

电力无线专网链路抗干扰传输控制方法

王海¹ 袁平亮¹ 包正睿¹

WANG Hai YUAN Pingliang BAO Zhengrui

摘要

电力无线专网链路因其复杂的拓扑结构,导致传输链路的抗干扰控制效果不佳。因此,文章提出电力无线专网链路抗干扰传输控制方法。采用多径信道模型和前馈-反馈联合均衡控制架构,构建电力无线专网的网络信道模型。并基于信号强度监测和中继选择策略,建立电力无线专网链路抗干扰的目标函数。运用蝴蝶优化算法求解优化目标函数,实现电力无线专网链路抗干扰传输控制。实验结果表明,所提抗干扰传输控制方法在误码率和信息传输成功率上均优于对比的两种方法,表现出卓越的抗干扰性能。

关键词

电力无线专网; 链路抗干扰; 蝴蝶优化算法; 多径信道模型; 传输控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.11.021

0 引言

随着电力无线专网技术的日益普及和广泛应用,其传输的稳定性和可靠性问题逐渐成为人们关注的焦点。在面对复杂的电磁环境时,干扰信号的存在无疑会对数据传输的质量造成严重影响。因此,深入研究电力无线专网链路的抗干扰传输控制方法显得尤为关键。在抗干扰控制技术这一领域,已经有许多不同的方法被提出,并且在各种不同的场景中得到了应用。例如,宋海伟等人^[1]及其研究团队在非合作的环境下,通过采用 Bayesian-Stackelberg 博弈模型以及分层 Q 学习算法,来解决无人机与干扰源之间的对抗竞争关系下的功率控制问题,从而实现了无人机功率控制方案的稳定收敛。然而,由于博弈模型参数估计的不准确性以及无人机与干扰源之间动态变化的复杂性,使得控制效果存在一定的局限性。姜丽敏等人^[2]则将受干扰的无线通信系统建模为广义稳定控制系统,他们通过干扰观测器来预测未来的误差和控制输入,进而优化控制策略以实现自适应调整。但是,由于观测器设计未能充分捕捉到飞行器的动态特性和干扰变化,导致控制方法的效果并不理想。宫占霞^[3]利用电磁辐射检测装置采集的大数据,通过 MeanShift 聚类方法识别电磁干扰信号的特征,并对存在干扰的舰船电气设备实施电磁屏蔽,从而实现了选择性抗干扰控制。然而,由于数据质量的不足以及选择性控制策略的不够精准,导致控制效果并不充分。牛英滔等人^[4]将外部干扰和模型不确定性等效到控制器输入端,实现了系统总干扰的补偿控制。但是,由于观测算法对无线通信系统环境变化的适应性不强,

导致整体抗干扰能力受限。针对上述方法存在的不足,本文提出了一种新的电力无线专网链路抗干扰传输控制方法。该方法通过构建网络信道模型,建立链路抗干扰目标函数,并采用蝴蝶优化算法来实现传输控制。这种方法充分考虑了电力无线专网的复杂性和特殊性,旨在提升其在复杂电磁环境下的传输稳定性和可靠性。与现有的其他方法相比,本文所提出的方法具有更高的适应性和鲁棒性,能够更有效地应对干扰信号,从而保障数据传输的质量。此外,还详细探讨了该方法在不同场景下的应用效果,通过一系列的仿真实验和实际案例分析,验证了其在提高电力无线专网传输性能方面的显著优势。本文的研究成果不仅为电力无线专网的抗干扰传输控制提供了新的理论依据和技术支持,也为相关领域的研究者和工程师提供了宝贵的参考。

1 电力无线专网链路抗干扰传输控制方法

1.1 构建网络信道模型

为实现电力无线专网多路数据传输与拥塞控制,融合动态带宽分配机制构建多径信道模型。利用本地扩频序列生成码元,当调制带宽超信道容量时,需重点考虑离散多径下的码间干扰^[5]。信号特征分量的表征方式为:

$$x(t) = \text{Re} \left\{ a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} s_l(t - \tau_n(t)) e^{-j2\pi f_c t} \right\} \quad (1)$$

