

无线电引信抗箔条干扰综述

刘景萍, 韩可冬, 刘斌, 周琳

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 首先简要叙述了箔条干扰的发展状况。然后对无线电引信抗箔条干扰方法的研究现状进行了综述, 介绍了基于频谱展宽、极化特征、多普勒差异、回波信号特征、距离像、稀疏表示等抗箔条干扰方法。最后总结了无线电引信抗箔条干扰技术面临的问题, 并对其发展前景作了展望。

关键词: 引信; 箔条; 抗干扰; 频谱展宽; 极化; 稀疏表示; 距离像; 神经网络

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)04-0016-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.003

Overview of Anti-chaff Interference of Radio Fuze

LIU Jing-ping, HAN Ke-dong, LIU Bin, ZHOU Lin

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: The development of chaff interference was briefly described, and then the research status of anti-chaff interference methods for radio fuze was reviewed. The anti-chaff interference methods based on spectrum broadening, polarization characteristics, Doppler difference, echo signal characteristic, range profile and sparse representation were introduced. Finally, the problems faced by anti-chaff interference technology of radio fuze were summarized, and the development was prospected.

KEY WORDS: fuze; chaff; anti-interference; spectrum broadening; polarization; sparse representation; range profile; neural network

无线电引信是利用电磁波环境信息感知目标,并在距目标最佳炸点处引爆战斗部的一种近炸引信^[1]。在第二次世界大战时,国外就已经开始研制及应用无线电引信。实践表明,导弹装上引信后,能更有效地摧毁目标,因此无线电引信被广泛应用于杀伤概率要求较高的武器系统中。我国在 20 世纪 80、90 年代,军工企业通过引进国外生产线,借鉴国外产品资料,基本具备了自主设计、生产集成电路式无线电引信的能力^[2]。发展至今,无线电引信已经将多种技术融合,多用途引信、弹道修正引信、毫米波引信等得到了广

泛应用^[3],有效提升了弹药的射击精度和毁伤效果。随着无线电引信的飞速发展,针对无线电引信的干扰方式也越来越多,且越来越有效。有数据统计表明,在越南战争中,美军采用了多种电子对抗措施,一度令地空导弹的杀伤概率降到 2%,防空火炮的杀伤概率更是只有 0.5%^[4]。对于无线电引信的干扰方式可以分为有源干扰和无源干扰。无源干扰指干扰源不主动辐射电磁波,而是通过反射电磁波,使引信发出错误起爆信号或漏爆。近年来,无源干扰技术凭借其操作简单、能适应多种战场环境且造价低、设备技术要求

收稿日期: 2022-10-11; 修订日期: 2022-12-12

Received: 2022-10-11; Revised: 2022-12-12

作者简介: 刘景萍(1967—),女,博士。

Biography: LIU Jing-ping (1967-), Female, Doctor.

引文格式: 刘景萍,韩可冬,刘斌,等. 无线电引信抗箔条干扰综述[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 016-025.

LIU Jing-ping, HAN Ke-dong, LIU Bin, et al. Overview of Anti-chaff Interference of Radio Fuze[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 016-025.

不高、干扰效果明显等优点^[5], 应用更加广泛。箔条是无源干扰中最常用的一种材料, 它价格低廉、使用方便, 具有良好的干扰效果。针对箔条干扰, 目前无线电引信采取了相应的抗干扰措施。

1 箔条的应用现状

箔条是无源干扰技术中应用最早, 并且效果最好的干扰器材。IEEE 对箔条的定义是: 一种轻型的空中反射目标云, 通常由铝箔条或涂覆金属的纤维所组成, 能在一定的空间范围产生干扰回波^[6]。在第二次世界大战时, 英国就使用了大量箔条来干扰敌军的雷达, 使敌军遭受严重的打击。在第四次中东战争中, 以色列军舰使用了箔条干扰设备, 导致敌方发射的 50 枚反舰导弹无一命中目标。1988 年, 美国在与伊朗的海战中, 通过发射多枚箔条弹, 成功诱导伊朗反舰导弹偏航。1991 年, 在第一次海湾战争中, 仅美 A-10 飞机就发射了 355 381 枚箔条弹^[7]。箔条干扰实战如图 1 所示。由于箔条在近现代战争对抗中特别有效, 箔条开始被广泛研究及应用。美国三军飞机使用的诱饵洒布系统 AN/ALE-47 如图 2 所示。飞机在被导弹锁定跟踪后, 会施放箔条弹形成箔条云, 然后根据自身运动状态和威胁信息做切向机动。由于箔条弹散开后的雷达截面积远大于飞机的雷达截面积, 导弹最终会转跟箔条^[8]。

在空中作战时, 箔条的应用可以分为以下几类^[9]: 布设干扰走廊, 形成长掩护带; 迷惑, 在大范围内投放箔条, 使得敌方引信无法识别目标; 欺骗, 利用箔



a A400M 运输机发射箔条干扰弹



b 舰载直升机发射箔条/红外干扰弹

图 1 箔条干扰实战

Fig.1 Chaff interference in action: a) A400M transport plane fires chaff interference grenades; b) shipborne helicopter fires chaff/infrared jammer shells

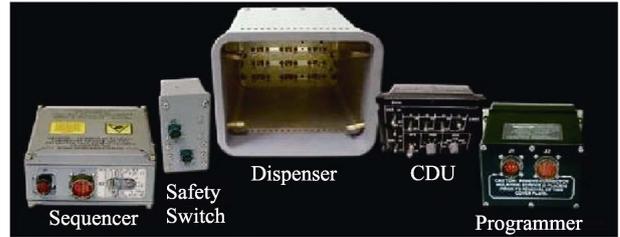
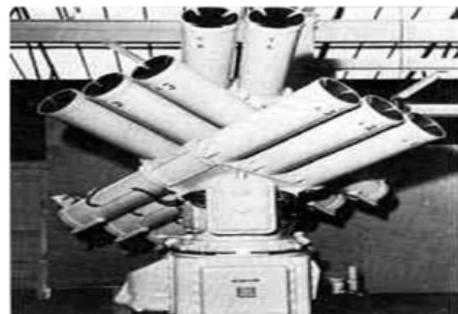


