

# 复杂体制雷达辐射源信号识别新方法

韩俊, 陈晋汶, 孙茹

(空军预警学院, 湖北武汉 430019)

**摘要:** 针对现有方法识别准确率不高和对噪声敏感的问题, 应用双谱二维特征复杂度实现了低信噪比下未知复杂体制雷达信号的高准确率识别。对接收到的信号首先提取双谱幅度谱并简化为二维特征, 然后求取该二维特征的复杂度特征中的盒维数和信息维数, 并将两者作为识别的特征参数, 最后基于支持向量机完成识别。由于不同信号的双谱区别大且对高斯噪声不敏感, 因此提取的盒维数和信息维数可分性强、稳定度高, 仿真验证了方法的优越性, 在信噪比为 5 dB 时, 识别准确率最低为 86%。

**关键词:** 信号识别; 双谱; 二维特征; 信噪比

**中图分类号:** TN971; TN957.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2337(2016)01-0076-05

## New Method for Recognizing Complicated Radar Emitter Signal

HAN Jun, CHEN Jinwen, SUN Ru

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** For the low recognizing rate and sensitive to the signal-to-noise ratio(SNR), the bispectrum two-dimensional characteristics complexity is proposed to recognize unknown complicated radar signal rightly. The bispectrum of received signal is extracted and predigested to be the two-dimensional characteristics. Then the box dimension and information dimension are extracted from the two-dimensional characteristics and used as the recognition characteristics. The last recognition is accomplished by SVM. The bispectrums of different signals are different and not sensitive to SNR, so the box dimension and information dimension are divisible and steady. The advantage of this novel method is validated by simulation results, and the lowest recognition rate is 86% at  $SNR=5$  dB.

**Key words:** signal recognition; bispectrum; two-dimensional characteristic; signal-to-noise ratio(SNR)

## 0 引言

雷达辐射源信号识别是电子战系统的关键技术之一, 是指从截获到的密集雷达脉冲流中分选并识别出属于不同辐射源的脉冲。随着新型复杂体制雷达所占的比例越来越大, 未知雷达辐射源信号分选与识别在电子战中扮演的角色愈来愈重要, 所需解决的问题也愈来愈多。当前的雷达辐射源信号识别算法主要是基于分析截获信号的各种常规参数, 如到达时间、到达角、载频、脉宽等。其中, 利用到达时间分选与识别是较为常用的一种方法。PRI 分选与识别算法有很多种, 典型的如序列差直方图、PRI 变换, 以及改进的 PRI 变换算法等。但这些算法都存在一定的缺陷, 难以适用于当前复杂的电磁环境。文献[1]综合利用到达角、载频、脉

宽和脉幅四个常规参数能准确实现对常规雷达辐射源信号的识别, 但当信号的载频、脉宽等参数多变、快变时, 该方法的识别准确率将大大降低。

脉内特征是雷达辐射源信号最具特色的参数之一, 虽然当前一些雷达辐射源信号的常规参数变化丰富, 但其脉内特征参数却具有一定的稳定性。目前已有不少学者将熵值、小波包特征、模糊函数等脉内特征参数应用到雷达辐射源信号的分选与识别之中, 并进行了性能评估研究, 取得了一定的成效<sup>[2-6]</sup>。这些通过增加脉内特征参数进行识别的方法对噪声比较敏感, 且适用的信号调制样式有限。针对上述问题, 本文利用双谱对噪声不敏感的特点, 提出了一种新的识别算法。对接收到的信号首先提取其双谱幅度谱, 然后将其转化为二维特征, 为降低识别算法的运算量, 进一步求取该二维特征中的复杂度特征, 即盒维数和信息维数,

并将盒维数和信息维数作为最终的识别特征参数,最后利用支持向量机(SVM)<sup>[7]</sup>实现识别。仿真试验证明,新方法充分发挥了双谱对噪声不敏感的特点,在较低的信噪比下可以准确识别不同调制样式的雷达辐射源信号。

