

基于时频图像特征提取的 LFM 雷达有源欺骗干扰识别

杨少奇, 田波, 李欣, 谭铭

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 为了提高雷达的抗干扰能力,有针对性地合成最有效的抗干扰措施,提出了一种基于时频图像特征提取的欺骗干扰识别方法。该方法对雷达接收信号进行时频分析,根据时频图像分布的特点,提取时频域可分离度和三阶 Renyi 熵 2 个有效特征参数,将 2 个特征参数用于雷达接收信号的自动干扰识别。仿真结果验证了算法的有效性和稳定性,为后续抗干扰措施的选取提供了先验信息。

关键词 有源欺骗干扰; SPWVD; 特征提取; 干扰识别

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.011

中图分类号 V243.2; TN974 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0056-04

A Recognition Method of LFM Radar Active Deception Jamming Based on SPWVD Figure

YANG Shaoqi, TIAN Bo, LI Xin, TAN Ming

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to improve the anti-jamming ability of radar and synthesize the most effective anti-jamming measures in accordance with, a jamming recognition method is proposed based on SPWVD features analyzed. In this method, SPWVD distribution of received radar signal is given firstly, and feature extraction of radar active deception jamming by separating degree in time-frequency domain and Renyi entropy is put forward based on its distribution difference. Finally, these two features are used in jamming recognition. The simulation results show that the technique is effective and stable in recognizing active deception jamming signal. And by doing so this provides the selections of follow-up anti-jamming measures with a priori information.

Key words: active deception jamming; SPWVD; feature extraction; jamming recognition

随着现代电子干扰技术的发展,有源欺骗式干扰对雷达造成的威胁越来越大。根据欺骗干扰参数的不同,典型的欺骗式干扰有距离拖引干扰(RG-PO)、速度拖引干扰(VGPO)以及距离速度同步拖引干扰(R-VGPO)3种。由于干扰信号参数与雷达回波信号在多个参数域重叠^[1],导致雷达很难识别自身是否受到干扰,从而无法使用有效的方法进行

干扰抑制。因此,研究欺骗式干扰方式的识别方法,对于提高雷达抗干扰措施的针对性和有效性具有积极意义^[2]。

雷达有源欺骗干扰识别,可以看作具有高度相似性的多个信号之间的检测和分类的过程。目前国内研究主要集中在 2 个方面:一是提取有效的信号特征;二是选取高效的模式识别方法。相关研究存

收稿日期:2015-05-21

基金项目:航空基金(2013096001)

作者简介:杨少奇(1992-),男,安徽阜阳人,硕士生,主要从事智能抗干扰研究.E-mail:ysq4ever@163.com.

引用格式:杨少奇,田波,李欣,等.基于时频图像特征提取的 LFM 雷达有源欺骗干扰识别[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):56-59. YANG Shaoqi, TIAN Bo, LI Xin, et al. A Recognition Method of LFM Radar Active Deception Jamming Based on SPWVD Figure[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 56-59.

在如下不足:文献[3]存在非负矩阵分解具有不唯一性的缺点,识别率达不到 100%;文献[4]需要利用多个脉冲,增加了处理时间;文献[5]在相位量化位数大于 4 时失效,文献[6]亦存在类似的问题;文献[7]极化测量复杂度较高难以实现;文献[8]没有对拖引干扰进行分析。针对上述问题,本文主要从时频分析出发,寻找能够有效表征雷达接收信号的特征参数,对雷达有源欺骗干扰进行识别。

1 雷达接收信号时域模型

欺骗性干扰是指使用假的目标信息作用于雷达的目标检测和跟踪系统,使雷达不能正确的检测真正的目标,或者不能正确的测量真正目标的参数信息^{[9]112-119},本文主要针对距离拖引干扰、速度拖引干扰和距离-速度联合拖引干扰进行分析和识别。

拖引干扰分为捕获期、拖引期和停拖期,本文主要针对拖引期的某一脉冲信号进行分析研究。

假设雷达发射信号采用 LFM 形式,则其可以表示为:

$$S(t) = \exp j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \varphi_0) \quad (1)$$