图 2 AN/ALE-47(V)机载对抗投射系统组件
Fig.2 AN/ALE-47(V) airborne counter projection system components

条形成假目标使引信误炸。在海面作战时, 箔条干扰一般采用 2 种作战方式: 冲淡干扰方式和质心干扰方式^[10]。目前典型的箔条干扰发射系统有: 英国的“乌鸦座”诱饵发射系统、俄罗斯的 PK-2、PK-10 和 PK-16 系统、美国的 MK 36 SRBOC 型无源干扰发射系统和 MK 33 RBOC 型无源干扰发射器及法国的“达盖 2 型”无源干扰发射系统等^[11]。一些典型的干扰发射系统如图 3 所示。箔条在地面的作战时, 主要是通过大量抛洒箔条形成屏障, 以达到掩护地面车辆、阵地等设施的目的。



a 英国“乌鸦座”诱饵发射系统



b 俄罗斯 PK-2 无源干扰发射系统

图 3 典型的箔条干扰发射系统

Fig.3 Typical chaff interference launching system: a) British Corvus decoy launch system; b) Russian PK-2 Passive interference transmission system

2 抗箔条干扰现状

如何有效地对抗箔条干扰是当前待解决的问题。针对这一问题, 国内外的科研院所都开展了相关研究, 但国外关于对抗箔条干扰研究的公开报道较少。从国内现有的公开资料看, 目前抗箔条干扰技术大概

可以分为六大类：基于频谱展宽、极化特征、多普勒差异、回波信号特征、距离像、稀疏表示等抗箔条干扰方法。

现有研究大多是利用识别的方法抗干扰,但当出现目标和干扰不可分辨的情况,识别的方法不再适用^[12]。其中,对抗箔条冲淡式干扰是在目标和箔条干扰可分辨条件下,通过目标与箔条的特性差异来完成箔条干扰的识别^[13];对抗箔条质心式干扰是在目标和干扰不可分辨条件下,通过极化滤波、极化对比增强、多重MTI滤波和小波变换滤波等方法提取目标信号,实现抗箔条干扰。

2.1 基于频谱展宽的方法

箔条弹在空中炸开后,箔条会受到风力和重力的作用,使其在水平方向和竖直方向的速度随时间发生变化,直到箔条达到受力平衡后,箔条开始匀速运动,箔条云处于相对稳定的状态,一般称此时的运动状态为“平动”。箔条还会绕某一固定轴做旋转运动,称为“锥动”。由于箔条的平动和锥动,箔条云回波信号的频谱存在搬移与展宽现象^[14],如图4所示。目标回波信号的频谱不存在这一现象,因此可以区分箔条和目标。

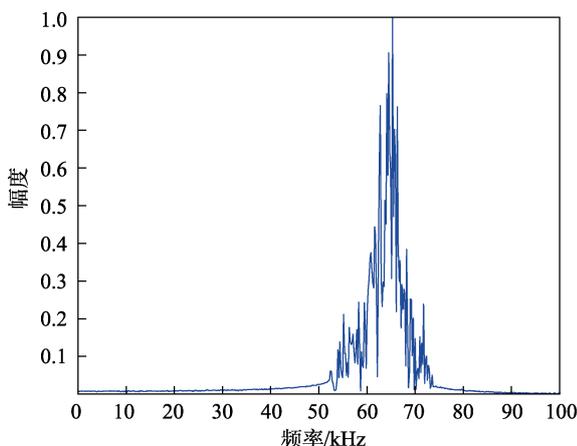


图4 箔条云回波频谱展宽现象

Fig.4 Chaff cloud echo spectrum broadening phenomenon

通过直接法谱估计和AR参数模型谱估计可以验证该方案的可行性。直接法谱估计需要先对样本数据进行傅里叶变换,进而求出其功率谱,即:

$$X_N(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-jn\omega} \quad (1)$$

$$P_x(\omega) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-jn\omega} \right|^2 \quad (2)$$

式中: $x(n)$ 为采样后的接收信号; N 为采样个数。为了减小误差,一般需要对样本进行加窗处理。直接法谱估计流程如图5所示^[15]。

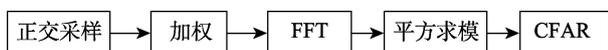


图5 直接法谱估计流程

Fig.5 Flow chart of direct spectral estimation method

AR参数模型谱估计是一种自回归模型,它采用如下的差分方程来表示样本序列:

$$x(n) = -\sum_{i=1}^p a_p(i)x(n-i) + e(n) \quad (3)$$

式中: $e(n)$ 是均值为0、方差为 σ^2 的高斯白噪声; p 为AR模型阶数; $a_p(i)$ 为模型的参数。将 $x(n)$ 看作白噪声通过模型后的输出,根据式(3)推得功率谱如式(4)所示。

$$P_x(k) = \frac{\sigma^2}{|1 + \sum_{i=1}^p a_i W_N^{-ki}|^2} \quad (4)$$

一般根据最终预测误差(FPE)准则来选择AR模型的阶数 p ,通过求解Yule-Walker方程来计算模型参数和 σ^2 。

尚炜等^[16]分别用2种谱估计法进行了仿真,证明了箔条的回波频谱具有展宽现象,因此可以根据此现象来识别箔条和目标。他还比较了直接法谱估计和AR参数模型谱估计的性能,结果表明,AR参数模型谱估计的建模复杂度较高,但是它的谱分辨率要高于直接法谱估计。此外,有研究者通过对比AM和FM的频谱宽度,发现目标和箔条干扰有显著差异,将调幅带宽和调频带宽输入到BP神经网络后,解决了箔条内是否有目标的问题,对目标和箔条的识别率可达到90%^[17]。李尚生等^[18]考虑了箔条的锥动和平动对回波信号频谱的影响,建立了箔条云回波信号模型。结果表明,舰船目标回波信号的频谱展宽幅度要远小于箔条云回波信号的频谱展宽幅度,与实测结果相符,通过回波信号频谱展宽大小来区分舰船目标与箔条干扰是可行的。王丹^[19]通过对回波信号的谱分析、恒虚警处理之后,对信号的功率谱进行了判断,计算信号的谱宽 W_n ,并与设定的门限 T_n 比较,如果检测到的 W_n 超过 T_n ,就认为该信号是箔条云回波,否则就认为是目标舰船回波。处理流程如图6所示。成思文等^[20]同样根据舰船与箔条在频谱上的差异,提出了利用箔条频谱展宽特性通过谱检测算法识别箔条干扰,并通过仿真验证了该方法的有效性。

