

# 微波数字通信抗干扰技术及其在复杂环境中的应用

张 典

锡林郭勒盟微波总站 内蒙古 锡林郭勒 026000

**摘要:** 随着通信技术飞速发展,微波数字通信在复杂环境中的应用愈发关键。本文聚焦微波数字通信抗干扰技术及其在复杂环境中的应用。首先阐述微波数字通信基本原理,包括信号传输方式与系统构成。接着详细介绍扩频、纠错编码、自适应等抗干扰技术。分析复杂通信环境带来的电磁干扰、多径效应、恶劣气候条件等挑战。最后提出抗干扰技术在复杂环境中的应用策略,涵盖技术组合应用、优化网络布局、加强设备性能以及智能算法应用等方面,旨在为提升微波数字通信在复杂环境下的可靠性与稳定性提供理论参考。

**关键词:** 微波数字通信; 抗干扰技术; 复杂环境; 应用策略

引言: 在当今信息化时代,通信技术是社会运转的关键支撑。微波数字通信凭借其传输容量大、抗干扰能力强等优势,在众多领域得到广泛应用。然而,随着通信环境的日益复杂,各种干扰因素不断涌现,如电磁干扰、多径效应以及恶劣气候条件等,这些干扰严重影响了微波数字通信的质量与可靠性,甚至可能导致通信中断。因此,深入研究微波数字通信抗干扰技术,并探索其在复杂环境中的有效应用策略,对于保障通信畅通、推动各行业稳定发展具有重要的现实意义,成为当前通信领域亟待解决的关键问题。

## 1 微波数字通信基本原理

### 1.1 信号传输方式

微波数字通信利用300MHz至3000GHz频段的电磁波进行信息传输,其核心特性为视距传播与中继接力传输。受地球曲率限制,单段通信距离通常不超过50公里,需通过中继站分段放大信号实现远距离传输。信号传输采用时分复用技术,将多路数字信号按时间片分配至同一频段,提升频谱利用率。调制方式包括QAM(正交幅度调制)等,通过改变载波的幅度与相位实现数字信息编码。传播过程中,信号易受地形障碍、大气降水及多径效应干扰,需结合纠错编码、自适应均衡等技术补偿衰落,确保传输可靠性。

### 1.2 系统构成

微波数字通信系统由终端站、中继站、枢纽站及天馈系统构成。终端站负责信号的基带处理(如CMI/NRZ变换、纠错编码、调制解调)及上下话路;中继站通过再生中继技术消除噪声累积,支持信号放大与转发;枢纽站实现多条线路的交叉连接与业务调度。天馈系统采用抛物面天线定向收发电磁波,支持多收发信机共用天线以提升频谱效率。核心设备包括微波收发信机(完成

频率转换与放大)、中频调制解调器(实现数字信号与中频载波的转换)、基带切换设备(保障主备通道无损切换)及勤务监控系统(提供状态监测与远程管理功能)。系统通过SDH(同步数字体系)标准实现大容量同步传输,单电路速率可达2.4Gbit/s<sup>[1]</sup>。

## 2 微波数字通信抗干扰技术

### 2.1 扩频技术

(1) 直接序列扩频(DSSS)。DSSS将原始数据比特与高速伪随机码(PN码)进行模二加运算,使信号频谱扩展至数倍于原带宽。接收端通过同步PN码解扩,将信号能量重新集中,而干扰因未同步被扩散为宽带噪声。其抗干扰能力由扩频比(PN码速率与数据速率之比)决定,典型应用如IEEE802.11b协议,扩频比可达100以上,但需高精度时钟同步,硬件成本较高。(2) 跳频扩频(FHSS)。FHSS通过伪随机序列控制载波频率在宽频带内离散跳变,每个频点驻留时间短于干扰持续时间,从而避开窄带干扰。其抗干扰能力取决于跳频点数与驻留时间,需满足至少75个频点且单频驻留时间小于400ms。该技术硬件结构简单,但传输距离受限,常用于军事保密通信及低速率民用场景,如蓝牙技术。(3) 混合扩频技术。混合扩频结合DSSS与FHSS优势,通过双重扩频机制提升系统性能。例如DS/FH系统在直接序列扩频基础上增加频率跳变,既利用DSSS的高处理增益(抗干扰能力),又通过FHSS的频率分集特性改善多径衰落。混合系统处理增益为两者叠加,可显著提升复杂环境下的通信可靠性,适用于高保密性军事通信及抗干扰要求严苛的工业场景。

