

认知电磁环境适应理论与方法研究

郑建拥*, 魏光辉

陆军工程大学石家庄校区, 强电磁场环境模拟与防护技术国防科技重点实验室, 河北 石家庄

Email: *597921795@qq.com

收稿日期: 2021年5月1日; 录用日期: 2021年6月2日; 发布日期: 2021年6月9日

摘要

随着电磁环境的日益复杂, 射频、电子设备不适应复杂电磁环境的问题越加突显。针对目前提高设备复杂电磁环境适应能力方法的不足, 将正在蓬勃发展的人工智能方法适当地引入复杂电磁环境效应领域, 首次提出了认知电磁环境适应这一概念。认知电磁环境适应, 立足于射频、电子设备复杂电磁环境效应和机理分析, 以人工智能学习算法为途径, 以软件化的设备为平台, 以解决传统电磁兼容与防护方法的不完备、实时性差、无法适应复杂电磁环境等问题为目的。简述认知电磁环境适应方法所涉及技术的背景, 同时建立比较清晰的理论体系与方法框架。

关键词

认知电磁环境适应, 电磁环境效应, 机理分析, 学习算法, 软件化

Research on Theory and Method of Cognitive Electromagnetic Environment Adaptation

Jianyong Zheng*, Guanghui Wei

National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Army Engineering University, Shijiazhuang Hebei

Email: *597921795@qq.com

Received: May 1st, 2021; accepted: Jun. 2nd, 2021; published: Jun. 9th, 2021

Abstract

With the increasing complexity of electromagnetic environment, the problem that radio frequency and electronic equipment could not adapt to the complex electromagnetic environment became more and more prominent. In view of the shortcomings of current methods to improve the adap-

*通讯作者。

ability of equipment to complex electromagnetic environment, the booming artificial intelligence method was appropriately introduced into the complex electromagnetic environment effects, and the concept of cognitive electromagnetic environment adaptation was put forward for the first time. Cognitive electromagnetic environment adaptation, based on the mechanism analysis of complex electromagnetic environment effect of radio frequency and electronic equipment, took artificial intelligence learning algorithm as the way and software equipment as the platform, aimed to make up the shortcomings of traditional electromagnetic compatibility and protection methods, which is incomplete, poor real-time and inability to adapt to complex electromagnetic environment. Here summarized the related technologies background of cognitive electromagnetic environment adaptation, and at the same time, a relatively clear theoretical system and methodological framework are established.

Keywords

Cognitive Electromagnetic Environment Adaptation, Electromagnetic Environment Effect, Mechanism Analysis, Learning Algorithm, Software-Based

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

传统上应对电磁干扰主要采用电磁兼容与防护的相关方法, 这些方法依据电磁环境及其影响的评估和建模、设备耦合建模和防护技术, 对设备进行整体综合的设计, 在一定阶段、一定程度上提高了电子信息设备的抗干扰能力[1] [2] [3]。但是随着电磁环境的复杂度呈指数级增长, 传统的立足于数学计算和仿真的电磁环境建模和评估技术已经跟不上电磁环境变化的速度, 受限于对复杂多变电磁环境的认知不足, “仿真不真”的现象时有发生。而基于“纯硬件电路”的防护技术也逐渐失去了适应复杂电磁环境的完备性和实时性, 单纯依靠硬件已不能达到设备抗干扰的要求。

提高电子信息系统的电磁环境适应能力的关键是搞清楚复杂电磁环境各要素对信息系统的影响过程, 也就是需要进行复杂电磁环境效应机理分析。作为复杂电磁环境效应研究的重要组成部分, 电磁环境效应机理分析越来越受到重视。它既是电子信息系统复杂电磁环境作战性能试验鉴定中构建等效电磁环境的理论基础, 也是装备改型设计时提高电子信息系统电磁环境适应性的重要理论依据, 同时可以为智能电子战的策略决策提供理论支持。复杂电磁环境效应涉及的作用要素繁多, 所呈现的效应现象表述模糊, 其间作用关系错综复杂, 同时, 由于电子信息系统内部结构复杂、特性各异, 往往存在电磁环境参数不可准确获取, 关键作用因素不能准确确定, 未知机理不能及时发现和厘清等现象[4]。同时电磁辐射进入射频前端之后, 会产生诸多非线性现象, 这也为设备复杂电磁环境建模增添了诸多不确定因素。需要研究人员提供新思路、新方法、新概念。