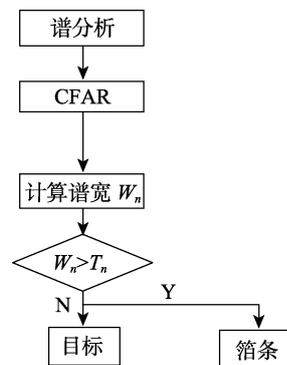


图6 利用频谱展宽效应抗箔条处理流程

Fig.6 Flow chart of anti-chaff processing by spectrum broadening effect

2.2 基于极化特征的方法

极化是电磁波除幅度、频率和相位之外另一个可利用的重要属性, 不同的目标具有不同的极化特性。根据目标和箔条云是否在同一引信分辨单元, 极化方法可以分为极化识别和极化滤波/对比增强 2 类, 前者适用于目标和箔条云在不同的引信分辨单元的情况, 如采用极化比、极化角特征量, 后者适用于目标和箔条云在同一引信分辨单元的情况。

极化比的定义可表示为: $\rho = \frac{\sigma_{VV}}{\sigma_{HV}}$, 其中 σ_{VV} 和 σ_{HV} 分别表示垂直极化发射时, 垂直极化接收和水平极化接收的回波 RCS。

李尚生等^[21]通过 3dsMAX 软件建立了飞机目标和箔条云的三维模型, 然后导入电磁仿真软件 FEKO 计算雷达在不同极化方式和不同角度下目标和箔条云的回波极化信息^[21]。研究表明, 箔条云的极化比均值远小于飞机目标的极化比均值, 极化比平均值相差 1 个数量级。因此, 可以通过极化比特征量识别飞机和箔条云。由于箔条和目标极化比特征量差异明显, 章力强等^[22]设置了双门限检测的方法识别箔条干扰, 极化比识别与抑制过程如图 7 所示。 T_h 为极化比的判别门限, 根据实际情况设置其数值大小。在 1 个检测周期内, 当回波脉冲数 N_1 大于标准 M_1 时, 判断目标为箔条假目标; N_2 大于标准 M_2 时, 判断目标为真目标。他们通过仿真证实了箔条假目标和舰船目标具有明显不同的去极化特性。吴盛源等^[23]针对均匀取向箔条云, 将共极化比绝对值和垂直共交极化比绝对值构成极化参数集作为鉴别量, 仿真得到单一极化比的鉴别量的鉴别率均低于 85%, 而以极化参数集为鉴别量

的鉴别率能达到 95% 以上, 能实现对箔条假目标的有效鉴别。

上述极化比方法适用于普通的箔条干扰, 其箔条取向随机, 随着箔条加工技术的发展与进步, 配重箔条应运而生。为识别配重箔条干扰, 李金梁等^[24]修正了原有极化比的识别特征量, 选取同极化通道和交叉极化通道的极化比的最小值, 即:

$$\rho = \min \left\{ \frac{\sigma_{VV}}{\sigma_{HV}}, \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{HV}} \right\} \quad (5)$$

改进后的方法不仅适用于普通的箔条干扰, 也适用于垂直取向的箔条干扰, 具有更强的适用性, 识别率均达到 90% 以上。然而箔条在大气中会受到重力、阻力、气流和飞机尾流等各种因素的影响, 上述研究存在一定的局限性。张帆^[25]考虑箔条平动和转动等运动对箔条回波信号的影响, 分析了随机取向箔条的极化特性, 修正了极化散射矩阵, 重新定义了交叉极化比, 提出了一种改进的极化信息抗箔条干扰方法。新的交叉极化比为:

$$\rho = \lg \frac{2\sigma_{VV}}{\sigma_{HH} + \sigma_{VV}} \quad (6)$$

根据空气动力学可知, 不同取向箔条的下降速度不同, 垂直取向最快, 水平取向最慢, 其他取向介于两者之间, 利用干涉原理可以获得目标的高度维信息。李永祯等^[26]提出用特征识别量 ρ 衡量箔条云和目标的极化特性差异, 从而提出一种基于分层极化特性的箔条云干扰识别方法, 并进行了大量理论分析和仿真实验, 结果表明, 所提方法可以有效地识别箔条干扰。

当目标和箔条云在同一引信分辨单元的情况, 如引信受到箔条质心干扰时, 可以采用斜投影极化滤波技术实现目标极化已知而箔条极化未知的干扰抑制^[27]。该方法可以有效地抑制箔条干扰, 提取出有用的目标信号。

杨勇等^[28]提出了在不事先知道目标和干扰偏振参数的情况下, 利用偏振斜投影来抑制箔条质心干扰。首先, 通过理论推导和几何解释证明了偏振斜投影后的干涉信号比和同相单脉冲比误差与目标偏振参数的估计误差无关, 然后利用接收信号直接估计出箔条质心干扰的极化参数, 利用估计的干扰极化参数和随机设置的目标极化参数构成极化斜投影算子, 通过该算子抑制了箔条质心的干扰, 实现抗箔条干扰, 并通过蒙特卡罗仿真验证了所提方法的有效性。李金梁等^[12]针对目标和干扰不可分辨的情况时, 提出了基于极化对比增强抗箔条质心干扰的方法。极化对比增强可以增大目标和干扰的能量对比, 在一定程度上起到抗质心干扰的效果, 其抑制质心干扰的效果与质心干扰和目标的极化特性差异的程度有关, 二者的差别越显著, 抗干扰的效果越好。