### 1 雷达辐射源信号的双谱估计

侦察接收机接收到的雷达辐射源信号,经过预处理之后,所含的噪声主要包括各种杂波、接收系统热噪声等。研究表明<sup>[8]</sup>,诸如天气之类由大量散射点引起的杂波和接收系统热噪声均趋于高斯分布。文献<sup>[9]</sup>证明了高阶谱作为时间序列分析的工具可以有效抑制高斯噪声的影响。因此,对接收到的雷达辐射源信号首先提取其双谱,以达到有效抑制高斯噪声的目的。以高阶累积量定义的双谱如下:

若随机序列 $\{x(n), x(n+\tau_1), \dots, x(n+\tau_{k-1})\}$ 的高阶累积量 $c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})$ 满足

$$\sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} |c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1})| < \infty \quad (1)$$

则 $k$ 阶谱定义为 $k$ 阶累积量的 $(k-1)$ 维离散傅里叶变换,即

$$S_{kx}(\omega_1, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) \cdot e^{-j(\omega_1\tau_1 + \dots + \omega_{k-1}\tau_{k-1})},$$

$$|\omega_i| \leq \pi, \quad i = 1, \dots, k-1,$$

$$|\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_{k-1}| \leq \pi \quad (2)$$

双谱即三阶谱,定义为

$$B_x(\omega_1, \omega_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} c_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} \quad (3)$$

本文采用非参数化双谱估计的直接估计法<sup>[9]</sup>,对雷达辐射源信号进行双谱估计。

1) 将数据 $\{x(0), x(1), \dots, x(N-1)\}$ 分成 $K$ 段,每段 $M$ 个样本,即 $N = KM$ ,这里允许两段相邻数据间的重叠。

2) 计算离散傅里叶变换(DFT)系数

$$X^{(k)}(\lambda) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} x^{(k)}(n) e^{-j2\pi n\lambda/M} \quad (4)$$

式中, $\lambda = 0, 1, \dots, M/2, k = 1, \dots, K$ 。

3) 在此基础上,求出 DFT 系数的三重相关

$$\hat{b}_k(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{\Delta_0^2} \sum_{i_1=-L_1}^{L_1} \sum_{i_2=-L_1}^{L_1} X^{(k)}(\lambda_1+i_1) X^{(k)}(\lambda_2+i_2) \cdot X^{(k)}(-\lambda_1-\lambda_2-i_1-i_2) \quad (5)$$

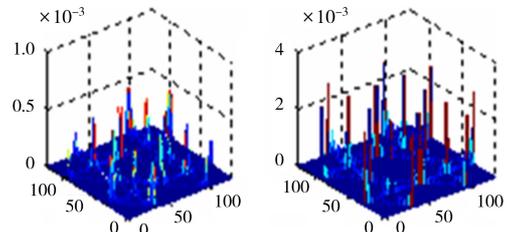
式中 $k = 1, \dots, K, 0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1, \lambda_1 + \lambda_2 \leq f_s/2, \Delta_0 = f_s/N_0$ ,而 $N_0$ 和 $L_1$ 应选择为满足 $M = (2L_1 + 1)N_0$ 的值。

4) 将所给数据 $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ 的双谱估计以 $K$ 段双谱估计的平均值给出,即

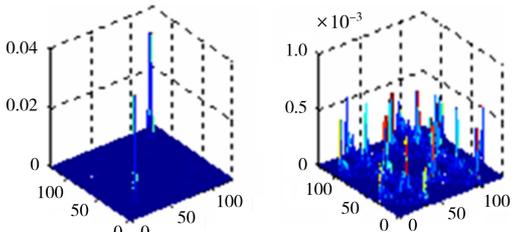
$$\hat{B}_D(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \hat{b}_k(\omega_1, \omega_2) \quad (6)$$

式中, $\omega_1 = \frac{2\pi f_s}{N_0} \lambda_1, \omega_2 = \frac{2\pi f_s}{N_0} \lambda_2$ 。