而相对于纯硬件系统的固化、封闭, 软件化系统具有较强的灵活性和开放性。软件系统采用一般采用标准化、模块化的结构, 其硬件可以随着器件和技术的发展而更新或扩展。软件也可以随需要而不断升级。软件化系统不仅能和新体制电台通信, 还能与旧式体制电台相兼容。目前, 软件化已经在自动测试技术和软件无线电中得到广泛应用[5] [6]。

基于以上考虑, 以提高电子设备在复杂电磁环境中的适应能力为目的, 首次提出认知电磁环境适应这一概念。认知电磁环境适应, 以电磁环境效应的机理分析为基础, 以人工智能学习算法为工具, 以软

件化系统为平台, 是涉及多个领域的新概念。在此简述相关技术背景, 并简要介绍认知电磁环境适应。

2. 相关技术发展现状

认知电磁环境适应概念的提出, 可以追溯到软件无线(Software Defined Radio, SDR), 是一种无线电广播通信技术, 它基于软件定义的无线通信协议而非通过硬连线实现。软件无线电利用现代化软件来操纵、控制传统的“纯硬件电路”的无线通信技术。

之后结合人工智能学习方法, 又衍生出认知无线电。“认知”概念也进一步被认知电磁兼容继承, 并作为抗干扰的方法, 被应用于有线传输领域。上述三种技术都是通信领域的新兴方法, 是认知电磁环境适应的理论来源。受益于“认知”概念, 认知电磁环境适应将软件化、人工智能等技术引入所有电子设备的电磁兼容与防护领域, 以弥补传统抗电磁干扰方法的诸多不足。以下说明涉及的技术背景。

2.1. 认知无线电

随着电子电路技术的发展, 无线电数字通信技术已经进入到人类社会生活的方方面面。而无线电技术的大规模应用, 也使无线电频谱——这一种不可再生资源成为无线电应用的重难点之一。以监测、管理和有效地利用无线电频谱, 同时提高电子设备抗干扰的能力为目的, 1999年, Mitola博士在软件无线电的基础上, 提出了认知无线电概念, 并在之后得到广泛应用和关注[7] [8] [9]。认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术通过频谱的动态感知与监管手段可以更加高效地利射频谱资源, 实现高可靠、高利用率的通信。认知无线电技术可以感知探测复杂的外部电磁环境, 实现准确、迅速的频谱扫描, 并评估特定频段是否被主用户或者敌方干扰占用[10]。认知无线电是一种智能无线电系统, 能够感知其环境, 对其进行解释, 并根据电磁环境, 甚至可以对每个用户的需求等因素做出适当的决策。认知无线电是通过综合多种成熟技术的实现的, 这些技术确保了系统之间的共存并共享频谱资源[11]。

认知无线电是在软件无线电基础上提出的, 而软件无线电的基本思想就是电子设备功能的实现尽量少的依靠硬件, 而主要取决于驻留在DSP中的信号处理算法。传统的硬件无线电通信设备只是作为无线通信的基本平台, 而许多的通信功能则是由软件来实现, 打破了有史以来设备的通信功能的实现仅仅依赖于硬件发展的格局。具体而言就是将硬件标准化、通用化、模块化, 具有广泛的适应性; 但是软件部分则需要可升级、可重构、可灵活变化。各种功能, 如工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等, 用软件来完成。并从设计上将宽带模数变换器(A/D)及数模变换器(D/A)尽可能地靠近射频天线, 建立一个具有“A/D-DSP-D/A”模型的通用的、开放的硬件平台[12]。

当然, 软件无线电虽然被认为是未来无线电发展的趋势, 但目前并未形成主流。主要原因是它需要极高速的软、硬件处理能力。由于硬件工艺水平的限制, 直到今天, 纯粹的软件无线电概念也没有在实际产品中得到广泛的应用。但这种基于软件化概念基础上的软件定义系统平台却越来越受到人们的重视。

