

电力系统无线通信网络的抗干扰技术分析

■ 李广昊 程洁莹

【摘要】随着电力系统的现代化及其通信技术的广泛应用，无线通信网络的抗干扰能力成为了保障系统稳定运行的关键。干扰问题直接影响到电力系统的运行安全和通信效率。本文分析了电力系统无线通信网络面临的主要干扰来源，探讨了包括频谱管理、信号处理及网络拓扑优化在内的抗干扰技术。文章详细介绍了这些技术的原理与具体应用，并通过案例分析展示了这些技术在实际中的应用效果和存在的挑战，为电力系统无线通信网络的抗干扰技术发展提供了实证参考。

【关键词】电力系统；无线通信网络；抗干扰技术；频谱管理；信号处理

DOI: 10.20167/j.cnki.ISSN1673-7911.2024.09.24

0 引言

在电力系统的日常运维中，无线通信网络扮演着至关重要的角色。然而，从工业设备的辐射到自然环境的电磁干扰，多种因素不断挑战着网络的稳定性与安全性。有效的通信是确保电力系统精确控制与监测的前提，而深入探索和优化无线通信网络的抗干扰技术则是提升电力系统可靠性的重要途径，这不仅涉及到复杂的技术问题，更关系到电力供应的持续稳定，是电力系统技术革新和升级的重要组成部分。

1 电力系统无线通信网络的干扰来源分析

1.1 外部干扰

电力系统的无线通信网络在运行过程中频繁受到各种外部干扰的影响，其中最为常见的是工业设备辐射和自然现象造成的干扰。工业环境中，设备如变压器、高压开关和电机等在运行时会产生强烈的电磁辐射。这些辐射能够通过电磁波的形式传播，干扰无线通信设备的正常信号。例如，频率在 30kHz 至 300GHz 之间的电磁波能够直接影响无线通信频道，导致信号质量下降。辐射的强度与设备的运行电流和电压水平正相关，在设备故障或是不正常工作状态下辐射强度通常会异常增加^[1]。雷电是自然现象中对无线通信网络影响最大的因素之一。雷电产生的电磁脉冲（EMP）能够瞬间产生高达数千伏的电压，对无线通信设备造成瞬时干扰甚至损坏。

1.2 内部干扰

内部干扰主要来源于电力系统内部设备间的相互影响以及同频干扰，这些干扰源通常与设备设计、配置及运行状态密切相关。电力系统内的通信设备和其他电气设备共享同一环境，设备间不可避免地存在电磁干扰。例如，

无线路由器、继电保护设备以及智能仪表等在工作时会产生特定频段的电磁波，当这些频段与通信设备的工作频段重叠时，就会导致信号干扰。内部干扰的强度取决于设备的电磁兼容性设计和距离，通常在设计阶段需要通过电磁兼容（EMC）测试来确保设备间的干扰降到最低。同频干扰发生在多个通信设备使用相同或相近的频率时，尤其是在无线通信网络密集的地区更为常见。这类干扰会导致信号相互抵消或干扰，降低数据传输的质量和速度。为了减少同频干扰，通常需要对无线通信网络进行频谱规划，合理分配频道和功率控制，以保障通信质量。

1.3 网络结构对干扰的放大效应

网络的结构设计也会影响到干扰的传播和影响范围，特别是在复杂的网络拓扑结构和网络负载不均衡的情况下。在电力无线通信网络中，复杂的网络拓扑可以导致干扰源的影响扩散到广泛的区域。例如，多跳网络中，一个节点的干扰可能通过多个中继点传播，影响到整个网络的稳定性。网络拓扑的设计需要考虑到干扰的最小化，例如通过增设冗余路径或使用高抗干扰能力的通信协议来优化。网络负载不均衡时，某些通信链路或节点可能承受过高的数据流量，导致设备过载和故障，增加系统的干扰风险。通过动态的流量管理和网络调度策略，可以有效地平衡网络负载，降低因负载不均导致的干扰风险。

2 无线通信网络抗干扰技术的基本原理

2.1 频谱管理技术

频谱管理技术是无线通信网络中用于优化频谱资源使用，减少干扰的关键技术。动态频谱分配技术（Dynamic Spectrum Allocation, DSA）主要是根据实时的网络状况

和环境干扰变化，动态调整频谱的使用。该技术使用算法实时监测频谱使用情况，根据通信需求和干扰状况自动调整频道分配。例如，当某一频道出现高干扰时，系统会自动切换到干扰较低的频道。这种技术的实施通常依赖于先进的频谱感知技术，可以通过信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）等参数来评估频道的质量^[2]。频谱感知技术使得无线设备能够检测到哪些频率带存在空闲频谱，并相应地调整其频谱使用，避免与其他无线设备产生干扰。这种技术通常涉及到对环境中的信号进行实时分析，包括功率水平、频谱占用和波形特性等。例如，通过实施能量检测（Energy Detection）方法，设备可以测量特定频率带的能量水平，如果测得的能量低于 -85dBm，可能表明该频段未被占用，可用于通信。

