

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508203

# 基于目标极化特性的机载电力线探测系统\*

高伟亮<sup>1</sup> 李宝鹏<sup>1</sup> 彭海军<sup>1</sup> 伍政华<sup>2</sup> 郭维波<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学青岛校区 青岛 266041; 2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所 合肥 230088)

**摘要:** 电力线目标因其细长物理尺寸、小的电磁散射面积,在低空飞行器防撞探测中较难发现,严重制约着低空飞行器的飞行安全。采用传统的光学雷达、毫米波雷达和激光雷达等对电力线进行探测,受能见度、发射功率、大气环境等因素制约,存在探测距离有限、识别概率低、虚警率高等缺陷。针对这一问题,设计了一种双极化技术体制机载电力线探测系统,利用电力线对L波段电磁波水平极化和垂直极化差异化散射特性,提取电力线目标回波双极化幅值、极化倾角作为极化特征向量,与传统多普勒检测状态向量一起构建目标检测增广状态向量。使用支持向量机(SVM)与卷积神经网络构建级联分类器,提取电力线目标的显性和隐形特性,采用2 000组电力线目标真实探测数据对分类器进行训练,以提高复杂地杂波中电力线目标的识别准确率。经在田野环境和山区环境下的飞行试验表明,该电力线探测系统可在全天时、全天候工作,在1 500 m距离范围内,对电力线目标具有92%以上的正确识别概率,具有非常广的工程应用场景。

**关键词:** 低空飞行器;电力线防撞;探测系统;极化特性;L波段

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Airborne power line detection system based on target polarization characteristics

Gao Weiliang<sup>1</sup> Li Baopeng<sup>1</sup> Peng Haijun<sup>1</sup> Wu Zhenghua<sup>2</sup> Guo Weibo<sup>1</sup>

(1. Qingdao Branch of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China; 2. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 233088, China)

**Abstract:** Power line targets (high-voltage lines) are difficult to detect in low-altitude aircraft collision avoidance systems due to their slender physical dimensions and small electromagnetic scattering cross-section, which severely constrains flight safety. Conventional detection methods such as optical radar, millimeter-wave radar, and lidar are limited by factors like visibility, transmission power, and atmospheric conditions, resulting in restricted detection range, low recognition probability, and high false alarm rates. To address these issues, an airborne power line detection system based on a dual-polarization technical scheme is designed. This system utilizes the differential scattering characteristics of power lines under horizontal and vertical polarization in the L-band. It extracts the dual-polarization amplitude and polarization tilt angle from the power line echoes as polarization feature vectors, which are combined with traditional Doppler detection state vectors to form an augmented state vector for target detection. A cascaded classifier, employing support vector machines (SVM) and convolutional neural networks (CNN), is constructed to extract both explicit and implicit features of power line targets. The classifier is trained with 2 000 sets of real detection data to enhance the accurate recognition probability of power line targets in complex ground clutter. Flight tests conducted in field and mountainous environments demonstrate that the proposed power line detection system operates effectively all-weather and all-day, achieving a correct recognition probability of over 92% for power line targets within a range of 1 500 meters, which indicates broad potential for engineering applications

**Keywords:** low-altitude aircraft; power line anti-collision; detection system; polarization characteristics; L-band

## 0 引言

无人机、直升机等低空飞行器在军用及民用领域的应用发展迅速,山体、高层建筑、电力线等障碍物对低空飞行器的飞行安全造成的威胁也越来越大,因碰撞低空障碍物引发的飞行事故时有发生<sup>[1]</sup>。电力线因为其小物理尺寸和小电磁散射面积<sup>[2-3]</sup>,在特殊地理环境下无法用肉眼观察到,且探测技术手段受限,因此电力线是低空飞行器威胁较大的障碍物目标<sup>[4]</sup>。当前,很多低空飞行器都装载了电力线探测系统,此类系统主要有光学雷达、毫米波雷达、激光雷达<sup>[5-11]</sup>。光学雷达主要采用光学成像和图像识别算法探测电力线目标,优点是探测精度较高,能够精准测量弧垂、线间距离等关键参数,缺点是能见度对光学雷达的探测距离影响较大,严重时甚至会使光学雷达失效<sup>[12-14]</sup>,因此主要适用于没有浓雾、暴雨等能见度高的场景。毫米波雷达主要采用毫米波波段微波信号进行电力线探测,优点是小天线口径和窄波束特性使其具有较高的跟踪精度和横向分辨力,缺点是毫米波信号易受自身发射功率和大气损耗的影响,探测距离有限,且采用传统时域、频域特性进行探测识别,受复杂地杂波的影响较大,对电力线的探测的虚警率一直较高<sup>[15]</sup>,因此主要适用于探测距离在 200 m 以内且地面环境相对不复杂的场景。激光雷达主要通过发射激光束和接收反射光来探测电力线目标,主要优点是速度快效率高、探测精度高且部分激光可以穿透植被稀疏枝叶,能够探测被植被遮挡的电力线,主要缺点是设备昂贵、数据处理复杂且易受到太阳光照射线的干扰<sup>[16]</sup>,因此激光雷达主要适用于大范围快速测量且无强太阳光或其他强光源照射的场景。

