

基于 SVM 算法和米波雷达的输电线塔通信电磁波干扰检测

樊 荣

(西安明德理工学院 信息工程学院, 西安 710124)

摘要: 在输电线塔通信电磁波干扰分析过程中, 存在各种噪声和干扰信号, 难以准确区分环境信号和目标信号, 导致信号特征提取无法准确反映信号的真实特性, 使在处理输电线塔通信电磁波干扰复杂性关系数据时, 检测准确性低; 因此, 提出基于 SVM (支持向量机) 算法和米波雷达的输电线塔通信电磁波干扰检测方法; 在输电线塔通信场景中部署米波雷达设备, 利用其电磁波探测能力获取现场通信电磁波干扰信息; 将米波雷达探测信号汇总为一个观测序列, 运用子波变换原理进行信噪分离, 实现环境信号和目标信号的完美划分; 面向电磁波干扰探测目标信号, 从时域、频域两方面入手, 提取大量信号变化特征; 以 SVM 算法为核心进行干扰检测, 将特征提取结果输入, 结合多维度丰富特征, 在最优超平面的辅助下完成通信电磁波干扰检测; 实验结果表明: 该方法生成的干扰检测结果 AUC 值达到了 0.94, 验证了其优越的电磁波干扰识别性能。

关键词: 输电线塔通信; SVM; 米波雷达; 电磁干扰; 特征提取; 信噪分离

Electromagnetic Wave Interference Detection in Transmission Line Tower Communication Based on SVM Algorithm and Meter Wave Radar

FAN Rong

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

Abstract: In the analysis process of electromagnetic wave interference in transmission line tower communication, there are various noise and interference signals, which is difficult to accurately distinguish environmental signals and target signals. As a result, the signal feature extraction cannot accurately reflect the true characteristics of the signal, resulting in low detection accuracy when processing the complexity data of electromagnetic wave interference in transmission line tower communication. Therefore, an electromagnetic wave interference detection method based on support vector machine (SVM) algorithm and meter-wave radar is proposed. An meter wave radar is deployed in the transmission line tower communication scenario, and its electromagnetic wave detection capability is used to obtain electromagnetic wave interference information. The detection signal of the meter-wave radar is summarized into an observation sequence, and the principle of subwave transformation is used to separate the signal and noise, and perfectly distinguish environmental signals and target signals. To detect the target signal for electromagnetic wave interference, a large number of signal variation features are extracted from the time domain and frequency domain. For the interference detection with the SVM algorithm as the core, the feature extraction results are input, combined with multi-dimensional rich features, and the communication electromagnetic wave interference detection is completed with the assistance of the optimal hyperplane. Experimental results show that the interference detection AUC value generated by this method reaches up to 0.94, which verifies its superior electromagnetic interference recognition performance.

Keywords: transmission line tower communication; SVM; meter wave radar; electromagnetic interference; feature extraction; signal noise separation

0 引言

输电线塔作为电力系统中至关重要的组成部分, 肩负着将电能从发电厂安全输送至各个用电区域的重

任^[1]。然而, 在电能传输的进程中, 输电线塔会不可避免地产生电磁场。这种电磁场不仅广泛分布于输电线塔周边的空间, 还可能通过导线、电缆等导电介质传播至

收稿日期:2025-02-05; 修回日期:2025-03-17。

作者简介:樊 荣(1986-),女,大学本科,实验师。

引用格式:樊 荣. 基于 SVM 算法和米波雷达的输电线塔通信电磁波干扰检测[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 97-104.

其他设备。当电磁场的强度达到或超过某一临界值时,便可能对邻近的通信设备构成干扰^[2],进而引发通信质量下降乃至通信中断等问题。

在实际工程项目中,输电线塔通信电磁波干扰的问题正日益严重,其影响不容忽视。随着电力系统的持续扩张和通信技术的迅猛进步,越来越多的通信设备和系统被部署于电力设施周边,加剧了电磁干扰的风险。此类干扰不仅影响了通信系统的稳定运行,更对公共安全、交通管控、医疗急救等关键领域带来潜在的安全隐患。为更好地应对电磁波干扰问题,推动电力系统和通信系统的协调发展,输电线塔通信电磁波干扰检测成为一项关键任务^[3]。随着研究工作的深入,融合先进算法的干扰检测方法不断涌现。

文献[4]提出基于CS-C-SVM的干扰检测方法,运用支持向量机构建一个智能分类模型,再引入布谷鸟搜索算法,对支持向量机参数进行寻优调整。将实时采集的信号特征输入模型,即可自动输出干扰检测结果。通过研究可知,模型的参数可以根据实际需求进行调整,这使得该方法具有较强的适应性。但该方法在部分场景下存在参数调优不当的情况,导致检测结果AUC值较低。文献[5]提出基于子波变换的干扰检测方法,针对通信干扰类型进行分析,为每一类干扰信号设置对应的数学模型,作为干扰检测的依据。面向现场采集的干扰信号,应用子波变换算法实现信号去噪,再提取信号中包含的时频分布特征。依托于混沌循环谱方法,设计一种干扰信号智能检测方案,通过对时频分布特征学习和检验,得出最终干扰检测结果。通过测试可知,该方法可以对信号展开多尺度分析,使其具有较强的灵活性。但该方法无法应对噪声信号对有效特征的掩盖,导致检测效果AUC值不高。文献[6]提出基于LSTM网络和特征融合的方法,将现场采集信号输入LSTM网络中,利用其强大的序列特征提取能力,获取信号包含的时域特征和频域特征,将两方面信号融合起来,输入全连接分类器中进行分类识别,即可推导出干扰检测结果。实践应用结果表明,LSTM网络拥有的内部状态更新机制,提升了干扰检测的鲁棒性。但该方法在特征融合时所选取的特征缺乏代表性,降低了AUC值。文献[7]提出基于数字滤波技术的方法,利用傅里叶基函数,对通信干扰探测信号进行断续、偏离量化处理,并以此为基础提取信号主要特征。结合变换域LSM算法、变步长LMS算法构建智能检测模型,将信号特征输入其中展开自适应分析,即可输出干扰检测结果。研究结果表明,该方法运用了先进的算法和计算技术,使得干扰检测效率得到提升。但该方法受限于算法本身的局限性,无法处理非线性或时变性的干扰信号,从而影响检测结果AUC值。

