

信息论视角下通信与信息系统抗干扰编解码技术设计

朱 玺 刘向奎

中国电子科技集团有限公司电子科学研究院 北京 100041

摘要: 在复杂电磁环境下通信与信息系统面临严重的干扰挑战, 亟需提升抗干扰能力以保障信息传输的可靠性, 本研究基于信息论理论框架并围绕信道容量和误码率控制等核心概念, 研究内容涵盖信道模型分析和自适应编码策略与联合解码机制, 研究结果表明合理利用信息冗余与信道特性可显著提升系统的抗干扰性能, 该研究为复杂环境下通信系统的可靠性设计提供理论支撑与技术路径。

关键词: 信息论; 通信系统; 抗干扰; 编解码技术

引言

通信与信息系统广泛应用于军事与应急通信等关键领域, 其在复杂环境中的稳定性和可靠性日益受到关注, 在实际应用中系统往往受到随机噪声和多径衰落等多种因素的影响, 导致信息传输过程中的误码率上升, 提升抗干扰能力成为通信系统设计中的核心问题, 信息论为通信过程的建模与性能分析提供坚实的理论基础, 特别是在信道容量计算和编码设计及误码控制等方面发挥关键作用, 将信息论方法引入抗干扰编解码技术设计, 可在不显著增加系统开销的前提下实现通信质量的有效提升。当前研究亟需构建基于信息论的系统化抗干扰编解码框架, 探索编码策略和解码机制与信道特性之间的深层次耦合关系, 进一步为未来高可靠通信系统提供理论依据与技术支持。

一、信息论基础与抗干扰设计理论支撑

1. 香农信息论的关键概念与公式

信息论以定量方式刻画信息传输过程中的不确定性和极限性能, 为通信系统抗干扰设计提供理论根基。香农提出的信息熵用于描述信源的不确定程度, 其定义形式为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i)$$

其中随机变量取值数 n 反映信源符号集规模, 概率分布决定信息产生的统计特性。在实际通信系统中, 符号集规模常达到 2^4 或 2^8 量级, 信源熵直接影响编码压缩与传输效率。信道模型方面, 引入互信息衡量输入与输出之间的信息关联强度, 该指标揭示干扰和噪声对信息传递能力的削弱程度。香农理论指出, 在给定带宽和信

噪比条件下存在理论可达的最大传输速率, 这一结论为抗干扰编解码设计提供性能上界参考, 使系统设计目标具备清晰的量化依据^[1]。

2. 信道容量与误码率之间的关系

信道容量是信息论中描述信道极限传输能力的重要指标, 其数值由带宽和信噪比共同决定, 在高斯信道条件下呈对数增长特性。误码率作为通信系统性能评价的重要参数, 反映接收端判决错误的频繁程度, 在强干扰环境中呈现快速上升趋势。当实际传输速率接近信道容量时, 系统对干扰和噪声的敏感性显著增强, 微小信道波动便会引起误码率的大幅变化。在典型无线通信系统中, 带宽取值常处于 10^6 量级, 信噪比下降 3 dB 便会导致误码率跨越数量级变化。信息论揭示信道容量与误码率之间存在内在约束关系, 合理控制编码速率与调制阶数, 可在容量限制内平衡传输效率和可靠性, 这一关系成为抗干扰系统参数设计的重要依据。

3. 冗余编码与信息传输可靠性的提升机制

冗余编码在信息论框架下被视为以额外符号换取传输可靠性的核心手段, 其本质是在原始信息序列中引入结构化约束以增强抗干扰能力。差错控制编码利用码字之间的最小距离特性, 使接收端在存在干扰的情况下仍可恢复原始信息。编码冗余度与纠错能力之间呈正相关关系, 码长从 100 扩展至 1000 时, 系统对随机干扰的容忍范围明显扩大。信息论视角强调冗余并非简单重复, 而是基于统计特性的优化设计, 使冗余信息在解码阶段发挥最大判决价值, 联合信道模型分析与冗余分配策略, 可在有限带宽条件下提升系统可靠性并降低干扰对信息判决的不利影响, 为通信与信息系统抗干扰编解码技术

提供可持续发展的理论支撑^[2]。

二、通信系统中的抗干扰编解码需求分析

1. 常见干扰类型及其对系统性能的影响

通信系统在运行过程中经常遭遇多种类型的电磁干扰，干扰信号在频域、时域或空间上的不同表现会对系统性能产生截然不同的影响。干扰类型主要包括窄带干扰、宽带噪声、突发脉冲干扰以及信道多径衰落等。以某型号地面无线传输系统为例，在不同干扰条件下进行对比测试，表1记录了其在不同干扰功率和类型下的误码统计数据。