式中: $e^{-j2\pi f_c t}$ 为横向滤波器扩频码序列; s_l 为噪声密度; $\tau_n(t)$ 为判决反馈均衡器的传递函数; $a_n(t)$ 为多径衰落引起的幅值衰减; $e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)}$ 为反馈增益部分。

基于前馈-反馈联合均衡控制架构,构建电力无线专网多径信道分配模型。在带宽受限条件下,多路径输入信号频谱可表示为:

$$c(\tau, t) = \sum_n a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} \delta(t - \tau_n(t)) \quad (2)$$

式中: f_c 为分数间隔均衡器的工作频率; $\tau_n(t)$ 为路径时延分布函数; $a_n(t)$ 为第 n 路径码间干扰损耗系数。

采用半盲与导频联合的解调方法, 借助贝叶斯滤波算法估计输出时延 $S_0(t) = a_0 \delta(t)$ 。多径传播引发的传输时延差异, 显著降低带宽利用效率, 复杂电磁环境与特殊设备布局更恶化此问题^[6]。

网络传输信号以多时延脉冲序列为统计特征, 其包络分布特性如图 1 所示。

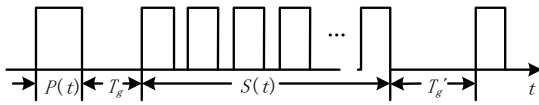


图 1 无线通信网络的带宽分配模型

基于信道冲击响应的导频估计模型可表示为:

$$S(t) = a_0 \sum_{i=1}^N a_i \delta(t - \tau_i) e^{j\omega_c t} \quad (3)$$

式中: N 为双向相关解调算法的响应阶次; τ_i 和 a_i 分别为第 i 条路径的频域衰减系数; ω_c 为多径信道解调的载波频率。

综上所述, 即可构建网络信道模型。

1.2 建立链路抗干扰目标函数

构建电力无线专网链路模型后, 干扰源依据信号强度监测, 对网络中能量峰值链路发起干扰。鉴于用户单时隙内接收反馈与中继传输耗时远低于通信总时长, 提升链路抗干扰性能时, 着重探究干扰源在传输二、三阶段的影响, 其对应干扰策略分别记为 $g_{j,1}$ 和 $g_{j,2}$ 。

对于电力无线专网内第 q 个用户, 采用方案 r_q 进行中继节点选择。在接收该用户信息时, 中继选择方案 r_q 对应的接收信噪比 SINR_{u_q, r_q} , 可通过公式定量计算, 为优化传输性能提供理论依据。

$$\text{SINR}_{u_q, r_q} = \frac{[1 - \varepsilon(g_{r_q}, g_{j,1})] A_u |\beta_{u_q, r_m}|^2}{\sum_{l \in Q} \varepsilon(r_q, r_l) A_u |\beta_{u_l, r_l}|^2 + N_0} \quad (4)$$

式中: A_u 为第 q 个用户因他户同选中继所受干扰; $\varepsilon(g_{r_q}, g_{j,1})$ 为第 q 个用户二阶段经中继传输是否遇干扰, 遇干扰时中继 SINR_{u_q, r_q} 置零 (因干扰源或抑链路信号); $\varepsilon(r_q, r_l)$ 为判他户中继选择是否与第 q 个用户一致; N_0 为电力无线专网背景噪声。

通信第三阶段, 若同中继被多用户共用, 需共享时间资源。在此条件下, 第 q 个用户信息经中继 r_q 转发时, 其接收端在电力无线专网的 SINR 可表示为:

$$\text{SINR}_{r_q, f_q} = \frac{[1 - \varepsilon(g_{r_q}, g_{j,2})] A_r |\beta_{r_m, f_q}|^2}{N_0} \quad (5)$$