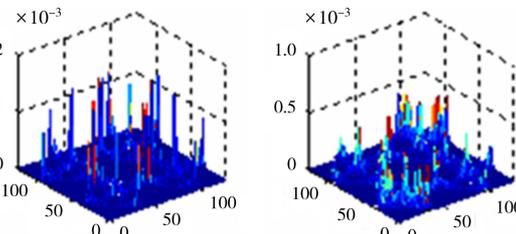
由此估计出的信号双谱,不仅能够有效抑制高斯噪声,更能够很好地反映不同雷达辐射源信号的特点。以常规雷达信号(CW)、线性调频信号(LFM)、频率编码信号(FSK)、二相编码信号(BPSK)、四相编码信号(QPSK)、线性调频-二相编码信号(LFM-BPSK)、频率编码-二相编码信号(FSK-BPSK)、非线性调频信号(NLFM)为例。每个分析信号的采样点数为2560,将其划分为20段,每段长为128点,最后得到 $128 \times 128$ 的双谱,如图1所示。由图1可知,不同调制样式信号的双谱幅度谱存在明显的差异。



(a) CW 的双谱图 (b) LFM 的双谱图



(c) FSK 的双谱图 (d) BPSK 的双谱图



(e) QPSK 的双谱图 (f) LFM-BPSK 的双谱图

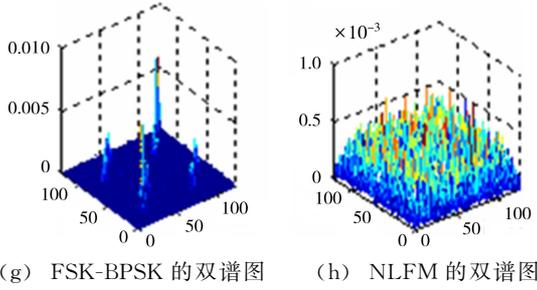


图 1 8 类雷达辐射源信号的双谱图

## 2 双谱二维特征的提取

双谱幅度谱为三维特征,直接进行识别处理,运算量大,不利于实时处理,因此需进一步简化为二维特征。在简化的过程中需把握两个原则:一是尽量减少运算量,以保证算法的运算速度;二是简化后的特征能够最大程度地反映模糊函数的特性。根据这两个原则,沿  $X$  轴作平行于  $YOZ$  平面的等间隔截面,可得到  $M$  个截面,取  $M$  个截面的最大双谱值作为特征向量,得到新的一维特征向量(即二维特征图):

$$\mathbf{R}_x = \max(\hat{\mathbf{B}}_{YOZ}) \quad (7)$$

当  $M=128$  时,可得到 128 个截面。图 2 给出了 8 类雷达辐射源信号的 128 个最大双谱幅度值的连线图,由图显见不同类别信号的双谱二维特征存在明显区别。该方法计算简单,便于将三维的双谱幅度谱简化为二维,且能充分体现不同信号的双谱特点。