针对以上电力线探测技术体制问题,本文从电力线的电磁波散射极化特性入手,设计了一种工作在 L 波段的基于目标双极化特性的机载电力线探测系统,不同于传统毫米波雷达采用单一垂直极化波探测,系统利用电力线水平极化波和垂直极化波的差异化响应特性,把电力线目标从复杂的地杂波中提取出来并借助于大数据样本,利用机器学习提取其他的辅助分类特征,从而大大降低了电力线目标探测虚警率,对电力线目标的识别正确概率达到了 92% 以上。探测距离优于传统单极化体制毫米波雷达(一般在 200 m 左右),可以在 1 500 m 内实现对电力线目标的探测。天气环境适应性方面,也优于光学雷达和激光雷达,可在全天时、全天候工作且不易受到干扰,在低空飞行器电力线探测识别领域具有较大的推广应用价值。

## 1 电力线极化特性

### 1.1 电磁波信号极化参数

假设一电磁波信号为平面波,平面波极化特性参数可以用极化椭圆来描述。如图 1 所示,极化椭圆长轴为  $2a$ ,短轴为  $2b$ 。 $E_{\alpha x}$  是信号水平极化强度大小, $E_{\alpha y}$  是信号垂直极化强度大小。 $\chi$  是椭圆率角,代表着信号的圆极化程度。 $\psi$  是极化倾角,代表信号的水平极化与垂直极化的差异化程度。

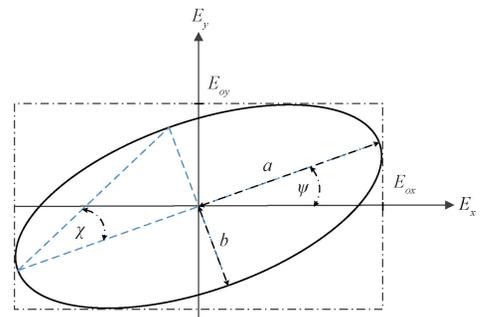


图 1 极化椭圆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarization ellipse

假设信号的水平极化信号初始相位为  $\varphi_x$ ,垂直极化信号初始相位为  $\varphi_y$ ,根据平面极化波的电场理论<sup>[17]</sup>,电场矢量可表示为:

$$|E(t)|^2 = E_x^2(t) + E_y^2(t) = E_{\alpha x}^2 \cos^2(\omega t + \varphi_x) + E_{\alpha y}^2 \cos^2(\omega t + \varphi_y) \quad (1)$$

令  $\theta = \omega t + \varphi_x$ ,  $\delta = \varphi_y - \varphi_x$ ,则有:

$$|E(t)|^2 = E_{\alpha x}^2 \cos^2 \theta + E_{\alpha y}^2 \cos^2(\theta + \delta) \quad (2)$$

对  $\theta$  求导得:

$$\frac{d|E(t)|^2}{d\theta} = -2E_{\alpha x}^2 \cos\theta \sin\theta - 2E_{\alpha y}^2 \cos(\theta + \delta) \sin(\theta + \delta) \quad (3)$$

求  $|E(t)|^2$  的极值点,则有:

$$-2E_{\alpha x}^2 \cos\theta \sin\theta - 2E_{\alpha y}^2 \cos(\theta + \delta) \sin(\theta + \delta) = 0 \quad (4)$$

整理可得:

$$E_{\alpha x}^2 \sin 2\theta + E_{\alpha y}^2 [\sin 2\theta \cos 2\delta + \cos 2\theta \sin 2\delta] = 0 \quad (5)$$

将上式展开得:

$$\sin 2\theta (E_{\alpha x}^2 + E_{\alpha y}^2 \cos 2\delta) + \cos 2\theta (E_{\alpha y}^2 \sin 2\delta) = 0 \quad (6)$$

整理可得:

$$\tan 2\theta = -\frac{E_{\alpha y}^2 \sin 2\delta}{E_{\alpha x}^2 + E_{\alpha y}^2 \cos 2\delta} \quad (7)$$

将  $\theta$  代入  $|E(t)|^2$  表达式即可得到  $a^2$  和  $b^2$ ,从而可以得到:

$$a^2 + b^2 = E_{ox}^2 + E_{oy}^2$$

$$a^2 - b^2 = \sqrt{(E_{ox}^2 - E_{oy}^2)^2 + (2E_{ox}E_{oy}\cos\delta)^2} \quad (8)$$

求极化倾角  $\psi$ ,  $\psi$  是椭圆长轴与  $x$  轴的夹角, 在长轴方向  $\theta$  处, 电场矢量的方向就是  $\psi$  的方向。利用式(7), 经过三角恒等变换, 最终可得到:

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{ox}E_{oy}\cos\delta}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \quad (9)$$

再求椭圆率角  $\chi$ , 由于  $\frac{b}{a} = |\tan\chi|$ , 符号由旋转方向  $\delta$  的符号确定, 再由  $a^2 + b^2$  与  $a^2 - b^2$  的表达式可求得:

$$\sin 2\chi = -\frac{2E_{ox}E_{oy}\sin\delta}{E_{ox}^2 + E_{oy}^2} \quad (10)$$

可用极化椭圆参数按照式(9)、(10)关系表示信号的极化特征。极化倾角  $\psi$  的物理意义是直接反映了电场矢量“最大振动方向”的空间取向, 而椭圆率角  $\chi$  的物理意义是定量刻画极化状态“偏离”直线或圆的程度。

电力线为典型的线状目标, 由电磁波极化理论<sup>[18]</sup>可知, 线状目标对水平极化信号的响应较强, 而对垂直极化信号的响应较弱, 而其他类型目标的这种差异化特性不明显<sup>[19-20]</sup>。因此, 传统单一的极化方式不利于电力线目标的检测, 可以利用电力线水平极化和垂直极化幅度与相位信息的差异型特点, 将电力线目标从其他目标中识别出来。线状目标的典型极化倾角  $\psi$  为  $0^\circ$  或  $180^\circ$ , 所以, 由式(3)通过测出水平和极化信号分量的幅值  $E_{ox}$  和  $E_{oy}$  以及两个分量之间的相位差  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$ , 即可测量目标的极化倾角和椭圆率角, 从而用于电力线的检测与识别。