2.2. 人工智能技术

当前, 人工智能的研究和应用如火如荼, 通过机器学习等人工智能算法研究或构建一种算法从数据中进行学习, 发现数据的规律, 然后把这些规律用到新的数据上进行预测或决策已经在很多领域得到广泛的关注。方兴未艾的人工智能识别技术, 也使得“认知”这一概念进入到无线电通信领域[13]。

狭义的人工智能技术主要是人工智能学习算法, 国内外一些学者已经在通过学习算法识别电磁环境上取得一定进展。黄家邦博士使用机器学习技术实现智能化干扰抑制, 但也仅限于两种调制信号的抗干扰仿真设计[10]; 利用短时傅里叶变换和卷积神经网络进行频谱感知, 但同样没有硬件的试验[14]; 还有先将电磁信号二维图像化, 然后利用卷积神经网络对电磁信号的8种数字调制方式进行识别, 但识别的

正确率仍可以进一步提高[15]; 还有一些研究使用改进后的人工蜂群算法来智能实现无线电功率控制[16]; 黄堂森等人在对比了多种无线电感知方法后, 提出了一种多节点无线电感知加权算法[17]。利用人工智能算法认知无线电环境, 并自适应调节发射参数, 实现频谱、功率等信号参数的最优化的相关研究已经表明, 人工智能算法可以有效地实现部分电磁信号的识别和自适应控制。但这些研究大都只是仿真研究, 很少有实验验证和实际应用。上述这些方法都是提取电磁环境(信号)特征, 通过识别特征来认知复杂电磁环境的具体成分。这种方法基于对有限的电磁信号类别的先验知识或数据自身的结构关系, 建立外界电磁信号特征和已知电磁信号之间的认知网络。最大的问题在于, 目前并没有建立起针对电磁信号的特征提取方法和分类器的理论基础。

而广义的人工智能技术是使认知无线电从概念走向实际应用的真正原因。与先进的人工智能技术相结合, CR 就可能通过吸取经验来对现在发生的情况进行实时响应, 过去的经验包括对设备损毁、干扰和运行模式等的记忆数据。这样, CR 就赋予了无线电设备依照频带可用性、位置和过去的经验来自主确定采用哪个频带的功能。同理, 人工智能也可以带给认知电磁环境适应自主调节自身参数来适应复杂多变的电磁环境的能力, 人工智能技术是认知电磁环境适应最重要的突破点之一。这种学习能力更倾向于智能控制方面, 在自动试验测试技术、自动驾驶技术等工程上应用很多, 但是学术研究很少。

2.3. 认知电磁兼容

“认知电磁兼容”最早由 Zeddham 博士在 2009 年提出。这一概念最早提出, 是认知无线电概念在有线电信上的延伸, 它以软件为基础, 以智能、自适应的方式抵御电磁干扰, 实现有线通信网络的电磁兼容与防护。作为经典电磁兼容方法的补充, 基于软件和信号处理方法的认知电磁兼容可以从以下几个方面找到其成功的原因[11]:

1. 信号的数字化;
2. 提高数字信号处理器的处理速度;
3. 实时识别并应对各种电磁辐射, 避免干扰出现。

与认知无线电相似的, 认知电磁兼容的原理也在于软件化的系统平台。目前的一般方法是通过认知电磁环境, 寻找“频谱空穴”, 然后通过通信协议和算法将通信参数调整到最佳[18][19][20]。这种方式的核心在于算法, 即信息交互自始至终都由算法控制, 而基础的硬件只用于收发信号。通过软件和算法进行信号处理, 实现智能化自适应的实现电磁兼容、防护与抗干扰。其中最典型的应用是“自适应陷波”[11], 即自适应识别射频设备的电磁环境频谱变化, 并通过灵活地调节可编程逻辑控制器, 对可能造成干扰的频率进行“陷波”。见下图 1。

