

双谱特征提取在欺骗式干扰方式识别中的应用

李建勋^{1,3}, 唐斌², 吕强¹

(1. 空军装备研究院雷达与电子对抗研究所 北京 海淀区 100085; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054;

3. 装甲兵工程学院控制工程系 北京 丰台区 100072)

【摘要】为了识别出具体的欺骗干扰方式,从而使雷达有针对性地选择抗干扰方法,该文提出了基于双谱特征和模式识别技术的欺骗式干扰识别方法。该方法给出了欺骗式干扰的双谱分布和估计方法,在分析其分布特征和统计特性的基础上,定义两种特征因子;采用基于核聚类的支持向量机分类器,完成对不同欺骗干扰方式的识别;建立了完整的干扰模式识别模型。仿真实验表明,该方法对3种不同欺骗干扰方式的正确识别率高,而且基本不受干噪比影响。

关键词 双谱; 欺骗式干扰; 特征提取; 干扰模式识别; 支持向量机

中图分类号 TN973

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.003

Bispectrum Feature Extraction Used in Deceptive Jamming Modes Recognition

LI Jian-xun^{1,3}, TANG Bin², and LÜ Qiang¹

(1. Radar and ECM Institute, Equipment Academy of Air Force Haidian Beijing 100085;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

3. Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering Fengtai Beijing 100072)

Abstract In order to recognize the deceptive jamming mode to make radar more effective in choosing anti-jamming measures, a deceptive jamming recognition method based on bispectrum feature analysis and pattern recognition technology is proposed. In this method, the bispectrum distribution and estimation method of deceptive jamming is given firstly, based on its distribution feature and statistical characteristic, two feature factors of deceptive jamming are defined, and then the support vector machine (SVM) classifier based on kernel clustering algorithm is designed to classify the feature factors and to recognize the different deceptive jamming modes. Finally, the complete jamming mode recognition model is built and simulated. The results of simulation show that this model has high correct recognition rate for 3 different deceptive jamming modes and little affected by jamming to noise rate.

Key words bispectrum; deceptive jamming; feature extraction; jamming pattern recognition; support vector machine

在军用雷达的发展历史中,干扰与抗干扰作为一对基本矛盾,一直是相生相伴、互相制约也互相促进。欺骗式干扰由于采用假的信息作用于雷达目标跟踪系统,使雷达不能正确地检测和跟踪目标,而常规的抗干扰手段对这种干扰方式的效果都比较差,所以欺骗式干扰已逐渐成为最常使用的干扰手段之一^[1]。

欺骗式干扰主要分为距离欺骗、角度欺骗和速度欺骗,针对这几种干扰方式,国内外的研究者已先后提出了相应的抗干扰方法,例如基于神经网络的雷达抗转发式距离欺骗干扰方法^[2]、采用发射脉冲间相互正交或近似正交的随机相位扰动信号形式

距离拖引欺骗干扰的方法^[3]、调频连续波雷达中基于线性预测滤波的抗速度欺骗干扰技术^[4]、通过保证雷达正确跟踪真实目标的脉冲前沿跟踪算法抗角度欺骗干扰^[5]、对目标信号和欺骗式干扰进行分类并实现目标检测的抗干扰方法^[6]等方法。这些方法适用的前提是已知雷达受到的欺骗干扰的具体方式,但目前关于这方面的研究还很少,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。

本文从模式识别角度出发,研究欺骗式干扰的识别方法。首先分析不同欺骗干扰方式的双谱特征,在此基础上,定义双谱对角切片的方差和双谱分布

收稿日期: 2008-03-19; 修回日期: 2008-09-29

基金项目: 部级预研基金(51307050401)

作者简介: 李建勋(1979-),男,博士生,主要从事雷达抗干扰和智能技术等方面的研究。

的信息熵为特征因子,然后设计基于核聚类支持向量机(support vector machine, SVM)多类分类器对特征因子进行分类,完成欺骗式干扰方式的识别。仿真结果表明,在不考虑背景噪声的情况下,该方法对常见的3种欺骗式干扰方式的识别率达到95%以上。

