

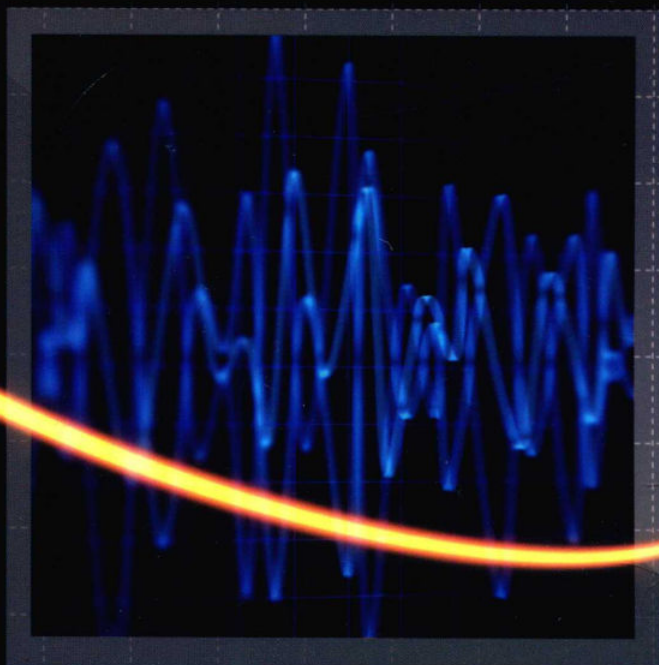


高端科技专著丛书

非高斯特殊噪声干扰的 抑制与消除

——从经典信号处理到压缩感知方法

◆ 刘思聪 杨 昉 宋 健 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

高端科技专著丛书

非高斯特殊噪声干扰的抑制与消除

——从经典信号处理到压缩感知方法

刘思聪 杨 昉 宋 健 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书针对宽带通信系统的关键技术难点,基于经典数字通信系统理论和新型稀疏恢复理论,从有效抑制窄带干扰的新型物理层帧结构设计、联合抵抗窄带干扰与冲激噪声的最优时频联合交织、基于压缩感知与结构化压缩感知的窄带干扰与冲激噪声稀疏恢复等几方面展开,介绍面向鲁棒高效5G新空口的非高斯噪声干扰抑制与消除最新研究进展和关键技术。其相关技术可以广泛应用于新一代无线通信、大规模多天线系统、电力线通信等多种宽带通信系统,为构建高可靠、高速率、广覆盖、海量连接的5G New Radio新空口提供支撑。

本书适合无线通信相关专业的研究生及科技工作者参考使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

非高斯特殊噪声干扰的抑制与消除:从经典信号处理到压缩感知方法/刘思聪,杨昉,宋健著. —北京:电子工业出版社,2019.5

(高端科技专著丛书)

ISBN 978-7-121-36455-6

I. ①非… II. ①刘… ②杨… ③宋… III. ①数字信号处理-噪声控制-研究 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第084770号

策划编辑:曲 昕

责任编辑:夏平飞

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:北京天宇星印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:11.75 字数:229千字

版 次:2019年5月第1版

印 次:2019年5月第1次印刷

定 价:69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: quxin@phei.com.cn。

前 言

自从 1948 年信息论鼻祖 Claude E. Shannon 先生提出信息论为通信技术奠基以来，特别是 20 世纪 90 年代起，数字通信经历了近三十年的长足发展历程，至今已实现了翻天覆地的变化。宽带数字通信技术基础雄厚，覆盖全球各个国家的绝大部分人口，关于宽带数字通信技术的研究和产业应用方兴未艾，推动着现代通信技术朝高速率、低延时、高可靠、广覆盖、海量连接等愿景和目标进一步发展。

随着现代社会的进步，无论人们日益增长的通信需求，还是大数据、物联网时代“万物互联”的需要，或下一代 5G 无线通信技术的发展，都对宽带数字通信系统的稳定性、鲁棒性和可靠性提出了越来越严苛的要求。然而，通信系统中存在的噪声、干扰一直以来都是限制通信系统性能的瓶颈。特别是宽带通信系统中广泛存在的非高斯特殊噪声与干扰，如窄带干扰、冲激噪声等，由于其复杂化、随机化、稀疏化、高强度等有别于高斯白噪声的特征，目前的传统方法限于“被动”抵抗，有一系列缺陷，无法有效抑制其不良影响，更难以做到从根本上精确消除，导致对宽带数字通信系统造成难以避免的性能损失。为保证宽带通信系统的有效、正确传输，不断提升网络吞吐率和用户服务质量，满足高可靠、高速率等下一代通信技术的需求，就必须突破通信系统性能提升这一难点，急需研究窄带干扰与冲激噪声抑制和消除的关键技术。