式中: f_0 为中频频率; k 为调频斜率; φ_0 为初始相位。暂不考虑噪声的影响,则距离雷达 R_0 处的目标回波信号为:

$$S_T(t) = A_T \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c) + \pi k (t - 2R_0/c)^2 + \varphi_0) \quad (2)$$

式中: A_T 为回波信号的幅度; c 为光速。当干扰机实施距离后拖干扰时,由于干扰信号与目标回波发生相干合成,雷达接收到的信号为:

$$S_R(t) = A_T \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c) + \pi k (t - 2R_0/c)^2 + \varphi_0) + A_R \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c - \Delta t_0 - \Delta t_j(t)) + \pi k (t - 2R_0/c - \Delta t_0 - \Delta t_j(t))^2 + \varphi_j) \quad (3)$$

式中: A_R 为干扰信号幅度; Δt_0 为干扰机固有时延; $\Delta t_j(t)$ 为调制时延; φ_j 为干扰信号初始相位。当干扰机实施速度后拖干扰时,干扰信号与目标回波发生相干合成,雷达接收到的信号为:

$$S_V(t) = A_T \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c) + \pi k (t - 2R_0/c)^2 + \varphi_0) + A_V \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c - \Delta t_0) + \pi k (t - 2R_0/c - \Delta t_0)^2 + \varphi_j \exp(j2\pi \Delta f_j(t))) \quad (4)$$

式中: A_V 为干扰信号幅度; $\Delta f_j(t)$ 为调制频移。当干扰机实施距离-速度联合拖引干扰时,干扰信号与目标回波发生相干合成,雷达接收到的信号为:

$$S_{RV}(t) = A_T \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c) + \pi k (t - 2R_0/c)^2 + \varphi_0) + A_{RV} \exp j(2\pi f_0 (t - 2R_0/c - \Delta t_0 - \Delta t_j(t)) + \pi k (t - 2R_0/c - \Delta t_0 - \Delta t_j(t))^2 + \varphi_j \exp(j2\pi \Delta f_j(t))) \quad (5)$$

式中: A_{RV} 为干扰信号幅度。

2 时频图像特征提取

时频分析多用于非平稳信号的分析与处理^[10],以及振动信号特征提取和故障诊断^[11]等。魏格纳-维尔分布(WVD)是典型的 Cohen 类时频分布,作为常用的时频分析工具,具有良好的时频聚集性,但多个信号存在时它的双线性会造成很多交叉项。在此基础上的平滑伪魏格纳-维尔分布(SPWVD)在时域上进行平滑,能够有效地抑制交叉项。

2.1 SPWVD 时频图

通过对雷达接收信号时域模型进行分析,可以发现:由于调制时延和调制频移的影响,干扰存在下的接收信号与目标回波在时域、频域上均存在差异。由于 LFM 信号在时频域具有耦合特性,因此有必要对雷达接收信号进行时频联合分析。WVD 是时频聚集性最好的时频分布,表达式为:

$$WVD(t, f) = \int s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (6)$$

对 WVD 对 t 和 τ 分别加窗 $h(\tau)$ 和 $g(u)$ 可得:

$$SPWVD(t, f) = \iint s(t - u + \frac{\tau}{2}) s^*(t - u - \frac{\tau}{2}) h(\tau) g(u) e^{-j2\pi f \tau} d\tau du \quad (7)$$

对雷达接收信号进行时频分析,得到图 1。

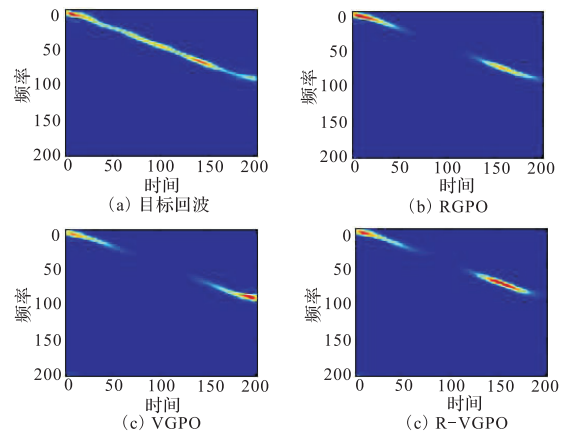


图 1 雷达接收信号的时频图像(JNR=5 dB)

