



基于自适应的SSD算法和1.5维谱的新型雷达干扰识别

张忠民, 王雨鑫

引用本文:

张忠民, 王雨鑫. 基于自适应的SSD算法和1.5维谱的新型雷达干扰识别[J]. *应用科技*, 2021, 48(5): 54–59.

ZHANG Zhongmin, WANG Yuxin. New radar jamming recognition based on adaptive SSD algorithm and 1.5-dimensional spectrum[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(5): 54–59.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.202012017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于变分自编码器的雷达辐射源个体识别

Radar emitter recognition based on variational autoencoder

应用科技. 2020, 47(4): 59–65 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201909009>

基于分数阶傅里叶变换和循环谱的雷达信号调制方式识别

Radar signal modulation recognition based on fractional Fourier transform and cyclic spectrum

应用科技. 2020, 47(3): 30–36 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201909013>

基于时频分析的自适应PCA辐射源调制识别

Research on emitter modulation recognition of the adaptive PCA based on time–frequency analysis

应用科技. 2018, 45(5): 33–37 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201712013>

基于循环谱和距离判别的雷达信号调制类型识别

Radar signal modulation recognition based on cyclic spectrum and distance discrimination

应用科技. 2018, 45(4): 61–64 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201709009>

复杂电磁环境下雷达有源干扰机的设计与实现

Design and implementation of radar active jammer in complex electromagnetic environment

应用科技. 2017, 44(2): 84–88 <https://dx.doi.org/10.11991/yykj.201608013>

基于修正的Rife和SVM的辐射源特征提取和识别

Emitter feature extraction and recognition based on the modified Rife and SVM

应用科技. 2015(3): 7–12 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1009-671X.201403021>



微信公众平台



期刊网址

DOI: 10.11991/ykj.202012017

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20210830.0922.002.html>

基于自适应的 SSD 算法和 1.5 维谱的新型雷达干扰识别

张忠民, 王雨鑫

哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要:随着数字射频存储器(DRFM)技术的发展, 新型有源雷达干扰呈现出灵活多变和脉压增益大的特点, 对雷达的生存环境是个严峻的挑战, 如何有效地捕捉并识别干扰类型具有研究意义。本文提出了一种基于自适应的奇异谱分解(SSD)算法和 1.5 维谱的识别方法。通过对 5 种干扰和回波进行 SSD 分解, 利用峭度准则自适应选取最佳分解个数和最佳分解分量, 对最佳分解分量进行 1.5 维谱估计, 将估计结果送入到支持向量机(SVM)中训练学习并分类。仿真结果表明, 该方法智能化选参和特征稳定的优点突出、识别率较高。

关键词:雷达干扰; 新型有源干扰; 灵巧干扰; SSD 分解; 1.5 维谱; 支持向量机; 信噪比; 特征提取

中图分类号: TN973.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-671X(2021)05-0054-06

New radar jamming recognition based on adaptive SSD algorithm and 1.5-dimensional spectrum

ZHANG Zhongmin, WANG Yuxin

College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: With the development of digital radio frequency memory(DRFM) technology, a new type of active radar jamming presents the characteristics of flexibility and large pulse compression gain, which is a severe challenge to the survival environment of radar. How to effectively capture and identify the types of interference is of great significance. In this paper, a recognition method based on adaptive singular spectrum component(SSD) algorithm and 1.5 dimensional spectrum is proposed. Five kinds of interference and echo are decomposed by SSD, the optimal number and component of decomposition are selected by kurtosis criterion adaptively, the optimal decompositions are estimated by 1.5-dimensional spectrum, and the estimation result is sent to the support vector machine (SVM) for training, learning, and classification. The simulation results show that the method has outstanding advantage of intelligent parameter selection and feature stability, as well as high recognition rate.

