

电磁波干扰下无人机通信链路异常容错控制方法

焦 库

(西安明德理工学院 信息工程学院, 西安 710124)

摘要: 无人机所处的电磁环境复杂多变, 存在多种类型的电磁波干扰源, 这些干扰信号会与无人机通信链路信号相互叠加, 导致信号频谱变得复杂, 难以准确提取出能够有效表征通信链路状态的频谱特征; 因此, 提出电磁波干扰下无人机通信链路异常容错控制方法; 从无人机通信链路信号中提取频谱特征, 利用 SVM 检测电磁波干扰导致的异常链路, 切断异常链路并通过鲸鱼算法重构无人机通信链路; 采用神经网络改进 PID 控制器同步调整无人机通信链路的传输与载波频率, 恢复无人机正常通信, 以确保通信连续性。实验结果表明, 所研究方法的传输速率相对更高, 均保持在 950 bps 以上、误码率曲线均保持在 0.15 左右, 这表明所研究容错控制方法在电磁干扰环境下的表现更优, 能够确保无人机在复杂电磁环境中保持更快速、可靠的通信。

关键词: 电磁波干扰; 无人机通信链路; 异常检测; 重构; PID; 容错控制

Fault Tolerant Control Method for Abnormal Communication Links of UAVs Under Electromagnetic Wave Interference

JIAO Ku

(School of Information Engineering, Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China)

Abstract: The electromagnetic environment in which drones operate is complex and ever-changing, with multiple sources of electromagnetic wave interference. These interference signals can overlap with the drone communication link signals, making the signal spectrum complex and difficult to accurately extract spectral features that can effectively characterize the communication link status. Therefore, a fault-tolerant control method for abnormal communication links of unmanned aerial vehicles (UAVs) under electromagnetic wave interference is proposed. Extract spectral features from drone communication link signals, use support vector machine (SVM) to detect abnormal links caused by electromagnetic wave interference, cut off abnormal links, and reconstruct drone communication links through whale algorithm. Adopting neural network to improve PID controller and synchronously adjust the transmission and carrier frequency of the drone communication link, restoring the normal communication of the drone to ensure communication continuity. Experimental results show that the transmission rate of the proposed method is relatively higher and remains above 950 bps, and the error rate remains around 0.15. This indicates that the fault-tolerant control method performs better in electromagnetic interference environments, ensuring faster and more reliable communication for drones in complex electromagnetic environments.

Keywords: electromagnetic wave interference; UAV communication link; abnormal detection; restructure; PID; fault-tolerant control

0 引言

随着无人机技术的飞速发展, 无人机在侦察、导航及运输等多个领域的应用日益广泛。然而, 无人机的通信链路在复杂电磁环境中的稳定性问题逐渐凸显, 特别

是在电磁波干扰下, 无人机的通信链路容易出现异常, 从而影响其正常运作^[1]。无人机通常依赖稳定的通信链路与操控人员进行数据传输和控制指令的接收。这些通信链路包括 GPS 导航信号、无线遥测遥控信号等, 它们都是无人机稳定飞行的关键。在军事侦察场景中, 通

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-04-03。

作者简介: 焦 库(1985-), 男, 硕士, 实验师。

引用格式: 焦 库. 电磁波干扰下无人机通信链路异常容错控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 179-187.

信链路的稳定性至关重要,其短暂中断导致重要情报的丢失,严重影响作战决策的准确性。在民用运输领域,通信链路的不稳定会引发安全事故,威胁乘客生命财产安全。然而,现代信息化环境导致电磁环境异常复杂,包括人为的电磁干扰和不可控的自然因素。人为因素如军用电磁对抗、敌方故意干扰等,都会对无人机的通信链路造成严重影响。此外,随着电子设备的广泛应用,小型电子干扰机、远程超大功率多信道干扰等设备会对无人机产生压制性干扰,导致通信链路失效^[2]。在电磁波干扰下,无人机的通信链路异常主要表现为信号丢失、通信中断、数据错误等问题。这些问题不仅影响无人机的正常飞行,还会导致无人机失控、坠毁等严重后果。因此,保障无人机通信链路的稳定性已成为当前亟待解决的重要问题。

目前,针对无人机通信链路异常容错控制的研究已经取得了一定的进展。文献[3]根据模糊逻辑设计自适应模糊容错控制器,根据系统的实时状态和环境变化调整控制器的参数。当系统出现故障时,根据模糊规则输出相应的控制信号,确保系统在出现故障时仍能保持稳定运行。但该方法在电磁波干扰下,通信链路的状态可能迅速变化,导致控制策略的调整速度无法跟上这种变化,导致控制策略无法及时、准确地应对通信链路异常,从而影响无人机的稳定性和安全性。文献[4]结合模糊逻辑和滑模控制的优点,通过模糊逻辑调整滑模控制的增益,实现对系统状态变化的灵活响应,同时保持滑模控制的鲁棒性,当系统发生故障时,容错控制策略可以确保系统继续稳定运行。但该方法在面对电磁波干扰,需要模糊增益滑模控制策略在滑模面附近频繁切换,导致抖振问题较为显著,影响控制的稳定性。文献[5]结合神经网络的非线性逼近能力和扩张状态观测器的状态估计能力,利用神经网络构建系统的动态模型,该模型能够接收系统的输入和输出数据,并输出系统状态的估计值。通过比较实际输出和估计输出,计算出估计误差并通过权值函数来调节控制器的控制律参数,从而提高状态估计的准确性。但该方法面对电磁波干扰,不确定性增大,神经网络的自适应性和容错策略无法有效应对系统的实际状态变化,导致控制鲁棒性不佳,甚至引发系统失稳。文献[6]忽略不确定性,将四旋翼的动力学分解为两个简单的非线性模型,设计鲁棒无迹卡尔曼滤波器,用于故障估计并加强二元滑模控制器,估计多个执行器中的未知故障,根据李雅普诺夫理论,对闭环 FTC 方法的可靠性进行稳定性分析。但当干扰频率高于控制器的更新频率时,控制器可能无法及时响应,导致系统失稳。