### 1.2 电力线回波极化特性

图 2 所示为不同直径  $d$  的电力线, 不同波长  $\lambda$  下的水平极化与垂直极化方式下的回波响应情况, 当电磁波波长与电力线直径满足一定关系时, 电力线的水平极化与垂直极化响应差异化较大。可以看出, 频段越高, 水平极化和垂直极化之间差异性变小, 不利于导线目标的检测。而在低频段两种极化的差异响应较大, 利于电力线

检测。但如果频段太低, 雷达波束宽度大, 会导致雷达测角精度下降, 不利于高精度测角。所以作为一种均衡选择, 在工程实现上, 本文设计的机载电力线探测系统的工作频段为 L 波段, 以兼顾电力线的极化特性和高精度测量需求。

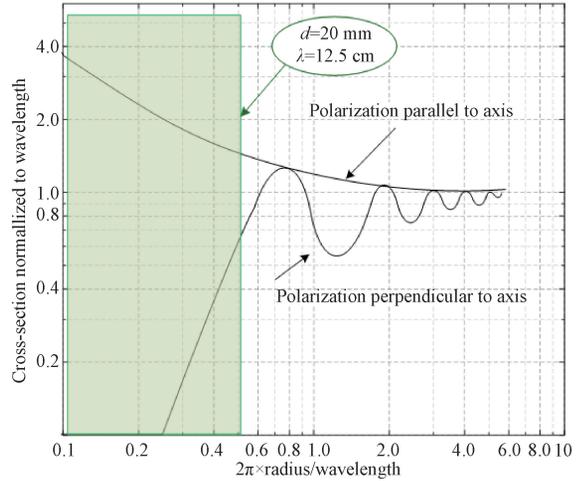


图 2 雷达频段、线缆直径和极化方式的关系

Fig. 2 The relationships among radar frequency band, wire diameter, and polarization mode

## 2 电力线探测系统设计

### 2.1 系统硬件设计

基于电力线目标回波水平极化和垂直极化的差异化响应特性, 通过双极化天线系统接收水平极化与垂直极化回波, 利用电力线水平极化回波强、垂直极化回波弱的特征, 将水平极化与垂直极化的幅度响应比值和极化倾角作为主要特性检测电力线目标。电力线探测系统硬件结构设计如图 3 所示, 主要由极化天线、射频处理模块、数字处理模块及显示终端 4 大模块组成。

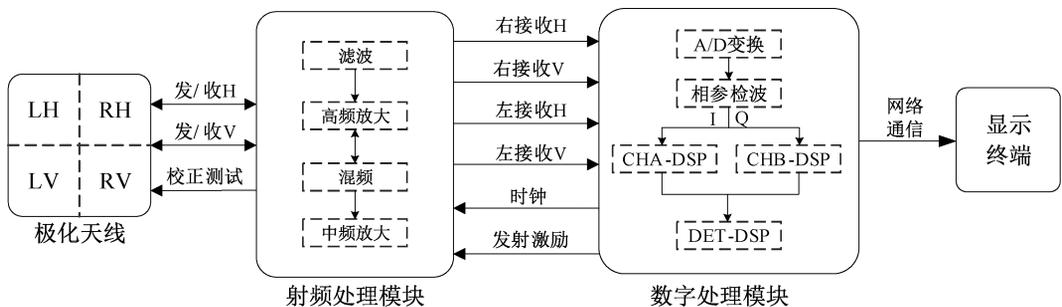


图 3 电力线探测系统组成框图

Fig. 3 Block diagram of the power line detection system

极化天线实物如图 4 所示,采用水平极化、垂直极化相结合的双极化天线体制,发射时由一对双极化天线合成发射圆极化信号,接收时分为左水平极化(left horizontal, LH)、左垂直极化(left vertical, LV)、右水平极化(right horizontal, RH)、右垂直极化(right vertical, RV)4 个单元独立接收。



图 4 极化天线模块

Fig. 4 Polarized antenna module

射频处理模块实物如图 5 所示,射频处理模块与天线接口如图 6 所示,在激励信号和时钟信号的辅助下,对极化天线输入的 4 个通道极化信号进行滤波,筛选出目标回波信号,对其进行低噪声高频放大和下变频处理,把高频信号变为中频信号,由中频放大器对信号进行放大后,输送给数字处理模块。



图 5 射频处理模块

Fig. 5 Radio frequency processing module

数字处理模块实物图如图 7 所示,数字处理模块是系统的信号处理与数据处理的核心模块。信号处理主要完成对 4 个接收通道的信号进行 A/D 变换和数字相参检波,提取目标回波的 I/Q 幅度与相位信息。四路信号中的 LH、LV 通道两路数据送至 CHA-DSP 处理器, RH、RV 通道两路数据送至 CHB-DSP 处理器,同步进行匹配滤波、相参积累、求模、恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)检测等信号处理。两路 CHA-DSP、CHB-DSP 输出的数据,在 DET(detect estimate transform)-DSP 处理器中