以上关于极化比的研究均表明, 箔条云的极化比均值远小于飞机或舰船目标的极化比均值, 为后续进

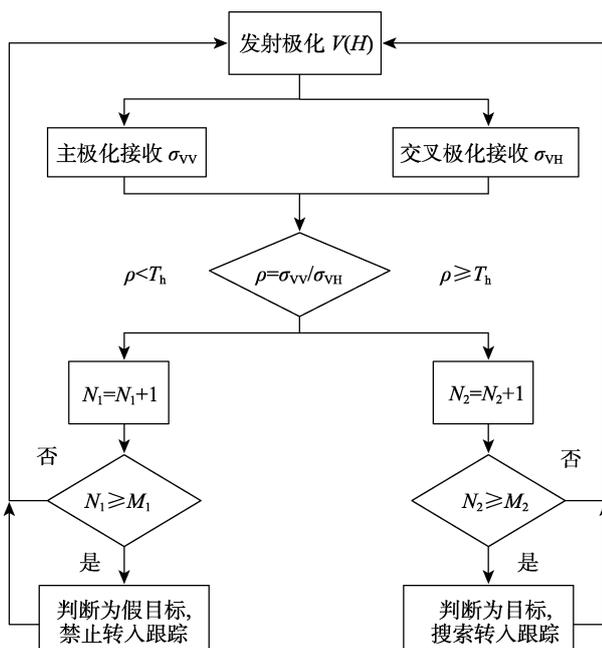


图 7 极化比识别与抑制流程

Fig.7 Polarization ratio identification and suppression process

一步抗箔条干扰研究奠定了基础。当接收信号为单独箔条云或飞机目标回波信号时,可以识别,但当接收信号为箔条云和飞机目标的混合回波信号时,无法识别。此时可以通过极化滤波技术滤除箔条干扰信号,提取出有用的目标信号,实现抗箔条干扰。

2.3 基于多普勒差异的方法

箔条运动扩散的速度和目标的速度有较大差距,对应其多普勒频率存在差异,因此可以通过研究多重动态目标指示技术,分析箔条云干扰的形成原理和信号特征,从多普勒维实现箔条干扰的目标识别方法。徐光耀等^[29]、董洁等^[30]均设计了多重 MTI 滤波器,3 抽头的多重 MTI 算法结构如图 8 所示。多重 MTI 滤波器在一些特定的多普勒频率处会提供足够的增益,并行处理多个 MTI 滤波器,以检测目标相对于箔条云的多普勒频率差,当在正确的多普勒频率差处积分时,可以检测出目标而消除质心式箔条干扰^[29]。

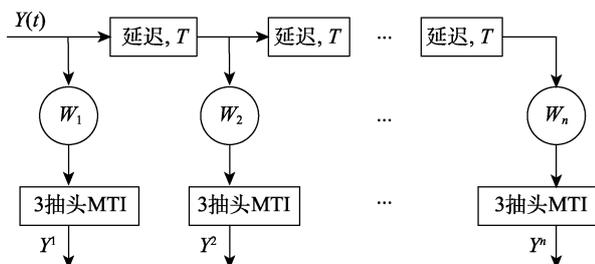


图 8 多重 MTI 算法结构
Fig.8 Multiple MTI algorithm structure

通过仿真对比发现,未经处理的图像无法区分目标和箔条干扰,目标回波与箔条回波的信干比约为 7 dB。经过处理后的图像中,箔条干扰基本消除,目标回波与箔条回波的信干比约为 18 dB,但是目标回波也有 2~3 dB 的损耗。该算法可以改善目标回波信号,基本滤除质心式箔条干扰,从而实现引信抗箔条干扰,但其实时性还需要提高,并且未立足实际应用。

刘博针等^[31]对舰载冲淡式箔条干扰和质心式箔条干扰分离期 2 种情况,分析了宽带相参雷达舰船目标回波与箔条回波的区别,提出了回波距离-多普勒二维像扩展因子和能量均匀度 2 个特征指标对舰船和箔条进行区分,结合实际应用环境,设计了抗箔条干扰算法。对实测数据的处理结果表明,箔条识别率可以达到 99.7%,验证了抗箔条干扰方法的有效性,但该方法在实战情况下的抗干扰性能还有待进一步测试。

2.4 基于回波信号特征的方法

目标回波和箔条回波具有不同的回波特性,基于此可以得到一些抗箔条干扰的方法。由于经过小波变换后的目标回波信号比箔条回波信号得到的小波变换系数相关性会更好,且相关时间更长,因此可以通

过回波信号的关联度来检测箔条干扰信号^[32]。式(7)为回波小波变换后的相关函数,其中 $D_j f(n)$ 为小波系数, $f(n)$ 为包含目标信息 $s(n)$ 与箔条信息 $w(n)$ 的回波信号。

$$\begin{aligned} conv(j, j+1) &= D_j f(n) \cdot D_{j+1} f(n) = \\ &= D_j s(n) \cdot D_{j+1} s(n) + D_j w(n) \cdot D_{j+1} w(n) + \\ &= D_j s(n) \cdot D_{j+1} w(n) + D_j w(n) \cdot D_{j+1} s(n) \end{aligned} \quad (7)$$

然而,仅仅将信号做小波变换对噪声的滤波效果不太好,因此在小波变换的基础上,需要设立门限值,分别对显示信号高频信息的细节系数与显示信号低频信息的逼近系数进行滤除^[33]。仿真结果表明,小波变换可以有效滤除混合在目标信号中的箔条干扰信号,实现抗箔条干扰。

除小波变换外,目标回波和箔条回波还可以通过比较灰色关联度的差异,对箔条干扰进行鉴别^[34]。首先,对每个周期的回波信号进行采样,用式(8)计算第 i 个周期与第 $i+1$ 个周期的回波信号的灰色关联度。其中,设第 i 个周期信号的回波为序列 X ,第 $i+1$ 个周期的回波为序列 Y ,则 X 与 Y 的关联度为:

$$a_{XY} = 2 \left[\frac{1 + |X| + |Y|}{1 + |X| + |Y| + |X - Y|} - 0.5 \right] \quad (8)$$

式(8)可反映第 i 个周期与第 $i+1$ 个周期回波序列的相似程度,为消除随机性,还需对所有周期的回波信号都进行关联度计算,可得到平均关联度 \bar{a} :

$$\bar{a} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} a_i \quad (9)$$

按照灰色关联度的定义可知,当几何形状上越相似时,关联度会越高。对于箔条云和舰船目标而言,舰船目标的 \bar{a} 值会更高,因此只需设置合理的目标检测门限,就可以将二者区分开。通过仿真表明,舰船目标的灰色关联度高于箔条,且更加稳定,因此该方法在理论上是可以将舰船目标与箔条云区分开的。