Keywords: radar jamming; new active jamming; smart jamming; SSD decomposition; 1.5 dimensional spectrum; support vector machine; SNR; characteristics extraction

没有干扰不了的雷达, 也没有抵抗不了的干扰^[1]。这说明干扰和抗干扰是协同发展的关系, 随着 DRFM 技术的日益完善, 这种新型雷达有源干扰呈现出灵活多变和脉压增益大的特点, 对于主动雷达系统, 回波信号伴随着敌军的有意干扰信号, 它们一方面具有欺骗目标的干扰作用, 另一方面具有压制目标信号的干扰作用, 为雷达的追踪和检测带来了巨大的挑战。干扰对抗中最关

键的一步就是干扰识别。文献 [2] 提出了一种提取信号频谱稀疏性的方法, 用以识别出间歇采样转发干扰。文献 [3] 采用半监督生成对抗网络 (secure steganography based on generative adversarial networks, SSGAN) 和改进模型图卷积-半监督对抗生成神经网络 (graph CNN-secure steganography based on generative adversarial networks, GC-SSGAN) 实现了干扰样本的半监督学习, 在分析了 9 种典型的有源干扰的前提下进行特征提取, 使用合适的识别器和识别网络进行识别。文献 [4] 提出了一种宽带雷达非常规有源干扰识别方法。大量文献表明, 干扰识别方法已成为抗干扰技术中的热点话题, 为后续的抑制干扰做铺垫。

收稿日期: 2020-12-24. 网络出版日期: 2021-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60875025).

作者简介: 张忠民, 男, 副教授; 博士.

王雨鑫, 男, 硕士研究生.

通信作者: 王雨鑫, E-mail: 787527581@qq.com.

1 目标和干扰模型分析

1.1 新型压制干扰

1.1.1 噪声卷积灵巧干扰

噪声卷积干扰定义为^[5]

$$j_1(t) = n(t) \otimes s(t)$$

式中: $n(t)$ 为白噪声, $s(t)$ 为线性调频信号, $j_1(t)$ 为噪声卷积灵巧干扰。

噪声卷积干扰通过雷达匹配滤波之后的输出为

$$y_1(t) = j_1(t) \otimes h(t) = h(t) \otimes s(t) \otimes n(t)$$

式中 $h(t)$ 为雷达匹配滤波器的单位冲激响应。

同时噪声卷积干扰信号的频谱为

$$J_1(\omega) = F[j_1(t)] = F[s(t) \otimes n(t)] = S(\omega)N(\omega)$$

式中: ω 为模拟角频率, F 为傅里叶变换, $S(\omega)$ 为雷达信号的频谱, $N(\omega)$ 为调制噪声的频谱。

由上述可知, 噪声卷积干扰就是噪声信号与截获信号相乘积, 而这相当于频域的乘积运算, 这使得干扰的频谱无需引导就对准目标频谱。

1.1.2 噪声乘积灵巧干扰

噪声乘积干扰可以定义为^[6]

$$J_2(t) = s(t)n(t)$$

噪声乘积干扰信号的频谱为

$$J_2(\omega) = F[J_2(t)] = S(\omega) \otimes N(\omega) \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 噪声乘积干扰是由噪声与截取信号相乘积而产生, 这就相当于频域相卷积, 表现为频谱的多普勒频移, 以达到干扰的目的。

1.2 新型欺骗干扰

1.2.1 间歇采样直接转发干扰

间歇采样直接转发的基本原理是^[7]基于 DRFM 的干扰机接收端截获到雷达回波信号后, 在脉冲信号内, 先根据采样时长截取其中一小段信号做高保真采样, 在采样间歇时, 把采样信号处理转发, 然后进入下一个循环: 采样, 转发。工作方式如图 1 所示。