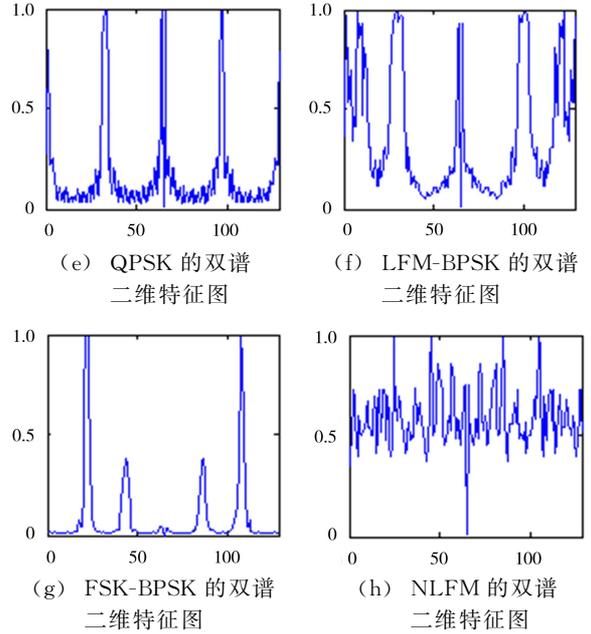


图 2 8 类雷达辐射源信号的双谱二维特征图

## 3 复杂度的提取

简化后的双谱二维特征较好地保留了双谱幅度谱的信息,但维数为  $M$ ,当  $M$  较大时,既增加了运算量,又不利于后续的信号识别,因此需进一步对二维特征进行维数的降低。8 类雷达辐射源信号的双谱二维特征图具有不同的几何尺度与疏密特性,即具有不同的复杂度特征。盒维数可以准确刻画信号序列的几何尺度情况<sup>[10]</sup>,且具有计算简单的优点,其定义如下:

设  $(F, d)$  是一个度量空间,  $\epsilon$  是一个非负实数,令  $B(f, \epsilon)$  表示一个中心是  $f$ ,半径是  $\epsilon$  的闭球。设  $A$  是  $F$  中的一个非空子集,对于每个正数  $\epsilon$ ,令  $M(A, \epsilon)$  表示覆盖  $A$  的最小闭球数目,闭球的半径为  $\epsilon$ ,即

$$M(A, \epsilon) = \{N : A \subset \bigcup_{i=1}^N B(f_i, \epsilon)\} \quad (8)$$

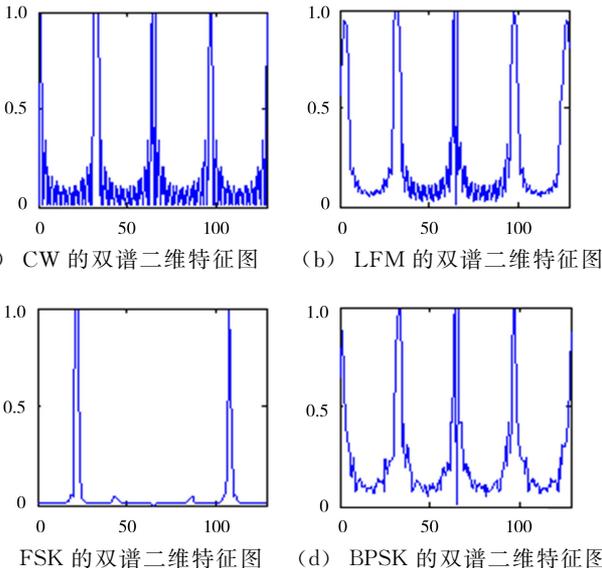
式中,  $f_1, f_2, \dots, f_N$  是  $F$  的不同点。

再设  $A$  是一个紧集,并且是非负的实数,若存在:

$$D_f = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln M(A, \epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (9)$$

则称  $D_f$  是集合  $A$  的分形维数,即为  $D_f = D_f(A)$ , 并称  $A$  具有分形维数  $D_f$ ,这种维数称为盒维数。

对于双谱二维特征的盒维数  $D_f$  按式(10)计算:



$$d(\Delta) = \sum_{i=1}^N |f(i) - f(i+1)| \quad (10)$$

$$d(2\Delta) = \sum_{i=1}^{N/2} (\max\{f(2i-1), f(2i), f(2i+1)\} - \min\{f(2i-1), f(2i), f(2i+1)\}) \quad (11)$$

$$D_i = 1 + \log_2 \frac{d(\Delta)}{d(2\Delta)} \quad (12)$$

盒维数仅反映了双谱二维特征的几何尺度信息,若要全面地反映其复杂度特性,还需要利用信息维数来刻画双谱二维特征的分布疏密特性。

设  $X$  是  $R^n$  的集合,  $\{A(i)\} (i=1, 2, \dots, N)$  是  $X$  的一个有限  $\delta$ -覆盖,令  $P_i$  表示集合  $X$  的元素落在集合  $A_i$  的概率,其值为

$$P_i = \frac{N(X)_i}{N(X \cap A_i)}, i=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