图 6 射频处理模块与天线接口

Fig. 6 Radio frequency processing module and antenna interface

进行信号合成并完成数据处理,实现目标自动识别和航迹跟踪。目标的探测识别信息与航迹信息,经过网络通信送显示终端显示,如图 8 所示。

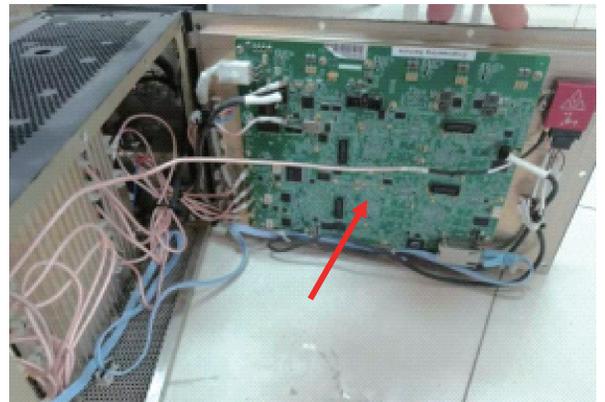


图 7 数字处理模块

Fig. 7 Digital processing module

## 2.2 系统软件设计

电力线探测系统软件是以输出带有准确目标属性信息、位置信息的电力线地图为最终目的,软件系统设计包含了基于极化响应差异的高概率检测、基于数据库和机器学习技术的虚警抑制、高精度干涉测角以及基于图形学的地图重构。系统数据流如图 9 所示,雷达在接收到多通道极化回波数据后,经过检测、虚警抑制等操作后,获得了带有属性信息的导线点迹信息,而且点迹信息同时带有位置信息,结合地图重构数据和位置信息,可以获得包含属性、距离、方位、置信度、经纬度等信息的电力线地图数据。

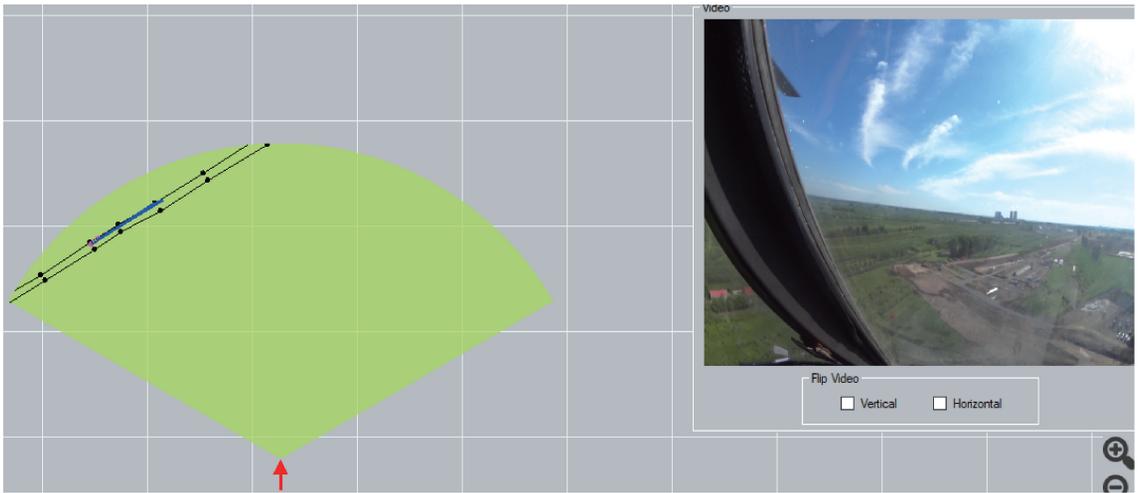


图 8 电力线探测显示画面

Fig. 8 Power line detection display screen

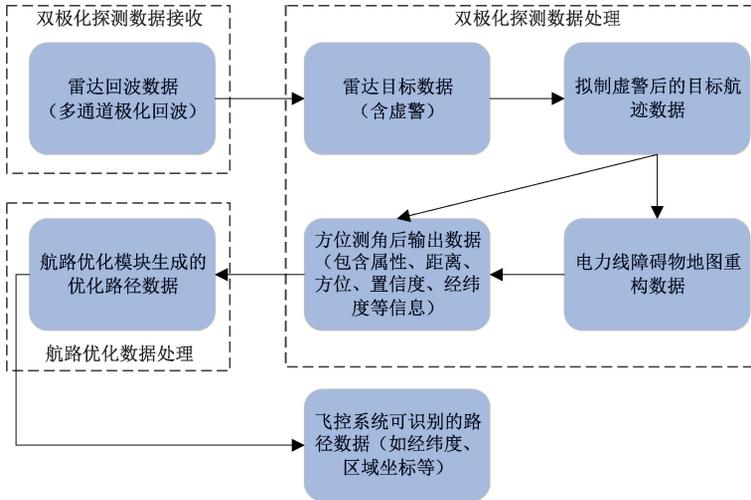


图 9 软件系统数据流

Fig. 9 Data flow of the software system

### 3 关键技术分析

#### 3.1 机器学习自动识别技术

传统单极化体制探测系统, 可以获取目标的距离  $d$ 、方位  $\theta$ 、速度  $v$  信息, 这些参数可构成状态向量  $S_{kinematic} = [d, \theta, v]$ 。由于电力线和地杂波都是静止的, 两者对于载机的多普勒频移相似, 无法从多普勒维从地杂波中提取电力线目标。所以  $S_{kinematic}$  只能用于目标运动状态跟踪, 不能用于电力线目标识别。利用电力线水平极化和垂直极化特征响应差异, 构建电力线目标的极化特征向量  $S_{feature} = [a_H, a_V, \psi]$ 。其中,  $a_H$  是目标水平极化回波幅值,  $a_V$  是目标垂直极化回波幅值,  $\psi$  是目标回波