在这一背景下，作者总结了近年来的最新研究成果，从如何抑制窄带干扰对同步的影响、如何提升通信系统在窄带干扰与冲激噪声下的时频联合交织性能、如何精确重构并消除窄带干扰与冲激噪声等科学问题切入，围绕“加扰”以抑制、“分集”以规避、“重构”以消除噪声干扰的研究思路，开展一系列有针对性的关键技术研究，提出了有效抑制窄带干扰的帧结构设计方法，最大化时间、频率分集增益的最优时频联合交织方案，基于稀疏恢复理论的精确重构与消除算法，从多个角度入手，全面提升下一代宽带通信系统抑制和消除窄带干扰与冲激噪声的能力。

相信本书介绍的新技术与新方法有望为该领域科研工作者的进一步研究提供一定的理论基础和技术储备，并为通信信号处理、无线通信等领域的本科生或研究生提供

参考。与此同时，本书介绍的相关核心技术将推进 5G New Radio 新空口关键技术的标准化进程与产业化应用。

囿于笔者能力有限，本书目前关于无线通信新空口中非高斯特殊噪声干扰的技术内容无法做到面面俱到、尽善尽美，因此不可避免地存在一定的局限性，个别内容有待进一步完善和深入研究，望各位专家读者不吝赐教。

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 技术背景	2
1.1.1 宽带数字通信系统发展综述	2
1.1.2 宽带数字通信系统中的主要噪声和干扰	6
1.1.3 窄带干扰与冲激噪声的特征及其危害	9
1.2 相关技术发展现状及面临的挑战	12
1.2.1 窄带干扰抑制方法的研究现状与存在的问题	12
1.2.2 冲激噪声抑制方法的研究现状与存在的问题	14
1.3 关键科学问题	16
1.4 本书主要内容	17
1.5 如何阅读本书	19
第 2 章 系统模型与基础知识	21
2.1 宽带数字通信系统概述	21
2.1.1 基于 OFDM 技术的宽带块传输系统架构	21
2.1.2 基于 OFDM 块传输系统关键技术	24
2.2 宽带数字通信系统帧结构	26
2.2.1 帧头前导符号结构	27
2.2.2 数据子帧结构	29
2.3 窄带干扰模型与冲激噪声模型	30
2.3.1 窄带干扰模型	30
2.3.2 冲激噪声模型	33
2.4 稀疏恢复理论基础	35
2.4.1 压缩感知理论	36
2.4.2 结构化压缩感知理论	38
2.4.3 稀疏贝叶斯学习理论	40
第 3 章 抑制窄带干扰的同步帧结构设计	42
3.1 本章引言	42

3.2	系统模型	44
3.3	窄带干扰下的 OFDM 同步帧结构设计	45
3.4	基于前导符号检测的定时同步与小数载波频偏估计	46
3.5	窄带干扰下整数 CFO 估计与信令检测	49
3.6	算法性能分析	50
3.7	仿真结果与讨论	51
3.8	本章小结	53
第 4 章	窄带干扰与冲激噪声下的最优时频联合交织	55
4.1	本章引言	55
4.2	系统模型	57
4.3	最优时频联合交织方案设计	58
4.3.1	最大化时间分集增益交织方案	58
4.3.2	最大化频率分集增益交织方案	60
4.4	算法性能分析	62
4.5	仿真结果与讨论	64
4.6	本章小结	68
第 5 章	基于稀疏恢复理论的窄带干扰重构与消除	70
5.1	本章引言	70
5.2	系统模型	73
5.3	基于压缩感知的窄带干扰重构	75
5.3.1	帧结构系统模型	75
5.3.2	重复训练序列时间差分采样	79
5.3.3	压缩感知重构算法	81
5.3.4	仿真结果与讨论	86
5.4	基于结构化压缩感知的 MIMO 系统窄带干扰重构	92
5.4.1	MIMO 系统窄带干扰与信号模型	92
5.4.2	窄带干扰的空域多维差分采样	94
5.4.3	基于结构化压缩感知的窄带干扰重构算法——S-SAMP	96
5.4.4	仿真结果与讨论	99
5.5	基于稀疏贝叶斯学习的窄带干扰重构	103
5.5.1	系统模型	103
5.5.2	基于块稀疏贝叶斯学习的 CP-OFDM 系统窄带干扰重构	107
5.5.3	仿真结果与讨论	114

