

非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标检测方法

柯旭, 莫文静, 陈典, 裴昌凡

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610000)

摘要: 机载雷达实际应用环境呈现出非均匀特性, 导致杂波抑制效果差, 高空微弱动目标误检率高; 为此, 开展非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标检测方法研究; 基于多普勒补偿改进空时自适应处理(STAP)算法抑制雷达回波信号中的非均匀环境杂波, 基于带通滤波器对雷达回波信号进行滤波处理, 提取雷达回波信号微多普勒特征, 构建特征向量; 并以构建的信号特征向量为输入, 基于支持向量机(SVM)建立高空微弱动目标检测模型, 自适应设置检测门限, 获得高空微弱动目标检测结果; 实验结果表明: 所提方法应用后, 非均匀环境杂波最大幅值仅为 0.04 dB, 有效降低了杂波对目标检测的干扰, 高空微弱动目标误检率最小值达到 0.1%, 降低了误检情况的发生概率, 为非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标的精准检测提供有效的解决方案。

关键词: 机载雷达; 动目标检测; 杂波抑制; 特征提取与增强; 非均匀环境; 高空微弱动目标

Detection Method of High-altitude Weak Moving Targets for Airborne Radars in Non-uniform Environments

KE Xu, MO Wenjing, CHEN Dian, PEI Changfan

(Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., AVIC, Chengdu 610000, China)

Abstract: Airborne radars have non-uniform characteristics in actual application environments, resulting in poor clutter suppression effect and high false detection rate for high-altitude weak moving targets. Therefore, research is conducted on high-altitude weak moving target detection methods for airborne radars in non-uniform environments. The improved space-time adaptive processing (STAP) algorithm based on Doppler compensation is used to suppress non-uniform environmental clutter in radar echo signals. The radar echo signals are filtered using a bandpass filter to extract micro Doppler features and construct feature vectors; And taking the constructed signal feature vector as an input, a high-altitude weak moving target detection model based on support vector machine (SVM) is established, adaptively setting the detection threshold to obtain the high-altitude weak moving target detection result. Experimental results show that after the application of the proposed method, the maximum amplitude of clutter in non-uniform environments is only 0.04 dB, effectively reducing the interference of clutter on target detection. The minimum false detection rate of high-altitude weak moving targets reaches 0.1%, reducing the probability of false detection while providing an effective solution for accurate detection of high-altitude weak moving targets for airborne radars in non-uniform environments.

Keywords: airborne radar; moving target detection; clutter suppression; feature extraction and enhancement; non-uniform environment; high-altitude weak moving target

0 引言

机载雷达是现代航空探测系统的关键技术装备, 在民用与军事领域中发挥着至关重要的作用。其中, 在民

用领域, 机载雷达可以对飞机飞行状态和位置进行实时监测, 为空中交通管制提供充足的依据支撑, 避免飞机碰撞事故的发生^[1]。与此同时, 机载雷达还可获取云层内部相关信息, 为灾害预警、气象预报等提供数据支

收稿日期:2025-07-18; 修回日期:2025-09-17。

作者简介:柯旭(1989-),男,博士研究生。

引用格式:柯旭,莫文静,陈典,等.非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标检测方法[J].计算机测量与控制,2026,34(7):27-34.

持。在军事领域,机载雷达可通过远距离目标探测、识别与跟踪,为飞行员提供战场态势及其相关信息,帮助飞行员作出正确的决策。此外,机载雷达还能够侦察和监视海上区域,及时发现敌方舰艇的动向,为海军作战提供重要的情报支持。但是,在机载雷达实际应用中,环境呈现非均匀特性,例如干扰、杂波、恶劣天气环境等,致使雷达回波信噪比较低,为目标检测造成了较大困难,尤其是高空微弱动目标检测^[2]。由于高空微弱目标反射面积小、距离远,导致其雷达回波极其微弱,极易淹没在杂波、背景噪声中,从而引发高空微弱动目标漏检问题。由此可见,如何设计一种高效的、精准的非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标检测方法,对于机载雷达技术的后续发展具有一定的现实意义^[3]。

从当前的研究成果分析,现有方法在处理高空微弱动目标检测任务时,存在杂波抑制失效、特征提取与增强性能欠佳等问题,导致现有方法难以获取精准的高空微弱动目标检测结果,从而对机载雷达技术的进一步发展与应用形成了制约。对此,许多学者进行了相关研究,例如,文献[4]针对水下目标探测中正交频分复用信号,提出高速微弱目标相参积累算法。在多脉冲积累过程中,由于目标机动导致相位变化大,且水下信噪比低使相参积累增益不足,使得相参积累增益难以达到理想水平。该算法借助分数阶傅里叶变换估计目标运动参数并进行补偿,再结合 Keystone 变换,实现多脉冲相参积累。然而,此算法过度依赖分数阶傅里叶变换和 Keystone 变换,导致计算复杂度大幅增加,对硬件计算能力提出了极为严格的要求,限制在实际应用中的实时处理能力;文献[5]提出基于优化长短时记忆网络(LSTM)的检测方法,运用麻雀搜索算法对 LSTM 模型参数进行优化,旨在提高预测精度、降低检测门限,并结合 LSTM 单步预测,利用预测误差从强海杂波背景中检测微弱信号。但在实际应用过程中,麻雀搜索算法在优化 LSTM 参数时,可能陷入局部最优解,导致模型参数并非全局最优,从而影响预测精度和目标检测性能;文献[6]针对近岸浑浊水体激光探测回波信噪比低、探测距离近问题,基于积分雷达方程,仿真研究激光接收天线长度、轴距对接收能量的影响,设计非同轴探测方案,进行目标探测实验。但是,双通道光学接收系统的设计较为复杂,增加了系统的成本和体积,影响在一些小型或空间要求严格的应用场景中的使用,进而降低该方法的普遍适用性;文献[7]提出基于流形滤波的检测方法,将雷达回波信号建立高维流形表示,把目标检测转化为流形上两点区分问题,同时在流形空间对杂波加权滤波,降低非均匀杂波能量,提高功率估计精度,改善检测性能。但是,该方法先将距离单元脉冲串回波建模为托普利兹正定矩阵,构成矩阵流形,通

