态演化可预测性的概念和度量指标。随后,频域相关性现象(即不同信道频谱状态演化之间的关联关系)逐渐引起研究者的关注。文献[6]基于稀疏空间采样实现了空域干扰图的构建。专利CN104486015A给出一种电磁空间频谱态势的构建方法^[7],一些研究团队利用热力地图展现电视信号的频谱使用情况,如利用Cellular ExpertTM软件可以开展无线频率规划和管理等任务,或在CORNET3D中实时呈现频谱态势并进行可视分析。

频谱态势利用的研究还处于初步阶段,主要集中在频谱资源决策、频谱安全和频谱对抗。文献[8]利用博弈论的方法,对频谱接入中的信道选择问题进行了研究,还有基于随机几何^[9]、频谱拍卖模型^[10]的频谱资源决策研究。在频谱安全方面,各种频谱态势的异常值层出不穷,如频谱数据篡改、模拟主用户和窃听等^[11-12]讨论了异常值的检测。在频谱对抗方面,电磁频谱已成为可以与机械动力、火力相提并论的新型战斗力和战争资源,但如何与频谱态势结合,研究还非常少。

综上所述,频谱态势感知、生成等单项技术研究成果已有比较丰富的积累,但频谱态势整体性研究还远远不够,尚未形成一体化的理论体系。而且,大规模频谱监测与用频网络、海量频谱数据与频谱可视化、广域频谱空间复杂决策与安全维护等的发展,使得频谱态势研究面临严峻挑战。

2 频谱态势体系与建模

相比频谱数据,在频谱态势中的数据研究的整体性更强,内容更丰富,机理更复杂。本文从频谱态势体系结构、频谱态势数学建模、频谱态势优化机制3方面进行频谱态势建模的分析。

体系结构,是对复杂事物的一种抽象。现有认知模型都缺乏整体性,频谱态势体系结构如图 1 所示,集体系模型、功能模型与环境模型于一体,指导频谱态势系统整体、内在要素、外部环境三者的相互关系和变动规律。

数学模型,是指那些反映了特定问题或具体事物系统的数学关系结构,历来是研究难点问题。电磁环境具有开放性和平衡性,与其他空间有着物质和能量的交换;电磁信号的产生与消失均具有突变性或快变性;电磁空间包含了复杂多样的用频系统和干扰系统,协同论基于“很多子系统的合作受相同原理支配而与子系统特性无关”的原理,可以促进异构系统遵循相同或相近原理协同工作。因此引入融合了耗散结构论、突变论、协同论等新兴科学理论的现代系统论可有效指导对频谱态势理论模型的构建。其中,局部互利模型^[13]以全网吞吐量为目标,最大化其自身和邻居用户收益和

$$U_{1n}(a_n, a_{J_n}) = g_n(a_n, a_{J_n}) + \sum_{k \in J_n} g_k(a_k, a_{J_k})$$

式中: $g_n(a_n, a_{J_n})$ 为用户 n 的吞吐量; $\sum_{k \in J_n} g_k(a_k, a_{J_k})$ 为用户 n 的邻居用户的吞吐量之和。

上述博弈为精确势能博弈,最优解为该博弈纯粹纳什均衡,突破了传统非合作博弈中个体理性假设和合作博弈中的集体理性假设,提出局部理性的假设;“黑灰白”频谱机会数学模型^[14],把空时频谱机会检测建模为如下复合假设检验问题,首次定义了异构频谱检测的用户级和网络级性能度量指标

$$O_0 : x_i[m] = \begin{cases} \omega_i[m] \\ \sqrt{\prod_i (d_i) s_i[m] + \omega_i[m]} & D_p < d_i \leq D_s \end{cases}$$

$$O_1 : x_i[m] = \sqrt{\prod_i (d_i) s_i[m] + \omega_i[m]} \quad 0 \leq d_i \leq D_p$$

