

应急广播系统中信号覆盖与稳定性研究

陈 盟

巨野县融媒体中心 山东 菏泽 274900

摘 要：本文系统探究影响应急广播系统信号覆盖与稳定性的关键因素及优化策略。首先分析其多模态传输网络（如有线电视、调频/中波广播、移动通信、地面数字电视）的技术特性；其次从物理环境、网络拓扑、设备性能和外部干扰等维度，揭示制约覆盖与稳定性的内在机理；进而提出提升覆盖效能的精细化规划方法（如基于GIS的传播模型预测、多频点协同组网）和增强稳定性的关键技术（如冗余备份、自适应功率控制、智能故障诊断与切换）。研究表明，通过科学顶层设计、先进技术和智能运维，可建成“横向到边、纵向到底、平战结合、安全可靠”的现代化应急广播网络。

关键词：应急广播；信号覆盖；系统稳定性；多模态传输；冗余备份

引言

当前，各类突发事件频发，对人民生命财产和社会稳定构成严重威胁，构建高效可靠的应急信息发布体系成为国家治理现代化的关键。应急广播系统作为政府发布信息、精准动员的“神经末梢”，必须确保应急指令“发得出、传得快、收得到、听得清”。然而，我国地域辽阔、地形复杂——高山、密林、城市建筑群等极易造成信号盲区；同时，系统需融合多种异构传输网络，其技术体制、覆盖能力与抗毁性差异显著。在地震、洪水或强电磁干扰等极端灾害下，部分链路可能瞬间中断，严重考验系统整体鲁棒性。因此，深入研究应急广播系统的信号覆盖与稳定性，不仅是重大技术挑战，更是关乎公共安全与国计民生的紧迫课题。

1 应急广播系统架构与传输网络特性分析

一个现代化的应急广播系统是一个典型的多层级、多网络融合的复杂巨系统。其基本架构通常遵循“六级贯通”原则，即国家级、省级、市级、县级、乡（镇、街道）级、村（社区）级平台的纵向贯通，并能与相关部门（如应急管理、气象、水利、地震等）横向对接。在这一架构下，信号的传输依赖于一个由多种技术组成的混合传输网络。

1.1 有线传输网络：基础与骨干

有线电视网络（HFC/CATV）和光纤网络构成了应急广播系统最稳定、最可靠的基础传输层。有线网络具有带宽大、抗干扰能力强、信号质量高等优点，尤其适合在城市和乡镇等有线基础设施完善的区域进行高保真音频和视频信息的播发。其信号通过同轴电缆或光纤直达用户终端（如机顶盒、智能音箱），几乎不受外部物理环境的影响，稳定性极高^[1]。然而，有线网络的致命弱点

在于其物理脆弱性。一旦发生地震、洪水等灾害导致光缆或电缆被切断，整片区域的信号传输将立即中断，且修复周期较长。因此，有线网络虽稳，但必须与其他无线网络形成互补。

1.2 无线传输网络：广域覆盖的主力

无线传输网络是实现应急广播全域覆盖的关键，主要包括以下几种模式：（1）调频（FM）/中波（AM）广播：这是传统且成熟的广播技术，覆盖范围广，接收终端（收音机）普及率高、成本低廉、功耗极低，甚至无需外部电源（手摇发电）。FM广播音质好，但绕射能力弱，易受高山、高楼阻挡；AM广播波长长，绕射和地波传播能力强，可实现超视距覆盖，但易受雷电等大气噪声干扰，音质较差。两者结合，可在不同地形条件下形成互补覆盖。（2）地面数字电视（DTMB）：作为广播电视数字化的产物，DTMB不仅能传输高质量的视音频节目，还能承载应急广播数据流。其频谱效率高，支持单频网（SFN）技术，多个发射台同步发射同一信号，可有效消除多径干扰并扩大覆盖范围。DTMB终端（数字电视机顶盒）同样具有较高的普及率。（3）移动通信网络（4G/5G）：随着移动互联网的普及，利用蜂窝网络进行应急信息推送已成为重要补充手段。通过小区广播（Cell Broadcast）或特定APP推送，可以实现对特定区域内所有手机用户的精准、强制触达。5G网络的大带宽、低时延、海量连接特性，更为未来应急广播的多媒体化、交互化提供了可能。但其依赖于基站的正常运行和用户的终端在线状态，在灾害中基站损毁或电力中断时，其可靠性会大幅下降。