极化倾角。定义  $\psi$  小于  $30^\circ$  和大于  $150^\circ$  的目标为电力线目标。构建由状态向量和特征向量组成的增广状态向量  $S = [S_{kinematic}, S_{feature}]$ , 用于基于极化差异特征的电力线目标跟踪与识别。以增广状态向量  $S$  为基础, 进行基于大数据机器学习电力线识别与跟踪数据处理, 原理如图 10 所示。

##### 1) 数据预处理

将极化回波原始数据进行预处理。首先进行无效数据剔除处理, 去除回波起始阶段没有目标的部分, 以及部分雷达工作间隙没有回波的部分; 其次去噪声干扰处理, 采用 CFAR 检测方法通过目标运动轨迹、及回波强度特征, 去除噪声和干扰目标。最后对实测数据进行线性插值, 以对齐时间, 方便以固定时间数据的方式进行网络

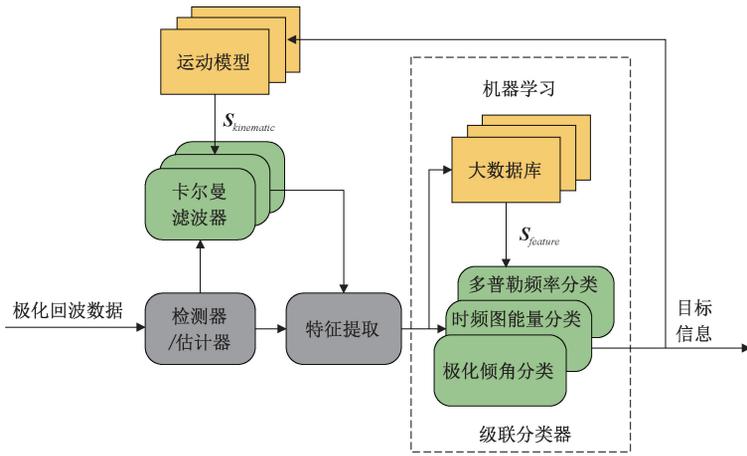


图 10 基于多为特征向量的电力线自动识别原理

Fig. 10 Schematic diagram of automatic power line recognition based on multi-feature vectors

训练。

### 2) 特征提取

通过农田、山区场景下电力线目标的数据,获取目标的基本状态向量  $S_{kinematic}$  和极化特征向量  $S_{feature}$ 。

### c) 构建级联分类器

级联分类器由多个强分类器组成,主要包含多普勒频率分类器、时频图能量分类器、极化倾角分类器、隐形分类器,每个分类器负责排除一部分非电力线目标。

### 4) 机器学习训练

机器学习训练算法流程如图 11 所示。采用支持向量机<sup>[21]</sup>(support vector machines, SVM)学习训练电力线目标回波的多普勒频率、时频图能量、极化倾角 3 种显形特性。采用卷积神经网络学习训练电力线的隐形特性,卷积神经网络采用 4 层结构,激活函数采用 Leaky ReLU 函数,以确保神经网络对电力线的非线性特征进行拟合,并允许训练过程中使用反向传播,提高计算效率。然后将 3 种显形特性与隐形特性再次通过全连接网络模型进行学习训练以提高识别的准确概率。当用 2 000 组测试数据对机器学习模型进行测试,识别概率达到 95% 以上时,则机器训练结束。

### 5) 目标跟踪处理

利用训练好的机器学习模型正确识别出真实的电力线目标,将识别结果反馈给运动模型,利用卡尔曼滤波器对目标进行更加精确的跟踪。

## 3.2 虚警率抑制技术

对于电力线检测系统来说,居高不下的虚警率是阻碍其走向实装的最大阻力,这是因为传统的雷达对于电力线这类特殊目标没有作特殊的信号和数据处理,不能将电力线目标和其余目标包括杂波引起的虚假目标和其他类型障碍物目标区分开来。而本文系统从 6 个维度的特征向量空间用于电力线目标的分类识别,通过多维极

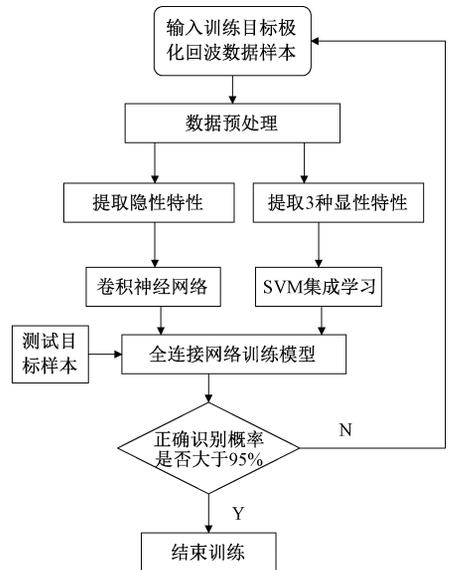


图 11 机器学习自动识别算法流程

Fig. 11 Machine learning automatically recognizes the algorithm process

化信息区分电力线目标、其他类型目标以及杂波引起的虚假目标,图 12、13 所示分别为从农田和山区环境下采集到的 2 000 个样本数据的电力线与虚警在多个极化维度上的特征分布。可以看出在水平极化通道幅值、垂直极化通道幅值和极化倾角组成一个三维空间中,电力线目标和非电力线目标在该空间中形成了明显的分界线,区分非常明显。