过聚类分解非均匀杂波数据,估计几何中心后进行加权滤波。但流形滤波方法对数据的质量和完整性要求极高,需要建立准确的高维流形表示。若数据存在缺失或噪声干扰过大,可能导致流形结构不准确,影响杂波滤波和目标检测效果;文献[8]提出基于 Prewitt 算子和 Radon 变换的检测算法,该算法首先分析多脉冲积累的跨距离单元走动及 Radon 变换受噪声干扰问题,然后利用 Prewitt 算子卷积抑制噪声并保留回波能量,再使用 Radon 变换沿距离单元走动斜线进行能量积累。然而, Prewitt 算子对噪声的抑制效果有限,对于一些强噪声环境,可能无法完全消除噪声干扰,进而影响后续的能量积累和目标检测。为了解决上述问题,本文提出非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标检测方法研究,实现更精准、高效的高空微弱动目标检测。

1 非均匀环境杂波抑制

在机载雷达高空微弱动目标检测方法设计与应用过程中,非均匀环境杂波的干扰是影响其性能的关键因素之一。非均匀环境杂波在时间和空间上呈现不均匀特性,且具有复杂的统计特性,主要包括气象杂波、复杂地物杂波等。传统空时自适应处理算法(STAP)在处理非均匀环境杂波时面临几个关键瓶颈:一是其依赖于全局均匀的杂波协方差矩阵估计,在非均匀环境中难以准确建模杂波统计特性,导致自适应权值计算偏差;二是对训练样本的数量和质量要求较高,非均匀环境中样本代表性不足,易出现协方差矩阵估计误差,进而影响杂波抑制性能;三是计算复杂度高,难以满足实时处理需求,尤其在非均匀杂波环境中,需更多样本和更高维度处理,进一步加剧计算负担^[9]。为准确提取高空微弱动目标雷达回波信号特征,本文采用多普勒补偿法对传统空时自适应处理算法(STAP)进行改进与优化,进而得到改进后的降维空时自适应处理算法(STAP)。该改进算法通过引入多普勒补偿机制,有效校正非均匀杂波的多普勒频移,使其在角度-多普勒域中更加集中,从而提升杂波协方差矩阵的估计精度;同时,通过降维处理和局域联合划分,显著降低计算复杂度,并增强算法对非均匀杂波空间变化的适应能力,使其能更精准地匹配非均匀杂波的局部统计特性,从而提高杂波抑制的准确性和鲁棒性。基于降维空时自适应处理的改进算法(STAP)非均匀环境杂波抑制流程如下所示。

步骤一:机载雷达在飞行过程中,按照设定的天线扫描方式与脉冲重复频率,采集不同方位单元、距离单元与俯仰单元的雷达回波数据,其构成了时空二维数据矩阵 $X = \{x_n(k)\}_{N \times K}$ ^[10]。其中, N 代表雷达天线的阵元总数, K 代表在一个相干处理间隔内的最大脉冲数。

步骤二:依据非均匀环境杂波特性与实际杂波抑制

需求,对雷达回波数据 $x_n(k)$ 进行多普勒补偿,表达式为:

$$x_n^c(k) = x_n(k) \cdot e^{-j2\pi f_{d,n}kT_r} \quad (1)$$

式中, $x_n^c(k)$ 代表多普勒补偿后的雷达回波数据; j 代表随机常数,取值范围为 $[0, 1]$; $f_{d,n}$ 代表第 n 个阵元对应的非均匀环境杂波多普勒频率; T_r 代表脉冲重复周期。

雷达回波数据经过多普勒补偿后转换为角度-多普勒域的数据矩阵 $\mathbf{X}^c = \{x_n^c(k)\}_{N \times K}$, 选择部分角度-多普勒单元构成降维后的雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_d$ (维度为 $M \times L$)^[11]。其中, M 满足 $M < NK$ 条件, L 代表选中的角度-多普勒单元数量。

步骤三:以步骤二输出的降维雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_d$ 为基础,计算其协方差矩阵,表达式为:

$$\hat{\mathbf{R}}_d = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}_{d,l} \mathbf{X}_{d,l}^H \quad (2)$$

式中, $\hat{\mathbf{R}}_d$ 代表降维雷达回波数据矩阵的协方差矩阵; $\mathbf{X}_{d,l}$ 代表降维雷达回波数据矩阵的第 l 个数据向量,其维度为 $M \times 1$; $\mathbf{X}_{d,l}^H$ 代表 $\mathbf{X}_{d,l}$ 的共轭转置。

为提升非均匀环境杂波抑制效果,采用局域联合处理法将降维雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_d$ 划分为 $P \times Q$ 个局域 (P 代表方位局域数, Q 代表多普勒局域数),每个局域包含一定数量的阵元 (N_s) 和脉冲 (K_s)。需要注意的是,局域的划分根据非均匀环境杂波特性与实际高空微弱动目标检测需求进行优化,例如在非均匀环境杂波强度变化较大的区域划分更小的局域,以此来提高雷达回波信号的处理精度^[12]。在每个局域内,构建局域的雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_{\text{local}}$ (维度为 $N_s K_s \times 1$),依据公式(2)计算局域雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_{\text{local}}$ 的协方差矩阵,表达式为:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{local}} = \frac{1}{L_{\text{local}}} \sum_{l=1}^{L_{\text{local}}} \mathbf{X}_{\text{local},l} \mathbf{X}_{\text{local},l}^H \quad (3)$$