2 信号覆盖效能的影响因素与优化策略

2.1 影响信号覆盖的关键因素

(1) 地理与地貌因素: 这是最根本的制约因素。高山、峡谷、茂密森林等地形会吸收、反射或阻挡无线电波, 形成信号阴影区。城市中的高楼大厦则会产生严重的多径效应和信号衰落 (Urban Canyon Effect)。(2) 发射系统参数: 包括发射机的输出功率、天线增益、天线高度、天线方向图 (主瓣宽度、旁瓣抑制) 以及工作频率。功率越大、天线越高、增益越高, 理论上覆盖半径越大。但过高的功率会造成能源浪费和对邻近频道的干扰。(3) 接收终端灵敏度: 不同品牌、型号的接收终端 (大喇叭、收音机、机顶盒) 其接收灵敏度存在差异。在信号边缘区域, 高灵敏度的终端仍能正常工作, 而低灵敏度的终端则可能出现杂音或无声。(4) 电磁环境干扰: 工业设备、高压输电线、其他无线通信系统等都可能产生电磁噪声, 抬高接收端的噪声基底, 降低信噪比 (SNR), 从而影响有效覆盖距离。

2.2 提升信号覆盖的精细化规划策略

2.2.1 基于GIS与先进传播模型的仿真预测

现代应急广播覆盖规划已进入数字化、精准化时代。其核心流程是: 首先, 获取规划区域的高精度数字高程模型 (DEM) (通常来源于测绘部门, 精度可达5米甚至更高) 和土地利用/土地覆盖 (LULC) 数据 (用于确定不同地表类型的电导率和介电常数)。然后, 选择合适的无线电波传播模型。对于FM/AM等中长距离规划, Longley-Rice (Irregular Terrain Model, ITM) 模型因其能综合考虑地形、大气折射、地面电参数等因素而被广泛采用。对于城市微蜂窝环境, 则可选用射线追踪 (Ray Tracing) 模型, 该模型能精确模拟信号在建筑物间的反射、透射和绕射路径, 但计算量巨大^[2]。将上述数据和模型输入专业的通信规划软件 (如Atoll, Planet, WinProp), 即可生成详细的信号强度、场强、信噪比等预测热力图, 为站点选址、天线参数配置提供科学、量化的决策依据。

2.2.2 多频点、多制式协同组网的系统设计

单一网络难以满足全域覆盖需求, 必须进行系统级的协同设计。频率规划是其中的关键。在同一区域内, FM广播的不同频率之间需保持足够的保护间隔 (通常为800kHz以上), 以避免邻频干扰。DTMB单频网的构建则要求所有发射台严格同步, 其同步精度 (时间、频率、相位) 直接决定了SFN的性能上限。在组网层面, 应遵循“主干+补点”的原则。例如, 以县域为中心, 建设一个高功率的DTMB主发射台, 覆盖大部分平原和丘陵地区; 在主站信号难以到达的偏远山村, 则部署低成本、小功率的FM或AM补点发射站。这些补点站通过卫

星链路或微波链路接收来自主站的应急信号, 再进行本地转发。所有网络的信息源均来自统一的县级应急广播平台, 通过标准化的协议 (如GB/T 38670) 进行调度, 确保信息的一致性和权威性。

2.2.3 自适应功率控制与动态覆盖调整

系统应具备一定的环境自适应能力。通过在关键区域部署远程监测终端, 可以实时回传当地的信号接收质量 (如BER、SNR)。平台根据这些反馈数据, 可以动态调整发射策略。例如, 在夜间或非应急时段, 可适当降低发射功率以节约能源; 当监测到某区域信号质量持续恶化 (可能由于新建筑遮挡或植被生长), 系统可自动提升该区域补点站的发射功率, 或向运维人员发出告警, 提示进行现场勘查和天线调整。这种闭环控制机制, 使得覆盖网络能够随环境变化而动态优化, 始终保持最佳状态。

3 系统运行稳定性的保障机制与关键技术

3.1 威胁系统稳定性的主要风险源

(1) 单点故障: 无论是前端的播控服务器、传输链路中的光缆, 还是末端的发射机, 任何一个关键节点的失效都可能导致局部乃至全局的服务中断。(2) 电力供应中断: 绝大多数广播设备依赖市电运行。灾害往往伴随大规模停电, 若无备用电源, 系统将迅速瘫痪。(3) 外部攻击与干扰: 包括恶意的网络攻击 (如DDoS攻击播控平台)、非法信号插入或压制式干扰, 都可能破坏系统的正常运行。(4) 设备老化与维护缺失: 长期运行的设备会出现元器件老化、性能下降等问题, 若缺乏定期的预防性维护, 故障率将显著升高。