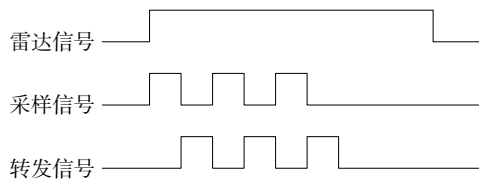


图1 间歇采样直接转发工作原理

1.2.2 间歇采样重复转发干扰

间歇采样重复转发干扰的产生原理^[8]是基于 DRFM 的干扰机接收端截获到雷达回波信号后, 在脉冲信号内, 先根据采样时长截取其中一小段信号做高保真采样, 在采样间歇时, 对切片信号进行规定次数的不间断重复转发, 然后进入下一个循环: 采样, 重复转发。工作原理如图 2 所示。

一般情况, 循环中的重复转发次数相同。

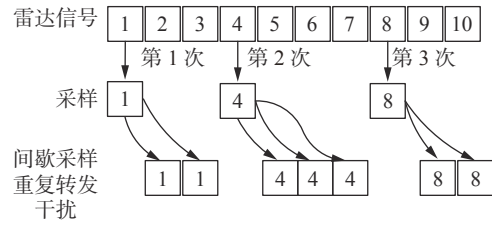


图2 间歇采样重复转发工作原理

1.2.3 间歇采样循环转发干扰

间歇采样循环转发干扰的产生原理^[9]是基于 DRFM 的干扰机接收端截获到雷达回波信号后, 在脉冲信号内, 根据采样参数对截获信号进行截取, 在采样间歇时, 对切片信号进行转发, 转发规则为对于每一个截取的切片在本循环立刻转发之外, 在下第 n 次循环会在循环开始后的第 n 倍的切片长度时刻转发, 每个切片都按照这个规则转发, 直到信号接收结束。间歇采样循环转发干扰的产生原理示于图 3。一般情况, 每个循环周期时长相同。

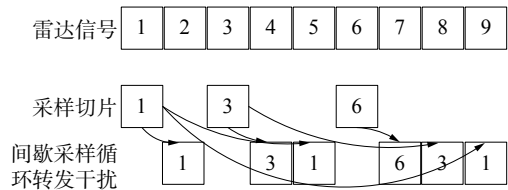


图3 间歇采样循环转发工作原理

2 峭度准则下的自适应 SSD 参数选择

2.1 峭度准则

为了能够在低信噪比下分离出具有“冲击”特性的干扰分量, 引入了一个概念——峭度^[10]。峭度系数 K 可以定量表征出峭度特性, 作为一个无量纲参数, 其可以定义为

$$K = \frac{E(x-\mu)^4}{\sigma^4} \quad (2)$$

式中: σ 为标准差, μ 为均值, x 为信号。

由式 (2) 可知, 峭度值越大, 则所求信号的观测值浮动就越大。由此可以得到结论: 在低信噪下, 信号的 SSD 分量的 K 值越大, 则此分解分量的干扰信息就越丰富, 干扰类型的特性就越明显, 因此峭度系数可作为最佳参数选择的依据。

2.2 SSD 算法及其参数选择

SSD 是现代信号处理的一种新方法, 它能够解决非线性、非平稳时间序列信号的自适应分解问题, 分解成若干成分, 这些成分就称之为奇异谱分量 (singular spectrum component, SSC), SSD 算法是基于迭代算法把成分从高频向低频排列。

SSD 算法需要选取分解个数和最优分量。以往需要人为的经验选取, 不仅效率低下而且选取

的参数可能也不是最优解^[11]。为此,本文提出了一种基于峭度准则的自适应参数选择的方法,用以同时解决奇异谱分解算法中分解个数设置和最优分量选取的问题。奇异谱分解算法的自适应参数选择的流程如图4所示。

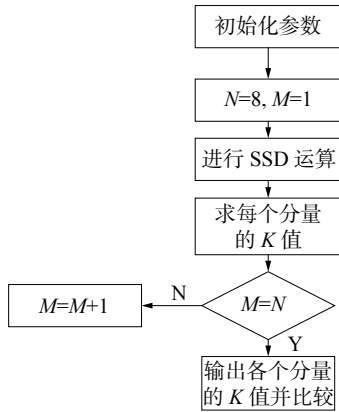


图4 自适应 SSD 参数选择流程

具体步骤如下:

1) 预设一个最大分解个数 N , N 值一般可设为6或者8,本文中取 $N=8$ 。然后初始化奇异谱分解算法的各个参数,设定 $M=1$ 。

2) 利用奇异谱分解算法对信号进行处理,得到 M 个分量,对这 M 个分量分别求峭度系数,并储存。

3) 令 $M=M+1$,重复步骤1)、2),直到 $M=N$,循环结束。

4) 将储存的峭度系数进行比较,可以先把每个分解个数的第1个分量取出作比较得到,选取最佳分解个数,然后把该最佳分解个数的所有分解分量进行比较得到最佳分解分量。其依据就是 K 值大小, K 值越大代表该分量的干扰特征明显,干扰信息丰富,更有特征提取的价值。

在此,以间歇采样直接转发干扰为例,设定了分解个数为2、6、8时,把混合信号进行奇异值分解,其结果如图5~7所示。从3个图可以看出,随着分解个数的增加,混合信号被分解的更加细致。

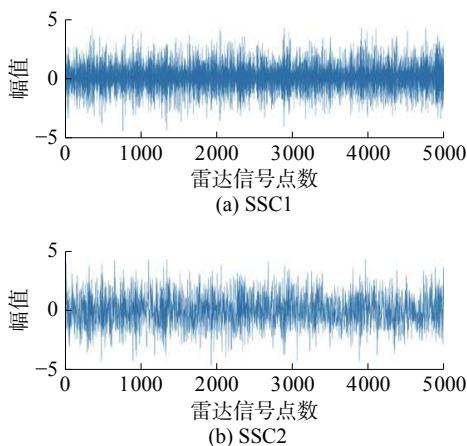


图5 分量个数为2时 SSD 分解结果

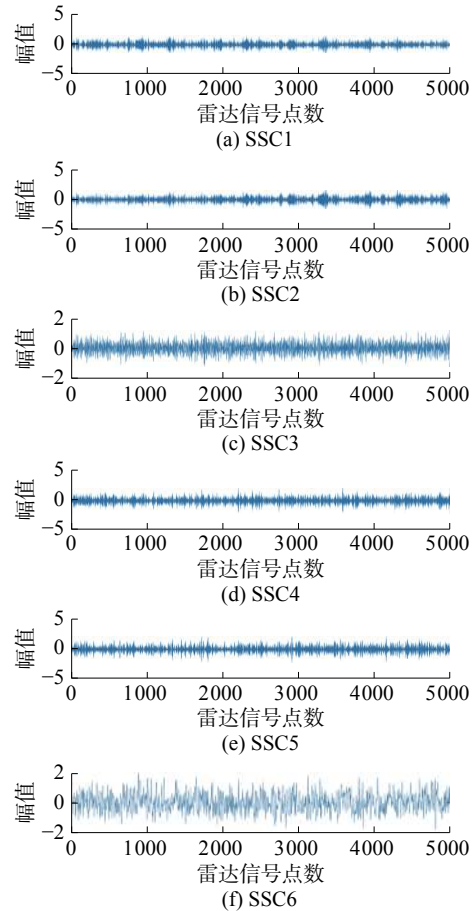
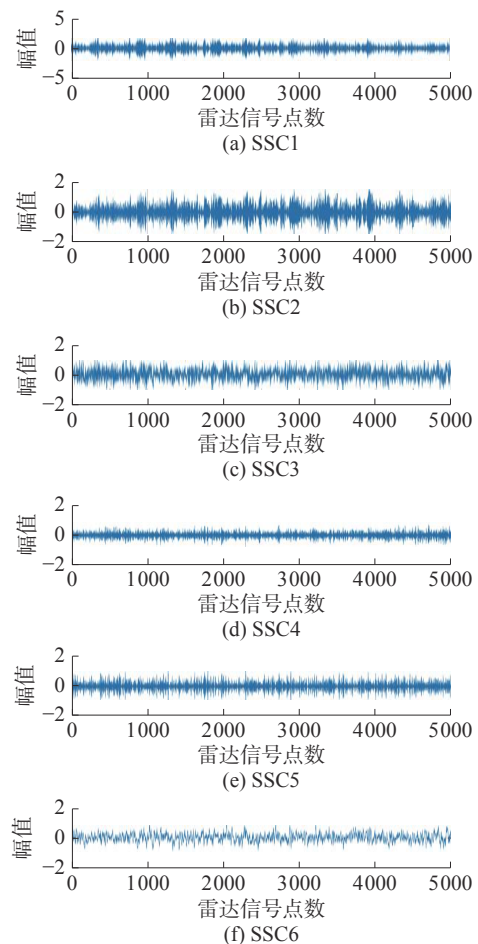