式中, $\hat{\mathbf{R}}_{\text{local}}$ 代表局域雷达回波数据矩阵的协方差矩阵; L_{local} 代表局域内的样本数量; $\mathbf{X}_{\text{local},l}$ 代表局域雷达回波数据矩阵的第 l 个数据向量; $\mathbf{X}_{\text{local},l}^H$ 代表 $\mathbf{X}_{\text{local},l}$ 的共轭转置。

降维雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_d$ 经过局域联合处理后,通过减少每个局域内的自由度,降低非均匀环境杂波抑制的运算复杂度,同时在一定程度上适应非均匀环境的变化。

步骤四:以步骤三计算获得的局域雷达回波数据矩阵的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{local}}$ 为依据,并联合局域目标信号导向矢量,确定局域最优权值向量^[13],计算公式为:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{local}} = \frac{(\hat{\mathbf{R}}_{\text{local}})^{-1} \mathbf{S}_{\text{local}}}{\mathbf{S}_{\text{local}}^H (\hat{\mathbf{R}}_{\text{local}})^{-1} \mathbf{S}_{\text{local}}} \quad (4)$$

式中, $\boldsymbol{\omega}_{\text{local}}$ 代表局域最优权值向量; $\mathbf{S}_{\text{local}}$ 代表局域目标

信号导向矢量; $\mathbf{S}_{\text{local}}^H$ 代表 $\mathbf{S}_{\text{local}}$ 的共轭转置。

步骤五:将局域雷达回波数据矩阵 $\mathbf{X}_{\text{local}}$ 与对应的权值向量 $\boldsymbol{\omega}_{\text{local}}$ 相乘,即可得到非均匀环境杂波抑制后的雷达回波数据,表达式为:

$$y_n(k) = \boldsymbol{\omega}_{\text{local}}^H \mathbf{X}_{\text{local}} \quad (5)$$

式中, $y_n(k)$ 代表非均匀环境杂波抑制后的雷达回波数据,其矩阵形式记为 $\mathbf{Y} = \{y_n(k)\}$; $\boldsymbol{\omega}_{\text{local}}^H$ 代表 $\boldsymbol{\omega}_{\text{local}}$ 的共轭转置。

上述过程在引入并应用降维空时自适应处理算法(STAP)(改进算法)的基础上,完成了高空微弱动目标雷达回波数据中非均匀环境杂波的有效抑制,有效提升了雷达回波数据的信噪比,为后续高空微弱动目标雷达回波信号特征提取提供了质量更优的雷达回波信号支持。

2 高空微弱动目标雷达回波信号特征提取

基于多普勒补偿法对传统空时自适应处理算法(STAP)实施改进与优化,可达成对高空微弱动目标雷达回波数据中非均匀环境杂波的有效抑制。非均匀环境杂波的抑制使得雷达回波数据中的信号与噪声功率比得以优化,即信噪比得到提升。在此基础上,开展对高空微弱动目标雷达回波信号特征的提取。通过对信号特征的提取,能够获取目标在速度、加速度等方面的关键信息,为构建高效的目标检测模型提供基础数据,进而保障对高空微弱动目标的精准检测。然而,高空微弱动目标雷达回波信号十分微弱,即便已经通过改进 STAP 算法抑制非均匀环境杂波,其内部仍包含大量的噪声干扰,如机载雷达设备振动噪声、电磁干扰噪声等,这些噪声对高空微弱动目标检测造成较大的干扰。因此,本文基于带通滤波器对高空微弱动目标雷达回波信号进行滤波处理,带通滤波器的中心频率通常依据目标预期多普勒频率范围设定,带宽则需兼顾目标运动变化范围与噪声抑制需求,一般通过雷达系统参数,如波长、脉冲重复频率等及如速度范围等目标先验运动信息综合确定;为保证滤波后信号不失真,滤波器应具有足够平坦的通带和适当的过渡带,通常采用线性相位 FIR 滤波器结构,避免群延迟引起的波形畸变,并通过频域仿真与实测数据反复验证,确保在有效抑制带外噪声的同时,保留目标信号的时频结构与调制信息。通过设置带通滤波器的参数,滤除信号中的高频和低频噪声,达到目标信号增强的目的^[14]。与此同时,提取高空微弱动目标雷达回波信号的微多普勒特征,能够反映目标微小运动特性的重要信息,并为高空微弱动目标检测提供关键依据。

设定带通滤波器的传递函数为 $h(f)$, 输入高空微

弱动目标雷达回波信号为 $y_n(k)$ ，其经过傅里叶变换得到频域信号 $\hat{Y}(f)$ ，则滤波处理后的高空微弱动目标雷达回波信号（频域表示）为：

$$\begin{cases} Z(f) = h(f)\hat{Y}(f) \\ \hat{Y}(f) = \int y_n(k)e^{-i\omega t} dt \end{cases} \quad (6)$$

