

无线通信前沿技术丛书

李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金 (No.61101090和No.61471100, No.61401074)、
863计划项目 (No.SS2015AA011303和2014AA8098083C)、中央高校基本业务
费项目 (No.ZYGX2012Z004) 联合资助



“十二五”
国家重点
出版规划丛书

变换域 通信系统

● 胡苏 唐万斌 王军 © 著

Transform Domain
Communication Systems



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无线通信前沿技术丛书/李少谦 周亮 主编

该书由国家自然科学基金 (No. 61101090 和 No. 61471100, No. 61401074)、863 计划项目 (No. SS 2015AA011303 和 2014AA8098083C)、中央高校基本业务费项目 (No. ZYGX2012 Z004) 联合资助

变换域通信系统

Transform Domain Communication Systems

胡 苏 唐万斌 王 军 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

交换域通信系统是一种面向认知无线电应用的新型无线传输技术。为了满足无线可靠通信系统抗干扰、抗截获的技术要求,变换域通信系统通过认知无线电中的频谱感知、频谱判决等技术手段实现主动抗干扰,并且通过可用空闲的频谱资源进行软扩频,能够实现该系统抗截获特性。

本书立足于当前变换域通信系统的研究现状和发展趋势,介绍了基于认知无线电的变换域通信系统的理论原理和关键技术。针对变换域通信系统在未来工程的实用化,本书重点从时间频率同步、信道估计、频谱效率优化以及变换域多用户通信系统等几个方面,对变换域通信系统进行了全面介绍和讨论。

本书可供从事认知无线电、变换域通信系统设计、应用、研究的工程技术人员及其他无线通信专业的工程技术人员学习参考,也可作为高等院校通信与信息系统和电子工程专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

变换域通信系统/胡苏,唐万斌,王军著.——北京:国防工业出版社,2015.5

(无线通信前沿技术丛书)

ISBN 978-7-118-10010-5

I. ①变… II. ①胡… ②唐… ③王… III. ①通信系统 IV. ①TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第077825号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 10¹/₄ 字数 225 千字

2015年5月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 58.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

序

随着国民经济的发展，无线通信技术已被广泛地应用在国民经济的各个领域和人们的日常生活中，特别是公用移动通信的迅速发展，公众使用的各种无线通信设备的数量急剧上升。尽管合理的频谱规划能够降低无线通信设备之间的部分干扰，如何进一步降低无线通信系统中干扰成为了无线通信系统提高系统容量、通信质量的技术难点。认知无线电能够通过智能学习提高频谱资源整体利用率，成为无线通信的发展方向之一，变换域通信系统作为认知无线电概念的实现方案之一，利用主动频谱感知和频谱判决，能够实现复杂电磁环境中无线通信系统抗干扰、抗截获，因此受到了高度关注。

目前，我国在认知无线电和变换域通信领域取得了许多重要研究成果，技术处于国际先进水平，在 ITU、IEEE 等国际标准化组织的相关标准制定中取得了较多话语权。本书作者的课题组致力于变换域通信系统的技术攻关、实现和应用推广，是国内较早开展变换域通信研究的课题组之一。本书是作者近年来在变换域通信研究方向的主要研究成果的提炼和整理，部分研究成果填补了该领域的空白。

本书涵盖了变换域通信系统的三个主要方面：变换域通信系统的工作机理；变换域通信系统在低信噪比条件下的时间频率同步、信道估计等关键技术；实际通信环境中，基于变换域通信技术的多用户通信系统及其配置参数优化设置。本书同时介绍了进一步降低传统多用户变换域通信系统的硬件实现复杂度的改进型系统。

本书体系完整、层次清晰、图文并茂，并提供了示例，保证了全书内容的学术性、系统性和可读性。本书可以作为相关研究人员和感兴趣读者的参考书。相信本书的出版，将为我国认知无线电和变换域通信系统的研究以及应用起到积极的推动作用，并进一步促进我国无线通信的持续高速发展。

李少谦

2015 年 3 月

前 言

随着国民经济的发展,无线通信技术已被广泛地应用到国民经济的各个领域和人们的日常生活中,特别是公用移动通信的迅速发展,使得各种无线通信设备的数量急剧上升。尽管合理的频谱规划能够降低无线通信设备之间的部分干扰,但如何进一步降低无线通信系统中的干扰成为了无线通信系统提高系统容量、系统通信质量的技术难点。

对于军事通信而言,现代战争中指挥通信、军事情报、兵器控制都日益依赖于电子设备,特别是无线电设备的支持。但是由于电磁频谱空间的开放性,无线信道容易被敌方侦察、截获和干扰,拥有和隐蔽通信信号变得十分困难,因此,无线通信抗干扰技术在军用通信具有重要的研究意义。尽管传统通信抗干扰技术在窄带干扰环境下具有良好的抗干扰性能,然而在宽带干扰和灵巧干扰环境中性能损失明显。根据分析发现,传统通信抗干扰技术并没有主动获取干扰信号时间分布,频率分布等重要信息,仅仅依靠频谱拓展或者通过一定概率躲避干扰来获取抗干扰能力。