图6 分量个数为6时 SSD 分解结果



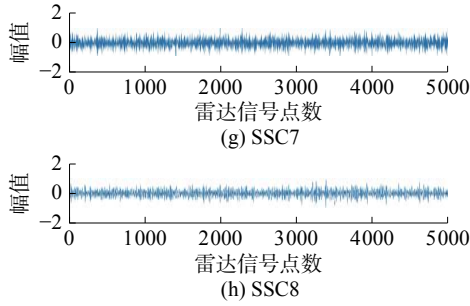


图7 分量个数为8时SSD分解结果

本文通过上述方法,得到最优选取分量个数为8。在选择完最佳分量个数后,分别得到了每个分解分量的峭度值如表1所示。从表中我们可以看出,第1个成分的峭度值最高,因此,本文选择第1个分解成分作为主要分析成分。

表1 分量个数为8时各分量的峭度系数

| SSC1 | SSC2 | SSC3 | SSC4 | SSC5 | SSC6 | SSC7 | SSC8 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3.12 | 3.08 | 2.96 | 3.05 | 2.91 | 2.87 | 2.92 | 3.05 |

3 基于SSD算法和1.5维谱特征提取识别方法

3.1 1.5维谱

对于一个非高斯的随机平稳信号 $x(t)$,其三阶累积量为^[12]

$$C_{3x}(\tau_1, \tau_2) = E[x(n)x(n+\tau_1)x(n+\tau_2)]$$

定义三阶累积量一维的对角切片为

$$r_{1,2}^x(\tau) \triangleq \text{cum}(x(t), x(t+\tau), x(t+\tau)) = C_{3x}(\tau, \tau)$$

定义三界累积量对角切片的傅里叶变换为 $x(t)$ 的1.5维谱^[13]

$$B(\omega) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} r_{1,2}^x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \triangleq C_{3x}(\tau, \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

时变1.5维谱是高阶累积量,具有抑制高斯噪声和对称分布噪声的能力;且其计算量在高阶谱中最小,与功率谱相近;可增强谐波信号中的基频分量;可消除二次相位耦合时的谐波分量;能准确地提取出干扰的特征。

3.2 SSD算法和1.5维谱的新型雷达干扰识别方法

鉴于上面所述,论述了奇异值分解和1.5维谱的优势,SSD算法先对低信噪比下的信号进行处理,提高信噪比,把分解分量进行1.5维谱计算,提高信噪比的同时,把干扰的特征提取出来以做识别。本文结合了两者的优势提出了基于SSD算法和1.5维谱的自适应性雷达新型干扰识别方法,具体的方法流程如图8所示。