### 2.2 纠错编码技术

(1) 线性分组码。线性分组码通过线性方程组建立信息码元与监督码元的关系,将k位信息组编码为n位码字,

形成 $n$ 维空间中的 $k$ 维子空间。其核心特性包括封闭性（任意两码字模二和仍为有效码字）和最小码距决定纠错能力（如最小码距 $d=4$ 可纠1位错并检2位错）。典型代表如汉明码、循环码（BCH码、RS码），广泛应用于卫星通信和存储系统。（2）卷积码。卷积码利用前 $N-1$ 个输入信息组的记忆效应进行编码，每个输出码元与当前及前序输入相关联，通过移位寄存器和模二运算实现。其性能由约束长度 $K$ （记忆长度）和码率 $R = k_0/n_0$ 决定，如TD-LTE系统采用的(3,1,7)卷积码具有最优距离谱和咬尾编码特性，通过维特比译码算法实现高效纠错，适用于频带受限的移动通信场景。（3）网格编码调制（TCM）。TCM将卷积编码与多进制调制结合，通过集合划分技术将信号空间分解为间距递增的子集，利用卷积编码器选择子集并确定信号点，接收端采用维特比算法解调。该技术在增加带宽条件下提升功率效率，例如8PSK-TCM系统较4PSK系统可获得3dB编码增益，广泛应用于卫星通信和光纤传输等对频谱效率要求高的场景。

### 2.3 自适应技术

（1）自适应滤波技术。自适应滤波技术通过动态调整滤波器系数，实时跟踪信号特征变化以抑制干扰。其核心算法如LMS（最小均方误差）和RLS（递归最小二乘）可根据输入信号统计特性自动优化权重，有效消除窄带干扰、周期性噪声及多径干扰。例如在雷达通信中，自适应滤波可抑制强杂波背景下的目标信号，提升信噪比，适用于时变信道环境下的信号处理。（2）自适应均衡技术。自适应均衡技术通过动态补偿信道失真（如多径效应引起的码间干扰），恢复原始信号波形。其基于训练序列或盲均衡算法（如CMA恒模算法），实时调整均衡器抽头系数，使输出信号逼近理想波形。在高速数字通信中，如5G毫米波系统，自适应均衡可显著降低误码率，提升传输可靠性，尤其适用于频率选择性衰落信道。（3）自适应功率控制技术。自适应功率控制技术通过动态调整发射功率，平衡信号质量与能耗。在无线通信中，基站根据终端反馈的信道质量（如CQI）或接收信号强度（RSSI），实时调整发射功率，既避免强干扰对邻区的影响，又确保覆盖边缘用户的通信质量。例如LTE系统中的快速功率控制，可在1ms内完成功率调整，提升系统容量与能效，适用于高密度部署场景<sup>[3]</sup>。

## 3 复杂通信环境带来的挑战

### 3.1 电磁干扰

复杂通信环境中，电磁干扰来源广泛且强度各异，包括自然电磁噪声（如雷电、太阳黑子活动）与人为电磁辐射（如工业设备、无线电广播、其他通信系统）。

这些干扰信号与目标通信信号频段重叠或邻近时，会通过直接叠加或调制干扰破坏信号完整性，导致接收端误码率激增。尤其在密集电磁环境中，多源干扰的叠加效应可能使通信链路完全失效，且干扰的时变特性（如突发脉冲干扰）进一步增加了信号检测与解调的难度。

### 3.2 多径效应

多径效应是信号经不同路径（如直射、反射、折射）到达接收端时，因路径长度差异产生相位差，导致信号叠加后幅度与相位随机变化的现象。在微波通信中，建筑物、地形等障碍物会引发严重多径衰落，使接收信号功率在短距离内快速波动（如瑞利衰落），甚至出现深度衰落（信号功率骤降数十dB）。多径效应还会导致码间干扰（ISI），破坏数字信号的时域波形，限制数据传输速率与系统容量。

### 3.3 恶劣气候条件

恶劣气候（如降雨、降雪、雾、沙尘暴）对微波通信的衰减影响显著。雨滴对高频信号（如Ka波段）的吸收与散射可导致路径衰减增加数dB至数十dB，且衰减量随降雨强度呈非线性增长；雪与雾的衰减效应虽较弱，但持续时间长，可能引发长期链路性能下降；沙尘暴中的颗粒物会吸收电磁波能量，同时改变信号传播路径，导致信号强度波动。

### 3.4 其他挑战

复杂通信环境还面临频谱资源紧张、设备非线性失真、移动性管理等问题。频谱资源有限导致系统间干扰加剧，尤其在共享频段场景中；设备非线性（如功率放大器饱和）会引入谐波与互调干扰，污染频谱；移动通信中，终端高速移动（如高铁、无人机）导致信道快速时变，多普勒频移破坏载波同步，增加均衡难度。此外，复杂环境下的隐蔽通信需求（如军事抗侦察）对信号隐蔽性与抗截获能力提出更高要求，传统技术难以满足<sup>[3]</sup>。