1 干扰信号双谱特征分析

1.1 欺骗式干扰信号模型

欺骗式干扰主要包括距离欺骗、角度欺骗和速度欺骗,考虑3种干扰方式下,干扰机截获到的雷达单次扫描期间的发射信号为^[7]:

$$s(t) = U \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1)$$

根据欺骗式干扰的定义和式(1),可以将3种欺骗式干扰信号用一种模型表示为^[7]:

$$J_d(t) = K_d U \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_j(t)) \times (t - \Delta\tau_j(t)) + \varphi + \varphi_j(t)] \quad (2)$$

式中 $K_d \geq 1$, 为功率放大系数,一般为常数; $\Delta\tau_j(t)$ 、 $\varphi_j(t)$ 和 $\Delta\omega_j(t)$ 分别为距离、角度和速度欺骗的调制函数,一般为^[7]:

$$\Delta\tau_j(t) = kt^2, \quad \Delta\varphi_j(t) = \Delta\omega_j(t) = kt \quad (3)$$

式中 k 为常数。如果欺骗式干扰信号不包含某项欺骗式干扰,则相应的项为0,即用式(2)表示距离欺骗干扰时, $\Delta\tau_j(t)$ 如式(3)所示, $\varphi_j(t)$ 和 $\Delta\omega_j(t)$ 均为0。

1.2 干扰信号的双谱定义

对式(2)求导,可得到欺骗式干扰的概率密度函数,记为 $p_d(t)$,则欺骗式干扰的特征函数定义为:

$$\phi_d(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_d(t) e^{j\omega t} dt \quad (4)$$

第二特征函数定义为:

$$\psi_d(\omega) = \ln \phi_d(\omega) \quad (5)$$

平稳随机变量的 k 阶累积量为随机变量的第二特征函数在原点处的 k 阶导数,因为欺骗式干扰为非平稳随机过程,具有时变特性,所以不能直接应用高阶累积量的定义。鉴于雷达的周期性,进入雷达接收机内部的欺骗式干扰信号应为循环平稳随机过程,可定义时变累积量为^[8]:

$$c_d^{(k)}(t; \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}[J_d(t), J_d(t + \tau_1), \dots, J_d(t + \tau_{k-1})] \quad (6)$$

欺骗式干扰信号的时变累积量谱定义为时变累积量的傅里叶变换,时变双谱定义为^[9]:

$$B_d(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} c_d^{(3)}(t; \tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} \quad (7)$$

时变双谱具有如下性质:

(1) 双谱一般是复函数,包含幅度和相位部分,

所以具有功率谱里没有的相位信息,可以从双谱中得到更多的特征信息;

(2) 双谱是双周期函数,周期为 2π ;

(3) 双谱具有对称性质,在分析干扰信号特征时,可以只分析其双谱某一对角切片的特征,降低运算量,提高运算速度。

1.3 双谱估计方法

干扰特征分析需要通过有限数据估计其双谱。双谱估计的方法有非参量法和参量模型法,非参量法包括间接法和直接法。非参量法中的直接法和间接法,其估计结果都是渐近无偏和一致估计,在数据长度足够的情况下,两者估计的均值相等。本文选用间接法进行估计^[10]。

1.4 双谱特征分析

本文采用式(2)和式(3),分别模拟产生距离欺骗、角度欺骗和速度欺骗干扰序列,时间长度为30 s,即雷达扫描3周,序列长度为192。先不考虑背景噪声,用间接法进行双谱估计,滞后时间取30 s,傅里叶变换的长度取64,得到的双谱估计如图1所示。由图1可以看出,距离欺骗的谱幅度较高且峰值较多,角度欺骗的双谱在频域平面的分布相对集中,速度欺骗的谱幅度较大,分布比较分散。