式中， $Z(f)$ 代表滤波处理后的高空微弱动目标雷达回波信号（频域表示）； f 代表多普勒频率； i 代表虚数单位。

通过逆傅里叶变换获得高空微弱动目标雷达回波信号的时域表示，计算公式为：

$$z(t) = \frac{1}{2\pi} \int Z(f)e^{i\omega t} df \quad (7)$$

式中， $z(t)$ 代表滤波处理后的高空微弱动目标雷达回波信号（时域表示）。

对于高空微弱动目标来说，由于目标部件的微小运动、目标的姿态变化、目标的内部运动等产生了附加的多普勒频率调制现象，从而引发微多普勒效应，形成微多普勒特征，使其成为高空微弱动目标检测的关键依据^[15]。微多普勒频率计算公式为：

$$\tilde{f} = \frac{2v_m}{\lambda} \quad (8)$$

式中， $\tilde{f}$ 代表微多普勒频率； v_m 代表目标微小运动引起的径向速度分量； λ 代表雷达波长。

本文通过短时傅里叶变换算法（STFT）对高空微弱动目标雷达回波信号 $z(t)$ 进行时频分析。STFT 的窗函数选择 Hamming 窗，其主瓣宽度和旁瓣抑制之间具有良好的平衡，有利于减少频谱泄漏；窗长设置为 256 个采样点，该长度能够在时间分辨率和频率分辨率之间取得较好折衷，以适应高空微弱动目标微多普勒调制变化的动态范围；重叠点数设置为窗长的 75%，以平滑时频谱图并减少时间轴上的信息丢失。这些参数可确保生成的时频谱图既能清晰呈现微多普勒调制结构的时变细节，又能有效抑制噪声干扰，为后续特征提取提供高保真度的时频表示。通过时频分析获取高空微弱动目标雷达回波信号的时频谱图后，对其进行归一化处理，将时频谱图中的每个时频点的幅度值归一化到一定数值区间内，以此来消除不同目标信号强度对特征提取的影响，表达式为：

$$\begin{cases} g(t, \tilde{f}) = \int z(t)W(\tau-t)e^{-j2\pi\tilde{f}\tau} d\tau \\ \hat{g}(t, \tilde{f}) = \frac{g(t, \tilde{f}) - \min[g(t, \tilde{f})]}{\max[g(t, \tilde{f})] - \min[g(t, \tilde{f})]} \end{cases} \quad (9)$$

式中， $g(t, \tilde{f})$ 代表高空微弱动目标雷达回波信号的时频谱图； $W(\tau-t)$ 代表窗函数； τ 代表时延； $\hat{g}(t, \tilde{f})$ 代表归一化处理后的时频谱图； $\min[g(t, \tilde{f})]$ 与 $\max[g(t, \tilde{f})]$

代表时频谱图 $g(t, \tilde{f})$ 的最小幅度值和最大幅度值。

以上述时频分析获得的时频谱图 $\hat{g}(t, \tilde{f})$ 为基础，提取高空微弱动目标雷达回波信号的微多普勒特征——微多普勒频率最大幅值、微多普勒频率平均幅值、微多普勒频率幅值标准差、微多普勒频率最大值、微多普勒频率平均值与微多普勒调制周期^[16]。其中，微多普勒频率最大幅值、微多普勒频率平均幅值与微多普勒频率幅值标准差属于微多普勒频率幅度特征，提取公式为：

$$\begin{cases} A_{\max}(t) = \max_{\tilde{f}} \hat{g}(t, \tilde{f}) \\ \bar{A}(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T A(t) \\ \sigma_A = \sqrt{\frac{1}{T-1} \sum_{t=0}^T [A(t) - \bar{A}(t)]^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中， $A_{\max}(t)$ 代表微多普勒频率最大幅值； $\bar{A}(t)$ 代表微多普勒频率平均幅值，反映了微多普勒频率幅度的整体水平； T 代表观测时间段内的采样点数； $A(t)$ 代表时间 t 对应的微多普勒频率幅值； σ_A 代表微多普勒频率幅值标准差，体现了微多普勒频率幅度随时间变化的波动程度。

微多普勒频率最大值与微多普勒频率平均值属于微多普勒频率范围特征，描述了目标在运动过程中产生的微多普勒信号在频率轴上的分布范围，其能够反映目标运动部件的运动速度、振动幅度等信息^[17]。在时频谱图 $\hat{g}(t, \tilde{f})$ 中找到幅度大于某一阈值 θ 的频率点，将满足 $\hat{g}(t, \tilde{f}) > \theta$ 的最小频率记为 $\tilde{f}_{\text{start}}$ ，将满足 $\hat{g}(t, \tilde{f}) > \theta$ 的最大频率记为 $\tilde{f}_{\text{end}}$ ，方便后续范围特征提取的说明。微多普勒频率范围特征提取公式为：

$$\begin{cases} B_{\max} = \max_t [\tilde{f}_{\text{end}} - \tilde{f}_{\text{start}}] \\ \bar{B} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \tilde{f}_{\text{end}} - \tilde{f}_{\text{start}} \end{cases} \quad (11)$$

式中， $B_{\max}$ 代表微多普勒频率最大值，其反映了在整个观测时间段内，微多普勒信号在频率轴上的最大分布跨度； $\tilde{f}_{\text{end}} - \tilde{f}_{\text{start}}$ 代表微多普勒频率范围； $\bar{B}$ 代表微多普勒频率平均值，反映了微多普勒频率范围的整体大小。

微多普勒调制周期反映了目标运动部件的周期性运动特性，例如振动目标的振动周期、旋转目标的旋转周期等。为提取微多普勒调制周期特征，沿时间轴对时频谱图 $\hat{g}(t, \tilde{f})$ 进行积分处理，得到时间—幅度曲线 $A(t)$ ，并对其进行自相关分析，表达式为：

$$R(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \sum_{t=0}^{T-\tau-1} A(t)A(t+\tau) \quad (12)$$

式中， $R(\tau)$ 代表自相关函数，描述时间—幅度曲线 $A(t)$ 在不同时延下的相似程度。

在自相关函数 $R(\tau)$ 中寻找除 $\tau = 0$ 外的第一个峰值点对应的时延 τ_{peak} ，其即为微多普勒调制周期，公式为：

$$T_{\text{mod}} = \tau_{\text{peak}} \quad (13)$$

式中, T_{mod} 代表微多普勒调制周期, 反映了目标运动部件的周期性运动特性。

上述过程完成了高空微弱目标雷达回波信号的特征多普勒特征提取, 对其进行整合处理, 获得特征向量 $\mathbf{I} = \{A_{\text{max}}(t), \bar{A}(t), \sigma_A, B_{\text{max}}, \bar{B}, T_{\text{mod}}\}$, 为后续高空微弱目标检测提供重要依据支持, 其流程如图1所示。