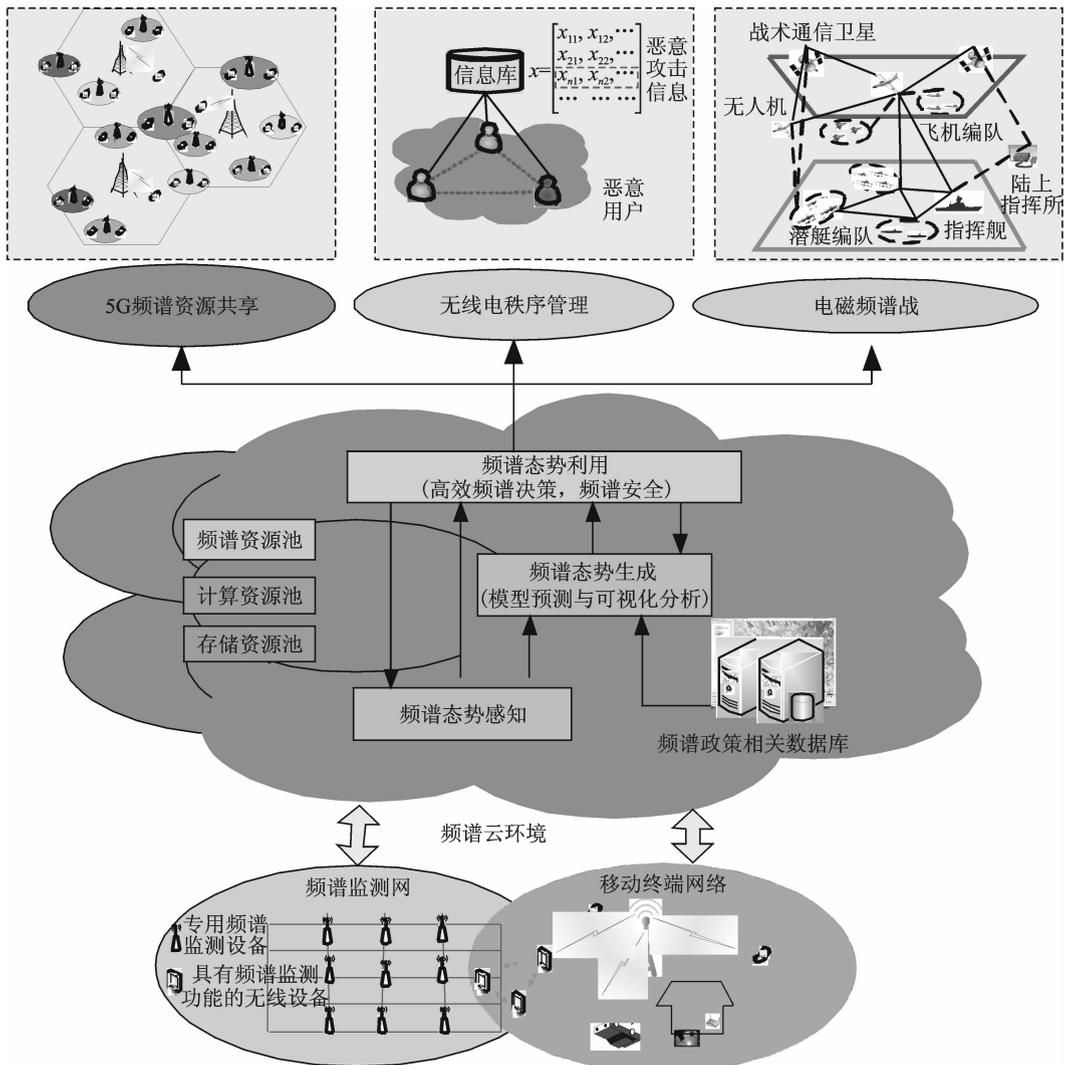


图 1 频谱态势体系结构研究方案

Fig. 1 Structure of spectrum situation system

式中： O_0 表示存在空时频谱机会给次用户使用(原始信号消失或者次用户在主用户传输范围以外)； O_1 表示没有空时频谱机会可以利用(次用户在主用户传输范围内并且存在原始信号)。

但是,单凭频谱态势体系架构构建与数学建模研究,定性定量地描述频谱态势系统特征与内在联系,还不能完全回答频谱态势研究价值以及如何更好的实现频谱态势价值的问题。频谱态势资源优化机理,正是研究频谱态势系统局部优化与全局优化、静态优化和动态优化、确定条件下的优化和模糊条件下的优化、最优化和次优化等优化机理,可修正体系结构与数学模型,最终实现优化决策。

