

# 灌区信息化改造工程无线传感网络部署的抗干扰试验

唐明

浙江河海中控信息科技有限公司 314000

**【摘要】**某中型灌区传统监测依赖人工巡检与有线传输，易受电磁设备、高压线路及复杂地形干扰，数据采集与传输效果不佳，难以满足精细化调度需求。为此设计三类抗干扰方案：动态信道自适应选择机制、空间分集与功率控制协同传输、优化ZigBee协议的传输协议。测试结果表明，动态信道模式下丢包率降至2.1%以下、时延缩至1.3s内。而协同传输模式接收成功率最高98.2%，有效提升了灌区无线传感网络的抗干扰能力与传输稳定性。

**【关键词】**灌区信息化；无线传感网络；抗干扰设计；动态信道选择

Interference Resistance Testing of Wireless Sensor Network Deployment in Irrigation District Digital Transformation Project

Tang Ming

Zhejiang Hehai Zhongkong Information Technology Co., Ltd. 314000

**【Abstract】** Traditional monitoring systems in a medium-sized irrigation district rely on manual inspections and wired transmission, which are susceptible to interference from electromagnetic devices, high-voltage lines, and complex terrain, resulting in suboptimal data acquisition and transmission performance that fails to meet precision scheduling requirements. Three interference resistance solutions were developed: a dynamic channel adaptive selection mechanism, coordinated transmission with spatial diversity and power control, and an optimized ZigBee protocol. Test results demonstrated that under the dynamic channel mode, the packet loss rate decreased below 2.1% and latency was reduced to within 1.3 seconds. The coordinated transmission mode achieved a maximum reception success rate of 98.2%, significantly enhancing the wireless sensor network's interference resistance and transmission stability.

**【Key words】** Irrigation district informatization; Wireless sensor network; Interference resistance design; Dynamic channel selection

## 引言

灌区传统水文监测模式依赖人工巡检与有线传输，存在显著局限性。其数据采集时效性不足，传输过程易受周边电磁设备、高压线路及复杂地形等因素干扰，导致数据传输稳定性差，难以适配灌区精细化调度的现实需求<sup>[1]</sup>。在此背景下，构建具备强抗干扰能力的无线传感网络成为灌区信息化改造的关键环节，相关抗干扰设计研究可为灌区高效、稳定运行提供有力技术支撑。

## 1 案例背景

本案例依托某中型灌区信息化改造工程展开。该灌区总灌溉面积达12.6万亩，下辖5条干渠、23条支渠，渠系总长187.2km，布设传统水文监测站点32处。传统监测模式存在明显不足，采用人工巡检结合有线传输的方式，数据采集周期长达24h，传输时延超过5s，且易受渠系周边电磁设备、高压线路及复杂地形影响，数据丢包率高达15.3%，难以满足灌区精细化调度需求。为解决上述问题，亟需构建抗干扰能力强的无线传感网络，由此引出灌区信息化改造工程无线传感网络部署抗干扰设计，为灌区高效运行提供技术支撑。

## 2 灌区信息化改造工程无线传感网络部署抗干扰设计

### 2.1 动态信道自适应选择机制设计

针对灌区渠系长、电磁环境复杂的特点，设计基于信道质量预测的动态自适应选择机制，核心是通过实时监测信道参数实现干扰规避。首先构建信道质量评价体系，引入信号强度（RSSI）、信噪比（SNR）、误码率（BER）三维指标，建立信道质量综合评价模型：

$$Q = \alpha \cdot \frac{RSSI - RSSI_{\min}}{RSSI_{\max} - RSSI_{\min}} + \beta \cdot \frac{SNR}{SNR_{\max}} + \gamma \cdot \left(1 - \frac{BER_{\max}}{BER}\right) \quad (1)$$