为了应对现有干扰检测方法表现出的应用局限,将支持向量机算法和米波雷达结合起来,设计一种输电线塔通信电磁波干扰检测方法。借助米波雷达获取输电线塔周围的电磁环境监测数据,通过信噪分离、滤波、特征提取等操作获取反映干扰信号变化的有效特征信息,将其输入训练好的SVM检测模型中,即可实现对干扰信号的准确检测,为提升通信系统的稳定性和可靠性提供有力支持。

1 SVM算法和米波雷达结合下输电线塔通信电磁波干扰检测的实现

输电线塔通信环境复杂,存在各种噪声和干扰信号,使得从众多信号中准确提取目标通信电磁波干扰信号成为一大难点。因此,为有效实现输电线塔通信电磁波干扰检测,通过米波雷达获取信号,并利用子波变换进行信噪分离,能够有效解决这一问题,准确地将环境信号和目标信号区分开来,提取出目标信号用于后续分析。并从时域和频域两个维度全面提取信号变化特征,以更完整地捕捉信号的特征信息,解决了特征提取不佳的问题,提高了对干扰信号的辨识度。最后将其作为输入,利用SVM算法完成输电线塔通信电磁波干扰检测。

1.1 建立电磁环境米波雷达探测方案

面向输电线塔覆盖区域,选择合适的监测点,部署米波雷达设备以监测通信电磁波^[8]。在布局上,米波雷达需考虑地形、电磁场分布及障碍物,确保监测无死角。每个监测点的雷达设备安装高度、方向均经过优化,以最大化探测效率。雷达设备间保持适当间距,避免相互干扰,同时形成互补,确保整个输电线塔区域被有效覆盖。米波雷达探测过程中,需要经历的两个主要环节就是脉冲信号发射和回波信号接收^[9]。其中,发射信号是由DDS(直接数字频率合成)产生的,在相位累加器、相位—幅度转换表、数模转换器、低通滤波器的共同作用下^[10],生成用于探测通信电磁波环境的雷达发射脉冲,如公式(1)所示:

$$b(T) = r\left(\frac{T}{c}\right) \exp\left(j \frac{d}{c} T^2\right) \quad (1)$$

$$r\left(\frac{T}{c}\right) = \begin{cases} 1, & \frac{T}{c} \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, b 表示米波雷达发射脉冲, T 表示时间, r 表示矩形函数, c 表示脉冲时宽, d 表示脉冲带宽, j 表示尺度, $\exp$ 表示指数函数。

以公式(1)给出的脉冲表达式为基础,将米波相控阵雷达发射的一组脉冲信号表示为:

$$V(T-NC) = b(T-NC) \exp[j2f(T-NC)] \quad (3)$$

式中, V 表示米波相控阵雷达发射的一组脉冲信号, N 表示发射脉冲数量, C 表示重复周期, f 表示载频。

公式(3)中的一组脉冲信号传播到输电线塔通信环境中,该信号在目标环境中遭遇电磁波会发生反射,从而产生一系列回波信号^[11],作为米波雷达探测结果,表示如下:

$$s(t, t') = Gr \left[\frac{t - \frac{2g(t')}{h}}{c} \right] \exp \left[j \frac{d}{c} \left(t - \frac{2g(t')}{h} \right)^2 \right] \times r \left(\frac{t'}{T} \right) \exp \left[-j \frac{4fg(t')}{c} \right] V(T - NC) \quad (4)$$

式中, s 表示基带回波信号, t 表示快时间, t' 表示慢时间, $\hat{T}$ 表示相参积累时间, G 表示常数, g 表示米波雷达探测距离, h 表示电磁波传播速度。其结果如图1所示。

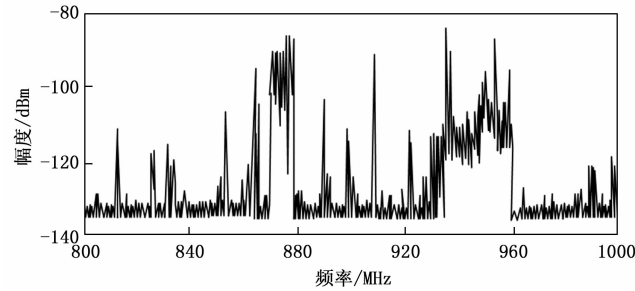


图1 米波雷达探测结果

其中,目标距离取值可以简单描述为:

$$g(t') \approx g_0 + \alpha' + \frac{1}{2} \alpha t'^2 \quad (5)$$

式中, g_0 表示米波雷达与输电线塔通之间的初始距离, v, α 表示电磁波传输的径向速度和径向加速度。

通过5个米波雷达设备采集现场环境的电磁干扰信号时,这些雷达设备每隔10 m放置一个。然而,在采集过程中,会受到多普勒频移效应的影响^[12],信号中包含不同频率的杂波,会影响最终的干扰检测结果。对此,设计一组窄带滤波器,将回波信号输入滤波器中展开初步处理,抑制信号杂波。