3.2 增强系统稳定性的核心技术体系

3.2.1 构建多层次冗余备份架构

为消除单点故障, 必须实施全方位的冗余设计。(1) 平台级冗余: 各级应急广播平台的核心业务服务器、数据库服务器应采用双机热备或集群模式。通过共享存储和心跳检测机制, 当主服务器出现故障时, 备用服务器能在秒级时间内接管业务, 用户无感知。(2) 链路级冗余: 关键传输链路必须具备物理路由分离的双平面或多平面备份。例如, 县到乡的干线可同时租用电信和联通的光纤, 或采用“光纤+微波”的混合方案。传输设备 (如光端机、路由器) 也应配置主备板卡。系统需支持自动保护倒换 (APS) 协议, 当主用链路中断时, 能在50ms内完成切换^[3]。(3) 终端级冗余: 在人口密集的公共场所 (如广场、学校操场), 应部署由不同网络驱动的多种终端。例如, 一套由有线IP网络驱动的IP音柱, 配合一套由无线FM信号驱动的传统大喇叭。两者互

为备份,确保一种网络失效时,另一种仍能工作。

3.2.2 实施高可靠分级供电保障

供电保障需根据节点的重要性进行分级设计。(1)一级节点(如国家级、省级平台):配备大型UPS(续航8小时以上)和固定式柴油发电机(油料储备满足72小时连续运行),并接入双路市电。(2)二级节点(如市、县级平台):配备中型UPS(续航4-8小时)和移动式或固定式发电机。(3)三级节点(如乡、村级前端站):配备小型UPS(续航2-4小时),并探索利用新能源(如太阳能+蓄电池)作为补充或替代方案,特别是在电网覆盖薄弱的偏远地区。所有备用电源系统都应具备远程监控功能,实时上报电量、电压、运行状态等信息。

3.2.3 部署自适应故障诊断与智能切换系统

系统应集成一个强大的网络管理系统(NMS)。该系统通过SNMP、TR-069等协议,对全网数以万计的设备进行实时监控。监控指标包括:设备在线状态、CPU/内存利用率、光功率、驻波比(VSWR)、温度、电源电压等。一旦某项指标超出预设阈值(如 $VSWR > 2.0$,表明天馈系统可能存在故障),NMS会立即触发告警,并启动预设的故障处理预案。例如,自动将业务切换到备用发射机,或通过短信/邮件通知指定的运维人员。更高级的系统还能结合AI算法,对历史告警数据进行关联分析,准确定位根因,避免误判。

3.2.4 强化纵深防御的网络安全体系

遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的十六字方针,构建纵深防御体系。(1)边界防护:在平台与外部网络(如互联网、政务外网)的边界部署下一代防火墙(NGFW)和入侵防御系统(IPS),过滤恶意流量。(2)身份认证与访问控制:所有运维人员和外部系统接入必须经过严格的双因素认证,并基于角色分配最小权限。(3)数据安全:所有应急播发指令

在传输前,必须使用国家密码管理局认可的SM2/SM9公钥密码算法进行数字签名^[4]。接收端在执行指令前,必须验证签名的有效性,确保指令来源真实、内容未被篡改。(4)无线信号监测:在重点区域部署无线电频谱监测设备,对应急广播频段进行7x24小时扫描,一旦发现异常信号(如非法占用、压制干扰),立即定位并上报。

4 结语

应急广播系统的信号覆盖与稳定性是其履行公共安全使命的基石。本文通过系统分析,揭示了影响覆盖与稳定的多维因素,并提出了一套涵盖科学规划、技术选型、冗余设计和智能运维的综合解决方案。研究表明,单一技术无法满足全域、全时、全灾种的应急通信需求,唯有构建一个以有线为基础、无线为主体、卫星为补充的多模态、立体化、智能化的融合传输网络,并通过严格的冗余备份和先进的智能管理技术加以保障,才能打造出一个真正“平战结合、安全可靠”的现代化应急广播体系。随着5G、北斗、AI等前沿技术的不断融入,未来的应急广播将不仅是信息的“扩音器”,更将成为国家应急管理体系中集感知、决策、执行于一体的智慧神经中枢,为守护人民生命财产安全构筑起一道坚不可摧的信息防线。

参考文献

- [1]张云.基于多模融合的应急广播语音信号覆盖增强技术研究[J].电视技术,2025,49(11):146-150.
- [2]高震.应急广播系统在县级融媒体中心的建设与实践[J].广播电视信息,2026,33(04):110-112.
- [3]关鑫.应急广播中无线发射系统建设及实现探析[J].中国新通信,2026,28(03):43-45.
- [4]陈佳佳.县级应急广播系统网络安全风险评估与防护策略研究[J].中国宽带,2026,22(02):82-84.