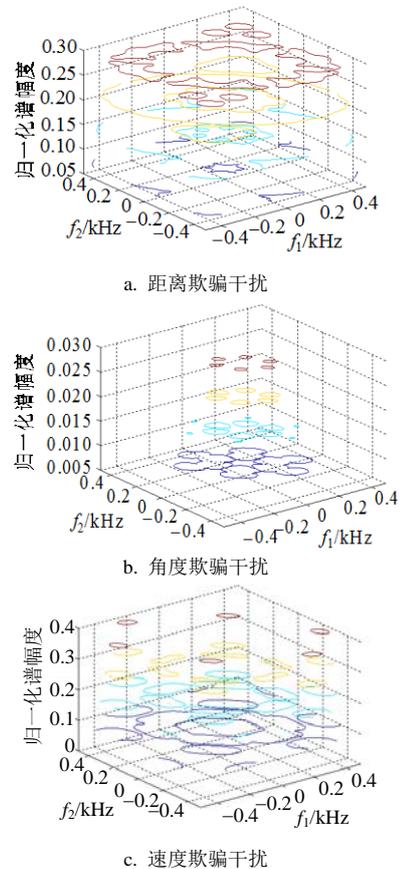


图1 欺骗式干扰的双谱分布

为了进一步突出不同干扰方式之间双谱分布的区别, 需要分析双谱分布的统计特性。考虑到不同干扰方式双谱的峰值分布有所不同, 以及双谱的对称性, 取双谱的一个对角切片分析它的方差特性, 如图2所示。图2验证了图1的结论, 在某一角切片上, 不同欺骗干扰方式的方差虽然会随频率变化有所不同, 但它们之间没有重叠。

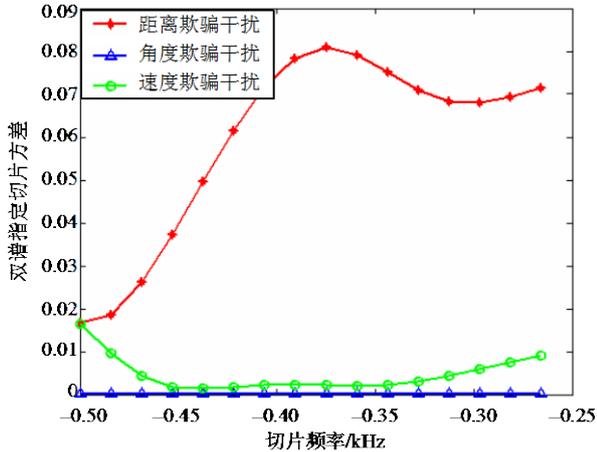


图2 欺骗式干扰的双谱方差特性

2 双谱特征提取

根据特征分析的结果发现, 双谱对角切片指定频率的方差特性可以区别不同的干扰方式, 因此, 可以定义它们某一频率的方差 $\sigma_{hb}^2(\omega)$ 为特征因子, 即有:

$$\phi_{hbv}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B(\omega, \omega_i) - u_{hb}(\omega)]^2 \quad (8)$$

式中 $N = F/2$, F 为计算双谱时傅里叶运算的次数; $u_{hb}(\omega)$ 为该频点双谱切片的均值。

同时, 不同干扰方式双谱分布的峰值也有比较明显的区别, 将其归一化后可以看作二维随机变量的概率分布, 因此, 可定义双谱指定切片的信息熵 ϕ_{IEb} 为特征因子:

$$\phi_{IEb} = -\sum_{i=1}^N B_i \ln B_i \quad (9)$$

式中 N 为双谱指定切片上的运算结果总数。信息熵是衡量离散变量随机性大小的度量, 若随机变量取各个值的概率几乎相等, 则随机性较强, 包含的信息较多, 熵值较大; 反之, 若随机变量取某几个值的概率很大, 而取其他值的概率很小, 则随机性较弱, 包含的信息较少, 熵值较小^[11]。所以, 特征因子 ϕ_{IEb} 能够反映出干扰能量在时频平面上的分布特征, 可以用来区分不同的干扰方式。