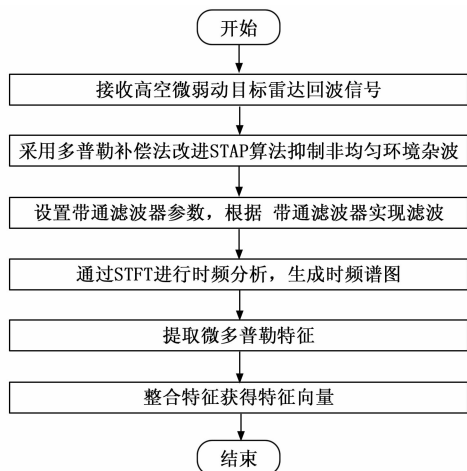


图1 雷达回波信号特征提取流程图

3 高空微弱目标检测

在完成上述高空微弱目标雷达回波信号特征提取工作的基础上, 为进一步提升高空微弱目标检测的性能, 实现更精准、更鲁棒的检测结果, 开展高空微弱目标检测。具体而言, 以高空微弱目标雷达回波信号特征向量 $\mathbf{I} = \{A_{\text{max}}(t), \bar{A}(t), \sigma_A, B_{\text{max}}, \bar{B}, T_{\text{mod}}\}$ 为依据, 基于支持向量机 (SVM) 构建高空微弱目标检测模型, 并对其检测门限进行自适应设置, 从而获得精准的高空微弱目标检测结果。

支持向量机 (SVM) 本质上是一种监督学习算法, 在高维特征空间中具有优秀的分类性能, 适用于高空微弱目标检测问题^[18]。基于支持向量机 (SVM) 的高空微弱目标检测模型应用过程如下所示。

1) 输入层:

接收高空微弱目标雷达回波信号特征向量 $\mathbf{I} = \{A_{\text{max}}(t), \bar{A}(t), \sigma_A, B_{\text{max}}, \bar{B}, T_{\text{mod}}\}$;

2) 特征映射层:

通过核函数 $\varphi(\cdot)$ 将输入特征向量 $\mathbf{I}$ 映射到高维特征空间, 使得在原始空间中线性不可分的样本在新空间中线性可分, 表达式为:

$$\varphi(\mathbf{I}) = \exp(\gamma \|\mathbf{I} - \mathbf{I}_j\|^2) \quad (14)$$

式中, $\varphi(\mathbf{I})$ 代表径向基核函数; γ 代表控制核函数宽度的超参数; $\|\mathbf{I} - \mathbf{I}_j\|^2$ 代表两者之间的欧式距离; $\mathbf{I}_j$ 代表特征向量样本。

3) 决策层:

在高维特征空间中构建最优分类超平面, 确定高空微弱目标检测的决策函数, 表达式为:

$$\zeta(\mathbf{I}) = \mathbf{v}^T \cdot \varphi(\mathbf{I}) + b \quad (15)$$

式中, $\zeta(\mathbf{I})$ 代表决策函数; $\mathbf{v}$ 代表权重向量, 表示超平面的法向量方向; b 代表偏置项, 决定超平面的位置。为求解最优权重向量 $\mathbf{v}$ 和偏置项 b , 本文采用序列最小优化 (SMO) 算法。SMO 算法通过迭代方式每次选择两个拉格朗日乘子进行优化, 并固定其他乘子, 通过解析求解子问题来更新参数。具体迭代流程包括: 1) 启发式选择违反 KKT 条件最严重的两个乘子作为优化对; 2) 解析计算这两个乘子的最优更新值, 并修剪以满足约束条件; 3) 更新对应的权重和偏置项。该过程迭代至所有乘子均满足 KKT 条件或达到最大迭代次数为止。通过将大优化问题分解为多个小优化问题, SMO 能高效收敛且避免局部最优, 从而保证获得的分类超平面接近全局最优解。

接下来, 使用 sigmoid 函数将决策函数输出 $\zeta(\mathbf{I})$ 映射为概率估计, 实现目标存在概率的量化表示, 表达式为:

$$P(\mathbf{I}) = \frac{1}{1 + \exp[\alpha \zeta(\mathbf{I}) + \beta]} \quad (16)$$

式中, $P(\mathbf{I})$ 代表高空微弱目标存在概率估计结果, 取值范围为 $0 \sim 1$; α 与 β 代表 sigmoid 参数, 通过最大似然估计从训练数据中学习得到。

传统方法主要依赖于恒虚警率检测器, 通过统计分析设置固定门限来区分目标和噪声。但是, 在高空微弱目标检测任务中, 固定门限存在微弱目标检测能力不足、非均匀环境适应性差、多目标场景性能下降、特征向量利用不充分、参数设置主观性强等缺陷, 进而影响高空微弱目标检测精度^[19]。因此, 设置自适应门限, 表达式为:

$$\eta = \operatorname{argmin} |P_{\text{fa}} - \hat{P}_{\text{fa}}| \quad (17)$$

式中, η 代表自适应门限; P_{fa} 代表虚警概率, 即目标误检概率; $\hat{P}_{\text{fa}}$ 代表期望虚警概率。

在实际高空微弱目标检测过程中, 由于非均匀环境的不断变化, 再加上高空微弱目标的不断运动, 自适应门限也需要进行动态更新。采用滑动窗口对自适应门限进行动态更新, 表达式为:

$$\eta_i = (1 - \mu) \cdot \eta_{i-1} + \mu \cdot \eta'_i \quad (18)$$

式中, η_i 代表自适应门限动态更新结果; η'_i 代表基于当前窗口数据计算的新门限值; μ 代表平滑因子, 取值范围为 $[0, 1]$, 具体取值依据实际检测场景中环境非均匀性程度与目标动态特性进行调整。在环境相对稳定、目标运动缓慢的场景中, 平滑因子应较大, 可选其在