针对上述问题,提出电磁波干扰下无人机通信链路异常容错控制方法,该方法不仅具有重要的理论价值,

还具有重要的实际应用价值,有望为无人机在复杂电磁环境中的安全飞行和高效作业提供有力支持。

1 无人机通信链路异常容错控制研究

为了应对电磁波干扰下无人机通信链路异常的问题,容错控制方法成为一个重要的研究方向。容错控制旨在在系统出现故障或异常情况下,通过调整控制策略来维持系统的稳定性和性能。在无人机通信链路异常的情况下,容错控制方法需要能够检测通信异常链路、链路重构,并采取相应的控制策略来减轻干扰对无人机飞行和任务执行的影响。

1.1 检测电磁波干扰下的无人机通信异常链路

电磁波干扰源多样,包括自然电磁现象、人为电磁辐射以及敌方的电子对抗等。这些干扰信号可能以连续波或脉冲波的形式存在,对无人机的通信链路造成不同程度的干扰^[7]。在干扰作用下,无人机的通信链路可能出现信号衰减、噪声增加及误码率上升等现象,严重时甚至导致通信链路完全中断。异常检测与定位是无人机通信链路容错控制流程中的首要环节,其具体实施细节如下。通过对每段通信链路的状态进行实时监测和分析,能够迅速识别出链路中的异常状况。在检测过程中,首先会采集每段通信链路中的信号,这些信号包含了链路状态的关键信息。针对采集到的信号,会进行傅里叶变换,将其从时域转换到频域,得到信号的频谱表示。通过分析频谱特征,可以看到信号在不同频率上的分布情况,从而发现异常的频率成分。例如,如果某个频率段上的信号强度突然增大或出现异常波动,就可能意味着该频率段受到了干扰。此外,还会结合信号的时域特征,如幅度、相位等的变化,进行综合判断。一旦检测到异常,系统会迅速定位异常发生的具体位置,通过及时检测和定位这些异常,可以触发后续的容错控制机制,避免无人机因通信链路中断而失控或任务失败^[8]:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

式中, $A(\omega)$ 为信号在频率域的表示, ω 为角频率, $a(t)$ 为时间域的信号, $e^{-j\omega t}$ 为复指数函数, j 为虚数单位。

在频谱中计算与信号特征相关的频率成分作为特征参数。具体如下:

1) 功率谱密度: 功率谱密度表示频率分量的能量强度,常用于信号识别和分类。

$$b_1 = \frac{|A(\omega)|^2}{N} \quad (2)$$

式中, N 为信号长度。

2) 频率均值: 频率均值反映信号的中心频率,可用于测量信号的整体频率水平。

$$b_2 = \frac{\sum_{\omega} b_1}{\sum_{\omega} \omega \cdot b_1} \tag{3}$$

3) 频率方差：频率方差表示信号频率分布的宽度，可用于评估信号的频率稳定性。

$$b_3 = \frac{\sum_{\omega} (\omega - b_2)^2 \cdot b_1}{\sum_{\omega} b_1} \tag{4}$$

4) 频带能量：频带能量计算特定频带内的能量，可用于评估信号在不同频率范围内的能量分布。

$$b_4 = \int_{\omega_s}^{\omega_e} b_1 \cdot d\omega \tag{5}$$

式中， ω_s 、 ω_e 分别为频带的起始和结束频率。

根据获得的频谱特征参数 $b = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ ，利用支持向量机 (SVM) 进行无人机通信链路异常检测，判断通信链路是否存在异常。支持向量机是一种广泛应用于分类问题的机器学习方法。支持向量机基本原理是找到一个最佳的线性分类器，使得训练数据集上的边界距离最大化，从而实现分类器的最大化稳定性。对于非线性问题，SVM 通过引入核函数将输入空间映射到高维特征空间，使得原本线性不可分的问题变得线性可分^[9]。在无人机通信链路异常检测中，SVM 被用作分类器，用于区分正常通信链路和异常通信链路。通过将提取的频谱特征参数作为输入，SVM 模型将学习如何根据这些特征来区分不同的通信链路状态。使用标记好的训练数据集（包括正常通信链路和异常通信链路的频谱特征参数样本）来训练 SVM 模型。在训练过程中，SVM 具体的参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置表

参数名称	参数描述	参数值
C	惩罚系数,控制误分类的惩罚程度	1.0
kernel	核函数类型,用于映射数据到高维空间	径向基函数
gamma	多项式核函数的次数	0.1
degree	多项式核函数的次数	3

基于上述的参数设置，接下来将学习如何根据特征参数来区分不同的通信链路状态。训练完成后，SVM 的决策函数为：

$$f(\mathbf{b}) = \text{sign}\left(\sum_{i=1}^n c_i O_i B(\mathbf{b}_i, \mathbf{b}) + \beta\right) \tag{6}$$

$$B(\mathbf{b}_i, \mathbf{b}) = \tanh[\varphi(\mathbf{b}_i \cdot \mathbf{b}) + \delta] \tag{7}$$

式中， $f(\mathbf{b})$ 为样本的预测类别（+1——无人机通信链路或-1——无人机通信链路异常）。 $B(\mathbf{b}_i, \mathbf{b})$ 为 Sigmoid 核函数，Sigmoid 核函数的特点在于它能够将输入数据隐式地映射到一个高维空间，并且在这个高维空间中实现数据的非线性可分。 c_i 和 O_i 为支持向量及其对应的类别标签。 β 为截距项； $\mathbf{b}_i$ 为训练样本 i 对应的特征向量；