除对信号进行时域处理后辨别目标回波和箔条回波,还可以利用时域、频域和联合时频域几何矩进行模式的特征提取,并用多层感知神经网络进行识别^[35]。黄靖涵^[36]使用基于机器学习的方法进行了抗箔条干扰,利用实测得到的箔条、目标数据和仿真得到的数据,构建了应用于卷积神经网络和支持向量机训练、验证、测试的相应数据集,分别基于 CNN 与 SVM 完成了 3 类特征分类识别的训练和测试。结果表明, CNN 模型识别率基本在 80% 以上, SVM 模型识别率基本在 70% 以上,能够有效完成箔条与目标的分类。王湖升等^[37]在箔条干扰的条件下,完成了距离-多普勒成像后,进一步完成了聚类、特征提取和机器学习分类器对抗识别。通过理论分析和实测数据表明,该方法能够准确地识别箔条和目标,抗干扰性能良好。

2.5 基于距离像的方法

在距离分辨率比较高时, 目标的一维距离像中包含了目标的几何形状和物理特性等细节信息, 而目标 (如飞机, 舰船等) 与箔条云的细节信息差异较大, 因此可以从目标与箔条云的一维距离像中提取特征来进行识别。

引用熵的概念来表征目标和箔条的距离像分布情况, 设 $\{S(l), l=1, 2, \dots, N\}$ 为回波信号的一维距离像序列, 则 $S(l)$ 的波形熵可以表示为:

$$E(S) = -\sum_{i=1}^N \bar{S}(l) \log_2 \bar{S}(l) \quad (10)$$

式中: $\bar{S}(l)$ 为归一化后的一维距离像序列。式(10)反映了距离像的离散程度。若物体的散射中心分布较为集中, 则熵值较小; 若散射中心能量分布较为分散, 则熵值较大。波形熵值体现了散射体的分布情况。将奇异值分解与波形熵结合, 对距离像进行分析, 可以提高波形熵识别方法的稳定性。目标和箔条干扰熵值特征分布如图 9 所示^[7]。其中, 图 9a 为箔条和目标的波形熵, 图 9b 为对目标和箔条干扰的奇异谱熵进行 Kruskal-Wallis 非参数统计分析后得到的统计箱。

此外, 可以基于箔条云和目标回波距离像的形状不变性、对称性, 对比相邻回波的距离像的差异, 进行箔条云和目标的识别^[38]。在信噪比较高时, 基于舰船与箔条回波在时频域上的稀疏性, 识别箔条云的效果较为良好^[39]。基于目标和箔条干扰的不同次数回波

的一维距离像之间相关性的不同, 使用 BP 神经网络进行特征学习, 也可以识别箔条干扰^[40]。可以利用深度神经网络对一维距离像进行特征提取, 同时使用经典子空间方法提取一维距离像的子空间特征^[41]。

2.6 基于稀疏表示的方法

基于冗余字典的稀疏表示是研究的核心之一, 稀疏表示的关键是稀疏表示算法和字典构造。稀疏表示算法有 MP、OMP 和子空间追踪等, 以及基于它们的改进, 如 ROMP、StOMP, 还有从自适应角度出发的 SAMP, 引入 Dice 系数匹配准则改进的自适应匹配追踪算法^[42]。除此之外, 还有 BPDN、LASSO 和 FOCUSS 方法等。部分常用的稀疏表示算法的对比见表 1。

字典构造分为固定字典与学习字典。常用的固定字典有快速傅里叶变换 (FFT)、离散小波变换 (DWT) 和离散余弦变换 (DCT) 等。常用的自适应字典有 ML、MOD 和 K-SVD 等。信号稀疏表示中常用的稀疏字典见表 2。

基于以上原理, 使用 K-SVD 算法分别对目标回波信号和箔条回波信号进行学习, 可以得到目标字典和箔条字典。再通过得到的自适应字典对目标信号和箔条信号分别进行重构 (如图 10 所示), 通过比较重构误差来区分目标和箔条信号^[25]。

在训练字典时, 也可以选用一维距离像数据集, 同样可以得到良好的效果^[43]。BPDN 算法可以消除不同信噪比下雷达回波信号中的噪声部分^[44]。此外, 段

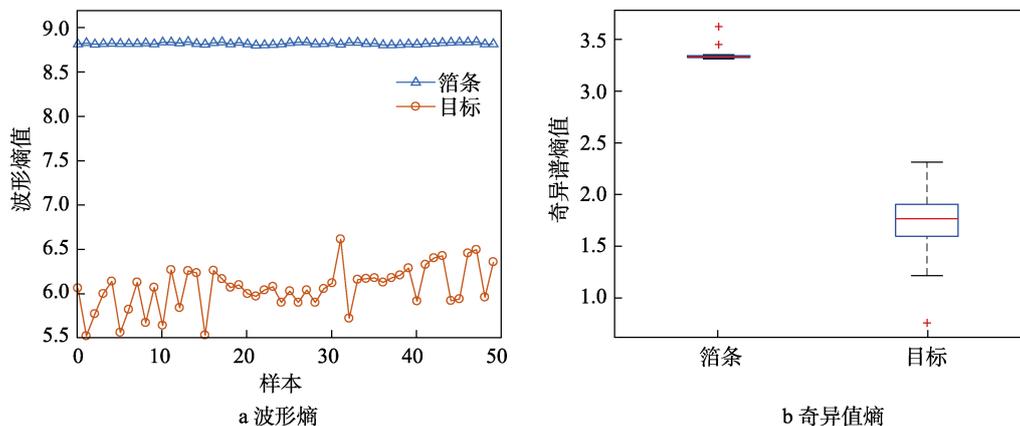


图 9 熵特征

Fig.9 Entropy characteristics: a) waveform entropy; b) singular values of entropy

表 1 常用稀疏算法对比

Tab.1 Comparison of commonly used sparse algorithms

稀疏算法	主要特点
MP	算法简单, 重构信号速度快, 信号在已选择的原子进行垂直投影是非正交性的, 每次迭代的结果并不是最优的而是次最优的
OMP	结果会在有限的几步收敛, 收敛速度快, 重构效果好, 但计算复杂度较大
BPDN	以全局最优解为准则, 具有较高精确度, 但具有较高计算复杂度, 应用并不广泛
Focuss	重构精度高, 同样存在时间复杂度大的问题