3 频谱态势关键技术

3.1 广域频谱态势感知

广域频谱态势感知是指多域联合频谱态势信息的可靠精确获取,重点在于“态”的高效获取问题。由图2可见,广域频谱态势感知方案包含广域频谱感知网络优化部署、大规模协作压缩频谱感知以及海量频谱数据高效汇聚3方面。

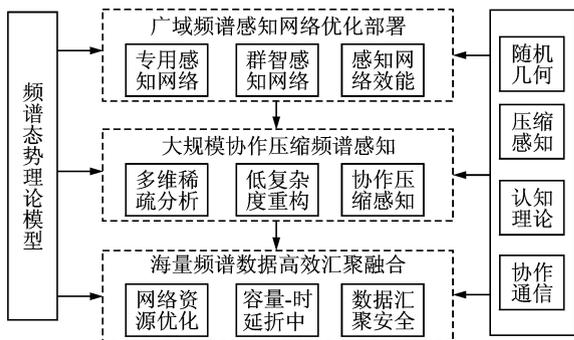


图2 广域频谱态势感知方案

Fig. 2 Scheme of spectrum situation sensing in wide area

广域频谱态势数据获取的基础是基于群智感知网络和大规模频谱感知专用网络的混合优化。首先,采用随机几何理论对频谱感知网络拓扑结构进行建模分析,通过齐次泊松点过程刻画群体用户和感知节点的空间几何分布;其次,采用随机几何中的网络容量分析理论,定量分析感知网络容量与感知节点密度之间的折中关系,实现感知节点的优化部署;再次,采用基于大规模智能终端的群体协作感知网络理论,节省专用频谱感知节点的部署密度及网络成本;最后,专用频谱感知网络与群智感知网络结合实现混合优化部署,最小化频谱感知网络的部署成本。

压缩感知是大规模协作频谱态势感知中不可或缺的一部分,其原因是认知协作无线网络中无线频谱和网络节点产生错误的感知数据具有稀疏性。例如,待感知的无线频谱很宽,同时其中只有少数频谱被占用。考虑到频谱感知节点的带宽和能量受限,需要网络资源受限的协作压缩频谱感知方法、多维信号的自适应压缩感知算法、合适的稀疏基和稀疏空间以及多维压缩感知信号的低复杂度稀疏重构方法,深度挖掘无线频谱态势信息。举例来说,如果待感知的无线频谱很宽,同时其中只有少数频谱被占用,即无线频谱的被使用状况具有稀疏性。不失一般性,第 m 个感知网络节点的时域接收信号表示为

$$y_m(t) = \sum_{k=1}^K h_{km}(t) * x_m(t) + n_m(t)$$

为了获得感知信号的频率响应,需要对观测信号 $y_m(t)$ 进行离散傅立叶变换,因此第 m 个感知网络节点的观测信号相对应的离散频率响应记为

$$Y_m(f) = \sum_{k=1}^K H_{km}(f) X_m(f) + N_m(f)$$

由于宽带无线频谱的被使用状况具有稀疏性,因此感知节点的观测信号 $Y_m(f)$ 也具备一定的稀疏性,据此可以通过求解范数正则化的最小二乘问题,估计宽带无线频段的被使用情况^[15]。基于压缩感知的认知协作频谱感知理论方法可有效提高了无线频谱感知的鲁棒性,如图3所示。图中:Swo-A为无异常数据感知;S-w-A-wo-D为有异常数据无处理下的感知;S-w-A-w-PDF为完美异常数据滤波下的感知;S-w-A-w-PSF为有异常数据有完美传感器滤波下的感知;S-w-A-w-ISF为有异常数据有不完美传感器滤波下的感知;S-w-A-w-DC为有异常数据有数据清除下的感知。

海量感知数据生成以后,接着汇聚到数据中心进行处理,需要高效的汇聚理论机制来保证传输容量和可靠性并降低汇聚传输的时延。考虑到感知网络的有限带宽资源、无线衰落和噪声干扰等不利因素的影响,需要通过网络感知节点的大规模协作理论与方法,得出分布式感知节点的协作波束成形、机会中继选择、以及协作资源分配优化等传输容量提升方法,在满足频谱观测数据传输时延和可靠性要求的前提下,最大限度地提高频谱感知网络的传输容量。