$\mathbf{b}$ 为测试样本对应的特征向量； φ, δ 为 Sigmoid 核函数的参数； $\tanh$ 是双曲正切函数，它将输入值映射到 -1 和 1 之间^[10]。

以上公式共同构成了 SVM 模型的理论基础，使其能够应用于分类和某些回归任务中。最后，利用训练好的支持向量机模型来进行无人机通信链路异常检测。将新的频谱特征参数输入到模型中，模型将输出一个预测结果，即通信链路是否存在异常。根据预测结果，就可以采取相应的措施来处理异常情况，如发送警报、调整通信参数等^[11]。获取电磁波干扰下无人机通信链路信号如图 1 所示。

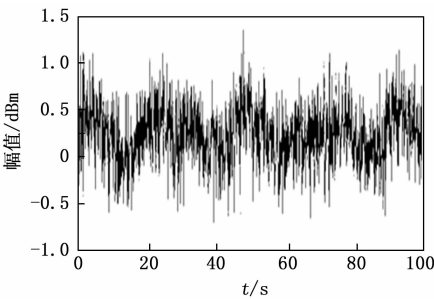


图 1 无人机通信链路信号示例

由图 1 可知，利用频谱特征参数和支持向量机进行无人机通信链路异常检测方法结合了信号处理中的频谱分析技术和机器学习中的分类算法，能够实现对无人机通信链路状态的实时监测和异常预警，从而提高无人机通信系统的可靠性和稳定性^[12]。

1.2 无人机通信链路容错重构

在通过上述章节进行无人机通信链路异常检测与定位后，找到了未被干扰或干扰较小的无人机通信链路，然后将存在明显异常的通信链路段立即切断，防止故障信号继续传输，避免对其他无人机通信造成干扰或损害。之后，进行无人机通信链路容错重构^[13]。容错重构是指在无人机通信链路出现异常时，重新建立或调整通信链路，以确保无人机与中继站或者地面站点之间的通信连续性。在电磁波干扰环境下，这一技术尤为重要，因为干扰可能导致通信链路的不稳定或中断，进而影响无人机的正常操作和控制^[14]。将无人机通信链路容错重构问题转换为目标优化问题，通过细化目标函数、明确约束条件、选择合适的优化算法等步骤，可以找到最优的通信链路重构方案，确保无人机在电磁波干扰环境下的稳定通信。

在目标优化问题中，目标函数的构建是核心。对于无人机通信链路容错重构，构建由 3 个单目标构成的多目标函数。

通信延迟是数据从发送端到接收端所需的时间。在无人机通信中，低延迟对于实时性要求较高的应用场景

至关重要。

$$g_1 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot d_i \quad (8)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{链路 } i \text{ 的连接状态} \\ 0, \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

式中, g_1 为通信延迟, x_i 为决策变量, d_i 为链路 i 的通信延迟时间, n 为通信链路的数量。

误码率: 定义为在特定时间内, 接收端错误接收的比特数与总传输比特数的比值。误码率反映了通信链路的质量, 是评估通信系统性能的关键参数之一。

$$g_2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \frac{m_i}{M} \quad (10)$$

式中, m_i 为链路 i 接收端错误接收的比特数, M 为总传输比特数, g_2 为误码率。

通信能耗: 无人机在进行无线通信时所消耗的能量。

$$g_3 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i \cdot T_i \quad (11)$$

式中, p_i 为第 i 条链路的传输功率; T_i 为第 i 条链路的传输时间。

为每个目标函数分配一个权重, 然后将这些加权后的目标函数相加, 形成一个单一的目标函数。权重的选择反映了不同目标之间的相对重要性。

$$G = \min \{w_1 g_1 + w_2 g_2 + w_3 g_3\} \quad (12)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 为相应的权重, G 为多目标函数。

针对目标函数, 设定约束条件。约束条件能够确保目标函数在合理的范围内进行求解, 避免产生不切实际或无法实现的解。通信链路在接收时的延迟需要控制在一定范围内, 确保系统能够快速响应外部事件, 提高系统的实时性。限制无人机的峰值功率, 可以促使系统在在保证通信质量的前提下, 尽可能降低能耗, 延长无人机的飞行时间^[15]。通信链路接收端错误接收的比特数必须低于设定的阈值, 以确保重构后的通信链路能够满足数据传输的准确性要求, 避免产生因通信质量不达标而导致的系统失效。

$$s. t. \begin{cases} d_{\min} \leq d_i \leq d_{\max} \\ p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \\ m_i \leq m_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ 为链路 i 的通信延迟时间的边界值; $p_{\min}$ 、 $p_{\max}$ 为第 i 条链路的传输功率的边界值; $m_{\max}$ 为允许链路 i 接收端错误接收的比特数最大值。

针对建立的多目标函数, 在约束条件下, 选取一种寻优算法重新寻找无人机通信链路。寻优算法能够同时处理多个目标, 并在迭代过程中不断逼近 Pareto 最优前沿, 即一组无法被进一步改进的解集, 其中每个解在某个目标上的提升都会以牺牲其他目标为代价, 最后从

算法输出的 Pareto 最优解集中选择最合适解^[16]。寻优算法选择鲸鱼算法对无人机通信链路目标函数进行求解。鲸鱼算法 (WOA) 是一种模拟座头鲸捕食行为的优化算法, 具有探索能力强、易于实现等优点, 适用于解决复杂的多目标优化问题^[17]。将鲸鱼算法应用于无人机通信链路目标函数的求解, 可以通过模拟鲸鱼的捕食行为来搜索最优的通信链路配置, 从而实现多个目标的最优化。具体过程如下:

1) 生成一定数量的鲸鱼个体, 每个个体代表一种可能的无人机通信链路连接方案 (候选解)。

2) 设置鲸鱼算法的相关参数, 如最大迭代次数、鲸鱼数量 N 、收缩包围系数、螺旋形状常数以及随机数。

3) 根据目标函数和约束条件, 计算每个鲸鱼个体的适应度值 $Fit(s)$ 。适应度值用于衡量每个候选解 (无人机通信链路连接方案) 解决在优化问题中的优劣程度, 是鲸鱼算法进行搜索和更新的依据。

$$Fit(s) = \frac{1}{G(s)} \quad (14)$$

式中, $Fit(s)$ 、 $G(s)$ 分别为鲸鱼个体 s (无人机通信链路连接方案 s) 对应的适应度值、多目标函数值。

4) 鲸鱼捕食行为模拟: 鲸鱼算法通过模拟鲸鱼的捕食行为来更新鲸鱼个体的位置, 从而逼近最优解。捕食行为包括收缩包围、气泡网攻击和螺旋更新位置。

收缩包围: 判断概率 p , 如果 $p < 0.5$ 且 $|h| \geq 1$, 则执行收缩包围行为。鲸鱼算法通过不断更新鲸鱼个体 (无人机通信链路连接方案) 的位置来模拟收缩包围猎物的行为, 使其向当前最优解 (猎物) 靠近^[18]。这一步骤通过计算当前最优无人机通信链路连接方案与其他无人机通信链路连接方案之间的距离, 并按照一定的规则更新无人机通信链路连接方案的位置来实现。

$$L(t+1) = \hat{L}(t) - h | \epsilon \hat{L}(t) - L(t) | \quad (15)$$

$$Fit(s)_{\max} \rightarrow \hat{L}(t) \quad (16)$$

式中, $L(t)$ 为第 t 次迭代时鲸鱼个体 (无人机通信链路连接方案) 的位置, $\hat{L}(t)$ 为第 t 次迭代时当前最优解的位置, h 和 ϵ 为相关系数, 用于控制鲸鱼的游动范围和引入随机性, $Fit(s)_{\max}$ 为最大适应度值。

螺旋泡网捕食: 判断概率 p , 如果 $p \geq 0.5$ 且 $|h| < 1$, 则执行气泡网攻击行为。鲸鱼在捕食时会进行螺旋运动以接近猎物。在算法中, 通过模拟鲸鱼的螺旋轨迹来更新无人机通信链路连接方案的位置。公式为:

$$L(t+1) = \hat{L}(t) + | \hat{L}(t) - L(t) | \exp(\mu \cdot \eta) \cos(2\pi\eta) \quad (17)$$

式中, μ 为螺旋形状常数; η 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数。

随机搜索猎物行为：当 $h \geq 1$ 时，随机选择一个鲸鱼个体的位置作为搜索代理，更新其他鲸鱼个体的位置，以增加多样性。

$$L(t+1) = L_r - h \mid \epsilon L_r - L(t) \mid \quad (18)$$

式中， L_r 为随机选择的鲸鱼个体的位置。

5) 不断迭代更新无人机通信链路连接方案的位置，并根据适应度值评估新个体的优劣。在迭代过程中，逐步逼近最优解。当达到最大迭代次数，停止迭代。

6) 输出鲸鱼算法得到的无人机通信链路连接方案的最优解。

鲸鱼算法通过模拟鲸鱼的捕食行为，能够全局搜索并找到近似最优解。在无人机通信链路容错重构中，可以确保优化重构链路的性能，提升重构通信链路的整体性能。

1.3 无人机通信链路同步调频控制

在无人机通信链路发生故障后，通过容错重构技术，可以迅速恢复链路的连接。然而，重构后的链路可能仍然受到电磁波干扰的影响，导致通信质量下降。因此，需要对重构后的链路进行进一步的优化和调整，即对无人机通信链路的传输频率与载波频率进行同步调频，实现对电磁波干扰的抑制，从而恢复无人机通信链路正常通信^[19]。载波频率是指在信号传输的过程中，并不是将信号直接进行传输，而是将信号负载到一个固定频率的波上，这个过程称为加载，这样的固定频率即为载波频率。在通信系统中，载波频率通常用于传输信息，它作为一种高频电磁波，通过调制技术将信息信号嵌入其中，然后在接收端进行解调来恢复原始的信息信号^[20]。在这一研究中，由于受到电磁波干扰，因此载波频率也需要进行调整。调整后的理想的载波频率。计算公式如下：

$$Q(k) = Q_0(k) + \int_0^k \frac{|Q_0(k) - q(k)|}{z} \quad (19)$$

式中， $Q(k)$ 为 k 时刻理想的载波频率； $Q_0(k)$ 为 k 时刻原始的载波频率； $q(k)$ 为 k 时刻电磁波干扰频率； z 是载波比。接着，计算重构后无人机通信链路的传输频率与理想载波频率 $Q(k)$ 之间的差值，即：

$$\Delta u(k) = Q(k) - l(k) \quad (20)$$

式中， $\Delta u(k)$ 为 k 时刻的差值； $l(k)$ 为 k 时刻无人机通信链路的传输频率。根据得到的 $\Delta u(k)$ ，借助神经网络 PID 进行同步调频控制。

PID 控制算法是一种经典的控制算法，广泛应用于工业过程控制、自动化、机器人控制等领域。PID 控制器通过计算误差信号来调整控制系统的输出，以使其接近所需的设定值。PID 控制器通过比例系数（P）、积分系数（I）和微分系数（D）计算控制信号，该信号为数