1998年,Joseph Mitola III博士首先提出了认知无线电(Cognitive Radio, CR)的概念,其核心思想是认知无线电具有学习能力,能与周围环境交互信息,以感知和利用在该物理空间的空闲频谱,并限制和降低冲突的发生。此后,全球工业界和学术界开始大规模研究认知无线电的理论和技術。我国在“十五”开始,通过“863”计划启动了认知无线电的研究工作。“十一五”期间,国家“863”“973”计划和自然科学基金等进一步加强了对认知无线电研究的支持。

基于认知无线电概念中的频谱感知和频谱判决能力,变换域通信系统(Transform Domain Communication Systems, TDCS)主动寻找干扰信号的频率范围,确定空闲频谱用于变换域通信系统的数据传输,从而实现无线通信过程中主动抗干扰的目的,即通过在发射端和接收机联合设计信号波形使其避开被干扰的频段。经过信息调制的信号不包含干扰频段的频谱成分,这样信噪比不受变换域滤波的影响。

此外,为了达到无线通信系统抗截获目的,变换域通信系统采取频域扩频方式把有效数据扩展到所有空闲频谱。根据扩频方式的技术特点可知,通过扩频的方式能够将数据信号有效地隐藏在噪声信号之中,从而实现抗截获的目的。因此,变换域通信系统通过上述主动频谱感知,频谱判决和频域扩频三种技术手段,能够实现无线通信系统主动躲避干扰信号,利用频域扩频达到抗干扰、低捕获概率的目的。

本书共分为7章。第1章通过介绍无线通信的干扰和抗干扰技术,说明了传统抗干扰技术的局限性以及发展新型抗干扰技术的必要性,在认知无线电概念的基础上,阐述了变换域信号处理与变换域通信系统的共性和特性,最后介绍了变换域通信系统的研究现状和应用情况。第2章详细介绍了变换域通信系统的基本原理和调制方式,针对传统变换域通信系统硬件实现的高复杂度,介绍了基于正交频分复用架构的变换域通信系统,以及针对上述硬件实现结构的改进型编码变换域通信系统。第3章首先介绍了正交频分复用系统同步中的两个重要过程,包括同步符号检测和同步参数估计;然后面向极低信

噪比和部分频率可用的认知无线电场景,展开对变换域通信系统同步技术的研究;针对变换域通信系统的应用场景明确同步技术的需求,介绍可行的同步方案依次完成同步符号检测和同步参数估计。第4章首先对正交频分复用系统的信道估计技术进行综述,然后分别针对慢衰落信道和快衰落信道重点研究适用于变换域通信系统的信道估计技术。第5章分析讨论变换域通信系统的频谱效率以及如何通过系统设计优化系统频谱效率,结合不同的应用场景,重点研究了基于嵌入式混合调制、子载波簇化以及正交循环码移位调制等3种改进的TDCS系统,讨论了调制方式、调制阶数、子载波点放置等不同因素对频谱效率的影响。第6章首先重点介绍变换域多用户通信系统以及接收端多用户检测方法;其次讨论了基于认知序列设计的变换域多用户通信系统,能够实现多用户变换域通信系统主动抗干扰、抗截获以及抗多用户干扰的技术优点。第7章针对上述变换域多用户通信系统的高复杂度和低灵活性的技术缺陷,介绍了基于认知序列软扩频的低复杂度认知扩频通信系统。此外,为了解决认知扩频通信系统的实用化难点,本章重点讨论了如何优化认知序列的相关特性和峰均功率比特性。

本专著是作者长期从事认知无线电和变换域通信系统研究的成果提炼。曾经或正在电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室学习的博士生何浩、喻火根,硕士生彭启航、陈磊、韩川、黄彪、龚树平,路瑶,柯英豪、郭惠婷、袁航、黄驿轩等对认知无线传输理论和关键技术,以及认知序列优化进行了广泛而深入地研究,他们所取得的有关成果对完成本书起到了重要作用,在此一并向他们表示感谢!

本专著获得了国家自然科学基金(No. 61101090, No. 61471100, No.61401074)、863计划项目(No.SS2015AA011303 和 2014AA8098083C)、中央高校基本业务费项目(No. ZYGX2012Z004)的资助。

已发表的本专著相关的研究成果包括:①电子科技大学博士毕业论文2篇(何浩、喻火根)、硕士毕业论文6篇(韩川,黄彪,彭启航,龚树平,陈磊,路瑶);②在国内外期刊和会议上发表了10余篇论文(包括IEEE Journal on Selected Areas in Communications, IEEE Transactions on Communications, IET Communications, Computer Networks 等国际高水平期刊论文,IEEE ICC, IEEE CrownCom 等国际高水平会议论文);③已授权和申请认知无线电和变换域通信系统相关的国家发明专利20余项;④提交认知无线电技术相关的国际和国内标准化提案10余项。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2015年3月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线通信的干扰和抗干扰技术	1
1.2 认知无线电技术背景	3
1.3 变换域通信系统	4
1.3.1 变换域信号处理	4
1.3.2 变换域通信系统	5
1.4 研究现状	6
1.4.1 传统信号变换域处理方法	7
1.4.2 变换域通信系统调制技术	8
1.4.3 变换域通信系统信号捕获和时频同步	9
1.4.4 峰均功率比抑制	9
1.4.5 变换域多用户通信系统	10
1.5 变换域通信系统的应用和展望	12
1.6 本书的范围和概貌	14
参考文献	15
第 2 章 变换域通信系统	18
2.1 变换域通信原理	18
2.1.1 变换域通信系统模型	18
2.1.2 圆周移位键控	21
2.2 基于 OFDM 架构的 TDCS 系统	26
2.2.1 基于 OFDM 架构的 TDCS 系统	26
2.2.2 基于交织 OFDM 架构的 TDCS 系统	28
2.3 编码变换域通信系统	32
2.3.1 编码 TDCS 系统软解调	32
2.3.2 改进型编码变换域通信系统	34
2.4 本章小结	39
参考文献	39
第 3 章 变换域通信系统同步技术	41
3.1 OFDM 系统的同步过程	41
3.1.1 同步符号检测	41
3.1.2 同步参数估计	42
3.1.3 同步算法综述	43