式中，Q为信道质量综合评价（取值范围0~1）； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 为权重系数（满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，经试验校准分别取0.35、0.40、0.25）；RSSI为当前信道接收信号强度（单位dBm）； $RSSI_{\min}$ 、 $RSSI_{\max}$ 分别为传感器工作的最小、最大接收信号强度（单位dBm）；SNR为当前信道信噪比（单位dB）； $SNR_{\max}$ 为传感器支持的最大信噪比（单位dB）；BER为当前信道误码率； $BER_{\max}$ 为系统允许的最大误码率<sup>[2]</sup>。

基于该评价模型，设计马尔可夫预测模型实现信道状态预判：

$$P_{t+1}(s_j) = \sum_{i=1}^n P_t(s_i) \cdot P(s_i \rightarrow s_j) \quad (2)$$

式中： $P_{t+1}(s_j)$ 为t+1时刻信道处于状态 $s_j$ 的概率； $P_t(s_i)$

为  $t$  时刻信道处于状态  $s_i$  的概率;  $P(s_i \rightarrow s_j)$  为信道从状态  $s_i$  转移到  $s_j$  的转移概率;  $n$  为信道状态总数 (本设计取优、中、差 3 种状态)。

当预测信道质量评价价值  $Q$  小于 0.6 时, 触发信道切换机制, 优先选择空闲信道中  $Q$  值最高的信道来保证传输的稳定性。该机制打破传统固定信道的模式, 借助多指标融合评价和状态预估, 达成信道选择的前瞻性和适应性, 可以有效避开高压线路, 电磁设备等突然出现的干扰<sup>[3]</sup>。

### 2.2 基于空间分集与功率控制的传输优化设计

结合灌区地形复杂、监测点分布分散的特点, 用空间分集技术和动态功率控制相结合的方式来提高抗干扰能力。首先建立多节点协同传输模型, 把相邻的 3 个监测节点组成一个分集组, 用信号叠加来提高接收效果, 分集增益计算公式为:

$$G_d = 10 \lg(M \cdot \eta) \quad (3)$$

式中:  $G_d$  为空间分集增益 (单位 dB);  $M$  为分集组内节点数量 (本设计取 3);  $\eta$  为节点协同传输效率。

为防止节点之间的信号干扰, 设计出动态功率控制算法, 根据信道质量评价价值  $Q$  和传输距离  $d$  自适应调节发射功率:

$$P_{tx} = P_{min} + \frac{P_{max} - P_{min}}{1 + e^{-k(Q - 0.5)}} + 10 \lg(d^2) \quad (4)$$

式中:  $P_{tx}$  为节点发射功率 (单位 dBm);  $P_{min}$ 、 $P_{max}$  分别为节点最小、最大发射功率 (单位 dBm);  $k$  为调节系数 (取 8.0, 控制功率调整灵敏度);  $Q$  为信道质量综合评价价值;  $d$  为节点与汇聚节点间的直线距离 (单位 m)。

该设计将空间分集和功率控制结合起来, 在分集组建立的基础上解决由于地形复杂造成的信号衰减问题, 在保证传输质量的同时减少不必要的功率消耗和信号干扰, 适合于灌区渠系沿线地形起伏、电磁干扰多变的场合。

### 2.3 抗干扰数据传输协议优化设计

在传统 ZigBee 协议的基础上, 对帧结构、重传机制进行优化, 设计适合灌区场景的抗干扰传输协议。首先对数据帧格式进行重构, 增加干扰检测字段和纠错编码字段, 帧长度计算公式为:

$$L = L_{head} + L_{data} + L_{detect} + L_{error} \quad (5)$$

式中:  $L$  为优化后数据帧总长度 (单位 bit);  $L_{head}$  为帧头长度 (固定为 32bit, 包含地址、控制信息);  $L_{data}$  为有效数据长度 (可变, 最大为 128bit);  $L_{detect}$  为干扰检测字段长度 (16bit, 存储信道实时干扰特征值);  $L_{error}$  为纠错编码字段长度 (32bit, 采用 RS(64,32) 纠错编码)<sup>[4]</sup>。