字信号。以减小偏差。然而，这些参数的调整往往需要丰富的经验和试错过程，对于非线性尤为困难。在某些情况下，PID 控制器导致系统输出超调，即系统输出超过设定值并产生振荡，这会影响系统的稳定性和控制精度。

为此，利用神经网络的自适应学习能力来优化 PID 控制器成为一种有效的解决方案。神经网络通常具有多层结构，包括输入层、隐藏层和输出层。输入层接收误差信号及其变化率等相关信息；隐藏层由多个神经元组成，通过激活函数对输入信息进行非线性变换和处理，提取数据中的特征和模式；输出层的神经元数量通常为 3 个，分别对应比例系数（P）、积分系数（I）和微分系数（D）的调整值。激活函数的选择可根据具体任务和数据特点进行，本文选择了 Sigmoid 函数，从而确保输出值在合理的范围内且具有良好的非线性特性。

在训练过程中，需要设置一些超参数。其中，学习率决定了权重和偏置更新的步长，过大导致训练不稳定，过小则收敛速度过慢；迭代次数决定了训练的总轮数，需要根据模型的收敛情况进行调整；批量大小则影响了每次更新权重和偏置时所使用的样本数量，对训练速度和效果也有一定影响。通过在线学习和训练，神经网络能够不断调整其权重和偏置，以适应复杂多变的控制任务，使得 PID 控制器能够在不同工况下保持最佳的控制性能。具体过程如图 2 所示。

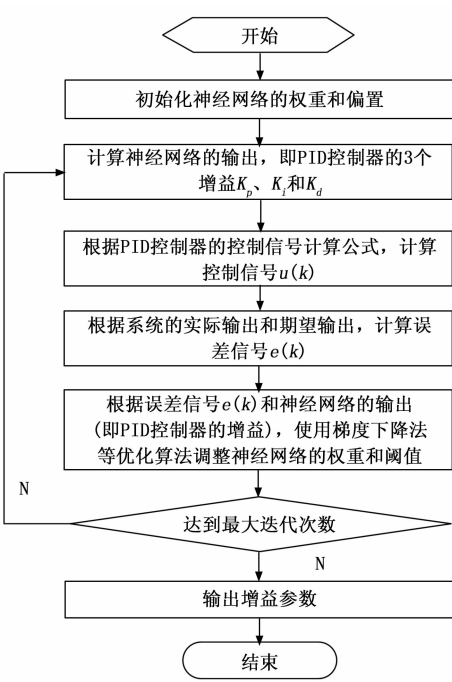


图 2 神经网络改进 PID 控制器过程

神经网络 PID 控制器采用误差逆传播学习算法（BP 算法）进行训练。在训练过程中，控制器根据输入

信号和反馈信号计算误差,并通过调整神经网络的权值和阈值来减小误差。通过反复迭代训练,神经网络能够学习到 PID 控制器的最佳系数组合。BP 神经网络 PID 控制器数学表示如下:

$$y(k) = K_p[\Delta u(k) - \Delta u(k-1)] + K_i\Delta u(k) + K_d[\Delta u(k) - 2\Delta u(k-1) + \Delta u(k-2)] \quad (21)$$

式中, $y(k)$ 为 k 时刻控制变量; K_p 为比例增益,它决定了误差信号对当前控制信号的影响程度。 K_i 为积分增益,它通过对误差信号的积分来累积过去的误差,从而调整控制信号以消除稳态误差。 K_d 为微分增益,通过对误差信号的微分来预测未来的误差变化,从而提前调整控制信号以提高系统的响应速度和稳定性。

经过 PID 控制器计算,输出无人机通信链路传输频率的控制变量。通过控制变量调整无人机通信链路传输频率,让其靠近载波频率,使得二者尽可能同步。这一过程确保了无人机通信链路在受到电磁波干扰时仍能保持稳定和高效的通信,具有重要的实际应用价值。

2 实验分析

2.1 实验环境

采用具备固定翼模式的倾转三旋翼无人机作为测试平台,以模拟多种飞行状态下的通信链路容错控制性能。无人机配备 UWB 传感器(3 个作为基站,1 个作为检测标签),用于精确测量无人机的位置,检测范围 0~100 m,测量精度 ± 5 cm,以及 STM32F103 芯片,用于无人机与地面站之间的数据传输与交互,确保在干扰环境下仍能维持一定的通信链路。该无人机通信网络拓扑结构如图 3 所示。

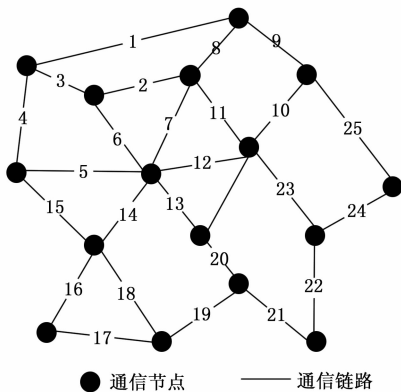


图 3 通信网络拓扑结构

图 3 中,每个通信节点都与其他节点直接连接,形成复杂的互连通信网络。这种网络具有高度的冗余和容错性。即使某个节点或链路出现故障,信息仍然可以通过其他路径进行传输。因此,网状拓扑结构是无人机通信中最常用的网络模型。

2.2 电磁干扰源设置

布置电磁干扰装置,调整其发射强度和频率,模拟不同的电磁干扰场景,电磁干扰工况设置如表 2 所示。

表 2 电磁干扰工况设置

工况	电磁干扰源类型	干扰频率范围/MHz	幅度/dBm	脉冲宽度/ μ s
1	连续波干扰源	2 400~2 483.5	-30~-10	5~20
2	脉冲波干扰源	5 725~5 875	-20~0	1~10