通过多普勒滤波器组处理后,米波雷达探测到的回波数据最终表示为:

$$\hat{s}(t, t') = \sum_{i=1}^n b(T - (i-1)Cs(t, t')g(t'))\omega_i \quad (6)$$

式中, $\hat{s}$ 表示滤波后的脉冲回波数据, ω 表示权重系数, n 表示多普勒滤波器数量, i 表示滤波器编号。

利用多普勒滤波器组对回波数据进行初步处理时,充分考虑了滤波器的延迟效应,通过这一过程有效消除了原始电磁波干扰探测信号中的杂波成分,从而获得了具有实际意义的探测数据。这些数据为后续设计基于子波变换的信噪分离算法提供了基础。

1.2 设计子波变换信噪分离算法

面向去除杂波后的输电线塔通信电磁波干扰探测信号,引入子波变换原理完成信噪分离^[13],实现环境信号和目标信号的完美划分,以便更好地应用目标信号推

导出干扰检测结果。为了便于分析,将所有的米波雷达回波信号汇总起来,形成一个观测序列^[14],如公式(7)所示:

$$S(\vartheta) = \{\hat{s}_1(t, t'), \hat{s}_2(t, t'), \dots, \hat{s}_\vartheta(t, t')\} = \beta(\vartheta) + \epsilon(\vartheta) \quad (7)$$

式中, ϑ 表示米波雷达探测周期, S 表示电磁波干扰信号观测序列, β 表示目标信号, ϵ 表示环境信号。

采用子波变换思想,对公式(7)给出的观测序列进行变换处理,得到第一次子波变换结果。再面向尺度参数进行二进制离散处理^[15],生成二进制子波变换公式:

$$\begin{cases} X_J = S(\vartheta) \times \chi_J = \frac{1}{J} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\vartheta) \chi \frac{\partial}{\partial H} \omega \vartheta \omega \\ X'_J = \frac{1}{2^J} \int_{-\infty}^{+\infty} X_J \bar{\chi} \frac{\partial}{\partial J} \omega \vartheta \omega \end{cases} \quad (8)$$

式中, J 表示子波变换尺度参数, X 表示第一次子波变换系数, X' 表示二进制子波变换结果, χ 表示母波函数, $+\infty, -\infty$ 分别表示正无穷和负无穷, ω 表示脉冲连续时长, H 表示电磁波吸收系数, $\bar{\chi}$ 表示傅里叶变换形式的母波函数, ϑ 表示积分运算函数。

通过公式(8)对米波雷达探测信号做子波变换,即可将原始电磁波干扰信号转换为两个子波信号,并获取子波变换系数,针对分解后的信号进行搜索,筛选出所有满足噪声特征的信号点,并将这些点的取值统一为0,遍历所有子波信号点后即可生成新的系数。

再将各类噪声投影到不同子波空间上,利用公式(9)给出的数学公式计算出子波信号方差:

$$\sigma_J = \begin{cases} M(\varphi(\psi_J)) & |\psi_J| > 0 \\ 0 & |\psi_J| = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, σ 表示信号方差, M 表示中位数取值函数, φ 表示绝对值函数, ψ 表示子波变换系数。

考虑目标信号和环境信号之间的差异,设定一个可以用来区分二者的判断阈值。对比阈值和子波信号方差,生成新的子波变换系数:

$$\psi'_J = \begin{cases} \lambda(\sigma_J) (|\sigma_J| - \eta_J) & |\sigma_J| \geq \eta \\ 0 & |\sigma_J| < \eta \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\eta_J = \sigma_J (2l\rho)^{1/2} \quad (11)$$

式中, ψ' 表示新生成的子波变换系数, λ 表示符号函数, η 表示阈值, l 表示对数函数, ρ 表示电磁波干扰探测信号序列长度。

将新的子波变换系数代入到公式(8)中,替换 X ,实现对通信电磁波干扰探测信号的信噪分离,能够获取原始信号中隐藏的目标信号,为后续提取通信电磁波干扰信号的特征提供了前提条件。

1.3 提取通信电磁波干扰信号特征

从时域和频域两方面入手,对目标信号进行特征提

取,以此来反映输电线塔通信电磁波干扰情况。在时域方面,主要完成了时域峰平比的提取^[16],具体计算公式为:

$$\mu_1 = \frac{K}{\bar{K}} \quad (12)$$

式中, μ_1 表示信号的时域峰平比, K 表示目标信号最大幅度值, $\bar{K}$ 表示目标信号平均幅度值。

在频域方面,完成了归一化频谱相似度^[17]、功率增强因数等 8 项特征的提取,具体计算过程为:

$$\begin{cases} \mu_2 = \frac{\sum_{l=1}^L P(\hat{s}_l) P(X'_l)}{\sqrt{\sum_{l=1}^L P^2(\hat{s}_l) \sum_{l=1}^L P^2(X'_l)}} \\ \mu_3 = \frac{Q(\hat{s}_l)}{Q(X'_l)} \\ \mu_4 = \frac{u - u' + 1}{L} \\ \mu_5 = \frac{I}{\bar{I}} \\ \mu_6 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\mu_4 - \mu_4(l)| \\ \mu_7 = \max[F(p)] \end{cases} \quad (13)$$