设中继工作于转发模式, 定义 V_q 为第 q 个用户发射端在电力无线专网的传输速率, 其计算公式为:

$$V_q = \frac{B \log_2 \left[\frac{1 + \text{SINR}_{u_q, r_q} \text{SINR}_{r_q, f_q}}{1 + \text{SINR}_{u_q, r_q} + \text{SINR}_{r_q, f_q}} \right]}{2Z_{r_q}} \quad (6)$$

式中: B 为频宽; Z_{r_q} 为与第 q 个用户同选中继的用户数, 其计算公式为:

$$Z_{r_q} = \sum_{l=1}^Q \varepsilon(r_q, r_l) \quad (7)$$

设定电力无线通信中第 q 个用户信息传输效率指标为:

$$\zeta_q = [1 + \exp(V_q - V'_q)]^{-1} \quad (8)$$

式中: V'_q 为第 q 个用户在电力无线专网的传输速率需求。

以最大化用户传输效率为目标, 构建链路抗干扰优化目标函数 F :

$$F = \max \sum_{q=1}^Q \zeta_q \quad (9)$$

基于上述步骤, 即可确立电力无线专网链路抗干扰的目标函数。

1.3 实现电力无线专网链路抗干扰传输控制

为实现电力无线专网链路抗干扰传输控制, 采用蝴蝶优化算法求解其优化目标函数 F , 旨在增强链路抗干扰性能。设 d 为蝴蝶的香味浓度, 计算公式为:

$$d = cP^s \quad (10)$$

式中: P 为刺激强度; c 为感知形态, 取值范围在 $[0,1]$; s 为幂指数。

蝴蝶优化算法求解 F 的步骤如下:

(1) 初始化算法参数, 涵盖维度 dim 、转换概率 p 、蝴蝶种群规模 N 、迭代次数 N_{iter} 、初始位置 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{\text{dim}})$ 、幂指数 s , 并将感知形态初始值设为 0.01。

(2) 基于电力无线专网信道特性计算蝴蝶个体适应度值, 确定刺激强度, 再利用式 (10) 计算相应浓度 d 。

(3) 生成随机数 rand 与 p 比较, 以确定搜索策略。

(4) 若 $\text{rand} < p$, 蝴蝶执行全局搜索, 方向指向全局最优解, 更新公式为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + d(a^2 h^* - X_i^t) \quad (11)$$

式中: h^* 为当前全局最优解; X_i^t 、 X_i^{t+1} 为第 t 、 $t+1$ 次迭代中第 i 只蝴蝶的解向量; a 为 $[0,1]$ 随机数。

(5) 若 rand 的值不小于 p , 则蝴蝶执行局部搜索操作, 其更新公式为:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + d(a^2 X_j^t - X_k^t) \quad (12)$$

式中： $\mathbf{X}_j'$ 与 $\mathbf{X}_k'$ 分别为在迭代次数为 t 时，个体 j 和 k 所对应的坐标向量。

(6) 核查是否达到最大迭代次数。达到则输出电力无线专网链路抗干扰优化目标函数 F 的最优解；未达到则更新感知形态 c ，返回步骤 (2) 继续迭代，更新为：

$$c(t+1)=c(t)+\frac{0.025}{c(t)N_{\text{iter}}}$$

(13)

通过上述步骤，实现了电力无线专网链路抗干扰传输控制。

2 实验结果与讨论

2.1 布设电力无线专网链路环境

在本次实验中，选取了一个包含 250 个节点的电力无线专网链路环境作为研究的场景。这个专网的覆盖范围被设定为一个 1 000 m×1 000 m 的区域，其中任意两个节点之间的距离被精心规划为 25 m。为了保证节点间的有效通信，设定了节点间有效通信距离为 35 m。在这个特定的环境下，根据目前的研究成果，可以观察到链路队列长度指标通常维持在链路总长度的 85% 以上，而拥塞链路的占比指标则被有效地控制在总数的 25% 以内。此外，传输速率也表现得相当稳定，它通常稳定在 1~10 MiB/s 的区间内。