Fig.1 SPWVD figure of received radar signal (JNR=5 dB)

仿真参数设置如下:信号带宽 5 MHz,脉宽 10 μ s,采样频率 20 MHz;为达到欺骗效果,干扰信号幅度一般为回波信号的 1.3~1.5 倍,本文取 1.4,即干信比为 2.922 6 dB,干扰机固有时延 200 ns;距离拖引的拖引速度为 750 m/s;速度拖引的拖引速度取 50 kHz/s;干噪比为 5 dB。SNR = $|s(t)|^2 / |n(t)|^2$, $j(t)$ 为干扰信号,则干噪比 JNR = $|j(t)|^2 / |n(t)|^2$,干信比 JSR = $|j(t)|^2 / |s(t)|^2$,则他们之间的关系为 JNR=SNR+JSR。

观察图 1 可以看出,目标回波信号与 3 种干扰

下信号的时频图有着明显的不同,而3种干扰下的时频图差别较为细小,因此需要进一步研究能够区分目标回波以及3种干扰信号的有效特征参数。

2.2 Renyi 熵特征提取

Renyi 熵是 Shannon 熵的推广,可以作为信号复杂度的测度,用来估计信号的信息量和复杂度^[6],对于连续形式的二维概率密度分布 $f(x, y)$ 来说,其 α 阶 Renyi 熵可以表示为:

$$R^\alpha = \frac{1}{1-\alpha} \log_2 \left[\iint f^\alpha(x, y) dx dy \right] \quad (8)$$

对于雷达接收信号而言,时频分布与二维联合概率密度函数 $f(x, y)$ 有着类似的性质^[6],则时频分布 SPWVD (t, f) 的 α 阶 Renyi 熵定义为:

$$R^\alpha = \frac{1}{1-\alpha} \log_2 \left[\iint \text{SPWVD}^\alpha(t, f) dt df \right] \quad (9)$$

文献^[6]指出 $\alpha = 3$ 时,大多数信号满足稳定条件 $\iint \text{SPWVD}^3(t, f) dt df > 0$,同时时频分布交叉项的熵值是渐近为 0 的,所以 3 阶 Renyi 熵的稳定性较好。本文对 4 种雷达接收信号的时频图像求 3 阶 Renyi 熵,干噪比为 1~16 dB,由于高斯白噪声的随机性,每个干噪比下作 300 次重复实验,对得到的 Renyi 熵求取平均,其仿真结果见图 2。

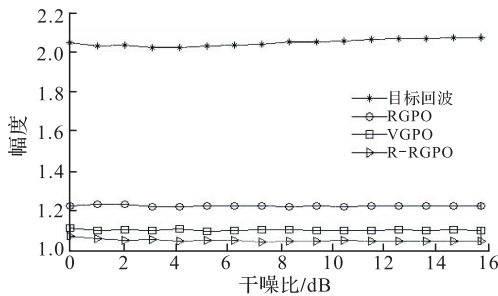


图 2 Renyi 熵随干噪比变化曲线

Fig.2 Curve of Renyi entropy while JNR is changing

图 2 可以看出,目标回波信号的 3 阶 Renyi 熵明显大于 3 种干扰信号下的回波信号,因此取适当的阈值 R_0 能够区分开回波信号和干扰信号。对于 3 种干扰信号,其 3 阶 Renyi 熵差异较小,不能用于特征识别,因此需要寻找新的特征参数。