3.2 OFDM-TDCS 系统的同步技术	43
3.2.1 同步技术需求分析	43
3.2.2 同步符号设计	44
3.2.3 同步符号检测	45
3.2.4 同步参数估计	49
3.3 本章小结	52
参考文献	52
第 4 章 变换域通信系统信道估计技术	54
4.1 OFDM 系统信道估计技术综述	54
4.2 衰落信道模型	55
4.2.1 IEEE 802.22 C 类信道模型	56
4.2.2 COST207 TU 信道模型	56
4.2.3 衰落信道的自相关函数	56
4.3 编码 OFDM-TDCS 系统的信道估计技术	57
4.3.1 LS 信道估计	57
4.3.2 LS 迭代信道估计	61
4.3.3 RLS 信道估计原理	63
4.3.4 性能分析与仿真	65
4.3.5 RLS-PF 迭代信道估计	73
4.4 算法评价	76
4.5 本章小结	77
参考文献	77
第 5 章 增强型变换域通信系统调制技术	79
5.1 传统 TDCS 的频谱效率	79
5.2 嵌入式混合调制 TDCS 系统	80
5.2.1 原理简介	80
5.2.2 仿真结果及分析	82
5.2.3 本节小结	84
5.3 基于子载波簇化的 TDCS	84
5.3.1 原理简介	85
5.3.2 子载波点分配机制	88
5.3.3 仿真结果及分析	90
5.3.4 本节小结	92
5.4 基于正交循环码移位调制的 TDCS	93
5.4.1 原理简介	93
5.4.2 Q-CCSK 的理论性能分析	96
5.4.3 仿真结果及分析	99
5.4.4 本节小结	101
5.5 本章小结	101

参考文献	102
第 6 章 多用户变换域通信系统	104
6.1 传统多用户变换域系统	104
6.1.1 系统模型	105
6.1.2 多用户接入的原理	106
6.1.3 随机相位序列的参数选取	107
6.2 多用户检测	111
6.2.1 多用户检测技术简介	111
6.2.2 多用户检测技术的性能测度	114
6.2.3 仿真结果	115
6.3 基于认知无线电架构的多用户变换域系统	117
6.3.1 系统模型	118
6.3.2 基于时频二维设计的序列设计	122
6.3.3 单径衰落信道下的调制方案设计与性能分析	124
6.3.4 多径衰落信道的调制方案设计与性能分析	130
6.4 小结	132
参考文献	133
第 7 章 基于认知序列软扩频的 CR-CDMA 系统	134
7.1 CR-CDMA 系统简介	134
7.2 认知序列设计与性能优化	137
7.2.1 基于时频二维的准 ZCZ 认知序列设计	137
7.2.2 自相关特性和峰均功率比的联合数值优化	140
7.3 基于认知序列的 CDMA 通信系统方案设计	145
7.3.1 系统模型	145
7.3.2 性能分析	146
7.4 小结	150
参考文献	150

第1章 绪 论

随着国民经济的发展,无线通信技术已被广泛地应用在国民经济的各个领域和人们的日常生活中,特别是公用移动通信的迅速发展,使得各种无线通信设备的数量急剧上升。尽管合理的频谱规划能够降低无线通信设备之间的部分干扰,但如何进一步降低无线通信系统中的干扰成为了无线通信系统提高系统容量、系统通信质量的技术难点。此外,对于军事通信而言,现代战争中指挥通信、军事情报、兵器控制都日益依赖于电子设备,特别是无线电设备的支持。对于飞机、舰艇、坦克等运动载体而言,无线通信是唯一的通信手段。但是由于电磁频谱空间的开放性,无线信道容易被敌方侦查、截获和干扰,拥有和隐蔽通信信号变得十分困难,因此,无线通信抗干扰技术在民用通信和军用通信具有重要的研究意义。

本章以无线通信为背景,在简介传统通信抗干扰技术之后,重点叙述基于认知无线电技术的变换域通信系统,该系统的特点在于,通过结合认知无线电频谱感知和频谱判决能力,变换域通信系统具有主动抗干扰、抗截获的技术特点。

