

广播电视工程中射频信号质量评估体系构建

孔凡猛

巨野县融媒体中心 山东 菏泽 274900

摘要: 本文旨在系统性地构建一个科学、全面、可操作的广播电视射频信号质量评估体系。首先,深入剖析了射频信号在广播电视系统中的关键作用及其面临的主要失真与干扰源;其次,全面梳理并分类了评估射频信号质量的核心技术参数,包括幅度域、频率域、调制域和时域四大类指标,并详细阐述了各参数的物理意义、测量方法及合格阈值;在此基础上,创新性地提出了一个分层级的评估框架,该框架涵盖了从物理层基础性能到业务层用户体验的完整链条。研究表明,建立一个标准化、自动化、智能化的射频信号质量评估体系,是保障广播电视公共服务高质量发展的关键技术支撑。

关键词: 广播电视工程;射频信号;质量评估;技术参数;评估体系

引言

广播电视作为国家舆论宣传和公共文化服务的关键平台,其安全、稳定、高质量播出至关重要。射频信号贯穿节目制作、传输到终端接收全链路,其劣化可导致画面马赛克、声音中断甚至停播,严重影响信息传播与观众权益。传统评估依赖场强、信噪比等模拟指标,难以应对OFDM、QAM等数字调制信号及复杂传输环境下的“峭壁效应”——即信号质量在临界点前良好,越过则骤然崩溃,亟需精细化、预警式评估手段。同时,尽管GY/T、GB/T等行业标准明确了技术要求,但缺乏整合多参数、覆盖全链路、面向业务目标的系统性评估框架。因此,构建科学统一的射频信号质量评估体系,既是工程技术迫切需求,也是落实国家标准、提升运维水平的战略任务。本研究旨在为此提供一套完整的评估工具与方法论。

1 广播电视射频信号特性与主要劣化因素

1.1 射频信号在广播电视系统中的核心地位

在广播电视系统中,基带的音视频信号(无论是模拟还是数字)必须经过调制,搬移到特定的射频频段,才能通过天线有效地辐射出去或通过电缆高效地传输。这个过程赋予了信号远距离传播的能力。对于地面数字电视(如DTMB、DVB-T2),信号通常采用高效的OFDM调制方式;对于有线数字电视(DVB-C),则多采用高阶QAM调制;而对于卫星广播(DVB-S2),则倾向于使用QPSK或8PSK等抗噪能力强的调制方式。不同的调制方式对信号质量的要求各异,这决定了评估体系必须具备足够的灵活性和针对性。

1.2 射频信号的主要劣化机制与干扰源

射频信号在传输中主要面临四类劣化机制:一是噪

声,包括宇宙辐射、大气热噪声及接收机内部白噪声,降低信噪比,限制接收灵敏度;二是失真,分为线性(幅频/相位响应不平导致码间串扰)与非线性(放大器等器件产生谐波与互调失真,干扰邻道);三是衰落,无线环境中因多径传播引发快衰落(瑞利/莱斯衰落),或因障碍物遮挡造成慢衰落(阴影效应);四是外部干扰,如同频、邻频、互调干扰及雷电、开关电源等引起的脉冲噪声,可直接淹没或破坏有用信号^[1]。这些因素共同影响广播电视信号的完整性与可靠性,是质量评估与系统优化的关键考量。

2 射频信号质量评估的核心技术参数体系

2.1 幅度域参数:衡量信号强度与功率关系

2.1.1 场强与接收信号电平

场强是描述空间某点电磁波强度的物理量,单位为 $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 。对于接收端而言,更常用的是接收信号电平(RSL),即进入接收机输入端口的信号功率,单位为 dBm 或 $\text{dB}\mu\text{V}$ 。RSL是判断信号是否在接收机正常工作范围内的首要指标。过低的RSL会导致信噪比不足,过高的RSL则可能使接收机前端放大器饱和,产生非线性失真。国家标准通常规定了不同区域(如城市、郊区、农村)的最低可用场强要求。

2.1.2 载噪比(C/N)与信噪比(SNR)

C/N是载波信号功率与噪声功率之比,是模拟广播时代的核心指标。在数字广播中,更常用的是SNR,即总信号功率(包含所有调制符号的能量)与噪声功率之比。SNR直接决定了数字信号的误码率(BER)性能,是评估信号能否被正确解调的关键门限。例如,对于64-QAM调制,通常需要SNR大于28dB才能保证稳定的接收。