0.8~0.95 之间,以提高门限稳定性并抑制瞬态噪声干扰;在环境急剧变化或目标机动性强的场景中,应选择较小的平滑因子,可选其在 0.1~0.6 之间,以加快门限更新速度,增强检测器对变化的响应能力,一般情况下可选择其在 0.6~0.8 之间。

以高空微弱动目标存在概率估计结果 $P(I)$ 与当前时刻自适应门限 η_i 为依据,制定高空微弱动目标检测规则,具体如下式所示:

$$\begin{cases} P(I) \geq \eta_i & \text{高空微弱动目标} \\ P(I) < \eta_i & \text{非高空微弱动目标} \end{cases} \quad (19)$$

综合上述设计,在非均匀环境杂波抑制背景下,实现机载雷达高空微弱动目标有效检测设计,其流程如图 2 所示。

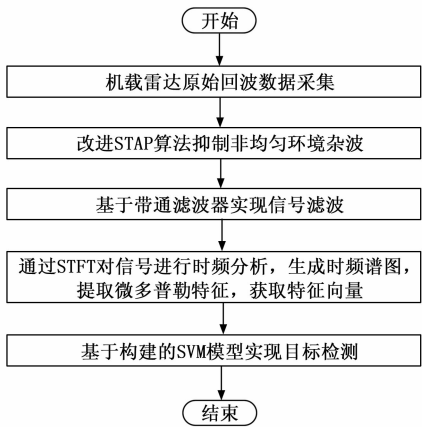


图 2 机载雷达高空微弱动目标检测流程图

4 应用性能测试

4.1 机载雷达系统准备

为验证所提方法的先进性,开展实验研究。本文在实验进行前对机载雷达系统进行准备,选取合适的硬件设备,并对基础参数进行合理的配置。与此同时,设计机载雷达系统架构与核心模块接口,方便后续实验的顺利进行。

机载雷达系统硬件选型、参数配置情况如表 1 所示。

机载雷达系统采用“感知—处理—决策”三级架构,其中,感知层主要包括天线阵列、发射机与接收机;处理层主要包括信号处理器与数据存储单元;决策层主要包括任务调度模块与高空微弱动目标检测模块。核心模块接口设计情况如下所示。

- 1) 天线—发射机接口: VPX 6U 背板总线,数据传输速率约为 10 Gbps (双向);
- 2) 接收机—处理器接口: Aurora 8 B/10 B,数据传输速率约为 8 Gbps (单向);
- 3) 处理器—存储接口: PCIe Gen4 x16,数据传输

表 1 机载雷达系统硬件选型与参数配置表

硬件名称	型号	核心参数
发射机	XT-8000	峰值功率:8 kW;脉冲宽度:0.5~10 μ s;频率稳定性: ± 1 ppm;杂散抑制: ≥ 75 dBc
接收机	RDR-2000	瞬时带宽:500 MHz;动态范围:110 dB;采样率:1.2 GSPS;噪声系数:2.8 dB
天线阵列	AESA-128T	阵元数量:128 $\times$ 128;波束宽度:0.3 $^{\circ}$ $\times$ 0.5 $^{\circ}$;增益:42 dBi
信号处理器	DSP-X6	浮点运算能力:4TFLOPS;内存带宽:256 GB/s
数据存储单元	SSD-R	容量:16 TB;写入速度:3.2 GB/s
电源	PMU-3000	输入电压范围:28 VDC $\pm$ 15%;转换效率:94%
惯性导航单元	IMU-9000	姿态精度:0.01 $^{\circ}$;角速度量程: $\pm 300^{\circ}$ /s;加速度计量程: ± 20 g

速率约为 64 GB/s (双向);

4) 跨模块同步接口: IRIG—B 时间码,数据传输速率约为 1 Mbps;

5) 任务控制接口: Ethernet 10GBase-T,数据传输速率约为 10 Gbps。

机载雷达系统应用场景如图 3 所示。

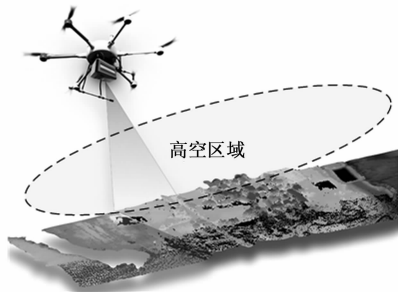


图 3 机载雷达系统应用场景示例图

4.2 高空微弱动目标检测模型训练

本次实验基于支持向量机 (SVM) 构建了高空微弱动目标检测模型,为保障本文方法在实验过程中性能的稳定性,需对高空微弱动目标检测模型进行训练,具体流程如下所示。

步骤一:准备各种高空微弱动目标的特征向量 $\{I_j, j=1, 2, \dots, M\}$, M 代表样本的总数量;

步骤二:初始化高空微弱动目标检测模型权重向量 v 和偏置项 b 为零向量和零值。与此同时,对核函数参数 γ 、sigmoid 参数 α 与 β 也进行初始化处理;

步骤三:采用 SMO 算法求解二次规划问题,逐步优化权重向量 v 和偏置项 b 。需要注意的是,在每次迭代训练中,固定其他参数,通过解析方法求解两个变量 v 与 b 的优化子问题,表达式为:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} v^T v + \phi \sum_{j=1}^M \xi_j \\ \text{s. t. } r_j[v^T \cdot \varphi(I_j) + b] \geq 1 - \xi_j \end{cases} \quad (20)$$