表 2 常用稀疏字典对比
Tab.2 Comparison of commonly used sparse dictionary

稀疏字典	主要特点
Gabor 字典	具有良好的时频聚集性，但是易出现截断和混合畸变等现象
Chirplet 字典	克服了 Gabor 字典的不足，适合于描述信号中频率分量随时间线性变化的分量
MOD 字典	通过求伪逆实现对欠定性方程组的求解，一次更新字典的全部信息，更新过程收敛速度较慢，且字典内各列之间存在相互干扰的可能
K_SVD 字典	逐个考虑原子信号对数据拟合的贡献并逐个更新原子信号

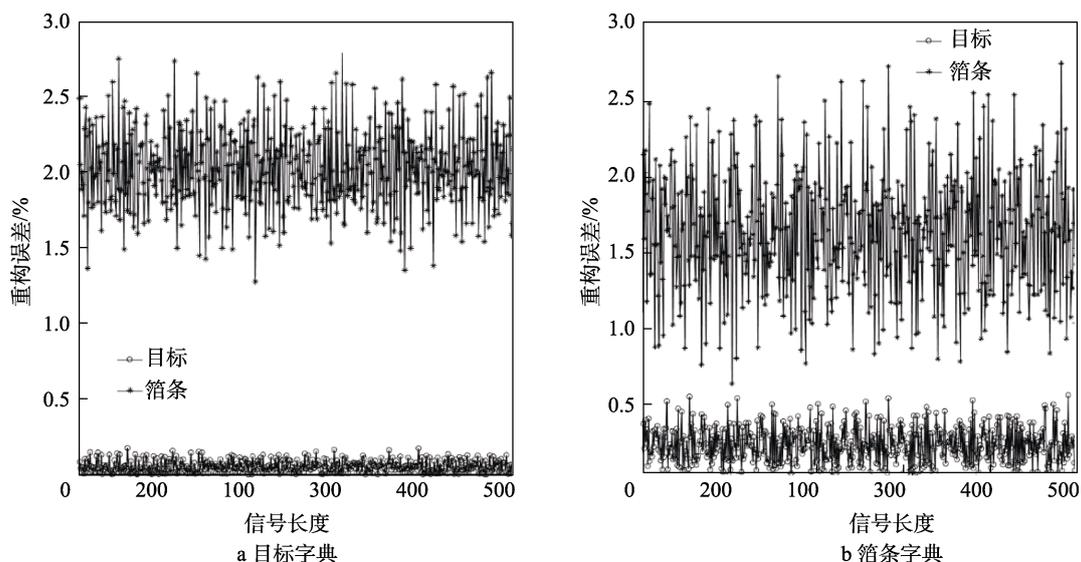


图 10 不同字典对信号的重构误差

Fig.10 Reconstruction error of signal by different dictionaries: a) target dictionary; b) chaff dictionary

沛沛^[45]分别提出了基于结构字典稀疏表示的目标识别算法、基于联合字典稀疏表示的雷达目标识别算法和基于双稀疏字典学习的雷达目标识别算法，相比其他类型的常规识别算法，提高了运算效率和目标识别率。李丽萍^[46]通过分析雷达回波的稀疏性，结合最小功率方法，提出了一种基于稀疏表示的杂波抑制方法，并通过仿真实验论证了所提方法的可行性。朱涛^[47]对基于稀疏表示的信号恢复算法以及字典学习算法展开了研究，既为某些现有算法提供改进版本或新的收敛性分析，也提出新的算法。

3 结语

无线电引信抗箔条干扰的方法众多，但仍然不够成熟，存在一些问题。目前，大部分抗箔条干扰的研究都处于理论分析与仿真的阶段，没有进行实测，因此其实用性和可靠性还需在实践中进一步检验。为了使得引信系统拥有更好的性能，往往采用复杂的信号处理技术，但同时会带来一些问题，如高成本、高计算量和存储需求，因此在设计时需要全方面考虑。

未来在抗干扰方法方面，由于神经网络强大的学习和处理能力，它在信号处理领域的广泛应用将是今后热门的研究方向，将推动抗干扰算法的发展。随着

硬件、软件技术的不断进步，复合制导技术结合不同单一制导技术的优点，能提高引信的抗箔条干扰性能，也将是未来发展的趋势之一。众多抗干扰方法应进行硬件的实现，并尽可能进行实际环境的测试，做到理论指导于实践，实践服从于理论，不断地优化，推动电子对抗事业的发展。

参考文献：

- [1] 金文, 武海东, 沙作金, 等. 无线电引信的抗干扰性能评估方法研究[J]. 制导与引信, 2020, 41(2): 11-16.
JIN Wen, WU Hai-dong, SHA Zuo-jin, et al. Research on Evaluation Method of Anti-Jamming Performance of Radio Fuze[J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(2): 11-16.
- [2] 张星宇, 齐杏林, 李黎明. 国外无线电引信发展历程及未来研究方向综述[J]. 飞航导弹, 2021(12): 152-157.
ZHANG Xing-yu, QI Xing-Lin, LI Li-ming. Summary of the Development Course and Future Research Direction of Foreign Radio Fuze[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(12): 152-157.
- [3] 李鑫鹏, 郭朝勇. 弹道修正引信及其旋转隔离技术综述[J]. 飞航导弹, 2017(6): 84-89.
LI Xin-peng, GUO Chao-yong. Summary of Trajectory Correction Fuze and Its Rotating Isolation Technology[J].