按照设计好的布置方案,将电磁干扰源设备放置在指定位置,然后将干扰源设备与控制系统连接,并进行调试,确保设备能够正常工作并输出预期的干扰信号。另外,需要注意的是,电磁干扰源的布局应确保电磁干扰源能够均匀地覆盖整个实验区域,并避免在特定位置形成过强的干扰。

2.3 无人机通信异常链路检测结果

基于章节 1.1 获取电磁波干扰下无人机通信链路信号,从信号中提取频谱特征参数并利用 SVM 进行异常检测,结果如表 3 所示。

表 3 无人机通信异常链路检测结果

链路序号	类别标签	
	工况 1	工况 2
1	+1	+1
2	+1	+1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	+1	-1
6	+1	+1
7	+1	+1
8	-1	-1
9	+1	+1
10	-1	+1
11	-1	+1
12	+1	+1
13	+1	+1
14	+1	+1
15	+1	-1
16	+1	+1
17	+1	+1
18	+1	+1
19	+1	+1
20	+1	+1
21	+1	+1
22	+1	+1
23	+1	+1
24	+1	+1
25	+1	+1

注: +1—无人机通信链路, -1—无人机通信链路异常。

从表 3 可以看出,在工况 1 电磁干扰下,链路 3、8、10、11 为异常链路,在工况 2 电磁干扰下,链路 5、

8、15 为异常链路。这些异常链路无法再进行通信工作，需要排除。

2.4 无人机通信链路重构方案

设置鲸鱼算法参数，如表 4 所示。

表 4 鲸鱼算法参数表	
参数名称	数值
种群大小	50
最大迭代次数	200
收缩包围系数	0~2
螺旋形状常数	1
随机数	0.2

在检测到通信链路异常后，采用基于鲸鱼算法的链路重构方法，尝试重新建立无人机与地面站之间的通信链路，结果如图 4 所示。

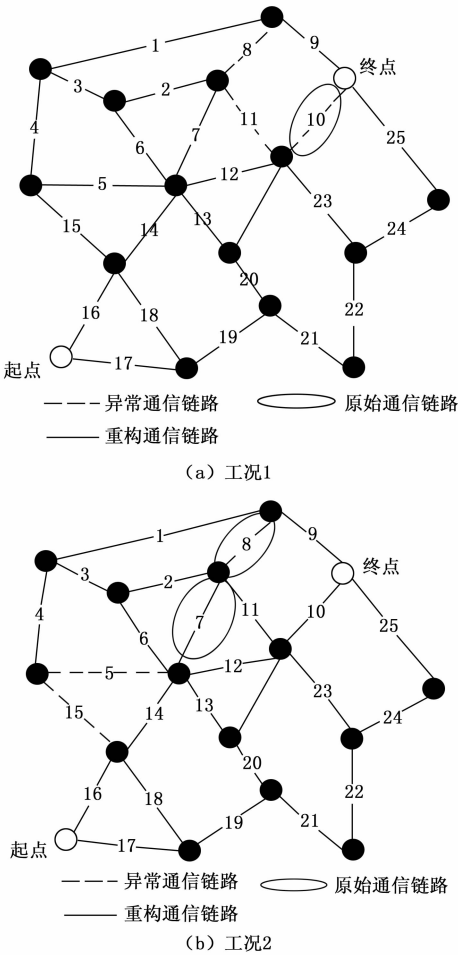


图 4 无人机通信链路重构方案

从图 4 中可以看出，经过重构，新的通信路径来绕过受干扰的区域，重新实现了通信。

2.5 同步调频控制结果

利用 BP 神经网络 PID 控制器对重构后的无人机通信链路的传输频率与载波频率进行同步调频，恢复无人

机通信链路正常通信。同步调频结果如图 5 所示。

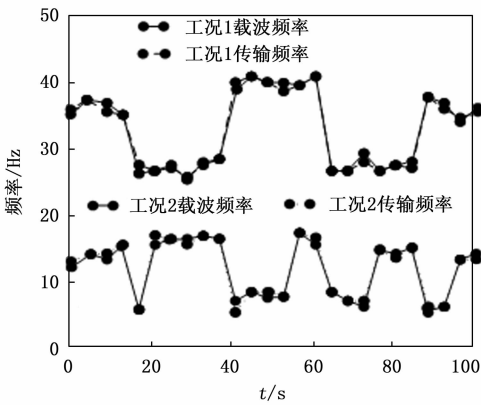


图 5 无人机通信链路同步调频控制

从图 5 中可以看出，经过同步调频控制，无人机通信链路的传输频率与载波频率保持高度同步，说明传输信号的频率将紧密跟随载波频率的变化，以适应电磁干扰，确保了通信信号在传输过程中的稳定性和一致性。

2.6 对比分析

电磁波干扰下无人机通信链路异常容错控制的目的主要在于确保无人机在面临电磁干扰时，其通信链路能够保持稳定和可靠，从而保障无人机的正常飞行和任务执行。因此，选择控制后的通信链路的通信传输速率以及误码率作为评估指标，对比 3 种传统容错控制方法。