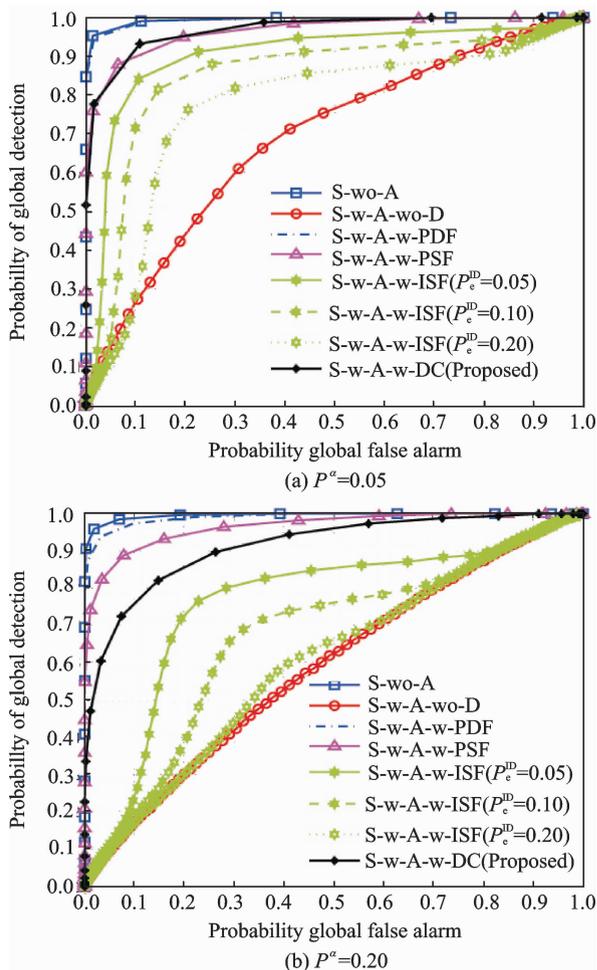


图 3 不同频谱忙闲稀疏比下各种频谱感知方案的检测概率和虚警概率

Fig. 3 Detection probability and false alarm probability of various spectrum sensing schemes under different spectrum busy free sparse ratios

3.2 动态频谱态势生成

动态频谱态势生成,是在频谱态势感知并获取频谱空间当前状态的基础上,进一步分析预测频谱空间的综合形势和未来发展趋势,并揭示频谱演化规律对于频谱态势中“势”的作用。具体内容包括多维空间频谱态势补全、频谱态势多视角呈现、频谱态势数据可视分析、频谱态势演化预测 4 个方面,如图 4 所示。

由于频谱数据具有异构多样化、多维空间关联性、来源多样化和不完备性的特点,频谱态势补全是态势生成研究中的首要环节。简单的空域频谱态势补全问题可建模为正则化的核模优化问题,采用基于空域稀疏采样的数据补全算法可有效提升频谱空间复用率。除此之外,频谱态势补全还包括从海量不完备的频谱数据中挖掘出有用的信息,根

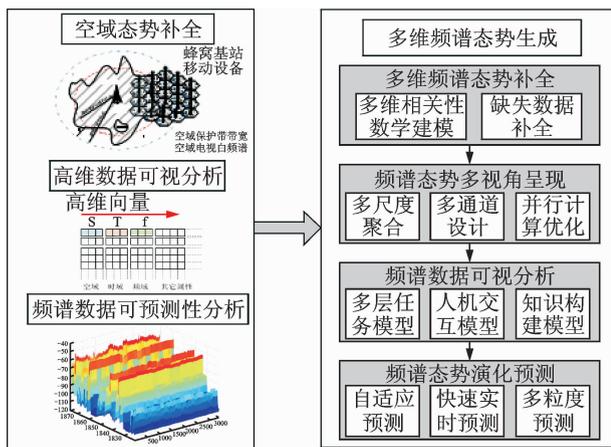


图 4 动态频谱态势生成研究方案

Fig. 4 Scheme of dynamic spectrum situation generating

据其在多维空间上的时间相关性、空间相关性和逻辑相关性,提取能全面反映频谱态势的指标信息,从而实现缺失空间频谱态势的补全。

经过态势补全后,需将数据进行多视角快速呈现。整个过程分为 4 个阶段:(1)预处理:对频谱态势的结构化和非结构化数据统一进行向量化和归一化处理。(2)降维:对时空维之外的属性采用线性或非线性方法进行降维和投影。(3)聚合/解聚:按照时间维、空间维或频率维对频谱态势数据进行聚合和解聚,分别对应相应维度的上卷和下钻。(4)渲染:针对降维和聚合处理后的不同类型数据,根据态势感知模型设计不同的视觉模型,最终实现高维频谱态势的可视快速呈现。