表1 移动通信系统在不同干扰条件下的误码统计

干扰类型	干扰功率 (dBm)	接收信噪比 (dB)	平均误码数 (每百万比特)
无干扰	-	25	1
窄带干扰	10	18	320
宽带噪声干扰	15	14	840
脉冲干扰	20	12	1290

表中数据显示在无干扰条件下，系统运行稳定，误码维持在极低水平。干扰引入后系统性能迅速恶化，其中窄带干扰使信噪比降低7 dB，误码数升至320，反映出对目标频点干扰的高效破坏性。当干扰转化为频谱更广的宽带噪声时，信噪比进一步下降至14 dB，误码数扩大至840。脉冲干扰表现出对系统时域连续性的极大破坏性，其高功率、高瞬时性特征使误码峰值达到1290。该对比说明干扰类型与功率水平共同决定系统性能下限，系统在干扰识别和分类处理方面必须具备较强适应性，才能为后续的抗干扰机制提供有效支撑。

2. 编解码技术在抗干扰中的应用目标

编解码技术作为通信链路中最接近信息本体的处理环节，其任务不仅限于完成数据格式转换和纠错，还必须从系统可靠性视角考虑在干扰环境下的信息生存能力。设计目标主要集中在提升信号扰动下的恢复效率、增强信息流对随机噪声与有意干扰的鲁棒性以及避免误码扩散所带来的连锁失效。以低密度奇偶校验编码为代表的现代差错控制技术，依赖稀疏矩阵构建的结构性约束关系，在调制方式为BPSK、噪声功率高于20 dBm的环境下仍保持低误码输出，其冗余开销控制在信道容量允许范围内，在不牺牲吞吐效率的前提下提升了译码正确率。抗干扰编码方案还需结合信道状态反馈机制，使冗余资源分配适应动态环境变化，从而构建面向具体干扰模式的最优配置结构。抗干扰解码不仅关注单帧误码恢复，

还需要具备滑动窗口译码与软判决机制，保障在连续扰动中维持系统输出的一致性与连续性。各类编码机制在抗干扰设计中的核心目标，是构建面向失真信号的稳定映射通道，使信息在离散噪声作用下依然保有完整的语义表达能力。

3. 系统级抗干扰设计的技术瓶颈

系统层抗干扰设计涉及多个通信子系统的协同运行，受限于现有体系架构和处理能力，抗干扰机制在资源调度、信道感知与模块协同等方面面临多重技术障碍。信道估计模块若无法实时更新信道状态信息，会导致调制识别与解码参数滞后，从而引发整帧识别错误。在信道变化速率超过100 Hz的环境中，反馈时延超过3 ms将引起调制误判和均衡失效。解码模块受到算法复杂度限制，在带宽为5 MHz、码率为3 Mbps的传输条件下，若采用迭代次数超过20轮的LDPC译码结构，常规嵌入式平台的处理周期将超过系统允许延迟上限，形成系统瓶颈。多模块间接口耦合度不足也会限制编解码器对物理层信道扰动的快速响应，调度层未能在接收到错误概率信息后及时调整资源分配，编码速率和调制方式未与扰动程度形成闭环关联。系统抗干扰能力不仅受限于单一模块性能，还受到跨层反馈链路的完整性与调度策略的限制，需从架构优化和控制机制设计两个方向推进瓶颈突破，才能在强干扰下实现通信系统的稳定运行^[3]。

三、抗干扰编解码技术设计与优化方法

1. 差错控制编码策略

差错控制编码是抗干扰通信系统中的核心机制，其本质在于借助构造冗余信息结构增强接收端对受损数据的判别与恢复能力。卷积码、Turbo码与低密度奇偶校验码是目前应用较广的三类方案，分别适用于实时性要求、纠错能力与编译码复杂度平衡不同的场景。在1 Mbps速率的短波信道中，当信道误码频度达到每 10^3 比特出现5次突发错误时，采用卷积码的Viterbi译码方式可将误码控制在10以内。Turbo码在长帧长度条件下具备接近香农极限的性能表现，其交织结构能够打散集中错误，在20 dBm干扰功率条件下将误码恢复能力提升3倍以上。LDPC码在长码长高吞吐条件下展现出优良纠错能力，其译码迭代过程在误差分布稀疏的条件下展现出良好的稳定性，适用于卫星链路与宽带无线传输等高冗余应用环境。差错控制编码策略需在纠错强度与系统资源消耗之间建立严密配比，合理选择编码约束长度、校验矩阵稀疏度与译码算法收敛轮次等参数，提升在多种干扰形态