1.1 无线通信的干扰和抗干扰技术

对无线电通信过程的干扰是在无线电通信技术诞生之前就已经客观存在了,如天线干扰和工业干扰等,但是人为的无线电干扰却是在无线电通信技术成功应用于战争研究之后才发展起来的。为了有效地进行干扰,敌方侦查、分析和干扰释放过程要快,干扰频率和其他干扰信号特征要准确,干扰功率要大,即在时间、频率、距离三维空间中,干扰方要尽可能逼近被干扰方^[1]。

通常的干扰类型有窄带干扰、宽带干扰和跟踪式干扰。

(1) 窄带干扰。通信频率的少量频点与频段所受到的干扰范围是局部的,瞄准式的窄带干扰可以集中功率,实现大功率干扰。

(2) 宽带干扰。适用于干扰信号带宽占据通信总带宽较大比例的通信场景。当宽带干扰覆盖到通信的全频段且功率又足够大时,则形成阻塞式干扰。宽带干扰在一定程度上是功率的对抗,要达到干扰目的,必须使干扰功率在对方信号频谱上进行全面压制,需要宽带干扰机具有足够大的干扰功率。

(3) 跟踪式干扰。干扰机实时地侦查接收无线通信信号,进行信号处理后在相同的中心频率上发射干扰信号,从而破坏跳频通信的方式。一般来说,跟踪式干扰是对跳频通信威胁最为严重的一种干扰方式。跟踪式干扰的技术水平主要取决于侦查接收、信号分析和施放干扰三个要素的处理过程。

为了解决上述不同类型的干扰信号对无线通信系统的影响,首先通信信号应具有高隐藏性、低截获性,使对方难以从周围众多电磁信号、干扰和噪声的环境中进行有效地

识别分类。其次，无线通信系统能够自动监测外部电磁环境，实时评估系统性能，分析干扰信号特征，自适应地回避干扰，根据电磁环境变化智能地进行无线通信系统参数和网络拓扑的优化配置，达到最好的通信效果。因此，无线通信系统的抗干扰能力不仅表现在设备的干扰容限，还要表现在系统和网络的综合抗干扰能力上，因此，各种无线通信抗干扰技术是复杂的抗干扰通信系统的基础。

无线通信抗干扰技术的基本目的是通过对信息、信息载体及传播方式进行特定的信号处理，提高通信接收机的输出信干噪比（Signal-to-Interference-Noise Ratio, SINR），使其具备较强的区分有用信号和干扰信号的能力；提高通信信号的隐藏性，使敌方难以识别和干扰，从而正确地接收所需的信息。通信抗干扰技术的基本技术、方法、措施一般可分为以下三类。

（1）信号处理。如采用扩展频谱技术，利用伪随机序列对发射和接收的信号进行扩频处理，以达到对干扰信号进行抑制的目的。

（2）空间处理。如采用自适应天线调零技术，当接收机受到干扰时，利用天线方向图零点自动指向干扰方，以提高通信接收机的信干噪比。

（3）时间处理。如突发传输技术，由于通信信号在传输过程中暴露的时间很短暂，降低了通信信号被侦察、截获的概率，从而提高了通信系统的抗干扰能力。

提高无线通信系统在严酷信息战环境下的生存能力，是军事通信面临的迫切问题。从具体技术而言，为了达到通信抗干扰能力，传统军事通信系统通常采用以下方法。

（1）时域直接序列扩频（Direct-sequence Spreading, DS）——直接用高码率的扩频码序列在发射端去扩展信号的频谱，使信号淹没在噪声里，敌方很难发现有信号存在；

（2）跳频（Frequency Hopping, FH）——指用一定码序列去选择的多频率频移键控，使载波频率不断跳变；

（3）跳时（Time Hopping, TH）——是用一定的码序列进行选择的多时片的时移键控，使发射信号在时间轴上跳变；

（4）各种混合方式——在上述几种基本的抗干扰方式的基础上，可以互相组合，构成各种混合方式，例如 FH/DS、DS/TH、FH/TH 或 DS/FH/TH 等，如图 1-1 所示。

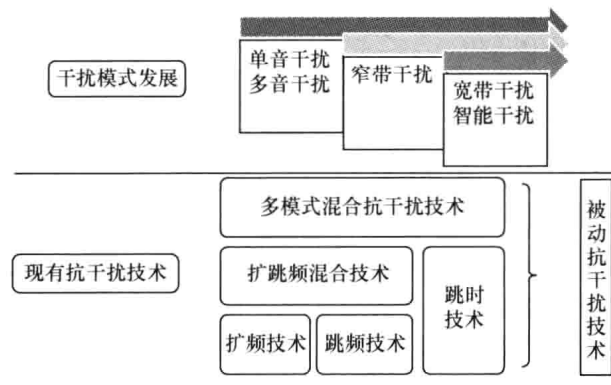


图 1-1 通信干扰与抗干扰技术的发展过程

未来通信抗干扰技术的发展趋势是：扩频技术、自适应技术与其他抗干扰技术相结合形成的自适应综合抗干扰技术；时域、频域抗干扰技术与空域抗干扰技术相结合形成的多维抗干扰技术；设备级的抗干扰走向系统级、网络级抗干扰；通信抗干扰技术理论的进一步完善和发展。