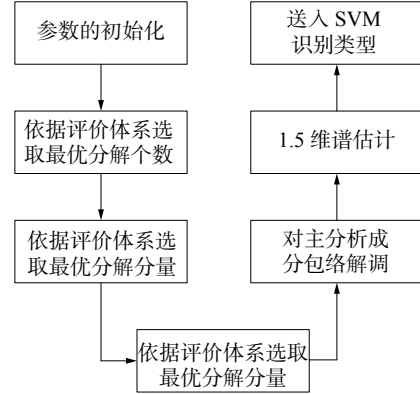


图8 算法流程

1) 自适应SSD参数选择。混合信号送入参数评价系统,首先设定最大分解个数,这里设置最大分解个数为8,依据图4所示流程,通过基于峭度准则的评价体系,不断迭代选取最优的奇异值分解个数。

2) 主分析成分的选取。已知步骤1)中选取的最优分解个数,把混合信号通过SSD算法分解,再根据每个分解分量的 K 值,选取最优分解分量,把这个分解分量作为主分析成分。

3) 主分析成分的特征提取。我们对主分析成分进行包络解调,对主分析成分的包络求取1.5维谱估计。

4) 把1.5维谱估计的结果送入SVM中,进行识别,获得识别结果。

3.3 实验仿真和结果分析

对间歇采样直接转发干扰,间歇采样重复转发干扰,间歇采样循环转发干扰,噪声卷积干扰,噪声乘积干扰分别与雷达回波信号混合,实验参数为信号采样率为50 MHz,雷达回波信号的脉宽为100 μ s,带宽 B 为5 MHz。所有干扰的干信比设为20 dB。间歇采样直接转发干扰信号的仿真参数为:采样间隔为10 μ s,采样占空比为50%。间歇采样重复转发干扰信号的仿真参数为:采样间隔为25 μ s,采样占空比为20%。间歇采样循环转发干扰信号的仿真参数为:采样间隔为25 μ s,采样占空比为20%。噪声卷积干扰信号的仿真参数为:调制噪声采用带限高斯白噪声,噪声带宽15 MHz,噪声长度100 μ s。噪声乘积干扰信号的仿真参数为:调制噪声采用带限高斯白噪声,噪声带宽1 MHz,噪声长度100 μ s。