下的编码鲁棒性。

2. 自适应编码技术与信道状态反馈机制

自适应编码技术依赖于对信道状态的实时估计与反馈调整，其目标在于在干扰动态变化的条件下维持编解码结构的最优运行状态。信道状态信息一般借助导频序列与功率监测模块获取，再由接收端反馈至发送端实现编码参数的动态配置。在一个带宽为3 MHz的跳频通信系统中，信道条件在每100 ms周期内发生显著波动，若编码结构保持静态配置，误码会呈周期性上升趋势。当引入信道反馈机制并采用分组调制映射与编码率重构策略后，系统在干扰突变情况下的误码数下降近10倍。自适应控制策略通常包括基于接收信噪比的编码率调整、基于误码趋势的译码迭代轮次调节以及调制阶数的联动切换。反馈机制对链路时延提出严苛要求，在反馈延迟超过5 ms的场景中，系统调整响应能力显著下降，误码收敛速度变慢，抗干扰性能明显退化。编码机制与反馈通道的配合需在速率、精度与响应频度之间寻求动态平衡，使得系统在频繁干扰环境下仍具备编码结构的弹性调节能力，从而提升整体的抗扰恢复性能与资源利用效率^[4]。

3. 多维联合编解码与协同抗干扰优化

多维联合编解码策略强调在多个处理维度上同步构建抗干扰能力，其基本思想是将编码、调制、均衡与检测等多个通信模块纳入协同设计范畴，在整体系统结构上构建端到端的鲁棒机制。在一个多天线MIMO系统中，当子载波数达到256、空间流设定为4路时，信号处理维度显著提升，单一模块的独立优化无法实现整体误码率的有效下降。在此背景下，联合设计的软判决译码机制可将均衡输出的置信度信息直接传递给解码器，避免中间判决信息的二次失真。该机制在频率选择性衰落信道下将误码控制能力提升2倍以上。协同优化的另一个核心方向是跨层参数自适应调节机制，例如在物理层识别信道劣化特征后，传输层自动降低包长并更新编码策略，形成编解码参数与链路负载之间的动态耦合。多维设计还体现在时频域资源分配与空间多样性利用方面，借助

联合编码与调度策略构建码字的空间冗余映射结构，使干扰分布在不同天线与频域资源间稀释，从而增强系统的稳健性。协同设计的复杂度显著高于传统模块化结构，其部署需依赖高性能计算平台与实时协同控制机制，但在强干扰与高负载环境中可实现更优的系统整体性能，具备明显的工程推广潜力^[5]。

结语

在复杂电磁环境和高动态通信场景不断扩展的背景下，抗干扰能力已成为通信与信息系统设计中的核心指标之一。信息论为系统的容量分析、冗余调控和误码建模提供了坚实的理论支撑，为编解码技术的发展指明了方向。围绕抗干扰目标，从差错控制编码、自适应机制到多维联合设计，不同技术路径在系统架构中形成互补关系，提升了整体抗干扰水平。编解码设计的精细化与协同化趋势日益明显，解码算法的智能化、参数配置的动态性以及模块间的融合能力将成为后续研究重点。持续推动信息论与工程实践的深度融合，有助于构建更加稳定、高效与可靠的新一代通信系统，为未来在极端条件下的信息传输安全奠定基础。

参考文献

- [1] 韩雨欣, 牛凯, 孙亚萍, 等. 语义信息论视角下的知识库表征极限与压缩原理[J]. 移动通信, 2025, 49(07): 31-35+60.
- [2] 谭晓青, 吕善翔. 基于通信系统数学模型的信息论与编码课程教学体系探索[J]. 大学数学, 2025, 41(02): 68-74.
- [3] 孙文虎. 基于知识图谱信息补全的抗噪声语义通信系统设计与实现[D]. 南京邮电大学, 2023.
- [4] 张青云. 基于离散调制的连续变量量子安全直接通信研究[D]. 西北大学, 2023.
- [5] 张平, 牛凯, 姚圣时, 等. 面向未来的语义通信: 基本原理与实现方法[J]. 通信学报, 2023, 44(05): 1-14.