5.6	算法性能分析	117
5.7	本章小结	120
第6章	基于稀疏恢复理论的冲激噪声重构与消除	121
6.1	本章引言	121
6.2	系统模型	123
6.3	基于先验辅助压缩感知的冲激噪声消除	124
6.3.1	冲激噪声下的 OFDM 系统模型	124
6.3.2	基于先验辅助压缩感知的冲激噪声重构	126
6.3.3	仿真结果与讨论	127
6.4	基于结构化压缩感知的 MIMO 系统冲激噪声消除	128
6.4.1	冲激噪声下的 MIMO 系统模型	128
6.4.2	基于结构化压缩感知的冲激噪声空域多维采样	130
6.4.3	采用新型结构化压缩感知贪心算法 SPA-SAMP 重构冲激噪声	132
6.4.4	仿真结果与讨论	135
6.5	基于时频联合压缩感知框架的窄带干扰与冲激噪声联合消除	137
6.5.1	基于压缩感知的时频联合采样 OFDM 系统模型	137
6.5.2	时频联合压缩感知框架下窄带干扰与冲激噪声联合重构	140
6.5.3	仿真结果与讨论	143
6.6	算法性能分析	147
6.7	本章小结	149
第7章	总结与展望	151
7.1	技术总结	151
7.2	未来研究展望	155
参考文献	157
附录 A	多径衰落下同步算法抑制窄带干扰有效性	171
附录 B	SPA-SAMP 算法收敛性与解的存在性	173
B.1	引理 6.1 的证明	173
B.2	定理 6.1 (无噪收敛性) 的证明	175
B.3	定理 6.2 (有噪收敛性) 的证明	176
附录 C	SCS-MMV 混合 $\ell_{1,2}$-范数最小化问题解的存在性	179

第1章

绪论

自从1948年信息论鼻祖 Claude E. Shannon 先生提出信息论为通信技术奠基以来^[1]，现代通信原理、技术及系统就不断经历着发展和沿革。从最初的模拟通信系统，如 AMPS 系统，经过技术革新与应用实践，逐渐发展演变为数字通信系统。从20世纪90年代起，数字通信经历了近三十年的长足发展，带宽逐渐增大，速率不断提升，至今已发生了翻天覆地的变化。宽带数字通信技术基础雄厚，覆盖全球各个国家的绝大部分人口，关于宽带数字通信技术的研究和产业应用方兴未艾，推动着现代通信技术朝高速率、低延时、高可靠、广覆盖、海量连接等愿景和目标进一步发展。

随着现代社会的进步，无论人们日益增长的通信需求，还是大数据、物联网时代“万物互联”的需要，或下一代 5G New Radio 新空口无线通信技术的发展，都对宽带数字通信系统的稳定性、鲁棒性和可靠性提出了越来越严苛的要求。然而，通信系统中存在的噪声、干扰一直以来都是限制通信系统性能的瓶颈。特别是非高斯特殊噪声干扰，如典型的以窄带干扰、冲激噪声等为代表的各种现有宽带通信系统中广泛存在的特殊噪声与干扰，由于其复杂化、随机化、高强度等有别于高斯白噪声的特征，目前的传统方法限于“被动”抵抗，无法有效抑制其不良影响，更难以做到从根本上精确消除，导致对宽带数字通信系统造成难以避免的性能损失。为保证宽带通信系统有效、正确地传输，不断提升网络吞吐率和用户服务质量，满足高可靠、高速率等下一代通信技术的需求，就必须突破阻碍通信系统性能提升这一难点，因此急需研究非高斯特殊噪声干扰的抑制与消除的关键技术。

在这一背景下，本书从如何抑制窄带干扰对同步的影响、如何提升通信系统在窄带干扰与冲激噪声下的时频联合交织性能、如何精确重构并消除窄带干扰与冲激噪声等问题切入，围绕“加扰”以抑制、“分集”以规避、“重构”以消除噪声干扰的研究

思路,介绍了一系列有针对性的前沿关键技术研究,本书重点提出并详细阐述了有效抑制窄带干扰的帧结构设计方法、最大化时间、频率分集增益的最优时频联合交织方案、基于稀疏恢复理论的系列精确重构与消除算法,从多个角度入手全面提升通信系统抑制与消除窄带干扰与冲激噪声的能力。书中涉及的新技术、新方法,有望为该领域学者的进一步研究提供一定理论基础和技术储备;与此同时,努力推进相关研究技术的标准化与产业化应用,为构建鲁棒、高效的5G新空口关键技术体系及其日臻成熟添砖加瓦。

本章首先概述宽带数字通信系统的发展历程和关键技术,介绍宽带数字通信系统中的主要噪声和干扰,并阐述窄带干扰与冲激噪声的特征及其危害,引出本书的主要研究对象——宽带通信系统中的非高斯特殊噪声干扰、窄带干扰与冲激噪声;其次对现有窄带干扰与冲激噪声抑制技术的研究现状进行综述,点明相关研究存在的问题和面临的挑战;随后给出本书重点研究内容所要解决的关键问题与研究目标,并据此阐述本书的主要研究思路、主要研究内容与技术路线、相关技术的研究成果和贡献;最后简要介绍本书的内容结构安排。