2.1.3 载波抑制比与肩部电平

对于采用残留边带 (VSB) 调制的ATSC系统或某些单边带系统, 载波抑制比衡量了载波分量被抑制的程度。对于采用OFDM调制的系统 (如DTMB、DVB-T2), 由于其频谱呈矩形, 信号带外能量应迅速滚降。肩部电平指在信号标称带宽之外特定偏移处 (如 $\pm 4.2\text{MHz}$ for DTMB) 的功率电平, 用于衡量发射机滤波器的性能和带外辐射是否符合频谱模板要求。

2.2 频率域参数: 揭示频谱纯净度与稳定性

2.2.1 频率误差与相位噪声

频率误差指实际载波频率与标称频率之间的偏差。过大的频率误差会导致接收机无法正确锁定信号。相位噪声则是衡量本地振荡器 (LO) 短期频率稳定性的关键指标, 表现为载波频谱两侧的噪声裙边。严重的相位噪声会恶化星座图的旋转稳定性, 增加误码率, 尤其对高阶QAM和OFDM系统影响巨大^[2]。

2.2.2 邻道泄漏比 (ACLR) 与频谱发射模板 (SEM)

ACLR是衡量发射机非线性失真导致的带外辐射能力的指标, 定义为主信道功率与相邻信道 (或隔道) 内泄漏功率之比。SEM则是一个更全面的规范, 它规定了发射信号在整个频谱范围内 (包括带内、带外和杂散域) 的最大允许功率谱密度。这两个指标共同确保了发射信号不会对邻近频道的合法用户造成有害干扰, 是无线电频谱管理的重要依据。

2.2.3 互调失真 (IMD)

当两个或多个强信号同时进入一个非线性系统时, 会产生新的频率分量, 即互调产物。三阶互调失真 (IMD3) 尤为重要, 因为其产物频率往往非常接近原始信号频率, 难以通过滤波器滤除。IMD3的大小通常用三阶交调截点 (IP3) 来表征, IP3越高, 系统的线性度越好。

2.3 调制域参数: 评估数字信号的保真度

2.3.1 误差矢量幅度 (EVM)

EVM是评估数字调制信号质量的黄金标准。它通过比较接收到的符号矢量与理想参考符号矢量之间的误差 (Error Vector) 来量化调制精度。EVM以百分比或dB表示, 值越小, 信号质量越好。EVM综合反映了噪声、失真、相位噪声、IQ不平衡等多种损伤对信号的影响, 是诊断发射机和接收机性能的强有力工具。

2.3.2 星座图

星座图是EVM的可视化表现形式。通过观察星座点的分布形态, 可以直观地判断信号劣化的类型。例如, 星座点呈圆形扩散, 表明主要受加性白噪声影响; 星座点沿径向拉伸, 可能是AM/AM失真 (幅度压缩); 星座

点发生旋转, 则可能源于相位噪声或频率偏移。

2.3.3 调制误差率 (MER)

MER与EVM密切相关, 定义为平均信号功率与平均误差功率之比, 单位为dB。MER数值越大, 信号质量越好。MER常用于有线电视网络的维护, 因为它对累积的噪声和失真非常敏感。

2.4 时域与业务层参数: 关联用户体验

2.4.1 抖动与定时误差

在数字传输系统中, 精确的符号定时和帧同步至关重要。抖动指数字信号脉冲在时间上相对于其理想位置的短期、快速变化。过大的抖动会破坏接收机的时钟恢复电路, 导致同步失败和误码。定时误差则指符号采样时刻的长期偏移。

2.4.2 误码率 (BER) 与包错误率 (PER)

BER是衡量数字通信系统可靠性的最基本指标, 定义为接收到的错误比特数与总传输比特数之比。在MPEG-TS流传输中, 更常用的是PER, 即丢失或损坏的TS包的比例。PER与BER直接相关, 但更能反映业务层面的数据完整性。通常, 系统会区分前向纠错前误码率 (Pre-BER/VBER) 和前向纠错后误码率 (Post-BER), 前者反映信道损伤程度, 后者反映最终解码性能。

2.4.3 传输流 (TS) 层分析

深入到MPEG-TS层, 可以监测节目时钟参考 (PCR) 精度、TS包抖动、PID (Packet Identifier) 错误、空包率等参数。这些参数的异常往往预示着编码器、复用器或传输链路的问题, 即使底层射频信号看似正常, 也可能导致业务中断。

3 射频信号质量分层级评估框架设计

将上述繁杂的技术参数有机整合, 需要一个清晰、结构化的评估框架。本文提出一个三层评估模型。

3.1 物理层基础性能评估

此层聚焦于射频信号最基本的物理属性, 回答“信号本身好不好”的问题。评估的核心是一组客观、可重复测量的技术参数, 主要包括接收信号电平 (RSL)、载噪比 (C/N)、误差矢量幅度 (EVM) 和邻道泄漏比 (ACLR)。这些参数直接反映了发射机、天馈系统以及局部电磁环境的健康状况。该层级的评估通常由专业的射频测试仪器 (如频谱分析仪、矢量信号分析仪) 在发射端或靠近发射端的位置完成, 是工程验收、设备入网检测和日常例行维护的基础, 其结果是判断硬件设施是否符合技术规范的直接证据。