之后进行的谱态势数据可视分析不仅依靠计算机的计算能力和人工智能,还有赖于人机的交互与协作,把人的认知能力融入到频谱态势感知过程中,从而构建有效的人机混合模型。除此之外,将人机交互与数据分析、可视化相结合,产生了以人为需求主体和分析主体的频谱态势数据可视分析框架:由浏览搜索、假设验证和总结预测 3 种核心活动组成,3 种活动循环渐进,完成渐进探索式频谱态势数据可视分析流程。

频谱态势演化预测针对频谱具有时频相关性及可预测性的特点,从频谱历史数据和演化规律出发,结合模式识别、归纳推理、统计学等领域理论,通过对历史频谱数据的关联分析、分类分析和聚类分析等,找到频谱数据在时、频、空、能、波束等多维空间上的特点及规律,搭建自适应、快速时变、多粒度的态势演化的概率预测模型,以满足复杂多样的频谱环境趋势分析的需要。

3.3 频谱态势利用

本节主要分析如何将频谱态势信息用于辅助基于频谱资源态势复杂决策、基于频谱安全态势异常值监测、基于频谱对抗态势的频谱稳健管理3方面,分析方案如图5所示。

基于频谱资源态势的复杂决策是高效频谱态势利用的基本核心内容,不仅决策过程中要利用频谱态势信息,而且决策结果又会影响到频谱态势的变化。图6所示是基于图博弈的用户拓扑图和博弈学习收敛结果^[13],以用户为节点,以用户频谱间干扰关系为边,构建频谱决策图博弈,并提出一种空间自适应行动算法,用户迭代更新的混合策略如下

$$q_i^{a_i}(k+1) = \frac{\exp\{\beta U_i(a_i, a_{j_i}(k))\}}{\sum_{\bar{a}_i \in A_i} \exp\{\beta U_i(\bar{a}_i, a_{j_i}(k))\}}$$

式中: β 为学习参数; $U_i(a_i, a_{j_i}(k))$ 为用户 i 在策略 a_i 下的效用; \bar{a}_i 为策略 a_i 的补集。

理论证明所提算法在参数 β 充分大的情况下,只需要通过局部用户的信息交互,能以任意高的概率实现全局网络吞吐量的最优。另外,通过云构架的模型,在频谱信息数据库的辅助之下,将线下的分散在大空间的决策问题转移到线上,通过虚拟云模型进行决策,也成为了解决复杂频谱态势的可行办法之一。

针对超密集网络的分层特性以及微小区间的相互干扰问题,可考虑含有上层宏基站间的粗粒度频谱分配、下层微基站间的细粒度频谱协作的多级混合决策框架;针对业务时空分布多样性,通过微小小区局部协作形成簇或联盟,可以更好地匹配分布