1.1 技术背景

1.1.1 宽带数字通信系统发展综述

现代宽带通信系统多种多样,具有不同的标准、形态和相应技术。但宽带通信系统的基本组成均包括信源、发射机、信道(含有噪声与干扰)、接收机以及信宿^[2]。信源是生成有用信息的部分。有用信息一般是二进制比特流,经由发射机在数字域基带进行信道编码、符号映射、调制,再经过数模转换(D/A)及成型滤波、上变频等处理后,由模拟前端形成发送信号传输到信道中。信号经过信道后会受到信道响应的影响,还会受到噪声与干扰的影响,随后到达接收机。接收机的模拟前端将接收信号耦合之后,进行下变频、模数转换(A/D),得到数字基带接收信号,然后进行同步、噪声干扰抑制、信道估计与均衡、解调解映射、信道解码等处理,最后恢复出接收的有用二进制比特流信息,传递给信宿^{[3][4]}。其中,噪声干扰的估计、抑制与消除是宽带数字通信系统的一个重要环节,能否有效抑制、估计和消除噪声干扰,将影响同步、信道估计、解码解映射等其他多个环节的性能。因此,噪声干扰的抑制与消除也是本书研究的核心问题。

上述数字通信系统,除信源、信宿外的各个组成模块,可以视为一种“数字接

口”，或者“二进制接口”^[2]。该二进制接口的功能是为信源和信宿的二进制信息比特流之间的传递提供物理层数字化接口，为上层链路提供二进制数据的传输通道，尽可能保证二进制比特流传输的可靠性、准确性而提高传输速率，数字通信系统的宗旨和功能也正在于此。采用二进制接口（即数字化）有许多优点，如数字逻辑设计及电路简易，数字化传输算法性能良好并且稳定性强，基于 Shannon 信息论的信源/信道分离定理，信源和信道编译码之间可以相互独立等。因此，数字通信系统近年来发展非常迅猛，无论在无线通信、有线通信等各种媒介中，还是在骨干网、核心网、广域网、局域网等各种网络中，数字通信系统都已经拥有海量技术和产业化应用的成型标准。

在数字通信技术及标准体系的演进中，最有代表性的是无线通信技术与标准体系的演进。第一代（1G）无线通信系统是模拟制式的，仅支持语音通话且速率较低，如有代表性的 AMPS（Advanced Mobile Phone System）系统^[5]。20 世纪 90 年代，第二代（2G）无线通信系统发展为数字通信模式，如采用码分多址接入（Code Division Multiple Access, CDMA）的 IS-95 系统^[6]以及采用时分多址接入（Time Division Multiple Access, TDMA）与频分多址接入（Frequency Division Multiple Access, FDMA）的 GSM（Global System for Mobile Communications）系统^[7, 8]。2G 的语音通话质量大幅提升，还可以支持低速数据服务，满足当时全球大量用户的通信和数据需求，获得了大量用户和市场。随着人们对通信数据率不断增长的需求，在 2G 标准的基础上，标准化组织 3GPP（3rd Generation Partnership Project）由 GSM 标准经过 GPRS（Generalized Packet Radio System）、EDGE（Enhanced Data Rates for GSM Evolution）演进为 WCDMA（Wideband CDMA）^[9]，美国的 IS-95 标准演进为 CDMA2000^[10]，中国也提出了自主知识产权的 TD-SCDMA 标准^[11]，构成了第三代（3G）无线通信的三大主要标准。21 世纪初期，蜂窝网络和智能手机的数量迅猛增长，为适应时代发展趋势，3GPP 提出了长期演进计划（Long Term Evolution, LTE），发布了 LTE release-8 系列标准，开启了无线通信的第四代（4G）。其之后发布的 LTE release-10 标准进一步完善了 4G 技术体系，被称为 LTE-A（LTE-Advanced）。4G 标准技术体系的关键革新是正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM）技术^[12-15]和多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）技术^[2, 16-18]，因为 OFDM 技术可以有效抑制频率选择性衰落，显著提升了频谱效率；MIMO 技术可以有效利用空间分集提升系统容量，使 4G 系统数据率进一步大幅提升。近年来，为满足低功耗、广覆盖、高速率、低延时、高可靠等各种场景的需要，在国际电联 IMT-2020（International Mobile Telecommunications-2020）规划下，4G 标准正如火如荼地向 5G 迈进^[19-21]。新一代无线通信的发展，需要更加先进的前沿通信技术，以保障各种复杂场景的服务质量，而本书所研