受限于软件化的未普及, “认知电磁兼容”也并未得到广泛应用, 目前找到的研究文献仅有一篇。

认知电磁环境适应是将“认知电磁兼容”这一概念应用对象的范围进一步扩展到所有射频、电子设备, 同时以设备电磁环境效应的机理分析为“认知”的基础, 以达到提高电子设备电磁环境适应能力的目的。

2.4. 设备电磁环境效应机理研究与建模

复杂电磁环境效应, 是指射频、电子设备在复杂电磁环境下所显现的响应。随着电磁辐射源数量、种类的不断增长, 电子设备在复杂电磁环境下的电磁辐射效应问题成为各国研究的热点。现代社会生活中射频设备的高度密集, 使得电磁环境日趋复杂, 为确保射频设备在复杂电磁环境下能够正常发挥效能, 定型前都需要进行严格的电磁干扰敏感度试验。为了评价射频设备在复杂电磁环境下的生存能力, 一般可以通过复杂电磁环境模拟仿真的方法进行相应的电磁辐射效应试验, 但是电磁环境纷繁复杂, 干扰信

号样式、频率、强度能够任意组合, 无法通过电磁环境模拟和辐射效应试验的方法一一进行试验和评价, 而研究电磁辐射对不同设备的干扰特性成为现在迫切需要解决的难题。

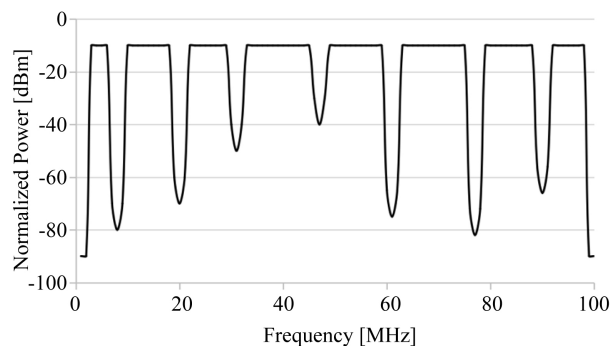


Figure 1. Adaptive notch

图 1. 自适应陷波

电磁辐射效应建模的基本方法主要有: 基于机理分析[21], 基于机理分析的电磁辐射效应建模方法能够从根本上反映电子系统的电磁辐射效应, 但是要弄清楚一个复杂电子系统的电磁辐射效应机理绝非易事, 准确建模缺乏理论和试验依据; 基于数值分析的电磁辐射效应建模方法[22] [23] [24], 这种方法是基于以计算电磁学为基础的, 通过电磁场理论与高性能的计算技术, 解决复杂电磁环境下电子系统辐射效应的建模问题。这些电磁数值分析方法都有较为成熟的软件, 这些商业软件虽然在电磁场计算方面具有较高的准确度, 但在复杂设备电磁辐射效应方面的计算准确度都差强人意; 基于试验数据统计分析的电磁辐射效应建模方法[25] [26], 由于信息化技术的迅速发展, 电子器件更加小型化、集成化, 功能更加强大, 组成的电子系统越来越复杂, 耦合路径也并非单一, 导致传统的电磁场理论分析方法和仿真方法在处理一些工程实际设备的电磁环境效应时存在很大偏差。因此基于试验数据统计分析的电磁辐射效应建模方法成为电磁学的一个新的研究方向。该方法将受试设备看作为灰箱甚至黑箱, 根据输入输出特性来建模。值得指出的是, 受试设备的输入输出特性与输入信号的幅度有关, 输入大信号时会出现严重的非线性, 导致基于试验数据统计分析的电磁辐射效应建模预测方法准确度下降, 尤其是强电磁脉冲辐射效应建模, 该方法能否适用值得商榷。目前, 基于机理分析、电磁辐射效应和试验数据统计分析的建模方法已经取得了一定成果[27] [28]。