2.2 设定电力无线专网链路初始状态

在已部署的电力无线专网链路内，构建了多个数据传输任务，并针对数据包的发送时刻、大小等核心参数予以详细设定。在全面权衡网络传输链路承载能力的基础上，将生成的传输任务与数据样本分配至链路的传输队列之中。借助对传输数据流量的精准调控，达成了对电力无线专网链路初始拥塞状态的预先设定。电力无线专网链路的初始状态配置详情如图 2 所示。

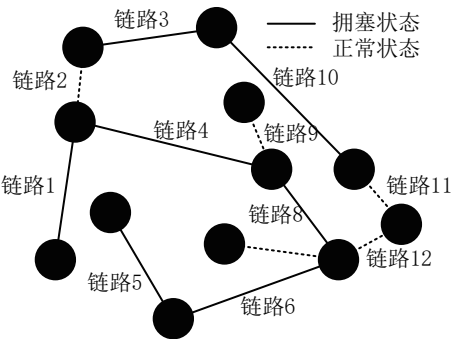


图 2 电力无线专网链路初始状态示意图

按照既定的步骤和流程，已经顺利完成了电力无线专网内所有传输链路的初始配置工作。考虑到在实际运行过程中，链路上传输的数据是持续不断地流动的，因此网络传输链路

的状态并非静态不变的，而是会随着时间的推移而呈现出动态变化的特性。

2.3 设置实验参数

为全面而深入地验证电力无线专网链路在面对各种干扰时的传输控制方法的整体效能，精心策划并实施了一系列具有针对性的测试。本次测试的主要目的是通过模拟现实世界中复杂多变且充满挑战的实际通信环境，来准确地评估和衡量我们所提出和设计的控制策略在实际应用中的表现和效果。具体的实验参数配置如表 1 所示。

表 1 实验参数

序号	参数	数值
1	发射机输出功率	200 W
2	信道损耗系数	0.5
3	干扰源发射功率	8 000 W
4	路径损耗因子	0.85
5	通信信号增强倍数	1.8
6	通信信号传输距离	80 km
7	干扰信号增强倍数	1.5
8	干扰信号传输距离	250 km

在设定好上述实验参数后，测试将模拟电力无线专网链路在实际环境中的抗干扰传输情况，以评估所提控制方法的有效性。

2.4 抗干扰传输控制性能测试结果

在本次实验中，采用本文所提方法、基于干扰观测器的飞行器主动抗干扰控制方法（方法 1）和基于大数据的舰船电气设备选择性抗干扰控制技术（方法 2）进行对比测试，对比不同方法的误码率，测试结果如图 3 所示。