本实验先分别对信噪比为5 dB和0 dB的混合信号送入搭建的系统,得到归一化1.5维谱估计,每种信号类型仿真了400次,结果如图9、10所示。

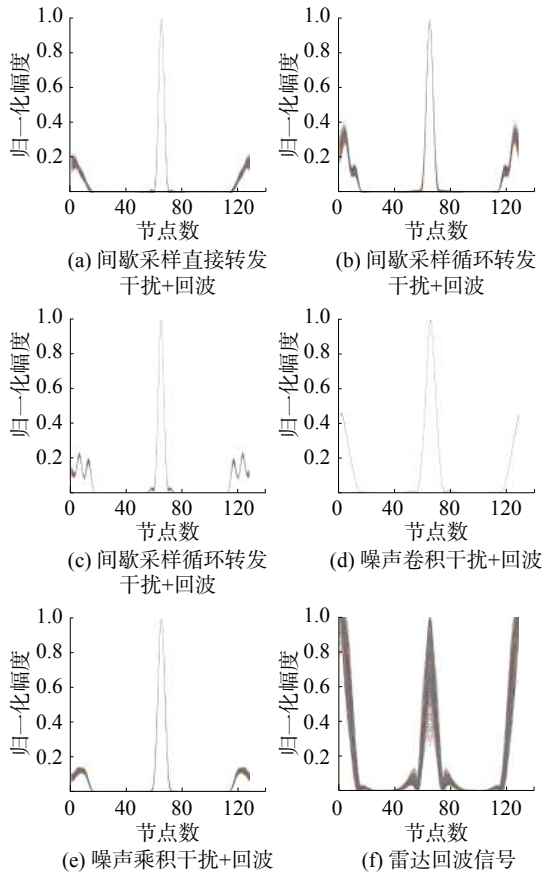


图9 信噪比为 5 dB 时的 1.5 维谱

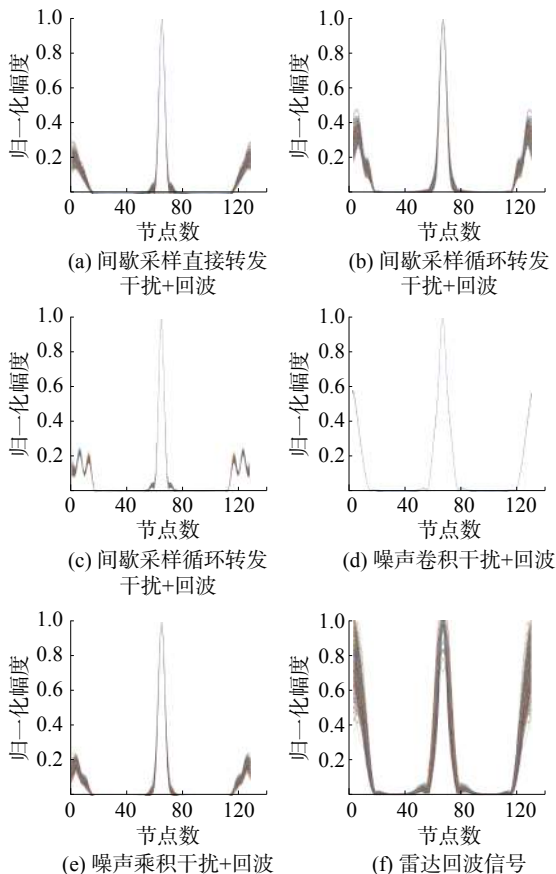


图10 信噪比为 0 dB 时的 1.5 维谱

从图 9、10 可以看出本文提出方法的优越性。由结果横向对比,可以看出 5 种干扰和回波的 1.5 维谱中峰的个数、峰面积、开始以及结束的图谱走势等不尽相同。对结果纵向对比,可以看出 0 dB 和 5 dB 两种信噪比下的 5 种新型干扰和雷达回波的 1.5 维谱基本相同,说明这种特征稳定。

根据流程把 5 种干扰和回波的混合信号送入搭建的系统,设定实验中的信噪比范围为 $-5\sim 5$ dB,以步长为 2 dB 进行实验,每次实验进行 400 次蒙特卡洛仿真,选取 280 个特征样本作为支持向量机的训练集,选取另外的 120 个特征样本作为支持向量机的测试集,送入 SVM 中进行训练学习并识别,其识别结果与文献 [14] 的对比结果如图 11 所示,每种信号的各自识别率如表 2 所示,6 种信号在信噪比为 -5 dB 下的混淆矩阵如图 12 所示。

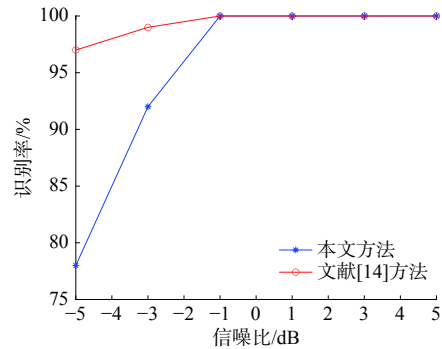
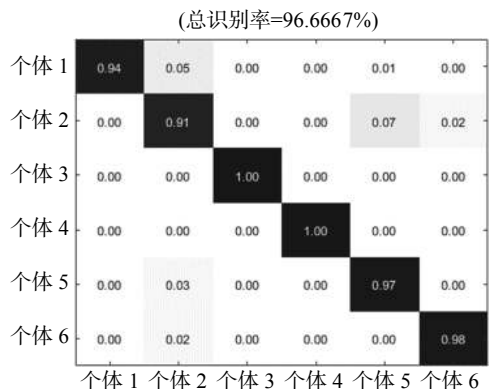