当接收端检测到数据错误时, 根据干扰检测字段判断干扰类型, 若为瞬时干扰则直接通过纠错编码恢复数据, 无需重传。若为持续干扰则触发定向重传, 仅向分集组内信号质

量最优的节点发送重传请求, 减少重传开销。同时引入传输优先级机制, 将水位、流量等关键监测数据标记为高优先级, 优先占用优质信道传输, 确保核心数据的实时性和可靠性。为了进一步提高协议的抗干扰性能和传输效率, 协议又加入了信道状态反馈和重传次数自适应限定的机制, 接收端把干扰类型、信道质量、数据纠错结果等信息及时反馈给发送节点, 给动态信道选择和功率调节提供数据支持。针对持续干扰场景下重传失败问题, 设置最大重传次数阈值, 超过阈值就自动切换到备用传输路径, 防止链路阻塞。传输优先级机制使用分级调度策略, 高优先级数据占用信道预留时隙和最优传输资源, 低优先级监测数据用时隙复用方式传输, 在保证核心监测数据高可靠低时延传输的同时, 提高网络整体资源利用率和吞吐量, 使优化后的协议可以长期适应灌区复杂多变的无线传输环境, 保证网络稳定运行。

## 3 案例应用效果分析

### 3.1 实验环境搭建及参数设定

本试验依托某中型灌区开展, 灌区总灌溉面积 12.6 万亩, 渠系总长 187.2km, 选取高压线路旁、电磁设备周边及地形起伏  $20^\circ - 35^\circ$  的复杂渠段作为典型干扰测试区域。布设 30 个传感节点, 划分 10 个分集组, 每组 3 个节点, 节点传输距离梯度设为 200m—500m。试验周期分 72h 和 48h 两组, 设定信道质量评价价值  $Q$  阈值 0.6, 功率调节系数  $k=8.0$ , 节点发射功率范围为 15dBm—25dBm。且本研究采用 RSSI、SNR、BER 三维指标监测信道状态, 数据帧头固定为 32bit, 有效数据最大 128bit, 干扰检测字段 16bit, 纠错编码字段 32bit。

### 3.2 动态信道自适应选择机制分析

本研究选取灌区 3 处典型干扰区, 高压线路旁、电磁设备周边、复杂地形段各一处, 布设 10 个传感节点, 节点沿渠系呈线性分散布置, 节点间距控制在 200~500m 之间, 保证覆盖不同干扰强度和地形衰减场景。试验周期为 72h, 全天候采集数据, 比较传统固定信道模式和动态信道自适应选择机制的性能。设定信道质量评价价值  $Q$  阈值为 0.6, 当  $Q < 0.6$  时触发切换, 记录信道切换次数、数据丢包率、传输时延三项指标, 每个工况重复测试 10 次取平均值, 消除随机误差和环境波动的影响, 试验结果如表 1 所示。

试验数据显示, 动态信道自适应选择机制下, 各工况的平均丢包率从 10% 以上降至 2.1% 以下, 传输时延从 4.5s 以上缩短至 1.3s 以内。高压线路干扰工况下性能改善最显著, 丢包率降幅达 85.8%。主要原因为该机制通过 RSSI、SNR、BER 三维指标构建信道质量评价模型, 结合马尔可夫预测模型预判信道状态<sup>[5]</sup>。当检测到高压线路等强电磁干扰导致

Q < 0.6 时, 系统快速切换至空闲优质信道, 规避了持续干扰。相比固定信道无法应对突发干扰的缺陷, 动态自适应模式实现了前瞻性信道选择, 大幅提升复杂电磁环境下的数据