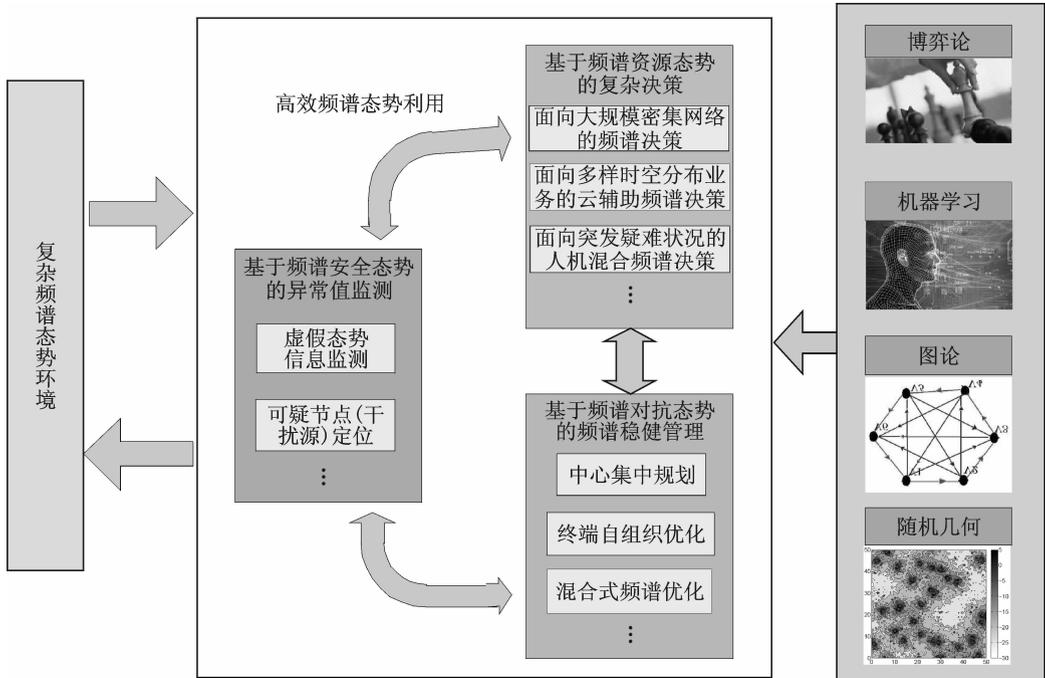


图5 高效频谱态势利用分析方案

Fig. 5 Scheme of efficient utilization of spectrum situation

多样性,并实现大规模决策的降维;通过对决策信息的获取、补充、人工评估和修正等手段,建立基于地理频谱数据库知识辅助的频谱决策模型和灵活的人机混合决策机制,实现对复杂频谱态势的高效利用。

频谱安全态势异常值检测是频谱资源态势决策和管理的前提条件。频谱态势异常值可分为攻击引发的异常和环境异常,前者特指攻击,而环境异常则指由于环境的突发变化,如聚集的人群、突发的运动等造成的频谱态势变化。显然,对前者要尽力消除,而对后者要善于挖掘分析。具体地说,

首先,利用机器学习等理论方法分析频谱态势数据,深入挖掘频谱态势特征,及时准确地发现异常值;其次,根据各种安全威胁的不同作用机理,综合分析异常值的特点,彻底找出异常原因,制定有效的处置机制;再次,为了提升系统主动防御能力,分析评估系统抵御攻击的能力,构建频谱态势的安全评估机制;最后,通过综合监测、处置和评估,形成良好的反馈机制,从而切实提升频谱态势利用的安全质量。

基于频谱对抗态势的频谱稳健管理是指为了应对电磁频谱战中的电子对抗行为,构建复杂网络

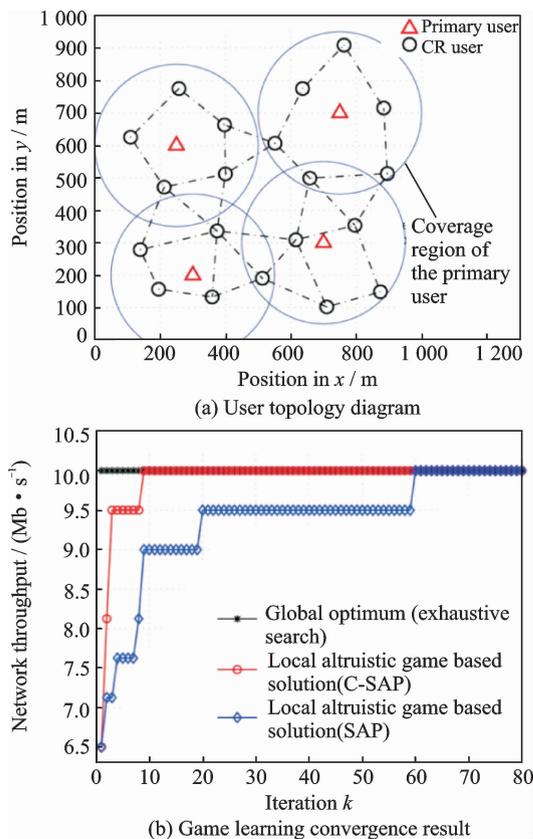


图6 用户拓扑图和博弈学习收敛结果

Fig. 6 User topology diagram and game learning convergence result

下基于分布式和集中式相结合的分层、分簇模型,建立存在各种对抗约束条件下的不同的效用函数,综合运用博弈论、不确定优化、智能学习和容量分析等理论和方法,设计灵活稳健的频谱管理策略。同时,采用面向体验质量决策模型与方法,在频谱管理优化中进行对抗条件下无线业务、防御和攻击策略与频谱资源的匹配优化,力求做到合理频谱计划、有效频谱监视、实时频谱管控、灵活频谱协同。