1.2 认知无线电技术背景

随着通信技术的迅速发展，不断进步的干扰技术也从传统的单音频干扰、多音频干扰、窄带干扰演变到宽带干扰（干扰机的干扰信号具有较宽的带宽）和灵巧干扰（干扰源主动变换干扰模式和干扰参数）。根据现有的资料文献可知，尽管传统通信抗干扰技术在窄带干扰环境下具有良好的抗干扰性能，然而传统的通信抗干扰技术在新型干扰模式下性能损失明显^[1]。根据分析发现，传统通信抗干扰技术并没有主动获取干扰信号时间分布，频率分布等重要信息，仅仅依靠频谱拓展或者通过一定概率躲避干扰来获取抗干扰能力。本小节通过介绍认知无线电的基本理论，介绍基于认知无线电技术的变换域通信系统的基本原理。

众所周知，无线频谱是无线电通信中宝贵的自然资源，一般采用固定分配的方式，由政府机关授权使用。由于通信行业的迅速发展，无线频谱资源贫乏的问题日益严重，尤其是在频率需求非常紧张的数百兆赫兹到 3GHz 无线频带中。然而，实际测量数据表明，大多数频段的频谱并没有被充分使用^[2]。一些频带大部分时间内并没有被任何用户使用，另有一些只是偶尔才被占用，其他频带使用竞争则相对很激烈。怎样才能提高频谱利用率已经成为人们非常关注的技术问题。

通过在合适的时间和地点让其他用户（那些没有被授权的用户）接入到没有被主用户（授权用户）占用的频段，频谱的低效使用可以得到改善。频谱管理机构指定的频段所有者享有优先权，其他设备在这些频段空闲时才可以分享它们。要做到这一点，就要教会“认知无线电”设备与其附近的其他设备进行协商。协商本身也要利用带宽，并且要遵守一定的规则，就像要转换车道的汽车一样。

认知无线电（Cognitive Radio, CR）的概念起源于 1999 年 Joseph Mitola 博士的奠基性工作，其核心思想是认知无线电具有学习能力，能与周围环境交互信息，以感知和利用在该物理空间的空闲频谱，并限制和降低冲突的发生^[3]。CR 的学习能力是使它从概念走向实际应用的真正原因^[4, 5]。有了足够的人工智能，CR 就可能通过过去的经验来对现在的实际情况进行实时响应，过去的经验包括对信号盲区、干扰和使用模式等的了解。这样，CR 有可能赋予无线电设备根据频带可用性、位置和过去的经验来自主确定采用哪个频带的功能。随着许多 CR 相关研究的展开，对 CR 技术存在多种不同的认识。最典型的一类是围绕 Mitola 博士提出的基于机器学习和模式推理的认知循环模型来展开研究，强调软件无线电（Software Defined Radio, SDR）是 CR 实现的理想平台。

目前，人们对认知无线电和软件无线电的关系基本达成共识：软件无线电具有相当的灵活性，但与认知无线电相比，缺乏一定的智能。二者的主要区别在于：软件无线电的工作参数由软件控制，允许通过编程来改变硬件平台支撑的收发机工作频率和调制方式；认知无线电能够通过与工作环境的信息交互来改变无线通信系统的参数配置，这些信息交互包括主动与频谱使用者协商和通信，和/或被动的频谱检测判决。认知无线电的实现不一定需要软件无线电的支撑，但如果借助于软件无线电，则认知无线电会具有更多潜在的优势。

基于上面的考虑,业界提出 CR 作为一种提高频谱使用率的手段,能感知环境,并能智能地调整系统的参数,以适应用户的要求^[6, 7]。CR 可以看作是带有“认知引擎(Cognitive Engine)”大脑的软件无线电^[8]。在概念上,认知引擎通过配置系统的发射波形、通信协议、工作频段和网络来对操作者的命令作反应,它同时不停地监视自己的性能,通过观察接收机的输出来确定射频环境、信道条件、链路性能等,同时通过调整系统的设置来使得业务质量满足用户要求、操作规范和管理限制^[9]。

当前,在频谱政策管理部门的带动下,一些组织开始开展 CR 技术的标准化工作,并先后制定了一系列标准以推动该技术在多种应用场景下的发展。例如,为了将分配给电视广播的 VHF/UHF 频带的空闲频道有效利用起来,2004 年成立的 IEEE 802.22 工作组开始制定对基于 CR 的无线区域网络(Wireless Regional Area Network, WRAN)的空中接口标准,目前已经推出了标准的草案^[10]; IEEE 802.16 工作组正在着手制定 IEEE 802.16h 版本标准,致力于改进如策略、MAC 增强等机制以确保基于 WiMAX(World Interoperability for Microwave Access)的免授权系统之间、与授权系统之间的共存。此外,ITU(International Telecommunication Union)也在努力寻找类似 CR 的频谱共享技术。