式中, μ_2 表示归一化频谱相似度, L 表示电磁波干扰信号频谱长度, l 表示频谱信号点编号, P 表示信号频谱归一化处理结果, μ_3 表示功率增强因数, Q 表示信号功率均值, μ_4 表示归一化频率带宽, u, u' 表示信号频谱最大值和最小值, μ_5 表示归一化频谱峰度, $I, \bar{I}$ 分别表示接收信号幅度值和接收信号幅度均值, μ_6 表示归一化频谱带宽偏差, μ_7 表示分数阶傅里叶域能量聚集度, $\max$ 表示最大值取值函数, F 表示能量聚集度, p 表示分数阶。

通过上述运算,得到归一化处理后得到特征信息,作为后续干扰检测的依据。

1.4 基于 SVM 算法的干扰检测

将通信电磁波干扰检测问题,转换为一个二分类问题^[18],再引入 SVM 算法进行干扰检测,将干扰探测信号包含的时域和频域特征输入其中,在最优超平面的辅助下^[19],完成干扰信号和正常信号的分类,从而得出最终的干扰检测结果。基于 SVM 算法的干扰检测模型构建过程中,定义最优超平面求解目标函数和约束条件^[20]:

$$\begin{cases} \varphi = \min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + z \sum_{o=1}^{\gamma} \zeta_o \\ y_o(\omega\mu + \tau) \geq 1 - \zeta_o \end{cases} \quad (14)$$

式中, φ 表示最优超平面求解目标函数, $\min$ 表示最小值取值函数, ω 表示超平面权重, z 表示惩罚因子, ζ 表示松弛变量, γ 表示输入的干扰探测信号特征数量, o 表示特征编号, y 表示 SVM 分类器输出结果, τ 表示偏差, μ 表示样本数据。

将拉格朗日乘子引入到最优超平面分析过程中,超

平面权重和偏差可以表示为:

$$\begin{cases} \omega = \sum_{o=1}^{\gamma} \vartheta_o y_o \mu \\ \tau = y_o - \sum_{o=1}^{\gamma} \vartheta_o y_o \mu \end{cases} \quad (15)$$

式中, ϑ 表示拉格朗日乘子。

再加入一个核函数,可将上述公式 (14) 转变为如下所示的 SVM 算法下的分类决策函数:

$$v(\mu) = \lambda \left(\sum_{o=1}^{\gamma} y_o \vartheta_o \xi(\mu, \mu_o) + \tau \right) \quad (16)$$

式中, ξ 表示核函数, μ_o 表示训练集中的第 o 个特征样本数据。输入数据是从时域和频域两方面提取的干扰探测信号特征。输出数据是干扰信号的分类结果。训练集通过收集大量输电线塔通信的干扰信号样本,并从时域和频域提取特征,同时标记每个样本的干扰类型来得到^[21]。这些标记好的样本被分为训练集和测试集,用于训练和验证 SVM 干扰检测模型。

在当前检测模型中,惩罚因子和核函数参数被视为可调参数^[22]。为确定这两项参数的范围,本文采取了初步试验结合验证的方法。具体而言,首先依据数据特性,为这两项参数设定合理的初始值范围。随后,在该范围内逐步调整参数值,并密切观察模型在验证集上的性能变化。通过多次迭代这一过程,能够找到使模型检测精度和泛化能力均达到最优的参数范围。值得注意的是,惩罚因子和核函数参数的取值对模型检测结果的准确性具有直接影响。为此,引入了灰狼算法^[23],该算法模拟狼群围猎捕食的过程,在预设的参数范围内搜索最优的惩罚因子和核函数参数。在实际运算过程中,灰狼位置更新的原理如图 2 所示。

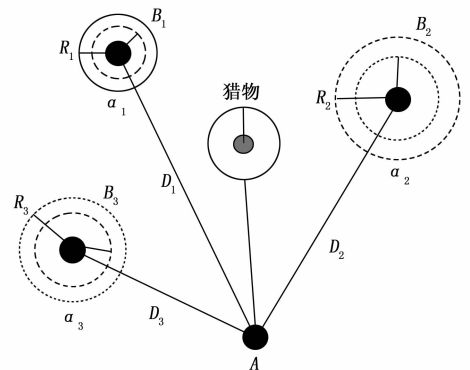


图 2 灰狼算法位置更新示意图

图 2 中, A 表示选定的决策灰狼, a_1, a_2, a_3 表示种群内适应度最高的三只狼, R_1, R_2, R_3 表示狼个体捕猎半径, B_1, B_2, B_3 表示灰狼层级, D_1, D_2, D_3 表示当前灰狼与适应度最高的灰狼之间距离。

定义干扰检测结果虚警概率为个体适应度值,在每次狼群个体位置更新后,根据适应度值判断个体劣程

度^[24]，以便找到全局最优解。当迭代次数满足给定条件，即可根据最优灰狼个体确定最优参数取值^[25]，将这一取值结果添加到公式（16）中，优化输电线路通信电磁波干扰检测结果。

2 实验分析

结合 SVM 算法和米波雷达技术，完成输电线路塔通信电磁波干扰检测新方法设计后，为了探究其在实践应用中的有效性与可行性，针对其展开实验测试。通过实验分析有助于深入理解 SVM 算法在复杂电磁环境中的应用潜力，还能为米波雷达技术在电磁干扰检测领域提供新的思路与方法。

2.1 实验准备

本文在多种条件下进行了实验，包括不同的地理环境和输电线路规模等。为具体展示实验结果，本文选取了一个典型场景——某输电杆塔周边的电力通信环境，并在此场景中选择 10 个监测点。这些监测点的布局旨在全面覆盖整个通信区域，以确保能够有效捕捉通信电磁波信号的特征。同时，合理设置了监测点之间的间距，并设计了一个结构完善、功能齐全的复合型宽带米波雷达装置。该装置被安装在指定的监测点上，用于实时采集通信电磁波信号，为电磁波干扰检测实验提供所需的数据支持。