究的新型噪声干扰抑制与消除技术也旨在为此有所帮助。

宽带数字通信技术的发展,不仅推进了蜂窝无线通信标准的演进,而且助推了地面无线多媒体广播等重要领域的技术体系取得长足发展。宽带地面数字电视广播系统(Digital Television Terrestrial Broadcasting, DTTB)自1990年以来,经历了二十多年的发展和演进,目前国际通用 DTTB 标准主要包括四种:美国的高级电视系统委员会(Advanced Television Systems Committee, ATSC)研发的基于单载波调制的 ATSC 标准^[22];欧洲电信标准协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)发布的基于编码 OFDM 的数字视频地面广播(Digital Video Broadcasting-Terrestrial, DVB-T)标准^[23];日本发布的基于分频段 OFDM 的地面综合业务数字广播(Integrated Service Digital Broadcasting-Terrestrial, ISDB-T)标准^[24];中国提出的基于自主研发时域正交频分复用(Time Domain Synchronous OFDM, TDS-OFDM)^[25]调制方式的数字电视地面多媒体广播(Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting, DTMB)标准^[26]。近年来,随着编码调制等技术的发展,DTTB 系统标准也不断演进,基于上述标准分别演进出 ATSC 3.0 标准^[27]、DVB-T2 标准^[28]、DTMB-A (DTMB-Advanced) 标准^[29]等系统,引入了高性能低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)^[30,31],采用高阶正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)^[32,33]或幅度相位调制(Amplitude Phase Shift Keying, APSK)^[34,35]、比特交织编码调制(Bit-Interleaved Coded Modulation, BICM)^[35-37]等一系列前沿技术,实现了更高速率和性能,逼近信道容量。此外,相关技术还促进了 DVB-S/DVB-S2 等标准为代表的卫星电视标准的发展,并且扩展到移动多媒体广播领域,产生了 DVB-NGH (DVB-Next Generation Handheld) 系统、ATSC-M/H (ATSC-Mobile/Handheld) 等移动宽带数字广播标准。地面无线多媒体广播信道中也广泛存在着诸如窄带干扰与冲激噪声等复杂的噪声干扰,依然是限制 DTTB 系统性能的重要因素^[38-40]。

此外,无线局域网和广域网、有线通信网络,以及新兴的物联网的全方位发展,也离不开数字通信技术的跨越和普及,同时网络的发展也推动着数字通信技术更加广泛的产业化应用。无线网络包括无线城域网(Wireless Metropolitan Access Networks, WMAN)和无线局域网。无线城域网的代表是美国电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)发布的 IEEE 802.16 系列标准,即 WiMAX^[41]系列标准,覆盖室外小区范围,类似于蜂窝无线通信应用场景。无线局域网的标准主要是 IEEE 802.11 系列标准规定的宽带无线局域网(Wireless Local Access Networks, WLAN),即 Wi-Fi,采用了 OFDM 和 MIMO 等 4G 关键技术,提供室内近距离优质宽带无线接入业务,获得了巨大的商业成功^[42],还在多种业务场景下得到有力推

广,如 IEEE 802.11p 标准无线车载通信接入 (Wireless Access in Vehicular Environments, WAVE)^[43] 是无线局域网在车载通信场景的延伸应用。另外,在可见光通信方面推出了 IEEE 802.15.7 标准,又称 Li-Fi,进一步延展了宽带局域网接入的方式。有线通信网络方面,主要是以 DVB-C/DVB-C2^[44] 为代表的有线宽带数字电视系统、以国际电联 ITU-T G.9960 标准^[45] 和 IEEE P1901^[46] 标准为代表的宽带电力线通信 (Power Line Communications, PLC) 系统以及传统光纤通信系统等。其中,宽带电力线通信网络不依赖于专用通信线缆,不需额外布线,利用传统供电网即可简易部署,实现“即插即用”的目标,最新宽带 PLC 的技术可达 500Mbps^[47] 甚至 1Gbps^[48] 的传输速率,覆盖范围在百米量级^[49],可以实现对楼宇和家庭的高效宽带覆盖,在智能家庭、智慧城市、智能电网等领域有广泛的应用前景。数字通信在物联网方面近年来也发挥了重要作用,典型代表是 2016 年诞生的基于 OFDM 或单载波频分复用 (Single Carrier-FDMA, SC-FDMA) 技术的 NB-IoT 系统^[50-52],可支持大量节点的低功耗广覆盖物联网。需要注意的是,无论在上述无线局域网还是在有线网络中,窄带干扰与冲激噪声都广泛存在,并且对网络的通信性能产生不可忽视的影响,必须研究有效技术应对这一问题。

