

# 高频微波数字通信在远程通信中的性能分析

朱一铭

锡林郭勒盟微波总站 内蒙古 锡林郭勒 026000

**摘要:** 高频微波数字通信凭借高频段大带宽优势,成为远程通信关键技术。本文聚焦远程传输性能,剖析传输速率、信号质量、稳定性等核心性能,探讨信道特性、调制解调技术等影响因素及制约机制。针对性能瓶颈,提出基于信道适配、调制编码优化、链路增强设计及抗干扰策略的优化方向,为提升高频微波数字通信远程传输性能提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 高频微波数字通信; 远程通信; 传输性能; 影响因素; 优化策略

引言: 随着信息技术的飞速发展,远程通信需求持续增长,高频微波数字通信凭借大带宽、高速率等优势成为关键技术。然而,高频微波信号在传播过程中面临诸多挑战,如路径损耗大、多径效应显著、易受干扰等,导致通信性能受限。深入分析高频微波数字通信远程性能,探究其制约因素并寻找优化方向,对提升通信质量、推动远程通信技术发展具有重要意义。

## 1 高频微波数字通信远程传输的核心性能

### 1.1 传输速率相关性能

高频微波数字通信的传输速率由频谱资源与调制技术共同决定。在频谱利用层面,毫米波频段(30GHz-300GHz)可提供数GHz的连续带宽,远超传统微波频段,为高速数据传输奠定物理基础<sup>[1]</sup>。数字调制技术通过符号映射效率提升速率,例如64QAM调制可在单载波上实现6bit/符号的传输,配合正交频分复用(OFDM)技术,可进一步将频谱效率提升至20bit/s/Hz以上。在系统架构层面,载波聚合技术通过合并多个非连续频段资源,突破单一频段带宽限制,实现传输速率的线性叠加。此外,全双工通信技术通过收发链路的空间隔离或自干扰消除,使上下行链路同时工作,理论上可将频谱效率提升一倍。

### 1.2 信号传输质量相关性能

信号传输质量以误码率(BER)为核心指标,受信噪比(SNR)与信道特性共同影响。高频微波信号在自由空间传播时,路径损耗随距离呈四次方增长,导致接收端信噪比显著下降。为补偿链路损耗,系统需采用高增益定向天线与低噪声放大器(LNA)组合,提升接收灵敏度。数字信号处理层面,前向纠错编码(FEC)通过引入冗余比特实现错误检测与纠正,例如LDPC码在编码增益上较传统卷积码提升3-5dB,可显著降低误码率。自适应均衡技术通过动态调整滤波器参数,补偿多径效应

引起的符号间干扰(ISI),确保信号波形完整性。

### 1.3 传输稳定性相关性能

传输稳定性体现为链路可用性与动态适应能力。高频微波信号易受大气环境影响,雨衰是主要限制因素,在Ka波段(26.5-40GHz),100mm/h降雨强度可导致路径损耗增加20dB/km。为维持链路稳定,系统需集成雨衰预测算法,根据实时气象数据动态调整发射功率或切换备用频段。此外,波束跟踪技术通过机械或电子方式调整天线指向,补偿因风振或建筑物遮挡引起的波束偏移,确保信号持续对准。在网络拓扑层面,Mesh组网结构通过多跳中继实现链路冗余,单一节点故障不影响整体网络连通性。

### 1.4 传输距离适配性能

传输距离适配需平衡覆盖范围与系统复杂度。单跳微波链路受地球曲率限制,典型视距传输距离为50-80公里,超出范围需部署中继站。为延长传输距离,系统可采用再生中继技术,在中间节点完全恢复数字信号后再转发,避免模拟放大引入的噪声累积。在频段选择层面,低频微波(如L波段1-2GHz)绕射能力强,适合非视距传输,但带宽受限;高频微波(如E波段60-90GHz)带宽充裕,但需严格视距条件。实际部署中,需根据地形特征与业务需求,灵活选择频段与中继策略。

### 1.5 抗干扰能力相关性能

抗干扰能力是高频微波系统在复杂电磁环境中的生存关键。空间传播特性使微波信号易被非授权设备截获,需采用扩频技术(如直接序列扩频DSSS)将信号能量分散至更宽频带,降低被截获概率。在频域干扰对抗层面,认知无线电技术通过频谱感知实时监测空闲频段,动态调整工作频率以规避干扰。在空域维度,智能天线技术通过波束赋形形成窄波束,将信号能量集中于目标方向,同时抑制旁瓣干扰。此外,加密算法(如