2.2 信号处理技术

信号处理技术在无线通信中用于提高信号的质量和可靠性，特别是在存在干扰的环境中。自适应滤波器是信号处理中一种动态调整其响应的滤波器，以最佳方式对抗干扰。在无线通信中，自适应滤波器可以根据接收到的信号动态调整滤波参数，优化信号与干扰的比例。常见的自适应滤波算法包括最小均方（LMS）算法和递归最小二乘（RLS）算法。例如，使用 LMS 算法的自适应滤波器可以通过以下公式调整滤波器权重：

$$w(n+1) = w(n) + \mu \cdot e(n) \cdot x(n)$$

其中， μ 是步长（学习率）， $e(n)$ 是时刻 n 的误差信号， $x(n)$ 是输入信号。该算法通过迭代更新权重以最小化输出的误差信号，能有效提高信号的抗干扰能力。

干扰信号的识别和抑制技术是通过分析接收到的信号，识别出非期望的干扰成分，并采取措施减少其影响。在无线通信中，可以采用数字信号处理方法，如快速傅里叶变换（FFT），来分析信号的频谱特性。通过 FFT，可以将时间域的信号转换为频域信号，进而识别出干扰信号的频率成分^[3]。之后，可以使用带阻滤波器等技术在某些特定频率上抑制干扰。例如，如果通过 FFT 分析确定干扰主要集中在 300MHz，可以设计一个中心频率为 300MHz 的带阻滤波器，以减少该频率处的干扰影响。

2.3 拓扑优化技术

拓扑优化技术在无线通信网络中用于增强网络的抗干扰能力和提高数据传输效率。网络拓扑的动态重构是一种高级网络管理技术，它允许网络根据实时的数据流量和干扰状况自动调整其结构。这一过程通常涉及到路由算法的动态更新，如使用基于状态的路由选择，它依赖于实时监测到的网络状态信息（如链路成本、节点负

载等）进行最优路径的计算。例如，一个基于 Dijkstra 算法的动态路由重构可能会计算所有可能路径的权重，权重可以定义为路径上的延迟和丢包率的函数，优选最低总权重的路径以确保数据传输的稳定性和效率^[4]。

3 电力系统无线通信网络抗干扰技术的具体应用

3.1 物理层抗干扰技术

在电力系统无线通信网络中，物理层的抗干扰技术主要包括采用抗干扰天线技术和高效编码技术的应用。抗干扰天线技术包括使用定向天线和多天线系统（如 MIMO 技术）以增强信号接收质量和减少干扰。定向天线通过集中信号传播的方向，减少了周围环境的干扰影响。MIMO 技术通过同时使用多个传输和接收天线来发送和接收多个数据信号，可以显著提高信号的强度和质

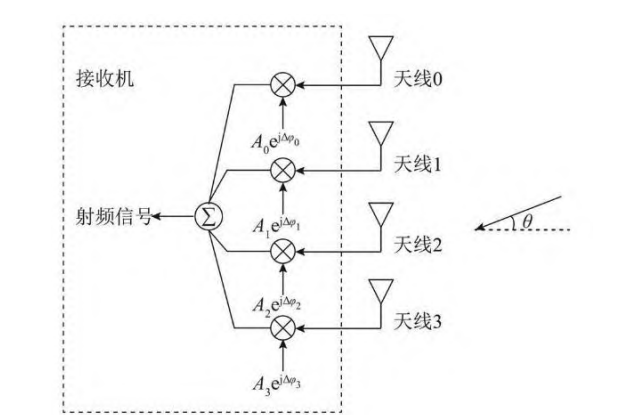


图1 多输入多输出（MIMO）天线系统的配置示意图

图中的信号源是信号的起始点，向多个天线发送信号。信号通过分配器被分配到多个通道，每个通道中的信号经过一定的相位调整（用 $A_n e^{j\Delta\varphi_n}$ 表示，其中 A_n 是幅度， $\Delta\varphi_n$ 是相位偏移），以确保信号在空间中适当分散，以避免或减少干扰。信号通过调整后被多个天线发射，这些天线可以根据需要调整发射方向和信号强度，从而形成一个方向性的信号波束。通过控制各个天线的发射信号的相位和幅度，可以有效控制信号的传播方向，这种控制有助于减少信号的散射和非目标方向的干扰，提高信号在预定方向上的清晰度和传输效率。

3.2 链路层抗干扰技术

在电力系统无线通信网络中，链路层抗干扰技术主要包括链路切换与重建策略以及数据包重传机制。链路切换技术涉及在检测到当前链路质量下降（如由于干扰导致的信号弱化或丢包率增加）时，动态地切换到另一