宽带数字通信理论与技术的深入发展及其在各领域的广泛应用,也促进了新型宽带数字通信技术逐渐完善。特别是在点对点传输方面的诸多关键技术的研究,为数字通信的性能实现持续飞跃奠定了重要理论技术基础。其中一些关键技术包括:块传输多载波 OFDM 调制技术,含循环前缀 OFDM (Cyclic Prefixed OFDM, CP-OFDM)、零填充 OFDM (Zero-Padding OFDM, ZP-OFDM) 以及 TDS-OFDM^[14,15,25] 等技术,可提升数字通信传输频谱效率、克服符号间干扰和子帧间串扰、增强均衡准确性和降低实现复杂度,已经被各种最新宽带数字系统普遍采用,与之对应的有 SC-FDMA 或单载波频域均衡 (Single Carrier-Frequency Domain Equalization, SC-FDE)^[53] 等单载波技术,但单载波技术在多径衰落下性能不如 OFDM 技术;同步技术,含帧同步、载波恢复与同步、定时同步与采样时钟恢复^[54-57],由于 OFDM 系统对精确同步有很高要求,所以同步性能是保证块传输可靠性的关键;编码调制技术,含信道编解码技术,如 4G 标准 LTE/LTE-A 采用的 Turbo 码^[58] 和 5G 增强移动宽带 (enhanced Mobile BroadBand, eMBB) 场景下数据链路拟采用的 LDPC 码等高效编码方案^[21],均可逼近信道容量;高阶星座映射/解映射技术 (如 QAM 和 APSK 星座映射调制),可以显著提升频谱效率和数据率,以及比特交织编码调制 (BICM) 和迭代 BICM (BICM-ID) 技术^[59],可以充分利用信号空间分集 (Signal Space Diversity, SSD) 提升映射与解映射间的等效信道容量^[60];交织技术 (包括比特交织、符号交织、坐标交织等)^[61-63],可以提供时间、频

率、坐标分集增益；多天线技术（如 MIMO-OFDM 技术、大规模 MIMO 技术）可提供空间分集增益，增加自由度，大幅提升频谱效率^[2]。

虽然宽带数字通信的技术标准演进和产业化应用发展势头十分迅猛，但是，现代宽带通信系统中无可避免地存在多种多样的噪声干扰，特别是复杂多变的窄带干扰与冲激噪声的存在，将直接影响上述点对点传输技术的性能和作用，成为限制通信系统性能的瓶颈。因此，就宽带数字通信系统性能的进一步提升和突破而言，窄带干扰与冲激噪声是不可忽视的重大问题，必须得到充分关注。

1.1.2 宽带数字通信系统中的主要噪声和干扰

宽带数字通信系统中存在多种多样的噪声和干扰。一般认为，噪声是由通信系统内部或来自外部某种随机噪声源产生的、影响有用信号的正确接收的有害因素，一般用其随机概率分布来表征；干扰是由某种外部产生或内部衍生信号引起的、对有用信号的正确接收造成干扰的有害信号，可以用干扰信号的确定性频谱或随机功率谱表征，也可用其随机概率分布表征^[64-66]。从定义上看，噪声与干扰有一定区别，也有一定联系。区别在于，噪声与干扰的产生原因和来源有所不同；联系在于，噪声与干扰都具有某种随机化特性，都对有用信号的正确传输和接收造成不良影响。

噪声和干扰有多种分类方式。常见的分类方式包括：按噪声干扰与有用信号之间的逻辑关系，可分为加性噪声、乘性噪声；按噪声干扰的线性特性，可分为线性噪声、非线性噪声；按噪声的产生来源与通信系统本身的关系，可分为系统内部固有噪声（如放大器和电子元件内部的热噪声、半导体器件的散粒噪声、器件的非线性产生的互调或谐波干扰）、外部噪声干扰（如宇宙背景噪声、大气噪声、电磁辐射噪声、电气设备开关产生的冲激噪声、来自同频带其他窄带业务的干扰）；按干扰的成因和来源，可分为有意干扰（如军事中的电子对抗干扰、阻塞干扰、跳频干扰）、无意干扰（如非授权公用频段上不同业务之间的同频段相互干扰）；按噪声干扰的概率分布特征，可分为高斯白噪声（如热噪声、散粒噪声）、非高斯噪声（有色背景噪声、冲激噪声、窄带干扰）等^[67-70]。