传输稳定性。同时, 合理的切换频率避免了频繁切换带来的额外开销, 保障了传输效率。

表1 动态信道自适应选择机制试验数据对比表

工况	信道模式	平均切换次数	平均丢包率	平均传输时延
高压线路干扰	固定信道	0	14.80%	5.2s
高压线路干扰	动态自适应	8	2.10%	1.3s
电磁设备干扰	固定信道	0	12.50%	4.9s
电磁设备干扰	动态自适应	6	1.80%	1.1s
复杂地形干扰	固定信道	0	10.20%	4.5s
复杂地形干扰	动态自适应	5	1.50%	1.0s

### 3.3 空间分集与功率控制协同工况分析

选取灌区 5 段地形起伏较大的渠段, 每段布设 3 组分集节点, 每组 3 个节点, 对比无分集功率控制、仅空间分集、分集与功率控制协同三种模式。试验周期 48h, 设定传输距离 200m-500m 梯度变化, 调节系数 k 取 8.0, 记录分集增益、发射功率及数据接收成功率, 每个传输距离梯度测试 8 次, 统计不同工况下的均值数据。试验结果如表 2 所示。

分集与功率控制协同模式下, 平均接收成功率较无分集功率控制模式提升 20%-30%, 发射功率降低 5-10dBm, 且分

集增益稳定在 3.8dB-4.5dB。地形起伏 35° 的长距离工况中, 该协同模式优势尤为突出。原因在于空间分集技术通过 3 个节点组成分集组, 利用信号叠加增强了复杂地形下的接收效果, 抵消了信号衰减。动态功率控制算法则根据信道质量 Q 和传输距离 d 自适应调整功率, 在保证接收成功率的前提下, 避免了大功率发射带来的节点间干扰。仅空间分集模式虽提升了接收成功率, 但未优化功率, 存在能耗偏高问题。而协同模式实现了两者的深度融合, 既解决了地形导致的信号衰减, 又降低了能耗和干扰, 适配灌区地形分散的特点。

表2 空间分集与功率控制协同试验

工况	传输模式	传输距离	平均分集增益	平均发射功率	平均接收成功率
地形起伏 20°	无分集功率控制	300m	0dB	22dBm	78.30%
地形起伏 20°	仅空间分集	300m	4.2dB	20dBm	89.50%
地形起伏 20°	分集+功率控制	300m	4.5dB	15dBm	98.20%
地形起伏 35°	无分集功率控制	400m	0dB	25dBm	65.70%
地形起伏 35°	仅空间分集	400m	3.8dB	23dBm	82.10%
地形起伏 35°	分集+功率控制	400m	4.1dB	18dBm	95.60%

## 4 结论

本研究提出的三种抗干扰设计可有效解决灌区无线传感网络传输问题。动态信道机制使丢包率降至 2.1% 以下,

时延缩至 1.3s 内; 空间分集与功率控制协同模式提升接收成功率 20%-30%, 降低发射功率 5-10dBm。该方案可为同类灌区信息化改造提供切实可行的技术参考。

## 参考文献

[1]张玉良,王艳兵. 无线传感网络通信数据抗干扰跳频传输方法研究 [J]. 陇东学院学报, 2025, 36 (05): 43-48.  
 [2]余华东. 无线传感网络中大数据访问安全等级首检测 [J]. 辽宁科技学院学报, 2023, 25 (05): 39-42+48.  
 [3]李鹏飞,苏晋升,孙彦赞,等. 多制式抗干扰车内无线传感网络设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (13): 117-122.  
 [4]张创基. 基于码元包络幅值提取的网络入侵检测算法 [J]. 智能计算机与应用, 2019, 9 (02): 155-158+161.  
 [5]侯慧玲,王崇霞. 高能量无线传感网络隐藏异常结构数据识别 [J]. 计算机仿真, 2018, 35 (10): 309-312.

作者简介: 唐明, 出生年月: 1972 年 3 月 18 日, 男, 汉族, 籍贯: 南湖, 学历: 本科, 现有职称: 高级工程师, 研究方向: 计算机软件集成服务。