个预先定义的备用链路。此策略基于实时监测链路的质量指标，如信噪比（SNR）或丢包率。例如，当链路的丢包率超过 5% 或 SNR 持续低于 20dB 时，系统自动触发链路切换机制，以保持通信的连续性和质量。链路重建则涉及在链路彻底失败时，快速建立新的链路以恢复通信。数据包重传机制是链路层常用的一种错误控制策略，用于确保数据完整性和正确性。当发射端在规定时间内未收到接收端的确认（ACK）时，它将重新发送数据包^[5]。这种机制依赖于定时器和计数器，如超时重传时间通常设定为 100 毫秒，重传尝试次数可能限制在 3 次以内，以避免网络拥堵和过度延迟。

3.3 网络层抗干扰技术

网络层的抗干扰技术主要包括路由优化算法和网络资源的动态调度。在存在多种传输路径的情况下，路由算法需要考虑路径的质量和稳定性，选择最佳路径以避免干扰。常见的算法如 A* 算法或 Dijkstra 算法，这些算法可以根据节点间的延迟、带宽和历史干扰记录计算最短或最优路径。网络资源的动态调度涉及到按需分配带宽、频道和网络容量，以适应网络条件的变化并优化整体网络性能。这通常包括基于网络流量和干扰模式动态调整网络资源的分配。

以某地区的电力系统无线通信网络为例，该网络负责传输关键的监控数据和控制命令，确保电网的实时监控和动态管理。该系统面临的主要干扰问题包括由附近的工业设施产生的电磁干扰以及自然环境因素（如闪电）导致的随机干扰。干扰导致的数据丢失率高达 20%，并且在干扰高发区域，网络延迟时常超过 200 毫秒，远高于系统要求的 100 毫秒以内。

为了解决上述问题，该电力系统采用了路由优化算法和网络资源的动态调度技术：采用了 Cisco XR 5000 系列路由器，采取 Dijkstra 算法进行路由优化，算法通过一个优化的网络管理系统实现，该系统可以实时计算每个节点间的最短路径，避免历史干扰记录显示的频繁干扰区域。系统还采用了自主开发的基于 Linux 的系统，集成了网络性能监控软件网络管理系统，实时监测网络流量和干扰模式，自动调整受影响区域的带宽和频道。在监测到干扰增强的信号时，系统自动增加受影响区域的带宽，或切换到干扰较少的频道。

在干预措施实施前后，管理者对网络进行了为期一周的连续监测，评估数据传输的稳定性和网络响应时间。数据来源来自实时网络监控系统 and 地区电网控制中心的日志记录。结果如表 1 所示。

表 1 抗干扰效果分析

指标	干预前	干预后
数据丢失率	20%	5%
平均网络延迟	200 ms	90 ms

结果显示，采用路由优化和网络资源动态调度技术后，电力系统无线通信网络的性能显著提高。数据丢失率从 20% 降低到 5%，平均网络延迟也从 200 毫秒减少至 90 毫秒内，均满足了系统的要求。这表明通过智能化的网络管理和干扰应对策略，可以有效地提升电力系统的通信可靠性和实时性^[6]。

4 结论

在应对电力系统无线通信网络中的干扰问题时，通过采用先进的抗干扰技术和策略，可以显著提高系统的稳定性和可靠性。这种技术的融合不仅优化了数据的传输路径，减少了信息的丢失，而且增强了网络在面对自然和人为干扰时的韧性。实践证明，结合多层次抗干扰措施与人工智能的智能管理系统，能够为电力系统提供更为强大的支撑，确保电网运行的高效与安全。

参考文献

[1] 谢添,高士顺,赵海涛,等.基于强化学习的定向无线通信网络抗干扰资源调度算法[J].电波科学学报,2020,35(04):531–541.

[2] 林海彬.基于强化学习的无线通信高能效抗干扰技术研究[D].厦门大学,2022.

[3] 许成刚,阮晓龙.无线通信网络射频信号混合调制仿真研究[J].计算机仿真,2018,35(11):189–192.

[4] 张辉.电力通信网络可信安全接入机制研究与设计[J].软件,2023,44(09):59–63.

[5] 朱晓敏.5G无线通信网络物理层关键技术研究[J].电脑知识与技术,2022,18(30):77–79.

[6] 柏青青,肖雨.基于无线技术的物联网电磁兼容与抗干扰探讨[J].电子元器件与信息技术,2022,6(09):1–4.

作者简介：李广昊（1992–），男，本科，助理工程师，研究方向：电气工程及其自动化；

程浩堃（1995–），男，本科，助理工程师，研究方向：电气工程及其自动化。

（作者单位：国网浙江省电力有限公司遂昌县供电公司）