复合型米波雷达工作过程中，考虑到实际环境探测要求，设置相关参数如表 1 所示。

表 1 米波雷达参数

参数名称	数值
载频	150 MHz
脉冲时宽	10 μ s
带宽	5 MHz
脉冲重复频率	200 Hz
相参累计脉冲数	128
采样率	10 MHz
最大探测距离	100 km
径向速度	68 m/s
回波幅度	1 μ V

按照表 1 给出的内容完成基础参数设置，再将该设备应用到研究区域内，完成米波雷达设备应用调试，调整前后回波矩阵二维灰度图像如图 3 所示。

通过对比图 3（a）和图 6（b）可以发现，米波雷达设备调整前，不同脉冲回波信号出现的距离单元存在差异，这表明其在通信电磁波干扰探测过程中面临着距离走动问题，这会导致长期持续探测时，采集信号中出现大量杂波。而经过调试后，不同脉冲回波信号保持在同一个距离单元上，解决了距离走动问题。

利用经过调试的米波雷达设备，对输电线路塔的通信电磁环境进行探测，并获取了探测信号数据，这些数据

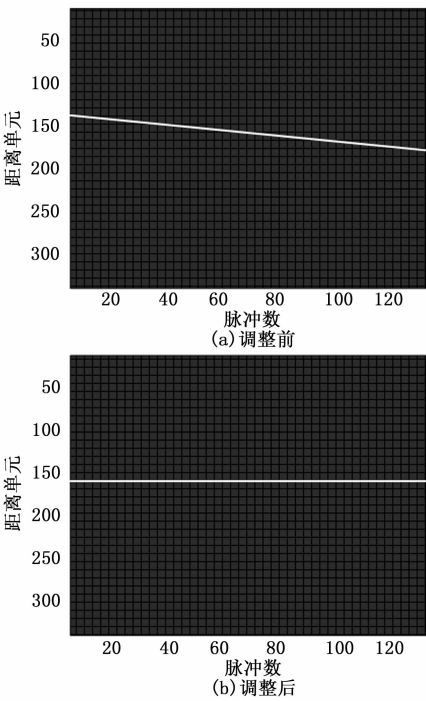


图 3 回波矩阵二维灰度图

为后续进行干扰检测分析提供基础。在实验筹备阶段，选取基于子波变换的检测方法和基于数字滤波技术的表示方法作为实验对照组。选择上述两种方法作为对照的原因是它们在信号处理领域内拥有卓越的代表性和广泛的应用实践，确保能够与本文提出的新型检测方法形成有效的可比性。随后，采用 3 种方法依次对现场探测数据进行分析，得出电磁波干扰检测结果，通过对比检测结果可以直观描述各方法的干扰检测性能，从而判断基于 SVM 算法和米波雷达的新型干扰检测方法是否具有推广价值。

2.2 信号预处理

以图 2 和另外任意两个场景下米波雷达探测的环境数据为例，针对其可以绘制出图 4 实测频谱。

从图 4 可以看出，三组输电线路塔通信电磁环境频谱具有一定差异。但整体来看，干扰信号主要集中在 870 ~ 880 MHz、930 ~ 960 MHz 两个频段。

采用子波变换信噪分离算法，对米波雷达探测信号进行预处理，即可得到图 5 所示的信号处理结果。

从图 5 可以看出，子波变换处理后，原始米波雷达实测频谱信号被分解为环境信号、目标信号两类，将环境信号看作会影响电磁波干扰检测结果的噪声信号，从原始频谱数据中去除，仅保留目标信号，针对其提取时域特征和频域特征，参与后续干扰检测工作。