式中,  $N(X)_i$  与  $N(X \cap A_i)$  分别表示元素的个数。令信息熵

$$S_i = - \sum_{i=1}^N P_i \lg P_i \quad (14)$$

作为  $X$  的位形熵。如果信息熵满足下面关系:

$$S_i(\delta) \sim \lg \delta^{D_i} \quad (15)$$

则  $X$  的信息维数定义为

$$D_i = - \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{S_i(\delta)}{\lg \delta} \quad (16)$$

## 4 新方法的步骤

综合上文的分析,对于接收到的雷达辐射源信号按如下步骤进行处理,以实现识别。

步骤 1 提取接收信号的双谱幅度谱;

步骤 2 将双谱幅度谱简化为二维特征;

步骤 3 分别求双谱二维特征的盒维数和信息维数;

步骤 4 利用求取的特征参数基于 SVM 算法实现识别。

## 5 仿真试验

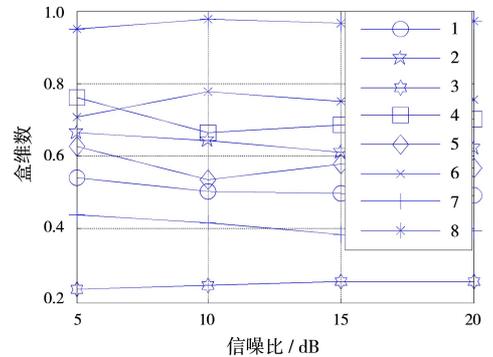
### 5.1 仿真条件

仿真 8 类雷达辐射源信号,分别为 CW, LFM, FSK, BPSK, QPSK, LFM-BPSK, FSK-BPSK 和 NLFM 信号。FSK 信号的两个频点分别为 20 MHz 和 40 MHz, FSK-BPSK 信号的两个频点分别为 25 MHz 和 35 MHz,其余信号的载频均为 30 MHz,脉宽均为 10  $\mu$ s,采样频率为 120 MHz。LFM 信号的带宽为 2 MHz; FSK 信号编码规律为 [100110];

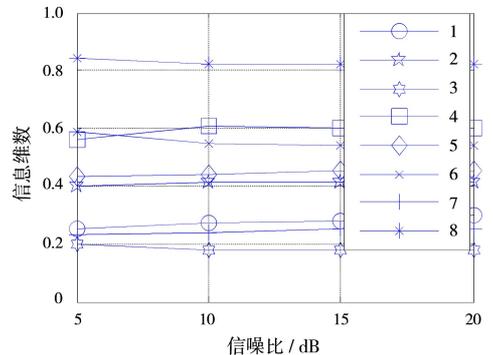
BPSK 信号的相位编码规律为 [11100010010]; QPSK 信号的相位编码规律为 [01230312211300112012]; LFM-BPSK 信号的带宽为 5 MHz,相位编码规律为 [11100010010]; FSK-BPSK 信号的频率与相位编码规律均为 [11100010010]; NLFM 信号为正弦调频信号。在信噪比为 5, 10, 15 和 20 dB 时,每类信号分别产生 400 个,其中 200 个用于训练,200 个用于测试。

### 5.2 试验分析

在 5, 10, 15 和 20 dB 时,首先分别求取 8 类雷达辐射源信号的双谱二维特征复杂度,每一类在对应信噪比时的平均值(100 个信号)如图 3 所示,图 3(a)为双谱二维特征复杂度的盒维数,图 3(b)为双谱二维特征复杂度的信息维数。由图 3 可知,8 类雷达辐射源信号的双谱二维特征复杂度存在一定的差异,即具有优秀的类间分离度,这为后续的识别打下了良好的基础;双谱二维特征复杂度受噪声的影响不大,这是该特征参数最大的优点所在,保证了识别准确率受信噪比影响较小。图 3 中的 1~8 分别表示 CW, LFM, FSK, BPSK, QPSK, LFM-BPSK, FSK-BPSK 和 NLFM 信号。