4 结束语

未来电磁频谱空间认知的发展将围绕频谱态势理论模型、广域频谱态势感知、动态频谱态势生成、频谱态势高效利用等方面展开,其新范式的发展正体现由分散到整体、局部到广域、低维到多维、静态到动态的跨越特征,也面临着广域高精度的频谱态势获取、高动态环境下频谱态势的快速准确预测、基于频谱态势的复杂决策等挑战,具有广阔的研究前景与实用价值,将为未来用频系统频谱共享、无线电秩序管理、电磁频谱战提供了理论和技术支持。

参考文献:

- [1] Zhao Youping, Reed J H, Mao Shiwen, et al. Overhead analysis for radio environment map-enabled cognitive radio networks, networking technologies for software defined radio networks, networking technologies for software defined radio networks [C] // Networking Technologies for Software Defined Radio Networks, VA, USA: IEEE, 2006.
- [2] Bazerque J A, Giannakis G B. Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks by exploiting sparsity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1847-1862.
- [3] Tang Mengyun, Zheng Ze, Ding Guoru, et al. Efficient TV white space database construction via spectrum sensing and spatial inference[C] // IEEE International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC). Nanjing, China: IEEE, 2015.
- [4] Li Husheng, Han Zhu. Competitive spectrum access in cognitive radio networks: Graphical game and learning[C] // Wireless Communications and Networking Conference. Sydney, Australia: IEEE, 2010.
- [5] Dhillon H S, Ganti R K, Baccelli F, et al. Modeling and analysis of K-tier downlink heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 550-560.
- [6] Zhang Haijun, Jiang Chunxiao, Beaulieu N C, et al. Resource allocation for cognitive small cell networks: A cooperative bargaining game theoretic approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 3481-3493.
- [7] Fragkiadakis A G, Tragos E Z, Askoxylakis I G. A survey on security threats and detection techniques in cognitive radio networks[J]. IEEE Communication Surveys and Tutorials, 2013, 14(2): 428-445.
- [8] Min A W, Shin K G, Hu Xin. Secure cooperative sensing in IEEE 802.22 wransusing shadow fading correlation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(10): 1434-1447.
- [9] Xu Yuhua, Wang Jinlong, Wu Qihui, et al. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: Global optimization using local interaction games[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2012, 6(2): 180-194.
- [10] Wu Qihui, G Dinguoru, Wang Jinlong, et al. Spatial-temporal opportunity detection for spectrum-het-

- erogeneous cognitive radio networks: Two-dimensional sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(2): 516-526.
- [11] Ding Guoru, Wang Jinlong, Wu Qihui, et al. Robust spectrum sensing with crowd sensors [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(9): 3129-3143.
- [12] 李伟生, 王宝树. 基于贝叶斯网络的态势评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(4): 480-483
Li Weisheng, Wang Baoshu. Situation assessment based on Bayesian networks[J]. *System Engineering and Electronics*, 2003, 25(4): 480-483.
- [13] 冯涛, 黄开枝, 徐天顺. 基于隐马尔可夫模型的通信态势估计方法[J]. *计算机工程*, 2013, 39(2): 6-11.
Feng Tao, Huang Kaizhi, Xu Tianshun. Communication situation estimating method based on HMM [J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(2): 6-11.
- [14] Ding Guoru, Wu Qihui, Wang Jinlong, et al. on the limits of predictability in real-world radio spectrum state dynamics: From entropy theory to 5G spectrum sharing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(7): 178-183.
- [15] Kim S J, Giannakis G B. Cognitive radio spectrum prediction using dictionary learning [C] // *Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Austin TX: IEEE, 2013.