2.3 干扰检测结果

基于 SVM 算法的干扰检测模型应用到实验过程中，先运用灰狼算法，对惩罚因子、核函数参数进行迭代，设置二者的取值范围均为 [0.01, 100]。通过灰狼算法

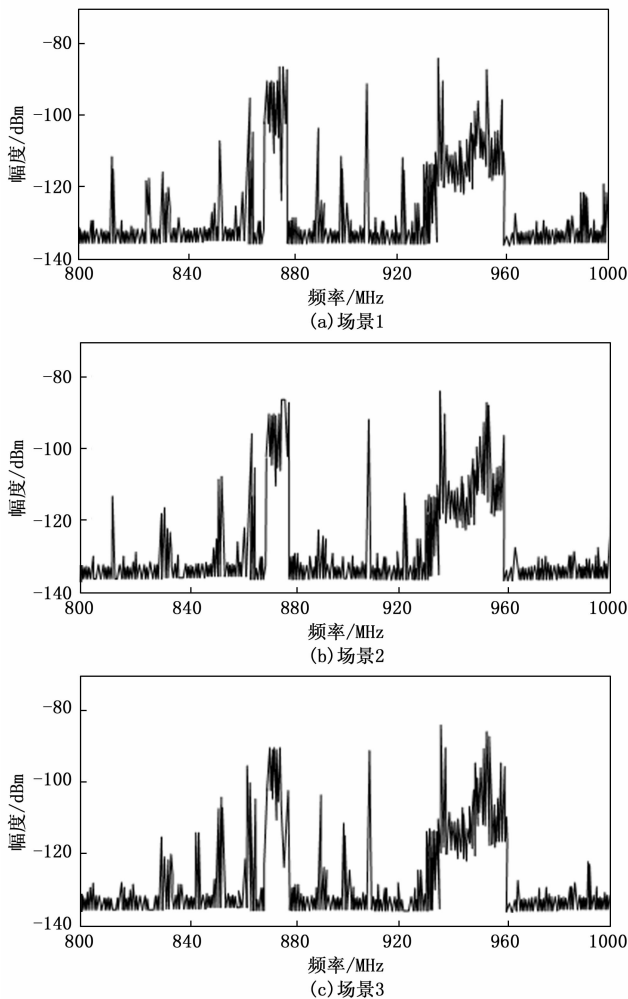


图 4 米波雷达实测频谱数据

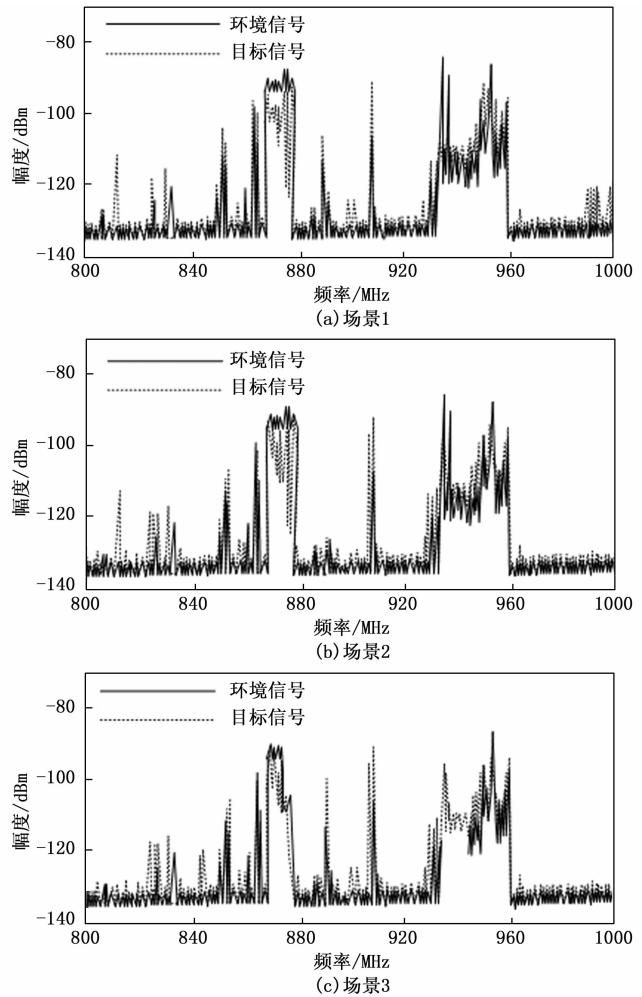


图 5 信噪分离结果

展开寻优计算时,所产生的适应度变化曲线如图 6 所示。

如图 6 所示,在完成 6 次迭代计算后,灰狼种群的平均适应度达到了收敛状态,而在第 7 次迭代结束后,最优个体适应度取值也满足了收敛要求。这表明该算法在达到最大迭代次数要求后,可以输出最优惩罚因子和核函数参数取值分别为 1、0.1,将这一取值结果代入到 SVM 干扰检测模型中,将模型性能调整到最优。

将 3 个场景下米波雷达探测目标信号包含的特征信息,依次输入基于 SVM 算法的检测模型中,就可以得出干扰检测结果。以部分频谱数据为例,结果表示该方法给出的检测结果与真实干扰情况一致。这表明在不同场景下,应用基于 SVM 算法和米波雷达的检测方法,可以实现对输电线塔通信电磁波干扰的准确检测。

在每个场景下针对 1 000 个样本完成检测后,绘制出图 7 所示的混淆矩阵,以此来体现大样本条件下该检测方法应用效果。

从图 7 可以看出,面向场景 1 中的 1 000 个样本,该方法给出的干扰检测结果仅出现 6 次错误,而面向场景 2 和场景 3 给出的检测结果,错误次数分别为 5 次和

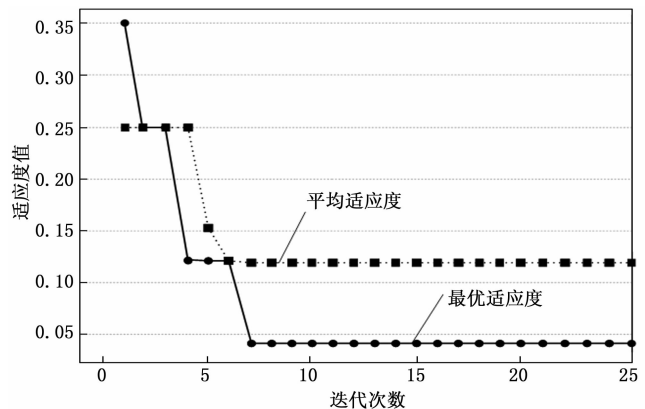


图 6 灰狼算法参数寻优适应度变化曲线

6 次。整体来看, SVM 算法和米波雷达的应用,可以较为准确地反映电磁波干扰情况,为输电线塔通信电磁波干扰抑制提供依据。

2.4 检测方法性能对比

基于 SVM 算法和米波雷达的干扰检测方法实验结束后,运用实验对照组的两种方法,分别对相同的实验数据进行干扰检测,统计各方法检测结果,并绘制出图 8 所示的 ROC 曲线,根据曲线围成面积确定 AUC 指标