## 3.3 电力线地图重构技术

经过检测和跟踪后,虽然电力线目标的虚警率很低,但只获得了目标的航迹点,并未对电力线的走向做出判别。基于图形学的电力线地图重构,就是在稳定跟踪的

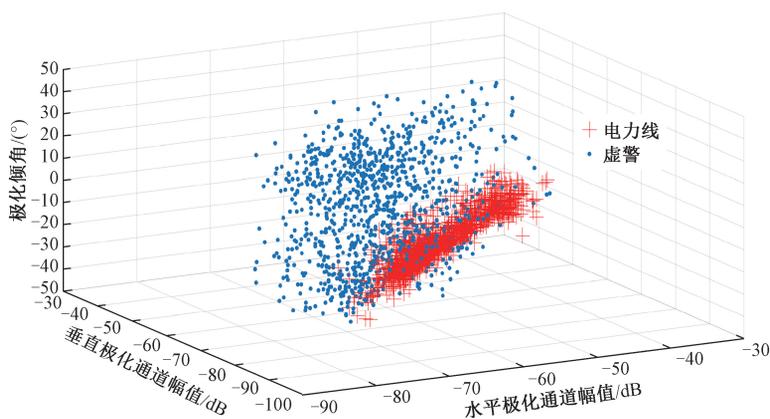


图 12 农田环境下,电力线与虚警在多个极化维度上的特征分布

Fig. 12 The characteristic distribution of power lines and false alarms in multiple polarization dimensions under the farmland environment

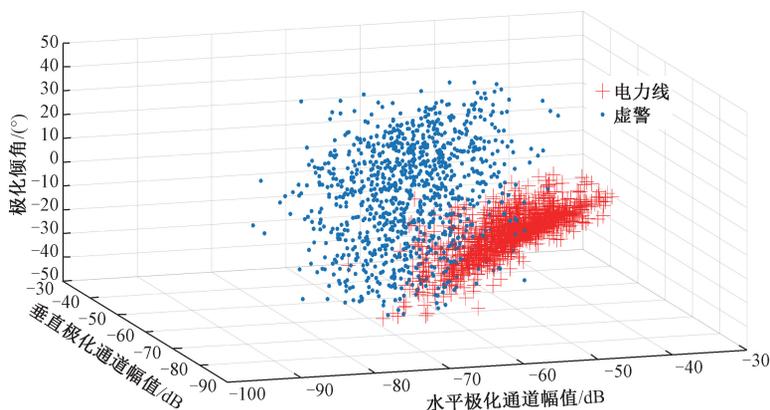


图 13 山区环境下,电力线与虚警在多个极化维度上的特征分布

Fig. 13 The characteristic distribution of power lines and false alarms in multiple polarization dimensions under the mountainous area environment

航迹点基础上,将相关的航迹点利用逻辑关系和图形学原理连成线,获得相应的电力线走向图,这不仅可以进一步将不能关联上的虚警点去除,还能为巡检无人机的航路再规划提供精确的电力线地图,从而能引导线路搜索系统搜索出更安全的飞行线路。如图 14 所示,在提取感兴趣区域后,将会对该区域新增电力线检测点与缓存中的电力线地图进行关联,并根据一定的几何规则判断新增点是否属于符合电力线的走向,从而判定是否延长电力线长度或新增一条电力线,更或者是作为虚警点剔除。获得电力线重构地图后,可将输出的数据转化为巡检无人机航路优化算法可识别的数据格式,为路径优化提供数据支撑。

#### 4 试验数据分析

本文利用中国飞龙通用航空有限公司一架 AS350B2

直升机进行电力线探测系统试验,如图 15 所示,雷达天线安装于一长支架上,雷达机箱固定于后排座位下面, GPS 天线吸附于驾驶台前面。雷达天线与机箱之间的射频线缆沿支架绕行至后舱,到达位于后排座位下的机箱。此外,在前挡风玻璃上安装一个自带 GPS 信息的索尼摄像机,用于实时同步记录飞行视频<sup>[18]</sup>。

首先,建立了飞行试验区域内的真实电力线地图,在飞行数据分析中通过经纬度的对比就可以从雷达回波数据中很容易获得真实电力线目标的检测点,其次,在农田、山区自然环境下对电力线目标分别进行了探测识别测试实验。试验场地选在哈尔滨某地,在飞行前,技术人员要与直升机飞行员进行充分沟通,明确此次试验的目的和飞行方法,规定飞行角度、飞行高度、飞行速度等。因为长时间的记录数据不利于试飞后的数据分析,要求跟飞的技术人员明确开始和结束记录数据的距离点。最终确定,试验中飞行角度在与电力线垂直方向的 $\pm 30^\circ$ 范