因此, 可以使用 ϕ_{hbv} 和 ϕ_{IEb} 两个特征因子构建特征参数集, 对欺骗式干扰进行联合特征提取, 以提高特征提取的准确率。

3 分类器设计

完成特征提取之后, 就需要设计分类器对特征因子进行分类。考虑到在实际抗干扰中, 要求分类器的训练和分类速度快, 而且不容易陷入局部极小, 因此, 本文选择设计SVM分类器。

标准的SVM是针对二元分类问题提出的, 对于多类问题, 主要有3种解决方法: 一类对余类法(one versus rest, OVR)、一对一分类法(one versus one, OVO)和二叉树法(binary tree, BT)。这3种方法都存在局限性^[12]。因此, 本文在BT决策分类树的基础上, 设计基于核聚类的SVM多类分类器^[13]。

4 欺骗式干扰识别模型的建立与仿真

4.1 欺骗式干扰识别模型

在完成特征提取和分类器设计之后, 就可以建立完整的欺骗式干扰识别模型, 如图3所示。

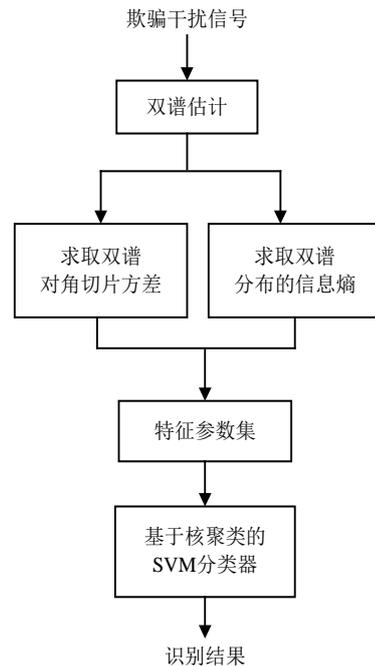


图3 欺骗式干扰识别模型

在图3的欺骗式干扰识别模型中, 预处理部分对欺骗式干扰信号进行双谱估计, 特征提取模块则是求取双谱对角切片指定频率的方差和双谱分布的信息熵, 构建特征参数集, 然后输入基于核聚类的SVM分类器进行分类, 分类器的输出则为识别结果。

4.2 欺骗式干扰识别模型的仿真

本文根据式(2)和式(3)分别模拟产生距离欺骗、

角度欺骗和速度欺骗共3种欺骗式干扰各500个样本,其中200个样本用于训练该模型,其余300个用于测试,并按照不同的干噪比(JNR)将高斯白噪声叠加到测试数据中,仿真结果如表1所示。其中训练时间是指模型训练成功所需的时间,主要是训练SVM分类器;测试时间是指完成一次识别所需的时间。该模型对不同JNR下干扰方式的平均识别率如图4所示。

表1 欺骗式干扰识别模型的性能指标

JNR/dB	训练时间/s	测试时间/s	识别率/(%)		
			距离欺骗	角度欺骗	速度欺骗
-3	136	9.6	85.4	83.8	86.2
0	133	9.0	87.0	86.2	88.6
3	129	8.8	93.2	91.8	94.4