受 CR 的潜力及其在无线电领域公认的“下一件大事情”的激励,国内外大学和一些科研机构也开始投入到认知无线电技术的研究当中。UC Berkeley 大学的 Anant Sahai 等人专注于认知无线电技术的可行性研究,他们试图解决认知无线电技术应用的基本理论问题。Rutgers 大学的 WINLAB 实验室在美国国家自然科学基金的资助下,与 Georgia Institute of Technology 和 Lucent Bell 实验室联合研发认知无线电实验平台^[11, 12]。该实验室还获得了美国国家自然科学基金的资助,研究通过认知无线电技术进行开放的频谱接入的算法和协议及其相关技术^[13]。

美国国防高级研究计划署(DARPA)资助了下一代无线通信(XG^[14])项目,主要研究系统方法和关键技术,以实现基于认知无线电技术的动态频谱应用;维吉尼亚理工(Virginia Tech)无线通信技术中心主要关注遗传算法的认知模型的研究、基于博弈论的认知无线电研究和认知无线电节点引擎试验床的研发;英国的移动通信技术虚拟中心开始转向认知无线电的研究,其多模终端研究小组与布里斯托尔大学(Bristol University)通信系统研究中心开始联手进行自适应射频技术的研究;欧洲通信协会资助的 DRiVE、OverDRiVE^[15]和 TRUST 项目主要关注在混合的多天线网络中动态的分配和流量控制,该协会同时资助的端到端重配置(End to End Reconfigurability, E²R^[16])网络研究项目主要研究如何功过端到端重配置网络和软件无线电技术将未来不同类型的无线网络融合起来,对基于认知无线电应用的市场模型、认知无线电网络的定价策略和计费策略也进行了初步的研究。

1.3 变换域通信系统

1.3.1 变换域信号处理

近年来在众多的抗干扰信号处理中,变换域处理技术越来越引起人们的广泛重视。所谓变换域处理技术就是将信号映射到时域以外的空间进行处理的一种信号处理技术。

变换域处理有许多优点,例如在变换域中,信号的某些特性会变得更加突出,从而获得更好的处理效果,而且有许多复杂的非线性处理在时域几乎不可能实现,却能在变换域里很方便地设计出来。在军用扩频通信应用中,变换域处理可以有效地抑制干扰,改善系统性能,因此,提高扩频系统的处理增益作为一种抗干扰途径,已具体应用到军事通信卫星有效载荷中^[24]。此外,随着大规模、超大规模和表面声波技术的迅速发展,使过去不可能进行变换域处理的技术(如傅里叶变换域处理)成为可能,而且能够实时实现,这就进一步推动了变换域处理技术的发展。

变换域处理技术的关键问题是寻找一种合适的变换,能够将干扰映射成为类冲击函数,与之对应地将信号映射成为与之正交(或准正交)的具有平坦谱特性的信号波形。这样通过对干扰所对应的变换域系数进行处理,再利用反变换恢复出所需要的信号^[25]。可以看出,变换域抗干扰技术包含两个重要组成部分:

- (1) 选择一种合适的变换使其能够将干扰映射为冲击函数(或类冲击函数)。
- (2) 对变换后的数据进行有效处理,做到既抑制干扰成分,又不过多损失有用信号。

然而传统通信系统的变换域处理对接收到的信号进行处理,而不是对信号本身进行设计。虽然变换域处理技术可以获得较好的抗干扰性能,但是这种处理在滤除干扰的同时也使被滤频带中的有用信号受到损失,使信号的信噪比降低,从而导致误码率提高。对于通信抗干扰设计而言,如果转换研究思路,利用 CR 技术的频谱认知、频谱判决、随机接入等特点,有效地判别干扰信号的时间分布、频率分布以及干扰类型,则能够主动避让或者抑制干扰信号,提高军事通信链路的通信质量。变换域通信系统通过在发射端和接收机联合设计信号波形使其避开被干扰的频段,经过信息调制的信号不包含干扰频段的频谱成分,这样信噪比不受变换域滤波的影响。

1.3.2 变换域通信系统

传统的变换域处理是对已接收到的信号进行处理,而不是对信号本身进行设计。虽然变换域处理技术可以获得较好的抗干扰性能,但是这种处理在滤除干扰的同时也使被滤频带中的有用信号受到损失,使信号的信噪比降低,从而导致误码率提高。针对目前主动干扰器的工作特点,干扰器的工作方式主要采取针对一个固定的频率范围进行大功率信号压制,从而主动破坏无线通信链路的通信质量。如果利用 CR 概念中的频谱感知和频谱判决技术,主动寻找干扰信号的频率范围,确定空闲频谱,使其用于变换域通信系统的数据传输,从而实现无线通信过程中主动抗干扰的目的,即通过在发射端和接收机联合设计信号波形使其避开被干扰的频段,也就是说经过信息调制的信号不包含干扰频段的频谱成分,这样使得信噪比不受变换域滤波的影响。

此外为了达到无线通信系统抗截获的目的,通信系统能够采取频域扩频方式把有效数据扩展到所有空闲频谱中。根据扩频手段的技术特点可知,通过扩频的方式能够将数据信号有效地隐藏在噪声信号之中,从而实现抗截获的目的。通过上述主动频谱感知,频谱判决和频域扩频三种技术手段,能够实现无线通信系统主动躲避干扰信号,利用频域扩频达到抗干扰、低捕获概率的目的。