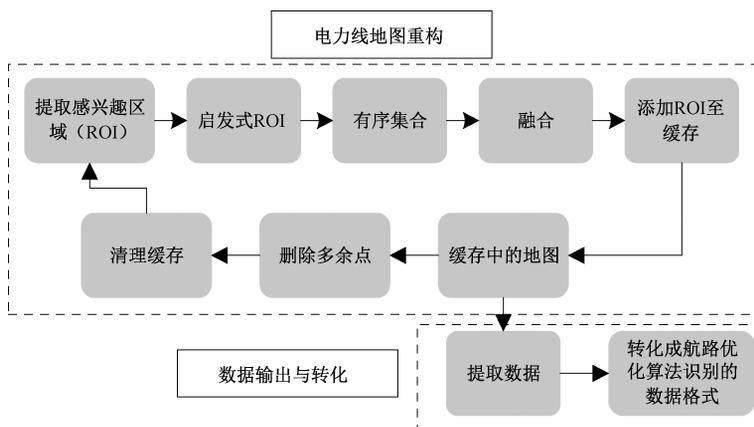


图 14 基于图形学的电力线地图重构流程

Fig. 14 The process of power line map reconstruction based on graphics



图 15 电力线探测系统安装布局

Fig. 15 Installation layout diagram of the power line detection system

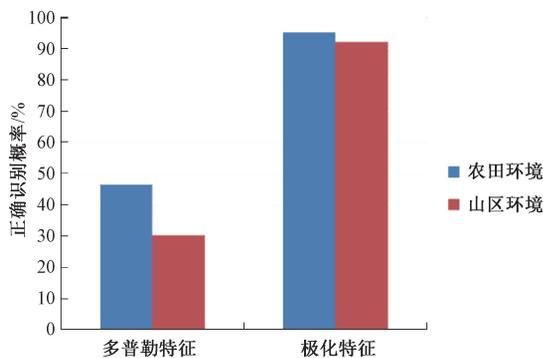


图 16 不同方法识别概率

Fig. 16 Recognition probabilities of different methods

围内最佳、飞行高度 30~80 m, 距离电力线水平方向探测距离 0~2 000 m, 飞行径向速度 25~35 m/s, 技术人员在距离电力线 2.5 km 处开始记录数据, 当直升机飞越电力线时结束数据记录。分别选用农田环境和山区环境下的 2 000 组数据作为机器学习训练样本, 分别采用农田环境和山区环境下 500 组数据作为测试样本, 利用极化特征识别方法进行探测识别, 同时对比利用传统的水平极化多普勒特征进行识别。水平极化多普勒特征识别和双极化差异特征识别正确概率如图 16 所示, 利用本文系统极化特征自动识别方法, 农田环境下对电力线目标的识别正确概率为 95.2%, 对山区环境下对电力线目标的识别正确概率为 92.1%。而利用传统多普勒特征的识别, 对电力线目标的识别正确概率较低, 农田环境下仅为 46.5%, 山区环境下为仅 30.2%。

通过载机所在位置信息和电力线的真实位置信息,

计算电力线距离和方位角的真实值。统计分析 240 个数据帧电力线方位角真实值和系统测角值的均方根误差 (RMSE), 以及电力线距离真实值和系统测距值的均方根误差。如图 17 所示, 经过统计分析, 电力线目标测角平均误差为 1.91°, 探测距离平均误差为 1.01 m。

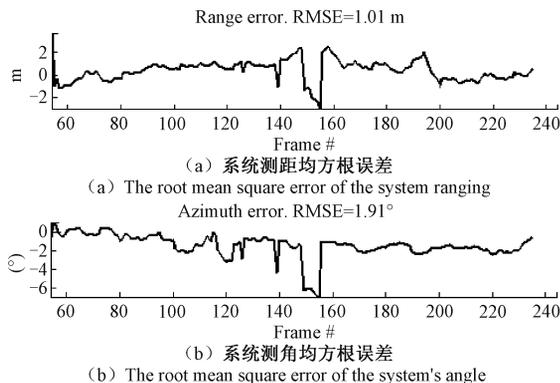


图 17 系统测量误差

Fig. 17 System measurement error

## 5 结 论

本文设计了一种利用电磁散射极化特性的机载电力线探测系统,利用电力线水平极化和垂直极化差异化响应特性,同时,采用大数据机器学习技术,利用运动特性与极化特性进行级联分类精确识别,可以将电力线从强地杂波中很好的识别出来。飞行试验表明,在农田和山区环境下,系统对电力线的正确识别概率均超过了 90%,对目标的距离探测均方跟误差在 1 m 左右,方位探测均方跟误差为小于 2°,可以在 1 500 m 内实现对电力线的探测,远远超出了毫米波雷达以水平极化方式对电力线的探测距离(一般在 200 m 左右),探测效果优于传统单极化体制毫米波雷达,天气环境适应性方面,也优于光学传感器识别雷达,系统在低空飞行器电力线探测识别领域具有较大的推广应用价值。

## 参考文献

- [ 1 ] 李义慎. 直升机防撞线系统电力线位置和相对速度探测方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.  
LI Y SH. Research on power line position and relative velocity detection methods for helicopter wire strike avoidance systems [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [ 2 ] 陈春风,李聘,陈昌年. 一种基于直升机毫米波雷达的高压线 RCS 快速计算方法[J]. 航空科学技术,2023,34(9):94-99.  
CHEN CH F, LI D, CHEN CH N. A fast calculation method for high-voltage wire RCS based on helicopter millimeter-wave radar [ J ]. Aviation Science and Technology, 2023, 34(9): 94-99.
- [ 3 ] 王家秀. 直升机载毫米波防撞系统技术研究[D]. 南京:南京理工大,2011.  
WANG J X. Research on helicopter-borne millimeter-wave wire strike avoidance system technology [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.
- [ 4 ] 肖艳平,潘建,黄波. 直升机高压线防撞处理研究综述[J]. 民航管理,2019(6):82-83.  
XIAO Y P, PAN J, HUANG B. A Review of helicopter high-voltage wire strike avoidance processing [ J ]. Civil Aviation Management, 2019 ( 6 ): 82-83.
- [ 5 ] 孙伟,贾若. 直升机防撞线主动预警系统[J]. 电子技术与软件工程,2018(21):76.  
SUN W, JIA R. Helicopter wire strike active warning system [ J ]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(21): 76.
- [ 6 ] 李静锴. 直升机机载毫米波雷达高压线防撞处理[J].