2.3 时频域可分离度特征提取

观察图 1 可知,对 3 种干扰下的雷达接收信号的时频图而言,每幅图像均存在 2 个能量集中的区域,而 2 个区域在时间轴上对应的位置之差有所区别。因此定义一个特征量:时频图像能量极值点可分离度,简称为时频域可分离度 TFSD。首先将时频图像从时间轴中间一分为二,然后分别求取左右两部分每个时间点的能量,取极大值并找出其对应的时间坐标,求其时间坐标差值的绝对值,即得到

TFSD 值。对 3 种信号进行仿真,干噪比为 1~16 dB,每个干噪比下作 300 次重复实验,对得到的值求取平均,仿真结果见图 3。

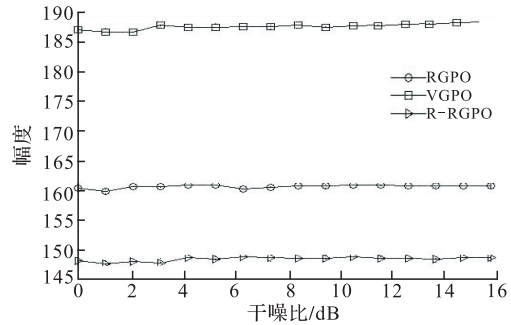


图 3 TFSD 随干噪比变化曲线

Fig.3 Curve of TFSD while JNR is changing

由图 3 可知,3 种干扰下的雷达接收信号的 TFSD 值明显不同,而且随干噪比的变化基本保持在同一个值附近,因此 TFSD 值可以作为特征参数对 3 种信号进行识别。分别取阈值 TFSD1 和 TFSD2,大于 TFSD1 为 VGPO,小于 TFSD1 大于 TFSD2 为 RGPO,小于 TFSD2 为 R-VGPO。

3 干扰识别

根据提取得到的特征参数 R 和 TFSD,采用统计判决树对雷达接收信号进行识别,识别算法的流程见图 4。

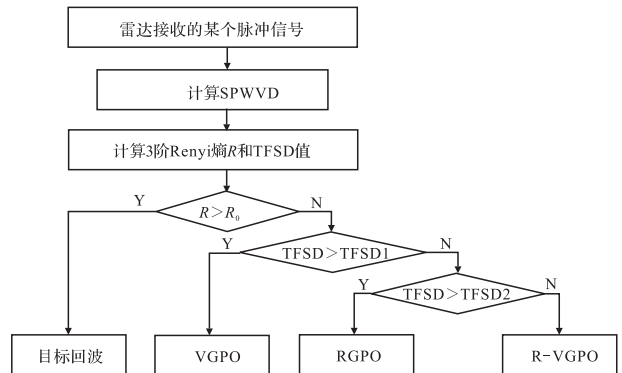


图 4 欺骗干扰识别流程图

Fig.4 Flow chart of deception jamming recognition

由于干扰信号采用 TFSD 值进行识别,则阈值 R_0 的选取原则是确保目标回波的正确识别率;在 TFSD1 和 TFSD2 的选取中,需要兼顾 RGPO、VGPO、R-VGPO 三者的识别率,对其进行折中选取,经过实验可以找到 2 个合适的阈值使 3 种干扰信号均有较高的识别率。

为了验证本算法的有效性,设置仿真条件如下:干噪比为 1~16 dB,每个干噪比下做 300 次仿真实验,根据阈值 R_0 , TFSD1, TFSD2 对 3 种信号进行识别,结果见图 5。

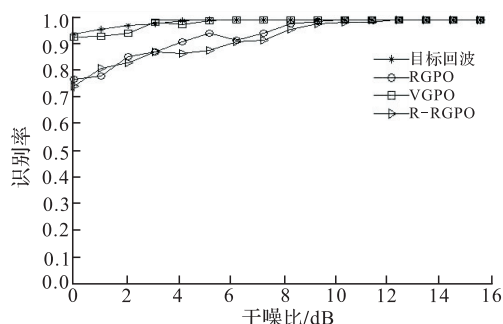


图 5 雷达接收信号识别曲线

Fig.5 Recognition rate of received radar signal

由图 5 可以看出,该方法对 4 种信号均具有较高的识别率,随着干噪比的增加,4 种信号的识别率均达到 100%,而真实目标的识别率最高,减小了漏报的概率,以保证己方的安全。同时对文献[12]可以看出在较低的干噪比下($JNR < 5$ dB),本文的识别率高于文献[12],证明了本文算法的有效性和稳定性,也说明了时频图像特征提取是解决 LFM 雷达干扰识别的一个新途径。