为了满足上述通信系统抗干扰技术要求,美国空军技术研究所(Air Force Institute of Technology)提出了一种结合 CR 技术的新型抗干扰/抗截获通信传输技术,即变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)。变换域通信系统首先利用

CR 概念中的频谱感知和频谱判决技术, 主动寻找干扰信号的频率范围, 确定空闲频谱用于变换域通信系统传输。1988 年, German 提出利用频谱占用信息修改直接序列扩频信号的波形来避免干扰^[17]。1991 年, Harris 公司的 Andren 为一种低截获率通信系统申请了专利^[18]。该专利没有提供理论分析, 也没有提供和功能处理相关的实现问题。美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory) 和空军技术学院采用了 Andren 提出的传播环境采样、波形生成的收发机框架和 German 的发送信号处理技术^[19]。该方案中的接收机使用传统的时域匹配滤波和最大似然检测估计。之后, V.Chakravarthy 在 WCNC 2005 上提出将变换域通信系统作为一种认知无线电技术的收发机候选方案^[20]。

变换域通信系统可以使用基于傅里叶变换的、基于离散余弦变换的和基于小波变换的基函数^[21], 其调制方式可以为循环码移键控 (Cyclic Code Shift Keying, CCSK)^[22]和正交编码用来传送数据。在实际应用中, 变换域通信系统为了传输有效数据, 主要采用 CCSK 调制方式有以下三个主要原因:

(1) CCSK 调制仅仅改变伪随机频谱效用序列中每个元素的相位特性, 因此, 调制后的数据仍然具有平坦的功率谱特征。类似于高斯白噪声, 具有平坦功率谱特征的信号具有低捕获概率 (从功率谱捕获角度)。

(2) CCSK 解调通过寻找圆周自相关函数的最大值位置, 从而恢复有效传输数据。从信号处理的角度而言, 圆周自相关函数能够通过 IFFT/FFT 模块实现, 降低了硬件复杂度。

(3) 对于 CCSK 解调而言, 系统接收机仅仅根据相关峰值的位置恢复出发送信号, 因此对于变换域通信系统而言, 接收机并不需要完美的自适应增益控制技术。根据上述技术特点是美国联合战术信息发布系统 (Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS) 采用 CCSK 的主要原因。

通过分析上述技术特点可知, 变换域通信系统的核心思想是, 首先利用频谱感知模块扫描外部的电磁环境, 通过频谱判决筛选出空闲的频谱资源, 然后在空闲频谱资源上分配伪随机多相位序列进行频域扩频, 最后采用圆周循环调制方式发射相应的数据。在特定通信环境中 (例如人为主动干扰环境), 变换域通信系统具备主动抗干扰、抗截获的技术特点。

1.4 研究现状

根据国内外研究现状, 国内外科研机构也处于起步阶段, 例如美国空军技术研究所 (Air Force Institute of Technology)、荷兰代尔夫特理工大学 (Delft University of Technology)、法国图卢兹大学 (University of Toulouse) 和 Ates Europe SAS 研究中心、新加坡淡马锡实验室 (Temasek Lab) 等。在国内, 2005 年启动的国家高技术发展计划中, 电子科技大学、西安电子科技大学和西安交通大学三校联合开展了有关变换域通信系统的研究。其他开展研究的高校包括清华大学、香港科技大学、哈尔滨工业大学、海军工程大学、空军工程大学等。在本小节后续的内容中, 将从变换域信号处理、调制方式、时频同步和捕获、峰均功率比优化以及变换域多用户网络几个方面重点总结变换域通信系统目前的研究现状。

1.4.1 传统信号变换域处理方法

变换域处理技术是变换域通信系统的灵魂，不同的干扰形式在不同变换域表现出不同的特点，选择合适的变换域技术能够实现最优的干扰剔除，现有的研究主要表现在傅里叶变换、小波变换、小波包变换、分数阶傅里叶变换等，下面将分别作简要介绍^[23]。

1. 离散傅里叶变换

离散傅里叶变换（Discrete Fourier transform, DFT）^[24, 25]是目前应用非常广泛的一种时频数字信号处理工具，且变换域通信最初也是建立在 DFT 上发展起来的。DFT 变换定义为一系列频率从 $0 \sim \pi$ 变化的复数正弦信号组成的基函数。在信号处理方面，DFT 变换的一个主要应用是谱估计。对于变换域通信系统而言，通过 DFT 频谱幅值来判断当前环境中存在干扰的区域或被占用的区域，并对该区域频点进行定位和剔除，具有简单直观、实现复杂度低、易于工程实现等优点。但是 DFT 是一种全局性变换，得到的是信号的整体频谱，因而无法表述信号的时频局部特性，而这种特性正是非平稳信号的最根本和最关键的性质，所以 DFT 在抵抗非平稳干扰时显得苍白无力。

2. 离散小波变换

离散小波变换（Discrete Wavelet Transformation, DWT）^[26]是一种窗口大小（即面积）固定而形状可变的分析方法，其时间窗和频率窗都可以改变，实现了时-频窗口的自适应变化。在低频时，小波变换的时间分辨率较差而频率分辨率较高，而在高频时正好相反。这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点，在信号的时频分析中具有很好的性能。基于 DWT 的门限剔除有基于小波系数和基于子带两种方法，由于在一个小波子带内的小波系数是时间的函数，这等价于假设系统在每一个码元周期内与干扰同步，这种假设无法剔除不存在于整个采样间隔内的干扰和扫频干扰；基于子带的方法是对整个子带进行门限剔除，也就是说整个子带被置为 0 或 1，由于干扰时间信息并未被使用，这种方法对同步没有要求。