- Aerodynamic Missile Journal, 2017(6): 84-89.
- [4] 赵惠昌, 张淑宁. 电子对抗理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
ZHAO Hui-chang, ZHANG Shu-ning. Theory and Method of Electronic Countermeasures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [5] 李健辉. 对反舰导弹箔条干扰方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
LI Jian-hui. Research on Jamming Method of Anti-Ship Missile Chaff[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [6] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
CHEN Jing. Principles of Radar Chaff Jamming[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [7] 林慧君. 毫米波引信抗无源干扰研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
LIN Hui-jun. Research on Anti-Passive Interference of Millimeter Wave Fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [8] 叶强. 直升机载箔条无源干扰投放策略技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
YE Qiang. Research on Passive Jamming Release Strategy Technology of Helicopter Chaff[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [9] 崔凯, 鲍红权. 雷达无源干扰材料——箔条的现状与发展趋势[J]. 中国建材科技, 2004, 13(6): 23-26.
CUI Kai, BAO Hong-quan. Passive Interferent Material for Radar—the Development and Current Situation of Shell[J]. China Building Materials Science & Technology, 2004, 13(6): 23-26.
- [10] 姚旺, 丛彦超, 孔志杰, 等. 海战场雷达末制导系统抗干扰技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 152-155.
YAO Wang, CONG Yan-chao, KONG Zhi-jie, et al. Research on Anti-Jamming Technology of Radar Terminal Guidance System in Naval Battlefield[J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(9): 152-155.
- [11] 邢世其, 刘业民, 李永祯, 等. 箔条在现代海战场中的应用及现状[J]. 航天电子对抗, 2021, 37(2): 58-64.
XING Shi-qi, LIU Ye-min, LI Yong-zhen, et al. Application and Status of Chaff in Modern Sea Battlefield[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(2): 58-64.
- [12] 李金梁, 来庆福, 李永祯, 等. 基于极化对比增强的导引头抗箔条算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 268-271.
LI Jin-liang, LAI Qing-fu, LI Yong-zhen, et al. Anti-Chaff Algorithm for Seekers Based on Polarimetric Contrast Enhancement[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 268-271.
- [13] 刘业民. 箔条云极化雷达特性及抗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
LIU Ye-min. Research on Characteristics and Anti-Jamming Technology of Chaff Cloud Polarization Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [14] 李尚生, 付哲泉, 李炜杰, 等. 箔条干扰回波信号频域特性研究[J]. 现代防御技术, 2016, 44(4): 37-42.
LI Shang-sheng, FU Zhe-quan, LI Wei-jie, et al. Frequency Characteristics of Chaff Echo Signal[J]. Modern Defense Technology, 2016, 44(4): 37-42.
- [15] 刘世敏. 箔条干扰的特征及其实测数据分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
LIU Shi-min. Characteristics of Chaff Interference and Its Measured Data Analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [16] 尚炜, 陈伯孝, 蒋丽凤. 基于频谱展宽效应的一种抗箔条方法[J]. 制导与引信, 2006, 27(3): 5-9.
SHANG Wei, CHEN Bai-xiao, JIANG Li-feng. An Anti-Chaff Jamming Method Based on the Effect of Spectral Expansion[J]. Guidance & Fuze, 2006, 27(3): 5-9.
- [17] YAN Zhao-shi, HAO Xin-hong, LI Ran, et al. Target Recognition Technology of Pulse Doppler Radio Fuze Based on Bandwidth Characteristics for Anti-Chaff Jamming[C]//2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). Melacca: IEEE, 2020.
- [18] 李尚生, 付哲泉. 关于制导雷达目标识别抗箔条干扰仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 19-22.
LI Shang-sheng, FU Zhe-quan. Anti-Chaff Jamming Method of Target Recognition for Guidance Radar Based on Frequency Characteristics[J]. Computer Simulation, 2016, 33(5): 19-22.
- [19] 王丹. 反舰导弹导引头系统建模与仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
WANG Dan. Research on Modeling and Simulation of Anti-Ship Missile Seeker System[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [20] 成思文, 余彩云, 马婷婷, 等. 基于时频域分析的箔条识别方法[C]//2016年IEEE中文制导、导航和控制会议论文集. 南京: IEEE, 2016.
Cheng Si-wen, Yu Cai-yun, Ma Ting-ting, et al. Chaff Recognition Method Based on Time-frequency Domain Analysis[C]//Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Nanjing: IEEE, 2016.
- [21] 李尚生, 付哲泉, 于晶, 等. 基于极化特征的抗箔条干扰方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(5): 478-482.
LI Shang-sheng, FU Zhe-quan, YU Jing, et al. Research on Anti-Chaff Jamming Method Based on Radar Echo Signal[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(5): 478-482.
- [22] 章力强, 李相平, 陈信. 箔条假目标干扰极化识别与抑制技术[J]. 制导与引信, 2012, 33(1): 19-23.
Zhang Li-qiang, Li Xiang-ping, Chen Xin. The Research on Technology of Polarization Identification and Suppression of Decoy[J]. Guidance & Fuze, 2012, 33(1): 19-23.
- [23] 吴盛源, 张小宽, 袁俊超, 等. 全极化信息在箔条假目标鉴别中的应用研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(3): 118-121.