2.6.1 通信速率分析

其中传输速率是指单位时间内，通过通信链路传输的数据量。以比特/秒 (bps) 为单位，值越高，表示数据传输速度越快。具体分析结果如图 6~8 所示。

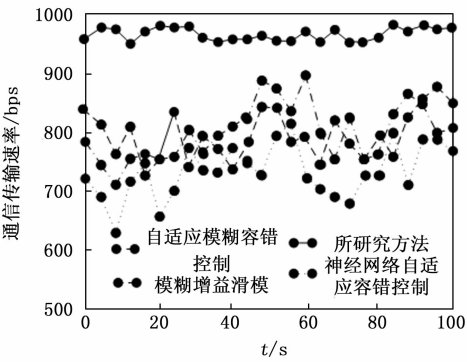


图 6 通信传输速率对比图

从图 6，图 7 可以看出，所研究方法与 3 种传统方法对比，优势显著。在传输速率方面，所研究方法的传输速率曲线明显高于其他 3 种传统方法且曲线波动较小，传输速率均保持在 950 bps 以上，说明在相同条件下，无人机通信链路能够更快地传输数据且都能保持相对稳定。在误码率方面，所研究方法的误码率曲线明显低于其他 3 种传统方法，均保持在 0.15 左右，表

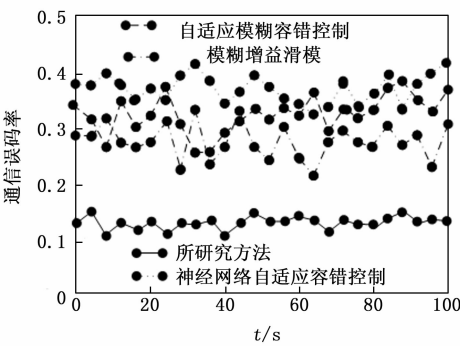


图 7 通信误码率对比图

明在相同的通信条件下，所研究方法控制下无人机通信链路能够更有效地减少数据传输中的错误，从而提高通信的准确性和可靠性。

2.6.2 能耗分析

在无人机通信链路性能评估中，能量消耗检测是至关重要的一环。特别是在电磁干扰环境下，精确测量不同容错控制方法的能量消耗，对于优化无人机续航、提升任务执行效率具有关键意义。为此，开展了能量消耗对比实验，实验结果如图 8 所示。

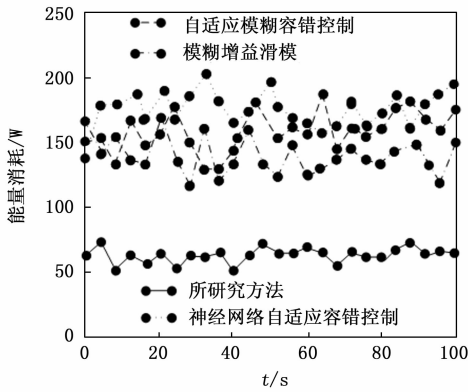


图 8 能量消耗对比图

由图 8 可以看出，所研究方法也表现出色。其能量消耗曲线相对平缓且整体数值始终保持在 100 W 以下，相较于其他 3 种传统方法，在相同任务和数据传输量下，所研究方法能显著降低能量消耗，延长无人机续航时间，这对于保障无人机的安全飞行和任务执行具有重要意义。总之，所研究容错控制方法在电磁干扰环境下的综合表现优于其他方法。

2.6.3 不同干扰强度下稳定性分析

为检验鲸鱼算法在 3 种不同干扰场景下的运行稳定性，这 3 种干扰场景分别为信号衰减干扰、多径效应干扰以及电磁干扰，且干扰强度由强到弱设置。对 4 种对比方法进行了独立运行实验，记录每次运行得到的最优链路成本，并计算在这 3 种干扰场景下的成本标准差。标准差越小，表明该算法在不同运行中结果越一致，稳

定性越高，具体结果如表 5 所示。

表 5 不同干扰强度下标准差对比结果

对比方法	信号衰减干 扰下标准差	多径效应干 扰下标准差	电磁干扰 下标准差
所研究方法	0.025	0.030	0.022
神经网络自适应容错控制	0.050	0.051	0.048
模糊增益滑模	0.045	0.054	0.061
自适应模糊容错控制	0.066	0.056	0.045

从表 5 数据可以得出，所研究方法在 3 种干扰场景下的标准差均相对较小，分别为 0.025、0.030 和 0.022，显示出较高的运行稳定性。相比之下，神经网络自适应容错控制、模糊增益滑模和自适应模糊容错控制的标准差均大于所研究方法，表明它们在相同干扰场景下的运行稳定性相对较低。由此可以得出，所研究方法在 3 种干扰场景下均表现出较高的运行稳定性，优于其他 3 种对比方法。

3 结束语

随着无人机技术的快速发展和广泛应用，无人机通信链路在复杂电磁环境中的稳定性和可靠性问题日益凸显。研究致力于探索电磁波干扰下无人机通信链路的异常容错控制方法，旨在提高无人机在复杂电磁环境中的通信性能，确保数据传输的准确性和连续性。研究中通过对无人机的通信链路进行持续监控，以识别出潜在的通信异常，根据无人机通信链路的实时状况，动态重构网络拓扑结构，根据通信链路的实时状况，动态调频，以降低干扰并提高通信质量。实验结果表明，该方法能够显著提高传输速率、降低误码率，提高通信链路的稳定性和可靠性，从而确保无人机在复杂电磁环境中能够正常通信和数据传输。研究成果不仅具有重要的理论价值，还具有重要的实际应用价值，有望为无人机在复杂电磁环境中的安全飞行和高效作业提供有力支持。未来，将继续深入研究电磁波干扰下无人机通信链路的异常容错控制方法，不断探索新的技术和算法，以进一步提高无人机通信系统的性能和可靠性。

参考文献：

[1] 徐冬雨，欧阳一鸣，黄正峰，等. 一种基于自适应容错链路的片上网络设计与研究 [J]. 电子与信息学报，2024，46（11）：4092-4100.