式中, ϕ 代表正则化参数; ξ_j 代表松弛变量; r_j 代表第 j 个样本的标签, 即高空微弱动目标 (+1) 或者非高空微弱动目标 (-1)。

步骤四: 将步骤三求解的最优权重向量 v 和偏置项 b 输入至高空微弱动目标检测模型中, 通过验证数据集对其进行测试, 若高空微弱动目标检测准确率大于或者等于阈值 φ , 表明高空微弱动目标检测模型训练完成, 反之, 转至步骤三继续进行迭代训练。

4.3 通用数据集可行性验证

为客观评估本文方法在非均匀环境下的基本性能, 选用 Koopman-BES 雷达公开数据集、Gotcha 公共数据集与自建高空场景雷达回波数据集进行测试。通过测试, 得到结果如表 2 所示。

表 2 通用数据集验证结果对比

数据集	杂波抑制后 平均幅值/ dB	目标检测 准确率 /%	目标检测 误检率/ %
Koopman-BES 雷达公开数据集	0.06	99.24	0.76
Gotcha 公共数据集	0.07	99.15	0.85
自建高空场景雷达回波数据集	0.03	99.65	0.35

如表 2 所示, 所提方法可在不同特性的非均匀杂波环境中保持稳定的高性能表现, 实现优异的杂波抑制效果与目标准确识别能力。具体而言, 在 3 个数据集上, 杂波抑制后残余杂波平均幅值均低于 0.07 dB, 同时目标准确检测率均高于 99.1%, 误检率均低于 0.9%。这充分证明了本文方法所采用的多普勒补偿与降维 STAP 处理策略具有强大的泛化性和鲁棒性, 能够有效适应不同来源和统计特性的非均匀杂波环境, 满足高空微弱动目标检测对高精度、低虚警的核心要求, 具备了投入实际工程应用的基本功能性与可靠性。

4.4 非均匀环境杂波抑制效果分析

应用本文方法、对比方法 1 (基于 FrFT-Keystone 运动补偿的高空微弱动目标检测方法) 与对比方法 2 (基于优化长短时记忆网络的高空微弱动目标检测方法) 对雷达回波信号中的非均匀环境杂波进行抑制处理, 具体如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 本文方法应用后, 非均匀环境杂波抑制效果显著, 最大幅值仅为 0.04 dB; 对比方法 1 应用后, 非均匀环境杂波幅值呈现大幅下降趋势, 但是最大幅值依然较高, 达到了 0.7 dB; 对比方法 2 应用后, 非均匀环境杂波幅值明显降低, 但是最大幅值仍然非常高, 达到了 0.5 dB。通过数据对比分析可知: 本

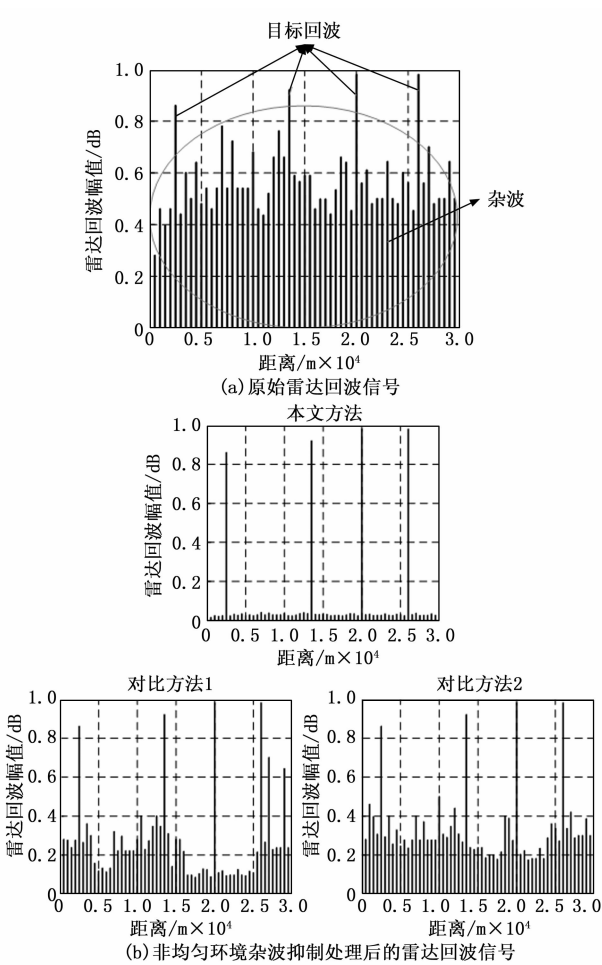


图 4 非均匀环境杂波抑制结果示意图

文方法的非均匀环境杂波抑制效果更好, 这是因为本文方法基于多普勒补偿法对传统空时自适应处理算法 (STAP) 进行改进与优化, 获得了降维空时自适应处理算法 (STAP)。传统 STAP 算法在非均匀环境下, 因空时协方差矩阵估计偏差导致杂波抑制性能急剧下降。本文方法通过多普勒补偿法的引入, 对杂波多普勒频移进行动态建模与补偿, 从而解决了多普勒频移失配、协方差矩阵污染等问题, 从而显著提升协方差矩阵估计的鲁棒性, 进而突破了传统 STAP 的局限性。与此同时, 降维 STAP 架构也有效地平衡了算法的复杂度与性能, 使得本文方法在保障非均匀环境杂波抑制效果的基础上, 大幅度地提升了非均匀环境杂波抑制的效率。

4.5 高空微弱动目标检测误检率对比分析

基于采集的数据集应用本文方法、对比方法 1 与对比方法 2 进行高空微弱动目标检测实验, 通过高空微弱动目标误检率分析应用方法的高空微弱动目标检测性能, 如图 5 所示。