3. 离散小波包变换

离散小波包变换（Discrete Wavelet Packet Transformation, DWPT）^[27]是在 DWT 的基础上对其高频部进一步分解，弥补了 DWT 在高频部分频率分辨率低而有可能剔除过多频率资源的不足，其具有多分辨率分析能力和良好的时频局部化特性，实时消除干扰以及当干扰变化较快时能够迅速将窄带噪声定位在一定的频域范围内，从而能够更好地消除窄带噪声，但是仍然存在分解深度不易控制和对非平稳干扰的抵抗能力差等问题。

4. 分数阶傅里叶变换

分数阶傅里叶变换（Fractional Fourier Transform, FrFT）^[28]是一种广义的傅里叶变换，可以理解为 chirp 基分解。如同单频正弦信号经过傅里叶变换就必然会在某个单频基上成为冲激函数，一旦要剔除的 chirp 信号与某组基的调频率吻合，那么该信号也就必然在该组基中的某个基上形成一个特征函数，而在别的基上则为零，这一点说明了 chirp 信号在分数阶傅里叶变换域上具有很好的时频聚焦性。针对线性调频（Linear Frequency Modulation, LFM）干扰，其在时、频域都具有较大的展宽，采用处理平稳信号的方法对其抑制往往得不到很好的效果，可以对 LFM 干扰信号在分数阶傅里叶域上进行精确剔除。

1.4.2 变换域通信系统调制技术

与传统的通信系统不同,变换域通信系统并没有使用载波调制,而是使用根据信道特征所设计的基函数对信息数据进行调制,即波形调制方式。变换域通信系统的调制技术主要有双极性调制和正交调制两类,而正交调制又有二元和多元之分。后来的研究者将双极性调制和 CSK 调制相结合产生了一种新的调制方式,即循环翻转移位键控。在多元正交调制的基础上结合双极性调制,衍生出多元双正交调制,后来有研究者分析了嵌入式混合调制技术在变换域通信系统中的性能,进一步丰富了变换域通信系统的调制技术。

1. 双极性调制

双极性调制是一种信号极性彼此相反的调制方式,即采用基函数和基函数的负数代表不同的二进制码元。如果变换域通信系统的基函数为 $b(t)$, 对于双极性调制的数学表述为

$$s_1(t) = b(t); s_2(t) = -b(t)$$

2. 正交调制

正交调制利用变换域通信系统基函数具有类似噪声特性,即与其自身时移的自相关值接近于 0, 因此,可以使用循环移位键控调制 (Cyclic Code Shift Keying, CCSK), 即通过 $b(t)$ 的循环移位代表不同的符号。值得注意的是,时域的循环移位反映在频域是线性相位移位,所以仅仅影响频率成分的相位,不会影响频谱幅度。

3. 嵌入式混合调制

结合双极性和 CCSK 调制又出现了一种新的调制方式,循环翻转移位键控 (Cyclic Antipodal Shift Keying, CASK) 比 CSK 更接近正交调制。通过扩展 CASK 调制方式的范围,嵌入式混合调制在 CCSK 调制的技术上引入了幅度相位载波调制技术,即 QPSK, 8PSK, 16QAM 等^[29, 30], 从而提高变换域通信系统的频谱利用率。但是随着嵌入式调制的阶数不断提高,变换域通信系统的性能也迅速恶化。因此,对于嵌入式混合调制而言,如何根据外部电磁环境和无线传播信道特征选择合适的调制阶数对于变换域通信系统而言具有重要的研究意义。

4. 双支路准正交循环移位键控调制^[31]

双支路准正交循环移位键控调制 (Quasi-orthogonal Cyclic Code Shift Keying, Q-CCSK) 通过分析传统变换域通信系统发现,接收机仅仅利用认知序列实数域相关特性恢复数据信息。如果利用正交空间投影方法构建准正交认知序列,那么该认知序列的虚数域同样具有良好的相关特性。根据上述发现,通过修改传统变换域通信系统的发射机结构,使其能够构建基于正交投影的准正交认知序列对。当变换域通信系统采用该认知序列对传输数据信息时,系统频谱效率能够提高一倍,并且保持系统误码率基本不变。

5. 基于簇化理论的循环移位键控调制^[32]

通过分析变换域通信系统发射信号与接收信号,传统变换域通信系统能够认为是一种饱和扩频通信系统,因此,系统误码率特性与空闲频谱的数量呈现对数特性。通过簇化方法 (Clustering) 将空闲频谱资源进行合理分配 (连续分配、等间距分配、随机分配),能够产生满足严格正交条件的认知序列集合。如果变换域通信系统采用该正交认知序列集合分别携带不同的数据信息,那么变换域通信系统的频谱利用率能够成倍增加,并且系统误码率维持在合理范围。