- 中国科技信息,2024(10):49-50.  
LI J K. Helicopter-borne millimeter-wave radar high-voltage wire strike avoidance processing [ J ]. China Science and Technology Information, 2024 ( 10 ): 49-50.
- [ 7 ] 朱佩佩. 一种直升机避障电力线检测方法[J]. 电讯技术,2022,62(3):342-347.  
ZHU P P. A power line detection method for helicopter obstacle avoidance [ J ]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(3): 342-347.
- [ 8 ] 张关应,束云豪,赵宇嘉,等. 红外与可见光图像特征引导融合的电力线检测方法[J]. 应用科技,2024,51(5):66-72.  
ZHANG G Y, SHU Y H, ZHAO Y J, et al. Power line detection method using feature-guided fusion of infrared and visible images [ J ]. Applied Science and Technology, 2024, 51(5): 66-72.
- [ 9 ] 卫青春,杨晓亮,赵华敏. 直升机防撞系统的电力线检测方法[J]. 无线电工程,2012,42(12):36-38,50.  
WEI Q CH, YANG X L, ZHAO H M. Power line detection method for helicopter wire strike avoidance systems [ J ]. Radio Engineering, 2012, 42(12): 36-38,50.
- [ 10 ] 张明,唐尧,景雄. 直升机载毫米波雷达高压线防撞处理研究[J]. 火控雷达技术,2016,45(2):7-11.  
ZHANG M, TANG Y, JING X. Research on helicopter-borne millimeter-wave radar high-voltage wire strike avoidance processing [ J ]. Fire Control Radar Technology, 2016, 45(2): 7-11.
- [ 11 ] 张烁,卞红伟,苏生. 基于 LSD 算法的无人机航空影像电力线检测方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2024,47(S1):341-344.  
ZHANG SH, BIAN H W, SU SH. Research on power line detection method from UAV aerial images based on LSD algorithm [ J ]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2024, 47(S1): 341-344.
- [ 12 ] 陈熙源,戈明明,姚志婷,等. 雨雪天气下的激光雷达滤波算法研究[J]. 仪器仪表学报,2023,44(7):172-181.  
CHEN X Y, GE M M, YAO ZH T, et al. Research on LiDAR filtering algorithm under rain and snow weather conditions [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 172-181.
- [ 13 ] 杨坚,李剑,徐硕. 基于改进 SegNet 的电力线自动检测方法[J]. 浙江电力,2023,42(6):112-118.  
YANG J, LI J, XU SH. An automatic power line detection method based on improved SegNet [ J ]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 112-118.
- [ 14 ] 叶树芬,施振华,苏成悦,等. 基于 YOLOv5 的电力线和杆塔实时检测算法研究[J]. 计算机测量与控制,

2022,30(11):77-84.

YE SH F, SHI ZH H, SU CH Y, et al. Research on real-time detection algorithm for power lines and towers based on YOLOv5 [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(11): 77-84.

- [15] 王士龙. 浅谈直升机防撞雷达现状与技术发展[J]. 现代雷达, 2024, 46(5): 9-12.

WANG SH L. Discussion on the status and technological development of helicopter wire strike avoidance radar[J]. Modern Radar, 2024, 46(5): 9-12.

- [16] 王汉顺. 一种基于无人机 LiDAR 点云的电力线快速提取方法[J]. 测绘标准化, 2024, 40(1): 166-170.

WANG H SH. A rapid power line extraction method based on UAV LiDAR point cloud[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2024, 40(1): 166-170.

- [17] 杨儒贵. 电磁场与电磁波 [M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 189-193.

YANG R G. Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves [M]. 3rd Ed. Beijing: Higher Education Press, 2019: 189-193.

- [18] WANG L, WANG J, TANG H, et al. Design and research of broadband electromagnetic wave polarization conversion and beam steering metasurfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(7): 0722003.

- [19] YUAN L, WU Q, ZHANG K, et al. Near-zero-loss arbitrary polarization conversion with non-orthogonal metasurfaces [J]. Nature Communications, 2024, 15: 7147.

- [20] 伍政华, 郭峰, 盛匀, 等. 基于雷达回波极化特征的电力线识别方法[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(1): 63-68.

WU ZH H, GUO F, SHENG Y, et al. Power line recognition method based on radar echo polarization characteristics [J]. Radar Science and Technology, 2020, 18(1): 63-68.

- [21] 苏斌, 侯思祖, 郭威. 基于图像融合和双通道卷积神经网络的配电网故障选线方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(9): 54-66.

SU B, HOU S Z, GUO W. Research on distribution network fault line selection method based on image fusion and dual-channel convolutional neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(9): 54-66.

## 作者简介



**高伟亮**, 2002 年于海军航空工程学院获得学士学位, 2005 年于海军航空工程学院获得硕士学位, 2009 年于海军航空工程学院获得博士学位, 现为海军航空大学青岛校区副教授, 主要研究方向为雷达目标检测。

E-mail: 49964200@qq.com

**Gao Weiliang** received his B. Sc. degree from the Naval Aeronautical Engineering Academy in 2002, M. Sc. degree from the Naval Aeronautical Engineering Academy in 2005, and Ph. D. degree from the Naval Aeronautical Engineering Academy in 2009. He is now an associate professor at Qingdao Campus of the Naval Aviation University. His main research interest includes radar target detection.



**李宝鹏** (通信作者), 2008 年于空军航空大学获得学士学位, 2010 年于空军航空大学获得硕士学位, 现为海军航空大学青岛校区副教授, 主要研究方向为雷达极化信号处理。

E-mail: 843901165@qq.com

**Li Baopeng** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the Air Force Aviation University in 2008 and M. Sc. degree from the Air Force Aviation University in 2010. He is now an associate professor at Qingdao Campus of the Naval Aviation University. His main research interest includes radar polarization signal processing.