无论在无线信道还是有线传输环境下，通信系统中都存在着不同种类的噪声和干扰。下面阐述一些典型的宽带数字通信系统和信道中存在的噪声和干扰。

1. 噪声

来自系统内部的噪声称为“系统固有噪声”，来自外部的噪声称为“外来噪声”或“外部噪声”。系统固有噪声的分布一般是随机的，须用概率分布函数描述，并且由

于其随机性,导致系统固有噪声难以抑制和对抗。但是,系统固有噪声的强度一般不大,由于模拟电路对强度小的噪声比较敏感,所以系统固有噪声对模拟电路影响显著,但数字电路、数字通信系统的信号电平和判决电平是离散的并且差距较大,所以系统固有噪声对数字系统的影响更小^[70]。另一方面,外部噪声可能是随机分布的,也可能是来自确定性信号的,其强度往往远高于系统内部噪声,有时甚至会明显高于有用信号的强度。因此,外部噪声对数字通信系统的影响是严重的^[66]。但是,外部噪声的分布比固有噪声更有规律可循,可能找到有效的抑制方法。一些典型噪声列举如下:

加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN): 最典型、最常见和常用的背景噪声模型,属于系统固有噪声。其成因是构成通信系统的各模块电子电路元件内部的分子热运动或电路中的电荷移动,由于其成因的物理本质特性,导致它不可能消除。AWGN 被广泛应用于通信噪声信道建模、分析和实际仿真等用途。典型的 AWGN 包括由分子或电子固有热运动引起的热噪声,由离散电荷移动引起的散粒噪声等^[64]。带限白噪声是 AWGN 的一种特例,可视为在通信系统有限的工作频带上噪声功率谱密度表现为平坦的 AWGN^[68]。

有色背景噪声 (Colored Background Noise, CBN): 有色背景噪声属于系统固有噪声,其功率谱密度函数与 AWGN 不同,在所关心的频带范围内不是“平坦”的,即不符合“白噪声”的定义和条件;相反,其功率谱密度会随着频率变化产生起伏,呈现出“有色”的特征。常见的有色背景噪声包括:由于电子器件中经过不连续介质的直流电流引起的主要集中在低频的 $1/f$ 噪声(又称“闪烁噪声”)、主要在高频显著的晶体管中的分配噪声、频谱主要为非白色低频段的大多数的音频噪声(如粉色噪声、棕色噪声)以及自回归噪声^[68]。

冲激噪声 (Impulsive Noise, IN): 冲激噪声一般在文献中定义为时域噪声占据的时间相对于块传输符号时长而言足够短、呈现脉冲和时域稀疏特征的系统外部噪声^[66,67]。一般文献认为,定量地看,对于块传输系统,如 OFDM 系统,冲激噪声可以视为脉冲非零元的持续时间与 OFDM 符号的持续时间之比值不超过 5% 的噪声脉冲信号^[71,72]。由于其时域突发和脉冲特性,冲激噪声常又被称为“脉冲噪声”。冲激噪声的成因十分广泛,通常包括产生于大气空间的天电噪声、产生于车辆和电气设备的电火花噪声、工业设备运行噪声、家用电器开关插拔噪声^[40,70]等。

其他类型噪声:除上述几种常用典型噪声外,通信系统中还存在其他一些噪声,如与信号之间呈现相乘关系的乘性噪声,对信号调制相位产生影响的相位噪声 (Phase Noise),由非线性器件或非线性信号处理操作引起的非线性噪声,如 OFDM 系统中为防止峰均比过高而采取的切顶操作引起的切顶噪声 (Clipping Noise),以及由于信号数模

转化和其他浮点、定点量化转化过程中由于比特位精度不足而引入的量化噪声等^[68,69]。

2. 干扰

干扰信号主要是指来自系统外部的、由某种外部干扰信号源产生的无用信号，通过某种媒介耦合进入通信系统，在时域或频域与通信系统有用信号交叠，从而干扰有用信号的正确接收、解调解码。干扰信号往往可以采用其确定性频谱或随机信号功率谱密度表征^[66]。部分干扰信号也可能来源于系统内部。宽带数字通信系统中一些典型的干扰列举如下。

窄带干扰 (Narrowband Interference, NBI): 窄带干扰一般在文献中定义为干扰信号在频域占据的有效带宽相对于信号工作带宽而言足够窄、呈现窄带和频域稀疏特征的系统外部干扰信号^[66,73]。与冲激噪声对偶地看，一般文献认为，在 OFDM 系统中的窄带干扰亦可定量定义为干扰信号频域非零元所占据带宽与 OFDM 工作频带宽度之比值不超过 5% 的干扰信号^[74,75]。在某些文献中，窄带干扰也被称作“窄带噪声”^[65]，本书统一称为“窄带干扰”，以示其来自外部干扰信号并与系统固有噪声的区别。窄带干扰在宽带数字通信系统中广泛存在，成因众多，譬如来自邻近无线设备辐射或者相同有线网络拓扑内的干扰源，通过无线泄漏或电缆耦合等方式产生的窄带干扰^[40,64]，以及来自相同工作频段的窄带授权业务或窄带业余无线电业务对宽带通信业务的干扰^[66,70]等。