[2] 武天才，王宏伦，任 斌，等. 基于学习的高超声速飞行器分层协调容错方法 [J]. 航空学报，2024，45（22）：225-237.

[3] 尹凌鹏，殷小亮，方晓汾，等. 一类具有执行器故障的非线性系统自适应模糊容错控制 [J]. 机械设计，2024，41（10）：123-127.

[4] 任朝晖，刘玉麟，姜泽宇，等. 基于模糊增益滑模四旋翼

- 无人机自适应容错控制 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2024, 45 (2): 209-216.
- [5] 黎 涛, 田 园, 钱俊宏, 等. 组合故障的无人机神经网络自适应容错控制 [J]. 弹箭与制导学报, 2024, 44 (3): 96-102.
- [6] WANG J, WANG D. A robust fault-tolerant control algorithm based on a novel modeling method for quadrotor application with accurate fault estimation [J]. *Evolutionary Intelligence*, 2024, 17 (5/6): 3169-3183.
- [7] 周大鹏, 富佳伟, 杨大鹏. 高超声速飞行器主被动复合一体化容错控制方法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54 (10): 2295-2307.
- [8] 李园园, 侯宝顺, 朱书慧. 多执行器故障条件下植保无人机的自适应鲁棒容错控制 [J]. 中国农机化学报, 2024, 45 (10): 254-261.
- [9] 黄海峰, 唐红雨, 何智明. 基于 PCA 和自适应神经模糊网络的风电机组执行器主动容错控制 [J]. 机械设计与研究, 2024, 40 (4): 74-80.
- [10] 李海燕, 吴佳栋, 董海迪, 等. 高超声速飞行器预设性能抗饱和容错控制方法 [J]. 海军工程大学学报, 2024, 36 (4): 14-21.
- [11] 丁 磊, 李小华, 刘 辉. 无关初始跟踪条件的自抗扰预设性能有限时间容错控制 [J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2024, 48 (3): 60-67.
- [12] 曹世豪, 施惠元, 苏成利, 等. 执行器部分失效的鲁棒模糊容错切换控制 [J]. 南京理工大学学报, 2024, 48 (2): 182-191.
- [13] 李 刚, 周尚波, 郭尚志, 等. 通信延迟下自适应容错控制及其在航天器编队中的应用 [J]. 重庆大学学报, 2024, 47 (4): 104-113.
- [14] 吴 凯, 杨 艺, 姚雪莲. 基于 Backstepping 的六旋翼无人机自适应容错控制 [J]. 火力与指挥控制, 2024, 49 (1): 35-42.
- [15] 马亚杰, 王 娟, 姜 斌, 等. 一种无人机-无人车编队系统容错控制方法 [J]. 航空学报, 2023, 44 (8): 182-195.
- [16] 侯 华, 周佳明, 蔡剑平. 三维无线传感器网络中虚拟力引导的鲸鱼覆盖优化算法 [J]. 传感器与微系统, 2025, 44 (1): 152-156.
- [17] 杨 彪, 钱禹东, 石裕怡, 等. 改进鲸鱼算法优化多微波源功率组合的微波加热系统温度均匀性研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (11): 4367-4381.
- [18] 李克文, 李国庆, 崔雪丽, 等. 基于概率精英差分和自适应黄金正弦的鲸鱼优化算法 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45 (10): 2944-2952.
- [19] 王苏杭, 刘福才. 考虑重力影响的柔性空间机械臂输出约束自适应 PID 容错控制 [J]. 高技术通讯, 2024, 34 (9): 960-971.
- [20] 黄金良, 周 劲, 喻 伟. 基于鲸鱼算法的 BP-PID 大米抛光机组控制系统优化 [J]. 食品与机械, 2024, 40 (11): 74-80.
- reverse logistics network design and disassembly line balancing with sequencing [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 187 (1): 109794.1-109794.14.
- [22] SANGAR B, SINGH M, SREEJETH M. An improved ANFIS model predictive current control approach for minimizing torque and current ripples in PMSM-driven electric vehicle [J]. *Electrical Engineering*, 2024, 106 (5): 5897-5907.
- [23] ZHANG J L, ZHU D B, JIAN W H. Fractional order complementary non-singular terminal sliding mode control of PMSM based on neural network [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2024, 25 (2): 213-224.
- [24] KIRIBUCHI T, INOUE Y, MORIMOTO S. Circuit equation in power superimposition for position sensor using single-phase transformer on PMSM power lines [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2024, 217 (1): 766-775.
- [25] SONG W, ZOU Y, ZHANG M S. Digital twin modeling method of three-phase inverter-driven PMSM systems for parameter estimation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39 (2): 2360-2371.
- (上接第 168 页)
- [16] 储禹丞, 张兰红, 程梦坤. 基于改进自适应趋近率的永磁同步电机无模型控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (5): 137-143.
- [17] 朱 元, 肖明康, 孟 令, 等. 永磁同步电机基于双积分器模型实现的改进离散准谐振控制器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (9): 3599-3609.
- [18] ZHAO J, LIU X, WANG S. Review of design and control optimization of axial flux PMSM in renewable-energy applications [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 36 (1): 1-21.
- [19] BOUYAHIA O, BETIN F, YAZIDI A. Fault-tolerant fuzzy logic control of a 6-phase axial flux permanent-magnet synchronous generator [J]. *Energies*, 2022, 15 (4): 14-27.
- [20] BHATTACHARJEE S, HALDER S, YAN Y. Real-time SIL validation of a novel PMSM control based on deep deterministic policy gradient scheme for electrified vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37 (8): 9000-9011.
- [21] TASOGLU G, ILGIN M A. A simulation-based genetic algorithm approach for the simultaneous consideration of