4 结语

针对有源欺骗式拖引干扰下的 LFM 雷达接收信号的特点,对其进行时频分析,得到 SPWVD 时频图像,提取 3 阶 Renyi 熵和时频域可分离度作为特征参数,并根据特征参数进行欺骗干扰识别,仿真结果验证了算法的有效性和稳定性,为后续抗干扰措施的选取提供了先验信息。本文仅以 LFM 体制雷达为例,也仅考虑了噪声对算法的影响,其他体制雷达的干扰信号识别算法验证以及复杂电磁环境下的干扰信号识别还有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] M Ahmed. Parameterized DRFM Modulator for ECM Systems [J]. International Journal of Advanced Electronics and Communication System, 2012, 1(1):56-60.
- [2] 李建勋,唐斌,吕强. 双谱特征提取在欺骗式干扰方式识别中的应用[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(8):329-332.
LI Jianxun, TANG Bin, LÜ Qiang. Bispectrum Feature Extraction Used in Deceptive Jamming Models Recognition [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(8):329-332. (in Chinese)
- [3] X Tian, B Tang, G Gui. Product Spectrum Matrix Feature Extraction and Recognition of Radar Deception Jamming [J]. International Journal of Electronics, 2013, 100(12):1621-1629.
- [4] X Tian, B Tang. Spectrum Texture Features Based Radar Deception Jamming Recognition Using Joint Frequency-Slow

Time Processing [J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(13): 5181-5188.

- [5] M Greco, F Gini, A Farina. Radar Detection and Classification of Jamming Signals Belonging to a Cone Class [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1984-1993.
- [6] 卢云龙,李明,闫琰. 利用调频率匹配的 DRFM 欺骗干扰检测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(5): 67-73.
LU Yunlong, LI Ming, YAN Yan. Method for Detecting DRFM Deception Jamming Based on LFM Rate Matching [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(5): 67-73. (in Chinese)
- [7] 刘勇,梁伟,王同权,等. 基于空域极化捷变的有源假目标鉴别[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2):288-294.
LIU Yong, LIANG Wei, WANG Tongquan. Active Decoy Discrimination Based on Spatial Polarization Agility [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(2):288-294. (in Chinese)
- [8] 李志明. 雷达有源干扰信号的自动识别方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009:16-25.
LI Zhiming. Research on Signal Recognition Method of Radar Active Jamming [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009:16-25. (in Chinese)
- [9] 张永顺,童宁宁,赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2010.
ZHANG Yongshun, TONG Ningning, ZHAO Guoqing. Principles of Radar Electronic Warfare [M]. 2nd Edition. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [10] 白航,赵拥军,沈伟,等. 基于时频分布 Renyi 熵特征的雷达辐射源识别[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1):437-442.
BAI Hang, ZHAO Yongjun, SHEN Wei, et al. Radar Emitter Recognition Based on Renyi Entropy of Time-Frequency Distribution [J]. Journal of Circuits and Systems, 2013, 18(1): 437-442. (in Chinese)
- [11] 章立军,刘博,张彬,等. 基于时频图像融合的轴承性能退化特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22):53-58.
ZHANG Lijun, LIU Bo, ZHANG Bin, et al. Feature Extraction Method of Bearing Performance Degradation Based on Time-frequency Image Fusion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22):53-58. (in Chinese)
- [12] 田晓,唐斌. 基于归一化小波分解能量比的雷达有源欺骗干扰识别[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(4):416-420.
TIAN Xiao, TANG Bin. Active Deception Jamming Recognition of Radar Based on Normalized Wavelet Decomposition Power Ratio [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(4):416-420. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)