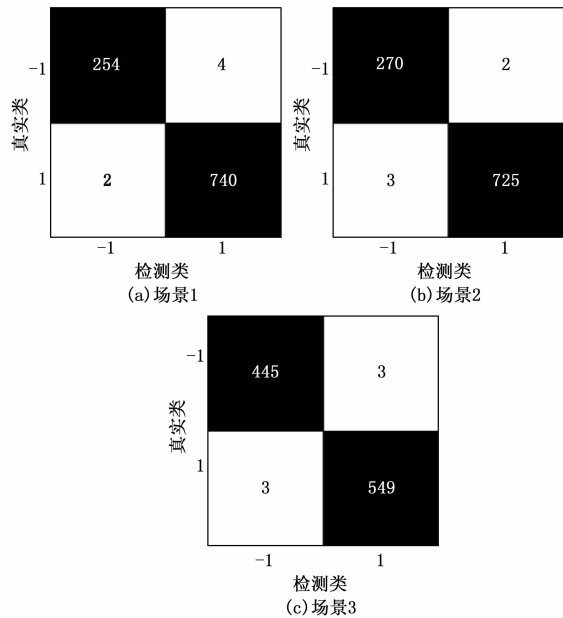


图 7 干扰检测结果混淆矩阵

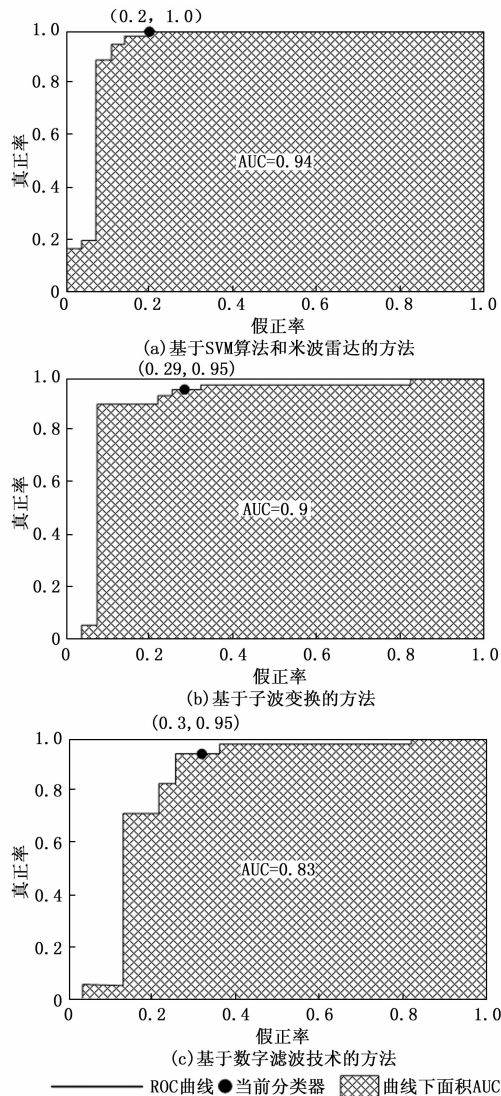


图 8 不同方法检测结果 ROC 曲线对比

值，运用该值体现检测方法所得结果的准确程度。

从图 8 可以看出，结合 SVM 算法和米波雷达的方法，所生成的电磁波干扰结果 AUC 值达到了 0.94，两外两种方法表现出的 AUC 值依次为 0.9 和 0.83。三者对比可以发现，创新探索出的干扰检测方法，使得检测结果 AUC 值提升了 4.3% 和 11.7%，这表明米波雷达技术的优越探测性能，与 SVM 算法的优越分类决策性能相配合，有利于提升电磁波干扰检测质量。

3 结束语

面向输电线塔通信电磁波干扰检测问题，提出融合机器学习与雷达探测技术的新方法。利用 SVM 算法构建分类函数，通过对大量历史数据的训练与学习，能够准确区分正常电磁信号与干扰信号，显著提升了检测的智能化水平。在检测过程中，米波雷达作为核心探测手段，凭借其高分辨率与强抗干扰能力，有效穿透复杂地形与障碍物，捕捉到输电线塔及其周边区域的精细电磁特征。通过精细的雷达信号处理与特征提取，进一步增强了干扰检测的精确性与实时性。综上所述，该方法的应用为电磁干扰治理与优化提供了科学依据，对保障电力传输安全与通信质量具有重要意义。

参考文献：

[1] 程佳敏, 李 亚, 朱贵富. 无人机远程通信高密度集成电磁干扰抑制技术 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (12): 96 - 100.

[2] 安 宁. 全光通信网络非线性突变频率干扰检测算法 [J]. 光通信研究, 2024 (3): 56 - 60.

[3] 赵翌博, 乔 钢, 刘淞佐, 等. 突发脉冲干扰下的白鲸哨声端点检测方法 [J]. 声学学报, 2024, 49 (3): 550 - 559.

[4] DANLU, YAQIANGYIN. Multi-parameter GNSS spoofing interference detection based on CS-C-SVM [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38 (6): 1325 - 1332.

[5] 王晓惠, 冯彩英. 基于子波变换的无线网络干扰信号检测研究 [J]. 激光与红外, 2022, 52 (6): 875 - 880.

[6] 魏 迪, 曾海彬, 洪 锋, 等. 基于 LSTM 网络和特征融合的通信干扰识别 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (4): 450 - 456.

[7] 张盛楠, 杨书华, 赵 巍. 基于数字滤波技术的激光通信干扰信号辨识研究 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (10): 153 - 156.

[8] 阳鹏飞, 何 羚, 王 茜, 等. 基于混合信号多域特征和 Transformer 的干扰识别 [J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46 (6): 2138 - 2145.