电子对抗干扰: 属于有意干扰、敌意干扰，目的是干扰对方通信系统的正常传输。常见的电子对抗干扰包括跳频干扰（干扰的频率位置以一定规律或随机地迅速切换实现跳频）、阻塞干扰（可以视为“宽带干扰”，在全频段工作频带上进行阻塞）、步进干扰（可以实现对欲干扰的有用信号的随机或混合扫频干扰）；同样，也包括窄带干扰（如单音干扰或多音干扰）以及脉冲干扰（可视为冲激噪声的一种，通过间歇性发射大功率干扰信号产生）^[66]等。

其他外部来源干扰: 来自外部干扰源的其他干扰，还包括由相邻频段其他业务产生的邻频干扰（如频带相邻业务的频谱泄漏导致的干扰），与有用信号处于同一频段的同频干扰（如蜂窝移动通信小区边缘用户收到来自邻近小区基站在相同频率上的干扰信号，导频污染也可视为此类）^[2]，有线通信中的无线耦合噪声或串话噪声，通信系统或电气电子设备的电子电路工作产生的电磁辐射电磁干扰（Electromagnetic Interference, EMI）^[67]等。

系统内部干扰: 产生于通信系统内部的对有用信号造成的干扰信号，如交叉调制干扰（简称交调干扰，由外部干扰信号和有用信号在接收机本身的非线性特性作用下

导致高次谐波而引起)、互调干扰(一般由不同频率上的有用信号在通信系统电路的非线性操作或非线性模块的作用下产生的谐波落在有用信号关注的滤波频带中而产生干扰)以及镜频干扰(由混频、变频处理引起的落在中频滤波范围内的镜像频率分量)^[76]等。

1.1.3 窄带干扰与冲激噪声的特征及其危害

窄带干扰和冲激噪声在宽带数字通信系统中普遍存在,对系统性能具有显著的危害性,必须引起足够重视,研究应对抑制的策略和方法。下面从窄带干扰与冲激噪声的特殊分布特征、普遍存在的来源、对通信系统的危害三个方面阐述。

1. 窄带干扰与冲激噪声的特殊分布特征

根据香农信息论,噪声和干扰是对通信系统性能最本质、最根本的制约因素,如果没有噪声和干扰,则信道容量可达无穷大^[77,78]。在 AWGN 信道下,信道容量有明确闭式解^[1],并已经得到充分研究。AWGN 是具有加性、功率谱密度平坦(即“白”)、服从联合高斯分布的平稳随机过程^[65]。

但是,窄带干扰、冲激噪声与 AWGN 无论在特征和统计分布上,还是在成因和危害上,都有着本质的区别,不能用传统的处理 AWGN 的模型、理论和方法来处理应对。首先,窄带干扰不是白噪声,由于它的频谱或功率谱密度局限在窄带,所以不呈现 AWGN 的“白”特性^[73]。其次,冲激噪声的统计分布是非高斯(non-Gaussian)的^[79],冲激噪声的幅度分布服从 Middleton Class A 分布^[71,72,80,81];同时,窄带干扰与冲激噪声的信号采样点联合分布并不服从联合高斯分布,各采样点的幅值是相互独立的,不具有联合高斯分布的协方差特征^[82,83]。此外,由于冲激噪声呈现脉冲、突发和瞬态特性,因此其分布特征可以视为非平稳(既非严平稳,也非宽平稳)随机过程^[84-86]。虽然有部分文献中采用了单变量高斯分布函数来描述窄带干扰或冲激噪声的统计模型的部分特征,但是这些文献也认为这只是高斯变量在窄带干扰或冲激噪声部分特征中的一种特殊扩展:例如窄带干扰的带限高斯噪声模型(Band-Limited Gaussian Noise, BLGN),虽然每个干扰音源(tone interferer)的幅值分布服从单变量高斯分布,但该模型多干扰音源的多变量之间并不服从联合高斯分布^[82,83,87];冲激噪声的高斯混合(Gaussian Mixture)模型中,每个脉冲非零元采样的出现时刻服从泊松(Poisson)分布或伯努利(Bernoulli)分布,故虽然其非零元幅值服从单变量高斯分布^[88],也不属于传统的 AWGN 噪声模型。

窄带干扰与冲激噪声出现的时域、频域位置具有显著不规则特性和随机分布特