(a) 双谱二维特征的盒维数



(b) 双谱二维特征的信息维数

图 3 8 类雷达辐射源信号的盒维数和信息维数

选用SVM分类器对8类雷达辐射源信号进行识别,采用RBF核函数,识别所用的特征参数即双谱二维特征的盒维数和信息维数。在不同信噪比条件下,8类雷达辐射源信号的识别准确率如表1所示。由表1可知,当信噪比为20dB时,8类雷达辐射源信号的识别准确率均为100%;随着信噪比的降低,识别准确率略有下降,当信噪比为15dB时,由图3观察可知,LFM与QPSK的双谱二维特征复杂度有部分交叠,因此二类信号的识别准确率有所降低,其余信号的识别准确率均为100%;在信噪比为10dB时,8类信号双谱二维特征复杂度的交叠概率增加,识别准确率也普遍降低,最低为90%,但FSK与NLFM的双谱二维特征复杂度仍然具有优异的分度,准确率仍为100%;当信噪比降为5dB时,8类信号双谱二维特征复杂度的交叠概率进一步增加,识别准确率也进一步降低,最低为86%,但该准确率仍然令人满意。

表1 8类雷达辐射源信号的识别准确率 (%)

信噪比	CW	LFM	FSK	BPSK	QPSK	LFM-BPSK	FSK-BPSK	NLFM
5dB	91	87	97	86	87	88	89	98
10dB	93	90	100	93	91	94	95	100
15dB	100	94	100	100	96	100	100	100
20dB	100	100	100	100	100	100	100	100

## 6 结束语

选择脉内特征作为雷达辐射源信号的识别参数是一个很有效的方法,现有此类算法有效识别的信噪比门限比较高,针对这一问题,本文提出一种新的识别方法。根据双谱对噪声不敏感的特点,对接收到的雷达辐射源信号提取其双谱二维特征复杂度,有效增强了算法在低信噪比条件下的稳定性,通过降维和特征提取降低了算法的运算量,仿真试验表明了算法的有效性。

## 参考文献:

[1] 郭杰,陈军文.一种处理未知雷达信号的聚类分选方法[J].系统工程与电子技术,2006,28(6):853-856.

- [2] CHEN Changxiao, HE Minghao, XU Jing, et al. A New Method for Sorting Unknown Radar Emitter Signal[J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 23(3): 499-502.
- [3] 陈昌孝,何明浩,徐璟,等.基于模糊函数相像系数的雷达辐射源信号分选[J].电波科学学报,2014,29(2):260-264.
- [4] 白航,赵拥军,沈伟,等.基于时频分布 Rényi 熵特征的雷达辐射源识别[J].电路与系统学报,2013,18(1):437-442.
- [5] 时羽,普运伟,张天飞.基于优势遗传的模糊函数主脊切面智能搜索方法[J].红外与毫米波学报,2013,32(1):80-85.
- [6] 王欢,何明浩,刘锐,等.雷达信号识别效果的模糊综合评价研究[J].雷达科学与技术,2012,10(4):372-375.  
WANG Huan, HE Minghao, LIU Rui, et al. Research on Fuzzy Comprehensive Evaluation of Radar Signal Recognition Effect[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(4):372-375. (in Chinese)
- [7] ZHANG Gexiang, RONG Haina, JIN Weidong, et al. Radar Emitter Signal Recognition Based on Resemblance Coefficient Features [C] // 4th International Conference, RSCTC 2004, Uppsala, Sweden: Springer, 2004:665-670.
- [8] 黄爱民,安向京,骆力,等.数字图像处理与分析基础[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [9] 张贤达.现代信号处理[M].2版.北京:清华大学出版社,2002.
- [10] 吕铁军,郭双冰,肖先赐.基于复杂度特征的调制信号识别[J].通信学报,2002,23(1):111-115.

## 作者简介:



韩俊男,1983年出生,安徽合肥人,博士,讲师,主要研究方向为雷达对抗、信息处理。

E-mail:duj81@163.com

陈晋汶 女,1977年出生,硕士,讲师,主要研究方向为教育训练。

孙茹 女,1977年出生,研究生,讲师,主要研究方向为军事教育管理。