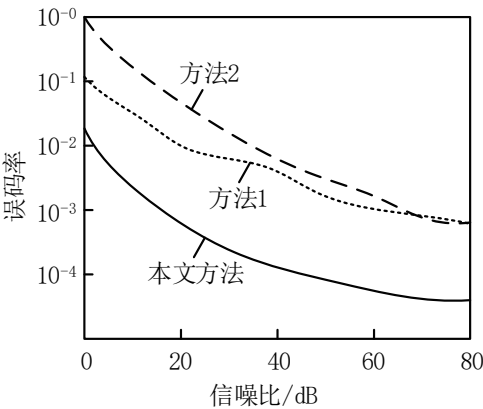


图 3 不同方法的误码率

通过仔细观察图 3 中的数据，可以清晰地看到，随着信噪比的逐渐提高，误码率呈现出明显的下降趋势。这一

点在本文所提出的方法中表现得尤为突出。与方法1和方法2相比,本文所提出的方法在误码率方面表现得更为出色,这充分证明了所提出方法在抗干扰传输控制方面的显著优势。

2.5 抗干扰传输控制方法应用性能测试结果

实验对比了所提控制方法、方法1与方法2的抗干扰传输控制能力,测试结果如图4所示。

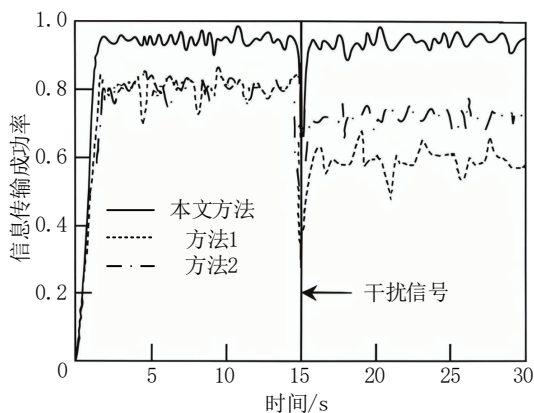


图4 不同方法的信息传输成功率

如图4所示,在进行测试的初始15 min阶段,所提出的控制方法展现出了卓越的抗干扰能力,其性能明显且稳定地优于其他两种比较方法,即方法1和方法2。当引入干扰因素后,所提出的方法能够迅速地恢复其性能,并且持续保持在高水平状态,相比之下,方法1和方法2则受到了较大的影响。这一系列的实验结果充分证明了所提出的方法在电力无线专网环境中的抗干扰能力是更为出色的。

3 结语

在本研究中,提出了一种创新的电力无线专网链路抗干扰传输控制方法。该方法的核心在于通过精心构建的网络信道模型,以及建立的链路抗干扰目标函数,来实现对电力无线专网传输过程中的干扰进行有效控制。为了达到这一目标,采用了蝴蝶优化算法来执行传输控制任务。这种方法的主要目的是增强电力无线专网在面对复杂电磁环境时的传输稳定性和可靠性。通过一系列的研究和实验,发现该方法在理论分析和模拟测试中展现出了显著的优势。它能够有效地应对各种干扰信号,确保数据传输的高质量。尽管如此,我们也认识到,在实际部署和应用过程中,该方法还存在一些需要改进的地方。例如,算法的复杂度相对较高,这导致了较大的计算资源消耗。针对这些挑战,建议未来的研究工作可以着重于对算法设计进行进一步的优化,以降低计算复杂度,并提高算法的运行效率。此外,

探索和集成更多先进的抗干扰技术,如自适应调制编码技术、智能频谱管理策略等,也将是提升电力无线专网抗干扰能力的重要方向。

参考文献:

- [1] 宋海伟,苏哲,田达,等.基于Bayesian-Stackelberg博弈的无人机抗干扰通信功率控制方法[J].航天电子对抗,2024,40(6):25-28.
- [2] 姜丽敏,陈曙暄,路坤峰.基于干扰观测器的飞行器主动抗干扰控制方法[J].系统工程与电子技术,2024,46(11):3883-3892.
- [3] 宫占霞.基于大数据的舰船电气设备选择性抗干扰控制技术[J].舰船科学技术,2024,46(7):167-170.
- [4] 牛英滔,姚行,张凯.基于干扰观测的无线通信系统抗干扰功率控制算法[J].电子与信息学报,2023,45(11):4033-4040.
- [5] 石童昕,陈龙胜,李统帅,等.基于智能体的电力系统分布式自适应抗干扰控制[J].北京航空航天大学学报,2024,50(5):1685-1692.
- [6] 张勇,汪成文,赵二辉,等.压力脉冲测试系统滑模抗干扰控制方法[J].西安交通大学学报,2024,58(5):64-74.

【作者简介】

王海(1994—),男,山西运城人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:电力通信。

袁平亮(1990—),男,河南商丘人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:电力通信。

包正睿(1992—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:电力通信。

(收稿日期:2025-05-19 修回日期:2025-10-31)