在射频设备的电磁兼容与防护方面, 传统上一般采用屏蔽、滤波和接地等技术来解决目前日益复杂和严重的电磁干扰问题。但是, 与认知无线电类似, 还可以通过一个能够感知其环境的系统来处理射频设备所处电磁环境, 对其进行认知与解释, 并根据电磁环境的具体情况而对电子设备作出适当的调整, 提高其电磁兼容性能和干扰防护能力[29]。但是这也这就要求射频设备自身的复杂电磁环境效应必须已知, 这一点无论是对认知电磁环境适应还是对传统的电磁兼容和防护领域来说都是亟待解决的难题。只有已知可以对设备造成干扰的源, 才可以在射频前端滤除掉有害的电磁辐射, 而这也是认知电磁环境适应的核心所在。

当然, 通过试验来建立电子设备效应模型是无法穷尽的, 不在效应模型内的干扰永远有可能发生, 这也为人工智能发挥作用提供了机会。通过人工智能的学习能力, 设备自身可以依据受干扰的记忆数据自主增强自身的防护能力。虽然目前的研究并没有达到这种程度, 但是做出这种设想并不是没有依据, 新出现的软件化自动试验系统、数字化实验软件与这种智能化适应电磁环境并没有清晰的界限了, 自主适应复杂电磁环境并不是个遥遥无期的未来。

3. 认知电磁环境适应

认知电磁环境适应基本思路是:

1. 通过试验建立设备电磁环境效应模型, 确定干扰信号参数信息和干扰阈值。建模的实现途径之前已经有比较成熟的研究[28] [30] [31], 可以在其基础上进行进一步应用。

2. 依据效应模型确定的干扰源参数, 实时认知电磁环境, 监测是否存在干扰源。认知电磁环境的方法可以采用上述人工智能学习算法对具体电磁环境进行分类识别, 但由于认知电磁环境适应对认知环境的实时性要求很高, 目前研究的人工智能学习算法是否可以满足要求还有待商榷。

同时, 还可以采用成熟的电磁信号分析技术来认知电磁环境[32] [33] [34], 这些方法的实时性在工程上已经得到验证。目前的电磁信号分析方法很多, 但都只针对信号的某个方面, 例如, 时-频分析或时-空分析, 并不能全面分析识别复杂的电磁环境。因此研究实时全面的电磁信号分析方法是下一步的重点之一。

3. 如果检测到电磁环境中存在干扰源, 立刻在软件化平台上对干扰源信号即时自适应陷波, 以达到提高设备复杂电磁环境适应能力的目的。

对于干扰的抑制和消除, 一直是电磁兼容与防护研究的难点[35] [36] [37] [38]。传统的模拟滤波器不可避免的带来硬件负担, 而数字滤波器严重依赖于干扰模型和滤波算法的精度, 这都为认知电磁环境适应的即时自适应陷波带来挑战, 也是下一步必须解决的难题。

具体的运行流程见图 2。

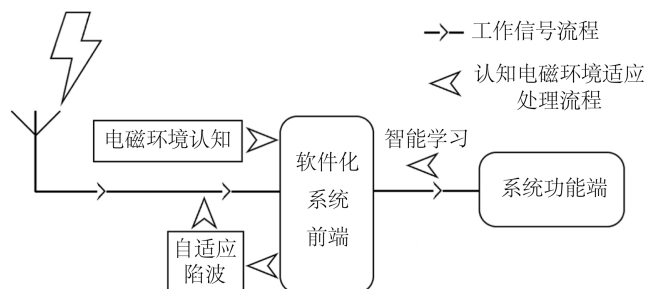


Figure 2. Flow chart of cognitive electromagnetic environment adaptation

图 2. 认知电磁环境适应流程图

同时, 和认知无线电相似的, 基于广义的人工智能学习技术, 认知电磁环境适应也同样可以赋予设备主动的根据外界电磁环境的变化, 和设备过去的运行记录(包括干扰、用户的使用习惯等)调整自身内部参数。在认知的同时, 自适应外界环境, 达到智能自动抗干扰的目的。这个方面之前并没有学术研究, 只是在工程领域有一些成熟的应用, 譬如自动试验测试技术和自动驾驶技术, 可以借鉴。

4. 结论

与传统的电磁兼容与防护的方法相比, 认知电磁环境适应具有以下优势:

1) 节省人工试验的时间。目前, 电磁兼容与防护的研究主要还是基于电磁环境效应试验, 研究人员需要花费大量时间在被测设备上。但是认知电磁环境适应可以通过人工智能学习算法来减轻这个负担。就像 CR 一样, 可以利用其以往的经验来改善其长期决策;

2) 对干扰变化等短期环境波动做出快速反应;

3) 可升级和可重新配置, 认知电磁环境适应还基于模块化软件平台, 每个模块都可以更新或替换为更适用的模块。可以手动设置或自动控制。这对用户和测试人员来说都很方便。

当然, 认知电磁环境适应有其局限性。其实现非常依赖高性能的可编程逻辑控制器和先进的人工智能算法。这将是一项长期的研究。

首次提出的认知电磁环境适应作为一个新概念从属于成熟技术, 如人工智能学习算法、自适应陷波、可编程逻辑控制器和电磁信号分析技术。这些成熟的技术使实现认知电磁环境适应成为可能。特别是基于目前的 CR 和认知电磁兼容技术, 认知电磁环境适应完全可行。

总而言之, 认知电磁环境适应是认知电磁兼容向所有电子设备的延伸。除了一致的学习能力和认知能力外, 还引入了设备电磁环境效应的试验建模方法。认知电磁环境适应有很可观的发展前景。相信在人工智能技术蓬勃发展的基础上, 电子设备的电磁兼容与防护方法也将向认知电磁环境适应发展。认知电磁环境适应将开创电子设备抗干扰的新局面。

参考文献

- [1] 刘尚合, 武占成, 张希军. 电磁环境效应及其发展趋势[J]. 国防科技, 2008(1): 1-6.
- [2] 苏东林, 雷军, 王冰切. 系统电磁兼容技术综述与展望[J]. 宇航计测技术, 2007(z1): 34-38.
- [3] 顾海林. 电磁干扰与电磁兼容性技术综述[J]. 科技创新导报, 2008(28): 94-95+97.
- [4] 范昕. 舰船电力系统电磁兼容性研究现状综述[J]. 中国舰船研究, 2013(3): 80-86.
- [5] 李廷鹏, 王满喜, 彭丹华, 等. 基于 GRNN 和 PNN 的复杂电磁环境效应机理分析[J]. 现代电子技术, 2018, 41(23): 153-156+160.
- [6] 楼才义, 徐建良, 杨小牛. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [7] Mitola, J.I. and Maguire, G.Q. (1999) Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, **6**, 13-18. <https://doi.org/10.1109/98.788210>
- [8] Haykin, S. (2005) Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **23**, 201-220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>
- [9] Iii, J.M. (2001) Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications. *Mobile Networks and Applications*, **6**, 435-441. <https://doi.org/10.1023/A:1011426600077>
- [10] 黄家邦. 基于机器学习的通信抗干扰技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [11] Zeddani, A., Avril, G. and Tlich, M. (2009) Electromagnetic Environment and Telecommunications: Towards a Cognitive Electromagnetic Compatibility. *Comptes Rendus Physique*, **10**, 4-12. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2009.02.001>
- [12] Buracchini, E. (2000) The Software Radio Concept. *IEEE Communications Magazine*, **38**, 138-143. <https://doi.org/10.1109/35.868153>
- [13] Benmammour, B. (2020) Recent Advances on Artificial Intelligence in Cognitive Radio Networks. *International Journal of Wireless Networks and Broadband Technologies (IJWNBT)*, **9**, 27-42. <https://doi.org/10.4018/IJWNBT.2020010102>
- [14] Liu, C., Wang, J., Liua, X., et al. (2019) Deep CM-CNN for Spectrum Sensing in Cognitive Radio. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.
- [15] 陶冠宏, 廖开升, 周林. 一种基于深度学习的电磁信号建模与调制识别新方法[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(5): 10-15.
- [16] 陈玲玲, 杨浩然, 冯琦, 等. 基于改进人工蜂群算法的认知无线电功率控制问题设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2019(5): 141-142.
- [17] 黄堂森, 李小武, 曹庆皎. 认知网络中无线电信号智能感知方法研究[J]. 应用科学学报, 2020, 38(3): 410-418.
- [18] Akyildiz, I.F., Lee, W.Y. and Chowdhury, K.R. (2009) CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *Ad Hoc Networks*, **7**, 810-836. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2009.01.001>
- [19] Sakai, Y., Nishijima, S. and Oodate, N. (2007) Software Defined Radio. US.
- [20] 杨小牛. 从软件无线电到认知无线电, 走向终极无线电——无线通信发展展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(1): 1-7.