- WU Sheng-yuan, ZHANG Xiao-kuan, YUAN Jun-chao, et al. Application of Full Polarimetric Information in Chaff Decoy Identification[J]. *Modern Defense Technology*, 2017, 45(3): 118-121.
- [24] 李金梁, 曾勇虎, 申绪润, 等. 改进的箔条干扰极化识别方法[J]. *雷达科学与技术*, 2015, 13(4): 350-355.
LI Jin-liang, ZENG Yong-hu, SHEN Xu-jian, et al. Modified Polarization Recognition Method for Chaff Jamming[J]. *Radar Science and Technology*, 2015, 13(4): 350-355.
- [25] 张帆. 引信信号处理及抗箔条干扰研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
ZHANG Fan. *Research on Fuze Signal Processing and Anti-Chaff Interference*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [26] 李永祯, 刘业民, 庞晨, 等. 基于分层极化特性的箔条云识别方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(8): 2099-2107.
LI Yong-zhen, LIU Ye-min, PANG Chen, et al. Chaff Clouds Recognition Method Based on Layered Polarization Characteristics[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(8): 2099-2107.
- [27] 来庆福, 赵晶, 冯德军, 等. 斜投影极化滤波的雷达导引头抗箔条干扰方法[J]. *信号处理*, 2011, 27(7): 1016-1021.
LAI Qing-fu, ZHAO Jing, FENG De-jun, et al. Anti-Chaff Method Based on Oblique Projection Polarization Filtering for Radar Seeker[J]. *Signal Processing*, 2011, 27(7): 1016-1021.
- [28] YANG Yong, XIAO Shun-ping, FENG De-jun, et al. Polarisation Oblique Projection for Radar Seeker Tracking in Chaff Centroid Jamming Environment without Prior Knowledge[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(9): 1195-1202.
- [29] 徐光耀, 郑娜, 费惠佳, 等. 基于多重MTI算法的抗质心式箔条干扰研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(1): 192-194.
XU Guang-yao, ZHENG Na, FEI Hui-jia, et al. The Research on Anti-Centroid Chaff Jamming Based on Multiple MTI Algorithm[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, 32(1): 192-194.
- [30] 董杰, 王法栋, 刘宗福. 基于多普勒滤波器的多重MTI箔条干扰消除技术研究[J]. *舰船电子对抗*, 2013, 36(1): 47-49.
DONG Jie, WANG Fa-dong, LIU Zong-fu. Research into Chaff Jamming Cancellation Technology of Multiple MTI Based on Doppler Filter[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2013, 36(1): 47-49.
- [31] 刘博, 常文革. 反舰宽带相参雷达的一种抗箔条干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(3): 440-446.
LIU Bo, CHANG Wen-ge. Effective Anti-Chaff Jamming Method for Anti-Ship Wideband Coherent Radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(3): 440-446.
- [32] 冯有前, 张善文, 宋国乡. 箔条干扰下的一种雷达目标小波识别方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2003, 30(3): 345-348.
FENG You-qian, ZHANG Shan-wen, SONG Guo-xiang. A Method for Recognition of Radar Targets under Chaff Jamming Based on the Wavelet[J]. *Journal of Xidian University*, 2003, 30(3): 345-348.
- [33] 汤广富, 陈远征, 赵宏钟, 等. 一种改进的小波变换抗箔条干扰算法[J]. *雷达与对抗*, 2005(2): 20-24.
TANG Guang-fu, CHEN Yuan-zheng, ZHAO Hong-zhong, et al. A Modified Algorithm of Anti-Chaff Jamming with Wavelet Transform[J]. *Radar & ECM*, 2005(2): 20-24.
- [34] 张芸. 基于灰色关联度的无源箔条干扰识别的仿真研究[J]. *舰船电子对抗*, 2020, 43(2): 56-60.
ZHANG Yun. Research into the Simulation of Passive Chaff Jamming Recognition Based on Grey Correlation Degree[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2020, 43(2): 56-60.
- [35] 赵海波, 胡光锐. 基于自适应联合时频处理的抗箔条干扰技术[J]. *上海交通大学学报*, 2008, 42(7): 1211-1216.
ZHAO Hai-bo, HU Guang-rui. Anti-Cloud Jamming Method Based on Adaptive Joint Time-Frequency Processing[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2008, 42(7): 1211-1216.
- [36] 黄靖涵. 无线电引信抗箔条干扰仿真技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
HUANG Jing-han. *Research on Simulation Technology of Anti-Chaff Interference of Radio Fuze*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [37] 王湖升, 陈伯孝, 叶倾知. 基于箔条干扰实测数据的对抗方法研究[J/OL]. *系统工程与电子技术*, 2022: 1-15. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-XTYD2022053100B.htm>.
WANG Hu-sheng, CHEN Bo-xiao, YE Qing-zhi. Research on Countermeasure Method based on measured Data of Chaff Interference[J/OL]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022: 1-15. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-XTYD2022053100B.htm>.
- [38] 李为民, 石志广, 付强. 舰船目标与舷外干扰的电磁特征分析与鉴别方法研究[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 19(4): 70-73.
LI Wei-min, SHI Zhi-guang, FU Qiang. Study on the Electromagnetic Signature Analysis and Discrimination Method of Ship Targets and Outboard Jamming[J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2004, 19(4): 70-73.
- [39] TANG Guang-fu, ZHAO Ke, ZHAO Hong-zhong, et al. A Novel Discrimination Method of Ship and Chaff Based on Sparseness for Naval Radar[C]//2008 IEEE Radar Conference. Rome: IEEE, 2008.
- [40] 郭裕兰, 万建伟, 欧建平, 等. 基于一维距离像的抗箔条干扰算法研究[J]. *雷达科学与技术*, 2011, 9(1): 67-71.
GUO Yu-lan, WAN Jian-wei, OU Jian-ping, et al. Research on Anti-Chaff Jamming Method Based on Range

- Profile[J]. Radar Science and Technology, 2011, 9(1): 67-71.
- [41] 周毅. 基于高分辨一维距离像的目标特征提取及融合识别研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
ZHOU Yi. Research on Target Feature Extraction and Fusion Recognition Based on High Resolution One-Dimensional Range Profile[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [42] 王福驰, 赵志刚, 刘馨月, 等. 一种改进的稀疏度自适应匹配追踪算法[J]. 计算机科学, 2018, 45(B06): 234-238.
WANG Fu-chi, ZHAO Zhi-gang, LIU Xin-yue, et al. Improved Sparsity Adaptive Matching Pursuit Algorithm[J]. Computer Science, 2018, 45(B06): 234-238.
- [43] 袁伟. 基于一维距离像稀疏表达的无源假目标识别[J]. 电讯技术, 2018, 58(7): 798-804.
YUAN Wei. Passive Fake Target Recognition Based on One-Dimensional Distance Image Sparse Representation[J]. Telecommunication Engineering, 2018, 58(7): 798-804.
- [44] 余付平, 冯有前, 高大化, 等. 基于稀疏分解的雷达信号抗噪声干扰方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1765-1769.
YU Fu-ping, FENG You-qian, GAO Da-hua, et al. Research on Anti-Noise Jamming of Radar Signals Based on Sparse Decomposition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 1765-1769.
- [45] 段沛沛. 基于稀疏表示的雷达高分辨距离像目标识别算法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
DUAN Pei-pei. Research on Target Recognition Algorithm of Radar High Resolution Range Profile Based on Sparse Representation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.
- [46] 李丽萍. 基于稀疏表示的杂波抑制方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LI Li-ping. Research on Clutter Suppression Method based on Sparse Representation[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [47] 朱涛. 基于稀疏表示的信号恢复及字典学习算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHU Tao. Research on Signal Recovery and Dictionary Learning Algorithm Based on Sparse Representation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

责任编辑: 刘世忠