相较于对比方法 1 与对比方法 2 来看, 本文方法高

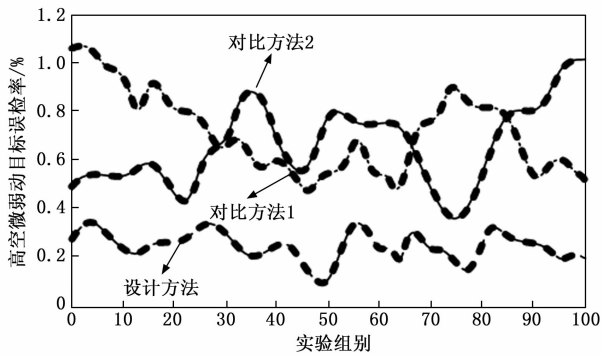


图 5 高空微弱动目标误检率示意图

高空微弱动目标误检率显著较低,最小值达到 0.1%。这是因为本文方法基于支持向量机 (SVM) 构建高空微弱动目标检测模型,而支持向量机 (SVM) 具备较强的分类性能,并且稳定性极强,能够为高空微弱动目标检测提供可靠的支撑。与此同时,本文方法设置了自适应检测门限,并对其进行动态更新与调整,使高空微弱动目标检测模型更加适应非均匀环境,从而提高高空微弱动目标检测的精度,即有效降低了本文方法的高空微弱动目标误检率。

5 结束语

机载雷达作为现代航空探测系统的核心传感器,在多个核心领域得到了广泛的应用,例如民用领域、军事领域等。但是,随着机载雷达技术应用的不断深入,其面临的问题与挑战也愈加严峻,尤其是非均匀环境下高空微弱动目标检测任务。由于高空微弱动目标雷达散射截面积积极低,致使雷达回波信号极其微弱,再加之目标运动速度较慢,多普勒频移不明显,使得传统检测方法难以奏效。与此同时,非均匀环境也会进一步恶化雷达信号的信噪比,进而影响高空微弱动目标检测性能。由此可见,如何在低信噪比、强杂波的非均匀环境下实现高空微弱动目标的可靠检测,已经成为机载雷达应用领域亟待解决的核心问题之一,故提出非均匀环境下机载雷达高空微弱动目标检测方法研究。实验结果显示:本文方法有效提高了非均匀环境杂波抑制效果与时频谱图获取精度,降低了高空微弱动目标误检率,为相关研究提供一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 刘 振,孙 纯,周胜增,等. 基于随机共振的水下目标微弱回波信号增强检测 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45 (10): 2014-2024.
- [2] 方 鑫,何 敏,黄大荣,等. 毫米波雷达微弱行人轨迹跟踪-预测一体化方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (11): 300-309.

- [3] 周瑞岩,王春蕾,周传睿. 基于快时间反转变换的雷达目标检测算法 [J]. 现代雷达, 2023, 45 (12): 109-115.
- [4] 高一丁,吴 敏,郝程鹏,等. 基于 FrFT-Keystone 运动补偿的 OFDM 声纳高速微弱目标相参积累检测算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46 (4): 1157-1166.
- [5] 叶 如,行鸿彦,周 星. 基于优化长短时记忆网络的海面微弱目标检测 [J]. 探测与控制学报, 2024, 46 (5): 57-63.
- [6] 张 鑫,宗思光,余 扬,等. 水下微弱目标双通道激光探测方法研究 [J]. 激光与红外, 2023, 53 (2): 185-193.
- [7] 邹润明,程永强,杨 政,等. 基于流形滤波的海面微弱目标检测方法 [J]. 信号处理, 2024, 40 (5): 853-864.
- [8] 杨勇军,肖志文,常 明,等. 基于 Prewitt 算子和 Radon 变换的雷达高速微弱目标检测 [J]. 光电与控制, 2024, 31 (6): 101-104.
- [9] 包中华,卢建斌,田永华,等. 密集杂波背景下雷达微弱海面目标的修正 Hough 变换 TBD 检测新方法 [J]. 电子学报, 2022, 50 (7): 1735-1743.
- [10] 邓 全,牛 群,程战涛,等. 基于高阶累积量的脉冲激光雷达信号处理技术研究 [J]. 微纳电子技术, 2024, 61 (12): 106-113.
- [11] 崔书玮,武文波. 基于时空域特征融合的红外弱小目标检测研究 [J]. 航天返回与遥感, 2024, 45 (5): 79-88.
- [12] 庄敏敏,宋 杰,熊 伟,等. 非合作辐射源双基地雷达技术综述 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45 (4): 35-45.
- [13] 邓桂林,邓 彬,陈 旭,等. 基于空间三维非均匀 SI-SO 阵列雷达的介质目标快速成像算法 [J]. 电子学报, 2024, 52 (1): 274-287.
- [14] 廖可非,王海军,谢宁波. 基于图信号处理的频控阵 MIMO 雷达动目标检测方法 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (23): 62-68.
- [15] 刘衍会,张宏武. 强杂波下微弱目标检测方法研究 [J]. 现代雷达, 2022, 44 (7): 31-37.
- [16] 葛诗然,刘睿恺,李 娜,等. 智能抑制复杂空间背景下的红外弱小目标检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2024, 53 (11): 266-278.
- [17] 车吉斌,王常龙,贾 岩,等. 外辐射源雷达互模糊函数智能快速计算方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50 (6): 21-33.
- [18] 周子铂,王彬彬,张朝伟,等. 基于迭代对消的外辐射源雷达目标检测方法 [J]. 雷达科学与技术, 2022, 20 (5): 555-564.
- [19] 刘添豪,尧泽昆,陈 曦,等. 一种空基雷达高速微弱机动目标信号相参积累方法 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (9): 1361-1367.