[9] 马 涛, 葛红舞, 孙圣武, 等. 面向电力线通信的干扰态检测及极化码设计 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学

- 版), 2023, 43 (4): 35-39.
- [10] 胡婉婉, 张劲东, 张 瑞, 等. 基于轻量化网络的干扰信号智能识别算法 [J]. 雷达科学与技术, 2023, 21 (2): 133-142.
- [11] 王 冠, 王 晖, 王金字, 等. 联合分形维数和奇异值熵的雷达干扰信号识别方法 [J]. 电子信息对抗技术, 2023, 38 (2): 14-20.
- [12] 董秀娟, 兰建平, 梁西银. 用于复杂环境的多径电子通信信号抗干扰仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (1): 218-222.
- [13] 穆巍炜, 何滨兵, 齐 尧, 等. 基于环形阵列的地面无人装备集群通信干扰抑制 [J]. 兵工学报, 2023, 44 (5): 1414-1421.
- [14] 李 芳, 熊 俊, 赵肖迪, 等. 基于快速强化学习的无线通信干扰规避策略 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (11): 3842-3849.
- [15] 李丽艳, 胡鸿豪, 王云兴. 电子通信非线性突变频率干扰检测与仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 471-475.
- [16] 冯 璐, 李长青, 李 炯, 等. 一种基于 IVA 的跳频通信抗跟踪干扰的联合盲源分离方法 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (11): 1790-1796.
- [17] 谭韶生, 夏 旭. 基于大数据优化神经网络的船舶通信网络干扰信息识别 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (上接第 96 页)
- 品厂进行维修, 还需对面向信号的测试系统进行深入的推广, 让各个成品厂全部按照面向信号标准进行测试设备的研发。
- 参考文献:**
- [1] 文永明, 余锋祥. 航空设备通用自动测试平台研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019 (4): 24-31.
- [2] 张 祯. 面向信号测试系统中信号组件及运行时技术的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [3] 刘金宁, 孟 晨, 赵锦成. 面向信号的自动测试系统软件模型研究 [J]. 测控技术, 2010, 29 (3): 63-66.
- [4] 李涛涛. 基于 ATML 的电子装备自动化测试技术及系统应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学 2025: 15-18.
- [5] 刘兆庆, 乔立岩. 基于 ATML 的分布式 ATS 架构研究 [J]. 宇航总体技术, 2018 (3): 38-45.
- [6] 李 慧, 曹广智. 面向信号的军用电台自动测试系统设计 [J]. 数字技术与应用, 2019, 37 (2): 174-175.
- [7] 赵志飞. 面向信号测试系统中复杂信号建模及运行时资源管理 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] 王怡苹, 李文海, 文天柱. 面向信号测试的路径搜索算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (7): 1650-1658.
- [9] 尚利宏, 谭 特, 周 密. 面向信号测试系统的多路信号路由算法研究 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (2): 135 (14): 133-136.
- [18] 蔡明辉, 刘 奇, 王 玥, 等. 射电天文台址常驻电磁干扰检测与识别方法 [J]. 天文学报, 2022, 63 (4): 8-19.
- [19] 周 文, 郝新红, 杨 瑾, 等. 基于多尺度色散熵与支持向量机的调频引信扫频干扰信号识别方法 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45 (6): 21-26.
- [20] 宋佰霖, 许 华, 齐子森, 等. 一种基于深度强化学习的协同通信干扰决策算法 [J]. 电子学报, 2022, 50 (6): 1301-1309.
- [21] 杨劲松, 唐孝舟, 李亚都, 等. 计及小信号水电机组监控设备电磁干扰检测方法 [J]. 中国农村水利水电, 2022, (12): 188-192.
- [22] 郑 雄, 杨晶晶, 张 彬, 等. 基于改进 YOLOv3 的 OFDM 信号中常见干扰的识别 [J]. 电子信息对抗技术, 2023, 38 (6): 9-16.
- [23] 刘明骞, 高晓腾, 李 明, 等. 空地协同场景下通信干扰智能识别方法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (3): 825-834.
- [24] 方明沅, 帖 翊. 同时同频全双工通信射频域自干扰盲辨识算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (2): 145-148.
- [25] 李佳浩, 杜子铭, 周 博, 等. 基于对抗互易点学习的无人机通信干扰干扰集识别方法 [J]. 信号处理, 2024, 40 (4): 639-649.
- 140.
- [10] 赵 鑫, 肖明清, 李继平. 面向信号的自动测试系统结构设计 [J]. 微计算机信息, 2010 (31): 14-15.
- [11] 王金龙, 徐煜华, 陈 瑾. 无线通信网络智能频谱协同与对抗 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50 (11): 1767-1778.
- [12] 刘宗杰, 杜 江, 陈 涛. 靶载雷达多功能测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (11): 223-227.
- [13] 田雪咏, 常天庆, 史少华. 基于多 Agent 的自动测试系统测试仪器模型设计 [J]. 自动化与仪表, 2011, 26 (4): 14-17.
- [14] 杨锁昌, 孟 晨, 冯振声. 面向信号的仪器驱动程序建模 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35 (8): 155-159.
- [15] 张仁辉. 基于虚拟仪器的远程信号源自动校准系统 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [16] 胡京徽, 吴 际, 孟 翰, 等. 面向机载设备自动化测试的信号模型 [J]. Computer Science, 2018, 45 (9): 94-98.
- [17] 肖 杰. 面向信号的自动测试系统中的仪器建模及控制功能实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [18] 戴豪民, 牛双诚, 张光轶, 等. 面向信号自动测试系统信号组件的设计 [J]. 现代电子技术, 2009, 32 (5): 60-62.