AES-256)对传输数据进行加密处理,确保即使信号被截获也无法解析内容。

## 2 高频微波数字通信远程传输的性能影响因素

### 2.1 信道特性对性能的影响

信道特性是决定高频微波通信性能的基础因素。自由空间传播中,路径损耗随距离呈四次方增长,限制了单跳传输距离<sup>[2]</sup>。多径效应导致信号在传播过程中经不同路径到达接收端,引发符号间干扰,尤其在非视距场景中更为显著。大气衰减是高频段传输的主要挑战,氧气分子在60GHz频段产生共振吸收,水蒸气在22GHz与183GHz频段形成吸收峰,导致这些频段在潮湿环境中的传输损耗急剧增加。此外,降雨引起的雨衰效应在毫米波频段尤为突出,降雨强度每增加10mm/h,路径损耗可能增加数dB至数十dB,直接影响链路可用性。

### 2.2 调制解调技术对性能的影响

调制解调技术直接影响频谱效率与抗噪声能力。高阶调制如256QAM通过增加符号映射比特数提升传输速率,但对信噪比要求更高,在低信噪比环境下易引发误码。正交频分复用(OFDM)将宽带信号分割为多个正交子载波,有效对抗多径效应,但需精确的频偏估计与相位补偿。解调端采用相干解调可获得最佳性能,但需复杂的载波同步与信道估计;非相干解调结构简单,但性能损失约3dB。自适应调制技术根据实时信道质量动态调整调制阶数,在保证误码率前提下最大化传输效率。

### 2.3 编码解码方式对性能的影响

编码解码方式通过引入冗余提升信号抗干扰能力。卷积码与Turbo码通过级联编码结构获得编码增益,但解码复杂度随约束长度指数增长。低密度奇偶校验码(LDPC)以接近香农极限的性能成为高频微波通信的主流选择,其并行解码架构可显著降低时延。极化码作为5G标准编码方案,在短码长场景下表现优异,但长码解码仍需优化。硬判决解码结构简单但性能有限,软判决解码通过量化信道输出信息提升纠错能力,代价是增加计算复杂度。

### 2.4 传输链路设计对性能的影响

传输链路设计需平衡覆盖范围与系统复杂度。中继站部署可扩展传输距离,但再生中继需完全恢复数字信号,引入处理时延;非再生中继仅进行模拟放大,虽时延低但噪声累积问题突出。天线设计直接影响波束成形效果,高增益定向天线可提升接收灵敏度,但需精确的波束跟踪机制补偿风振或平台移动。功率控制策略通过动态调整发射功率补偿路径损耗变化,避免因功率过剩引发邻频干扰,或因功率不足导致链路中断。

### 2.5 外部环境因素对性能的影响

外部环境因素对高频微波通信性能的影响具有动态性与不可预测性。温度变化导致设备参数漂移,影响本振频率稳定性与放大器线性度。风振引起天线指向偏移,降低波束对准精度,尤其在长距离传输中可能导致信号中断。电磁干扰来自同频段其他设备或自然现象(如太阳黑子活动),需通过频谱感知与动态频选技术规避。植被遮挡在郊区与森林场景中引入额外衰减,需在链路预算中预留足够余量。

## 3 高频微波数字通信远程传输的性能制约机制

### 3.1 高频段信号衰减对远程传输性能的制约

高频段信号在自由空间传播时面临显著路径损耗,其衰减量与频率平方成正比,导致毫米波频段传输距离受限。大气吸收效应在特定频段(如22GHz水蒸气吸收峰、60GHz氧分子吸收峰)引发额外衰减,进一步压缩可用传输范围<sup>[3]</sup>。雨衰是高频通信的主要制约因素,降雨粒子对电磁波的散射与吸收导致信号功率快速衰减,且衰减程度随降雨强度与频率升高而加剧。在非视距传播场景中,植被、建筑物等障碍物引发的穿透损耗同样不可忽视,需通过提高发射功率或采用中继技术补偿链路预算缺口。

### 3.2 多径效应对信号完整性的制约

多径传播使信号经不同路径到达接收端,时延差异导致符号间干扰,破坏信号时域波形完整性。在高频微波频段,短波长特性使得微小路径差即可引发显著相位变化,加剧频率选择性衰落。信道时延扩展限制系统最高传输速率,当符号周期小于多径时延差时,码间串扰将导致误码率急剧上升。均衡技术通过反向滤波补偿信道失真,但复杂信道环境下需动态调整均衡系数,增加硬件实现难度。分集接收技术通过空间、频率或极化维度分离多径分量,可有效提升信号抗多径能力,却以增加系统复杂度为代价。

### 3.3 带宽限制对传输速率的制约

可用频谱带宽是决定传输速率的核心资源,高频段虽提供更宽连续带宽,但实际分配受频谱管理政策限制。调制效率与带宽利用率共同影响频谱效率,高阶调制虽能提升单位带宽承载比特数,但对信噪比要求更高,限制其在噪声敏感场景的应用。数字信号处理中的滤波器滚降系数设计影响有效带宽,过窄滚降虽能抑制带外辐射,却降低频谱利用率;过宽滚降则可能引发邻道干扰。动态频谱分配技术通过灵活调整工作频段提升资源利用率,但需解决频段切换时延与兼容性问题。