## 4 抗干扰技术在复杂环境中的应用策略

### 4.1 技术组合应用

复杂环境中的干扰类型多样且动态变化，单一抗干扰技术难以全面覆盖所有场景。通过技术组合可形成多层次防护体系，例如将扩频技术与纠错编码结合，扩频通过频谱扩展降低干扰功率密度，纠错编码则通过冗余信息纠正残留误码，二者协同可同时抵御窄带干扰与随机噪声。自适应滤波与均衡技术的联合应用可解决多径干扰问题，前者抑制周期性干扰，后者补偿码间失真，适用于高速移动通信场景。此外，混合扩频（DS/FH）与智能天线技术的融合，既能通过频率跳变避开干扰频点，又能利用波束赋形抑制空间干扰，增强系统抗截获

能力。技术组合需兼顾性能与复杂度，例如军事通信中可能采用高复杂度的多技术叠加方案，而民用场景则优先选择成本效益比高的组合模式，如LTE-A中的载波聚合与MIMO技术协同。

#### 4.2 优化网络布局

网络布局的合理性直接影响抗干扰效果。在干扰密集区域，可通过增加基站密度或部署中继节点缩短传输距离，降低路径损耗与多径干扰影响；同时采用异构网络架构（如宏基站、微基站、皮基站协同），利用频谱复用提升资源利用率。对于地形复杂环境（如山区、城市峡谷），需结合三维空间布局设计，通过调整天线高度与倾角优化覆盖范围，减少信号盲区。动态网络规划技术可实时监测干扰分布（如通过频谱感知），自动调整基站发射功率或切换频段，避免与强干扰源频段重叠。此外，分布式天线系统（DAS）可将天线分散部署，降低单点故障风险，同时通过集中式信号处理提升抗干扰能力。网络布局优化需综合考虑覆盖、容量与干扰抑制，例如5G网络中通过超密集组网（UDN）与波束赋形技术实现高频段信号的精准覆盖与干扰规避。

#### 4.3 加强设备性能

设备性能是抗干扰的基础保障。硬件层面需采用高线性度功率放大器、低噪声放大器（LNA）及高选择性滤波器，减少设备自身非线性失真与带外辐射，降低对邻频系统的干扰。高灵敏度接收机可提升弱信号检测能力，例如通过采用零中频或低中频架构降低本振泄漏与直流偏移问题。软件层面需优化信号处理算法，如通过数字预失真（DPD）技术补偿功率放大器的非线性特性，或采用自适应调制编码（AMC）根据信道质量动态调整调制方式与编码速率，提升传输可靠性。设备需具备环境适应性设计，如抗振动结构、宽温工作范围（-40℃至+85℃）及防尘防水等级（IP67以上），确保在恶劣气候条件下稳定运行。此外，设备需支持多频段、多模式兼容，例如软件定义无线电（SDR）技术可灵活切换频段与调制方式，适应不同场景需求。

#### 4.4 智能算法应用

智能算法通过机器学习与数据分析实现抗干扰的智

能化与动态化。基于深度学习的干扰识别算法可分析信号特征（如频谱形状、时域波形），自动分类干扰类型（如窄带干扰、脉冲干扰、多径干扰），并选择最优抗干扰策略。例如，卷积神经网络（CNN）可用于频谱感知，通过训练模型识别干扰频段，指导系统切换至空闲频段；循环神经网络（RNN）则可预测干扰的时变特性，提前调整系统参数。强化学习算法可用于动态资源分配，例如通过Q-learning算法优化功率控制策略，在满足通信质量的前提下最小化发射功率，降低对邻区干扰。智能天线算法（如波束形成、空时编码）可通过感知干扰方向，动态调整天线权值，形成指向性波束抑制干扰，同时增强目标信号增益。此外，联邦学习技术可在分布式设备间共享模型参数，避免数据集中传输带来的隐私风险，同时提升全局抗干扰能力<sup>[4]</sup>。

#### 结束语

微波数字通信抗干扰技术作为保障复杂环境通信可靠性的核心手段，通过技术融合与创新持续突破干扰瓶颈。从扩频、自适应滤波到智能算法的深度应用，技术体系已形成多层次防护能力，可有效应对电磁干扰、多径效应及恶劣气候等挑战。未来，随着5G/6G、人工智能与软件定义无线电的深度融合，抗干扰技术将向智能化、动态化方向演进，实现干扰感知、决策与抑制的全流程自主优化。其在军事通信、应急救援、物联网等领域的广泛应用，将持续推动通信系统向高可靠、低时延、广覆盖目标迈进，为复杂环境下的信息传输提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]舒杰.数字微波通信与卫星数字通信技术在广播传输中的应用[J].中国新通信,2021,23(08):25-27.
- [2]郑哲.高压输电线路电力通信系统的抗干扰技术研究[J].中国宽带,2025,21(10):130-132.
- [3]赵琳,徐蓓蓓.OFDM技术在电视广播视频通信抗干扰中的应用[J].电视技术,2025,49(07):111-113.
- [4]黄宇,赵杰,陈建国.复杂电磁环境下电子通信信号抗干扰方法[J].计算机仿真,2023,5(08):159-163