3.2 链路层传输可靠性评估

此层关注信号在特定传输链路 (如从发射塔到接收

点的无线链路,或从头端到用户家的有线链路)上的稳健性,回答“信号传得稳不稳”的问题。评估重点在于信号抵抗信道损伤的能力,主要指标包括前向纠错前误码率(Pre-BER/VBER)、包错误率(PER)、抖动以及对于无线链路的多径时延扩展。这些指标综合体现了从发射端到接收端之间整个物理通道的质量,包括了路径损耗、多径效应、噪声累积和非线性失真的综合影响^[3]。该层级的评估需要结合信道特性,通常由具备完整解调和TS分析功能的综合测试仪在接收端或链路中间节点完成,主要用于网络覆盖优化、故障定位和链路预算验证。

3.3 业务层用户体验评估

此层是评估的最终落脚点,直接关联到用户的主观感受,回答“用户看得好不好”的问题。虽然主观评价(如平均意见分MOS)是衡量体验质量(QoE)的金标准,但在大规模工程实践中,更多依赖客观的代理指标。核心代理指标包括前向纠错后误码率(Post-BER)、TS流中断次数与时长、视频解码卡顿率以及音频失真度。更进一步,可以利用基于感知的视频质量客观算法(如PSNR、SSIM、VMAF)对接收到的视频流进行分析,得到与人眼视觉感知高度相关的质量分数。该层级的评估需要在用户终端或非常靠近终端的位置进行,是衡量整个广播电视系统端到端服务质量(QoS/QoE)的最终依据,也是服务提供商兑现其对用户承诺的关键衡量尺度。

4 评估体系的实施与未来智能化演进

4.1 标准化与自动化测量流程

评估体系的有效性依赖于测量的标准化和一致性。应严格遵循国家和行业标准(如GY/T 225-2007《中、短波调幅广播发射机技术要求和测量方法》、GB/T 28437-2012《地面数字电视广播监测技术规程》)规定的测量条件、方法和仪器校准要求。同时,应大力推广自动化测量平台,通过脚本或软件控制测试仪器,实现一键式、批量化的参数采集与报告生成,提高效率,减少人为误差。

4.2 基于人工智能的智能评估与预测

未来的评估体系将深度融合人工智能技术。通过在全网部署探针,持续采集海量的多维信号质量数据,利

用机器学习算法(如聚类、分类、回归)可以实现:自动识别信号劣化的根本原因。例如,通过分析EVM、ACLR、频谱等特征向量,AI模型可以准确判断问题是源于发射机功放老化、天馈系统进水还是外部干扰。基于历史数据和环境参数(如天气、温度),预测未来一段时间内关键链路的信号质量趋势,实现从“事后抢修”到“事前预防”的转变。AI系统可以根据实时评估结果,自动调整发射机参数(如功率、预失真系数)或网络路由,以维持最优的服务质量。

4.3 构建云-边协同的评估网络

将评估能力下沉到网络边缘(如县级监测站、小区光节点),与云端的大数据分析中心协同工作。边缘节点负责实时、低时延的本地信号质量监控和初步告警;云端则负责汇聚全域数据,进行深度挖掘、模型训练和全局态势感知。这种架构既能满足应急响应的时效性要求,又能发挥大数据的价值,为整个广播电视网络的规划、建设和运维提供强大的决策支持。

5 结语

广播电视工程中射频信号质量的优劣,是系统成败的生命线。本文系统地构建了一个涵盖幅度域、频率域、调制域和时域的多维度技术参数体系,并在此基础上创新性地提出了一个由物理层、链路层到业务层的分层级评估框架。该体系不仅全面覆盖了信号从产生到消费的全生命周期,而且紧密衔接了工程技术指标与最终用户体验。面对未来媒体融合与智能化的发展趋势,将人工智能、大数据和云-边协同架构融入评估体系,是实现广播电视网络从“被动运维”向“主动智维”转型的必由之路。通过建立这样一个科学、智能、高效的射频信号质量评估体系,能够为我国广播电视事业的高质量、可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]国家广播电视总局.超高清视频图像质量客观评价方法:GY/T400-2025[S].北京:国家广播电视总局,2025.
- [2]张明,王华.数字电视广播信号质量检测技术综述[J].广播与电视技术,2025,52(08):34-39.
- [3]李强.基于EVM的数字电视发射机性能分析与优化[J].电声技术,2024,48(11):78-82.