### 3.4 噪声与干扰对传输质量的制约

热噪声是通信系统的固有限制因素，其功率谱密度与温度成正比，高频段接收机灵敏度受噪声系数影响显著。人为干扰（如同频段其他通信系统）与自然干扰（如雷电、太阳黑子活动）可能引发突发误码，需通过扩频技术或跳频图案设计规避。非线性失真在功率放大器中引入互调干扰，降低信号质量，需采用线性化技术（如预失真补偿）抑制。同频干扰抑制算法通过信号特征提取与滤波处理分离有用信号，但复杂电磁环境下算法性能可能退化，影响传输可靠性。

#### 4 高频微波数字通信远程性能的优化方向

##### 4.1 基于信道适配的性能优化路径

信道状态感知与动态适配是提升传输效率的关键。通过实时监测信道衰落特性、多径时延扩展及噪声功率谱密度，构建动态信道模型指导系统参数调整。自适应功率控制算法根据路径损耗变化动态分配发射功率，在满足误码率要求的前提下降低能耗<sup>[4]</sup>。波束赋形技术通过调整天线阵列相位分布实现空间滤波，抑制非视距路径干扰并增强主瓣增益，适用于移动场景下的快速信道适配。频谱感知技术结合认知无线电理念，在空闲频段动态切换工作频率，规避深度衰落区域与强干扰频段，提升频谱利用率。

##### 4.2 调制编码技术的优化方向

调制方式与编码方案的联合设计可突破单一技术性能瓶颈。高阶调制（如1024QAM）与低密度奇偶校验码（LDPC）的组合在信噪比允许条件下实现频谱效率最大化，需通过迭代解码算法降低误码平台。非均匀星座调制通过优化符号分布提升抗噪声能力，适用于非线性信道环境。混合自动重传请求（HARQ）机制结合前向纠错与重传策略，在首次传输失败时通过增量冗余或追逐合并提升重传效率，降低端到端时延。软判决解码技术利用信道状态信息生成对数似然比，为解码器提供更丰富的判决依据，提升纠错能力。

##### 4.3 链路增强设计的优化思路

链路拓扑与硬件设计的协同优化可扩展传输覆盖范围。多跳中继网络通过合理部署中继节点构建冗余路径，采用网络编码技术合并多路信号提升链路容量。全双工通信技术通过自干扰消除实现收发同时工作，理论

上可将频谱效率提升一倍，但需解决近端干扰抑制难题。大规模MIMO技术利用数百根天线形成空间复用增益，结合波束空间处理降低信道相关性，适用于高频段密集传输场景。智能反射面（RIS）通过调控电磁波反射相位构建可控传播环境，可绕过障碍物建立虚拟视距链路，降低路径损耗。

##### 4.4 抗干扰性能提升的优化策略

干扰抑制需从频域、空域与码域多维度协同设计。扩频技术通过高速码片展宽信号带宽，降低干扰功率谱密度，直接序列扩频（DSSS）适用于窄带干扰抑制，跳频扩频（FHSS）可对抗扫频干扰。滤波器组多载波（FBMC）技术通过原型滤波器设计实现子载波间严格正交，抑制邻道干扰并提升频谱局部化特性。极化分集技术利用正交极化通道传输独立信号流，在多径环境下可获得2-3dB的分集增益。基于深度学习的干扰识别算法通过特征提取与分类训练，实现干扰类型自动判别与针对性抑制，提升系统在复杂电磁环境中的鲁棒性。协作式干扰消除技术通过多节点信息共享构建干扰空间模型，采用联合检测算法消除共道干扰，适用于密集组网场景。

#### 结束语

高频微波数字通信远程性能受多种因素制约，信道特性、技术方案及外部环境等均对其产生重要影响。通过基于信道适配的功率分配、波束跟踪等优化路径，调制编码技术的协同设计，链路拓扑与硬件架构的联合优化，以及频域、空域与码域多维度抗干扰策略，可有效提升系统性能。这些优化措施为高频微波数字通信在远程通信领域的应用提供了有力支撑，有助于满足日益多样化的通信需求。

#### 参考文献

- [1]朱伦.数字微波通信在消防应急通信保障中的具体应用[J].中国新通信,2024,26(7):13-15.
- [2]王萍.数字微波通信在应急通信中的有效应用[J].数字通信世界,2022(3):106-108.
- [3]左玉琦.数字微波通信的优点及其应用研究[J].通信电源技术,2022,39(10):127-129.
- [4]胡哲琼,蔡美玉.数字微波通信技术及应用分析[J].黑龙江广播电视技术,2024(1):23-25,30.