图11 本文方法和文献 [14] 的识别方法对比

表2 不同信噪比下的识别率

| 信噪比/dB | a | b | c | d | e | f | 平均识别率/% |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| 5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| -1 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| -3 | 99 | 98 | 100 | 100 | 99 | 100 | 99 |
| -5 | 94 | 91 | 100 | 100 | 97 | 98 | 97 |

图12 信噪比为 -5 dB 时的混淆矩阵

从表2、图11和图12可以看出,在低信噪比下,本文提出的方法也具有很高的识别率,在信噪比高于-5 dB时,平均识别率高于95%,不仅可以识别出回波是否被干扰,而且还可以识别出干扰类型。与文献[14]中的方法相比,使用文献中的方法,信噪比在-2 dB以上、识别率在90%以上;信噪比在-4 dB时,识别率接近80%。

4 结论

本文首先对干扰进行了仿真,依据干扰机理,分析提取目标在最佳SSD分解个数下的最佳分解分量的1.5维谱特征,所提特征因子在谱上体现了目标和干扰的差异。在上述特征提取的基础上,利用支持向量机分类器进行目标和干扰分类的识别,最终实现抗干扰的目的。作为一种新的处理非平稳非线性信号的自适应信号处理方法,SSD在抑制伪分量的产生和模态混叠方面具有优势,且表现出更好的鲁棒性。因此,将SSD应用于低信噪比下精确分离富含干扰信息特征的信号分量,提高原始信号的信噪比;并将1.5维谱作为后续分析,进一步抑制信号分量中的无关噪声干扰。

参考文献:

- [1] UJAN S, NAVIDI N, LANDRY R JR. Hierarchical classification method for radio frequency interference recognition and characterization in satcom[J]. *Applied sciences*, 2020, 10(13): 4608.
- [2] 蒋莹,何明浩,郁春来,等. 基于频域稀疏性的间歇采样转发干扰识别[J]. *空军预警学院学报*, 2015, 29(5): 318-321, 342.
- [3] 刘强. 基于深度学习的雷达干扰识别技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [4] DU Congju, TANG Bin. Novel unconventional-active-jamming recognition method for wideband radars based on visibility graphs[J]. *Sensors*, 2019, 19(10): 2344.
- [5] GUO Yifan, LIAO Guisheng, LI Jun, et al. An improved range deception jamming recognition method for bistatic MIMO radar[J]. *Digital signal processing*, 2019, 95: 102578.
- [6] HAO Honglian, ZENG Dazhi, GE Ping. Research on the method of smart noise jamming on pulse radar[C]// *Proceedings of the Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control*. Qinhuangdao, China, 2015: 1339-1342.
- [7] ZHANG Yanbin. Technology of smart noise jamming based on multiplication modulation[C]// *Proceedings of 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*. Wuhan, China, 2011: 1-3.
- [8] 刘明骞,高晓腾,张俊林. 多类型的雷达有源干扰感知新方法[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(10): 103-108, 121.
- [9] 郑苒榕. 雷达有源干扰识别方法及高效实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [10] 聂永辉,徐明文,张译丹. 基于多小波和峭度准则的风力发电机滚动轴承故障检测[J]. *东北电力大学学报*, 2019, 39(6): 15-23.
- [11] 檀鹏超. 雷达有源欺骗干扰多维特征提取与识别技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [12] 祝存海. 基于特征提取的雷达有源干扰信号分类研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [13] 王璐. 雷达新型有源干扰抑制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [14] 彭荣硕,董鹏曙,孟藏珍. 基于1.5维谱的欺骗干扰识别方法[J]. *空军预警学院学报*, 2019, 33(5): 349-352.

本文引用格式:

张忠民,王雨鑫. 基于自适应的SSD算法和1.5维谱的新型雷达干扰识别[J]. *应用科技*, 2021, 48(5): 54-59.
ZHANG Zhongmin, WANG Yuxin. New radar jamming recognition based on adaptive SSD algorithm and 1.5-dimensional spectrum[J]. *Applied science and technology*, 2021, 48(5): 54-59.