- [21] 刘峰. 基于电磁拓扑的后门耦合特性建模方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [22] Sun, H., Wang, P., Chang, H., *et al.* (2016) Study on Electromagnetic Influence of 750kV AC Transmission Lines on Multiple Buried Pipelines. *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Shenzhen, 18-21 May 2016, 31-34. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2016.7522725>
- [23] 郝建红, 范杰清. 电磁脉冲耦合效应的等效源建模及应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(6): 109-113.
- [24] Lamecki, A., Balewski, L. and Mrozowski, M. (2016) Effect of Mesh Deformation on the Accuracy of 3D FEM Electromagnetic Analysis. *IEEE Mtt-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization*, Beijing, 27-29 July 2016, 1-2. <https://doi.org/10.1109/NEMO.2016.7561607>
- [25] 赵金红, 李博, 张建华, 等. 复杂电磁频谱管理方案效果评估方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2017(3): 35-38.
- [26] 周城. 时间反演的无线传感器网络电磁干扰建模和频谱空洞估计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [27] 王雅平, 魏光辉, 潘晓东, 等. 通信电台带外双频干扰预测模型与试验[J]. 电子学报, 2019, 47(4): 826-831.
- [28] 潘晓东, 魏光辉, 万浩江, 等. 射频设备带内双频窄谱电磁辐射阻塞干扰效应预测模型[J]. 电波科学学报, 2020, 35(3): 77-85.
- [29] 苏东林, 戴飞, 谢树果. 系统级电磁环境效应认知方法[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 28-35.
- [30] Zhao, K., Wei, G., Wang, Y., *et al.* (2020) Prediction Model of In-Band Blocking Interference under the Electromagnetic Radiation of Dual-Frequency Continuous Wave. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2020, Article ID: 7651389. <https://doi.org/10.1155/2020/7651389>
- [31] 魏光辉, 赵凯, 任仕召. 通信电台电磁辐射 2 阶互调低频阻塞效应与作用机理[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(8): 2059-2064.
- [32] Vujevic, S. and Lovric, D. (2015) Inverse Continuous Numerical Fourier Transform for Transient Analysis of Electromagnetic Phenomena. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57, 1149-1154. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2015.2417654>
- [33] Azpúrua, M.A., Pous, M. and Silva, F. (2016) Decomposition of Electromagnetic Interferences in the Time-Domain. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58, 385-392. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2518302>
- [34] Azpúrua, M.A., Pous, M., Cakir, S., *et al.* (2015) Improving Time-Domain EMI Measurements through Digital Signal Processing. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 4, 82-91. <https://doi.org/10.1109/MEMC.2015.7204056>
- [35] Miao, X. and Tian, L. (2019) Digital Cancellation Scheme and Hardware Implementation for High-Order Passive Intermodulation Interference Based on Hammerstein Model. *China Communications*, 16, 165-176. <https://doi.org/10.23919/JCC.2019.09.012>
- [36] Ou, J., *et al.* (2018) Passive Intermodulation Interference Suppression through Sparse Discrete Fractional Fourier Transform. *Journal of Physics Conference Series*, 1060, Article ID: 012002.
- [37] Tian, L., Han, H., Cao, W., *et al.* (2017) Adaptive Suppression of Passive Intermodulation in Digital Satellite Transceivers. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30, 1154-1160. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.03.010>
- [38] Jang, B., Im, S., Kim, C., *et al.* (2020) Third-Order Passive Intermodulation Distortion Cancellation Using a Cubic Volterra Filter for Wireless Relay Systems. *Nonlinear Theory and Its Applications IEICE*, 11, 224-231. <https://doi.org/10.1587/nolta.11.224>