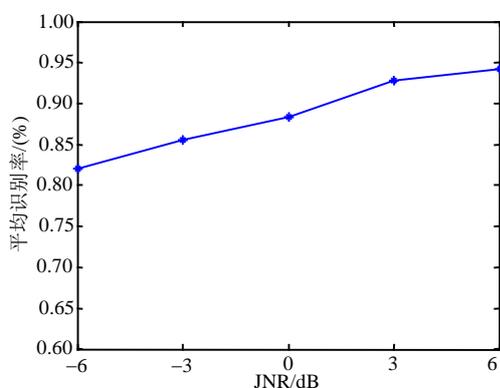


图4 不同JNR下欺骗干扰识别模型的平均识别率

从表1看出,欺骗式干扰信号识别模型的训练时间仅为130 s左右,比一般神经网络分类器要快得多,测试时间不足10 s,小于常规雷达的扫描周期,可以满足离线训练在线识别的需要;而且该模型对不同欺骗方式的识别率比较接近,其中对速度欺骗干扰的识别率稍高,JNR的变化对识别率的影响不是很大。图4则更直观地表示了JNR对干扰方式识别率的影响,可以看出干扰识别模型的平均识别率随JNR的下降并不大,模型的稳定性比较好。

5 结论

本文通过对欺骗式干扰信号双谱对角切片统计特性的分析,提出了一种欺骗式干扰方式的识别方法,并建立了识别模型。仿真结果表明,该方法识别率高,训练和测试时间短,可以满足实际雷达对抗的需要。

参考文献

[1] GUO Jian-ming, LI Jian-xun, LÜ Qiang. Survey on radar ECCM methods and trends in its developments[C]//CIE International Conference on Radar. Shanghai, China: [s.n.], 2006: 1578-1581.

[2] 吕强,李建勋,秦江敏,等.基于神经网络的雷达抗转发式距离欺骗干扰方法[J].系统工程与电子技术,2005,27(2):240-243.
LÜ Qiang, LI Jian-xun, QIN Jiang-min, et al. A method against radar's transmitting deceptive jamming in distance based on neural network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(2): 240-243.

[3] SOUMEKH M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization[J]. IEEE Transactions on AES, 2006, 42(1): 191-204.

[4] 陈建春,耿富录.基于线性预测滤波的抗速度欺骗干扰技术[J].系统工程与电子技术,2002,24(2):22-24.
CHEN Jian-chun, GENG Fu-lu. Anti-velocity deception jamming technique based on linear prediction error filtering [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(2): 22-24.

[5] CHIN Y H. Radar tracking system development[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.

[6] MARIA G, FULVIO G, ALFONSO F. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(5): 1984-1993.

[7] LI Jian-xun, LÜ Qiang, GUO Jian-ming. An intelligent signal processing method of radar anti-deceptive jamming[C]//7th International Symposium Test and Measurement. Beijing: [s.n.], 2007: 1057-1060.

[8] REN H, DU Qian, WANG Jing, et al. Automatic target recognition for hyperspectral imagery using high-order statistics[J]. IEEE Transactions on AES, 2006, 42(4): 1372-1385.

[9] 蔡忠伟,李建东.基于双谱的通信辐射源个体识别[J].通信学报,2007,28(2):75-79.
CAI Zhong-wei, LI Jian-dong. Study of transmitter individual identification based on bispectra[J]. Journal on Communications, 2007, 28(2): 75-79.

[10] 皇甫堪,陈建文,楼生强.现代数字信号处理[M].北京:电子工业出版社,2004.
HUANG Fu-kan, CHEN Jian-wen, LOU Sheng-qiang. Modern digital signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

[11] 童玲,陈光祜.测量数据处理中的Bayes理论与最大熵方法[J].电子科技大学学报,2007,36(1):77-78.
TONG Ling, CHEN Guang-jü. Bayes theorem and maximum entropy principle in the measurement data processing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(1): 77-78.

[12] XU Hai-xiang, ZHU Guang-xi, TIAN Jin-wen. Image segmentation based on support vector machine[J]. Journal of Electronics Science Technology of China, 2005, 3(3): 226-230.

[13] 陈增照,杨扬,何秀玲,等.基于核聚类的多类分类方法[J].计算机应用,2007,27(1):47-49.
CHEN Zeng-zhao, YANG Yang, HE Xiu-ling, et al. SVM multi-class classification based on kernel clustering algorithm[J]. Computer Applications, 2007, 27(1): 47-49.