

文章编号:1001-9014(2007)03-0187-04

基于一维选择线谱的脉冲星辐射脉冲信号辨识

谢振华¹, 许录平¹, 倪广仁², 王岩¹

(1. 西安电子科技大学工程学院 203 教研室, 陕西 西安 710071;

2. 中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600)

摘要:为提高脉冲星辐射脉冲信号辨识效果,利用双谱技术提取了脉冲星累积脉冲轮廓的非线性和非高斯特征.提出了一维选择线谱辨识算法,该算法采用特征核与特征域描述统计信号的共性及个性,定义信号特征矢量方差及特征矢量间的距离,抽取双谱图中具有最强类别可分离度的一维线谱特征向量构成特征模板.实验结果表明:一维选择线谱特征向量适于脉冲星信号辨识,且与选择双谱相比,一维选择线谱算法使整个特征向量具有最大类间可分离度,可以获得更好的辨识效果.

关键词:信息处理技术;信号辨识;一维选择线谱;脉冲星;双谱分析

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A

PULSAR SIGNAL RECOGNITION BASED ON ONE-DIMENSION SELECTED LINE SPECTRA

XIE Zhen-Hua¹, XU Lu-Ping¹, NI Guang-Ren², WANG Yan¹

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

Abstract: For recognizing the signals of pulsars and improving the effect of recognition, non-linear and non-gaussian characteristics of the average pulse profiles of pulsar signals were analyzed by using bispectra technology. Then one-dimension selected line spectra algorithm for extracting pulsar signals' characteristics was proposed. The algorithm makes use of feature core and domain to represent the generality of bispectrum and its distribution domain. And the variance of signal feature vector and the distance between two kinds of signal feature vectors were defined, based on which one-dimension line spectral vector with best interclass separability was redefined. The results of recognition experiments show that the algorithm of one-dimension selected line spectra is suitable for extracting pulsar signals' characteristics. Compared with the selected bispectra, the selected line spectrum has the maximum interclass separability.

Key words: signal processing technology; signal recognition; one-dimension selected line spectra; pulsar; bispectra analysis

引言

脉冲星是一种快速自转并具有强磁场的中子星,其辐射脉冲信号具有极其稳定的周期性,基于X-射线脉冲星的航天器定时、定位、定姿已成为天文导航领域的重要研究课题^[1].为进行脉冲星辨识,需提取脉冲星辐射脉冲信号的平移不变特征量.功率谱是一种传统的平移不变特征量,但功率谱丢失了信号的相位信息,因而严重削弱了目标赖以分类的形状特征.双谱是信号的另一种平移不变特征量,与功率谱不同,双谱保留了除线性相

位以外的信号全部幅度和相位信息,且双谱对任意对称分布的噪声具有盲性,能较好地抑制散射点交叉项.

利用双谱特征量进行信号辨识的主要方法有直接对双谱进行相关匹配、积分双谱和选择双谱.直接进行双谱相关匹配的计算量与存储量都很大,辨识系统的实时性受到影响.积分双谱在计算上是某一条路径上的能量相加,但存在某些双谱点属于平凡双谱,对目标识别所起的作用不大;积分过程也会导致某些双谱值被遗漏或某些双谱值被重复使用^[2].为了克服积分双谱的上述缺点,

收稿日期:2006-10-08,修回日期:2007-02-28

Received date: 2006-10-08, revised date: 2007-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60472085);陕西省自然科学基金资助项目(2006F04);国防预研基金资助项目

作者简介:谢振华(1978-),男,山东莱州人,西安电子科技大学在读博士研究生,主要研究方向:毫秒脉冲星微弱信号检测及其辐射模型理论研究.

张贤达教授等人提出了选择双谱方法^[3]. 选择双谱方法选出具有最强 Fisher 类别可分离度的双谱点构成特征向量, 这种方法避免了平凡双谱与交叉项. 然而, 选择双谱仅使单个双谱点在 Fisher 类别可分离度下具有最大距离, 而类别的特征向量间并不具有最大的内积距离, 即类别的特征向量间不具有最大的不相关性. 我们利用双谱技术分析了脉冲星辐射脉冲信号的非线性和非高斯特征, 借鉴选择双谱思想, 提出了从双谱中提取高分辨性能点的一维选择线谱方法. 与选择双谱相比, 一维选择线谱使类别的线谱特征向量间具有最大不相关性. 对多颗脉冲星的多频段信号进行的辨识实验验证了该算法的有效性.

1 脉冲星辐射脉冲的选择线谱辨识算法

进行信号类型辨识, 需要事先存储信号的特征参数作为模板. 在辨识阶段, 计算测试样本的特征量, 与各类信号模板的特征值进行相关匹配. 最后, 选择相似度最大的已知信号类作为测试样本的类别判决结果^[4]. 由于脉冲星类型众多, 且脉冲星信号在不同频段的波形也存在变化, 采用积分双谱方法难以充分提取脉冲星信号的特征, 而直接采用双谱二维特征模板进行相关匹配, 计算量大, 限制了其在实时目标识别中的应用. 为了充分提取脉冲星信号的特征量, 且避免平凡双谱与交叉项, 我们采用特征核与特征域描述统计信号的共性及个性, 定义了信号特征矢量方差及特征矢量间的距离, 基于以上的概念重新定义了类别可分离度, 抽取双谱图中具有最强类别可分离度的一维线谱特征向量构成模板, 进行目标辨识.

1.1 脉冲星辐射脉冲信号的双谱特征

设 $\{x(t)\}$ 表示一零均值随机过程, 其双谱定义为:

$$B_x(w_1, w_2) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{\infty} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(w_1\tau_1 + w_2\tau_2)} \quad (1)$$

或:

$$B_x(w_1, w_2) = \langle X(w_1)X(w_2)X^*(w_1 + w_2) \rangle \quad (2)$$

$$C_{3x}(m, n) = E\{x^*(k)x(k+m)x(k+n)\} \quad (3)$$

其中 $C_{3x}(m, n)$ 为信号 $\{x(t)\}$ 的三阶累积量, $X(w)$ 表示 $x(k)$ 的傅氏变换, $*$ 表示复共轭.

图 1 和图 2 分别为脉冲星 B0329 + 54 和 B2111 + 46 在不同频率的脉冲信号累积脉冲轮廓的双谱等高线图. 脉冲星数据来自于 EPN 数据库 (the European Pulsar Network Data Archive). (1) 辨

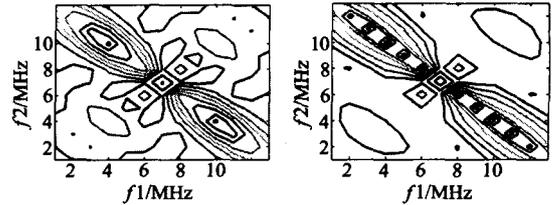


图 1 脉冲星 B0329 + 54 分别在 8500MHz(左)和 4750MHz(右)信号累积脉冲轮廓的双谱等高线图
Fig. 1 Contour lines of the bispectrum of the average pulse profile for PSR B0329 + 54 at 8500MHz (left) and 4750MHz (right)

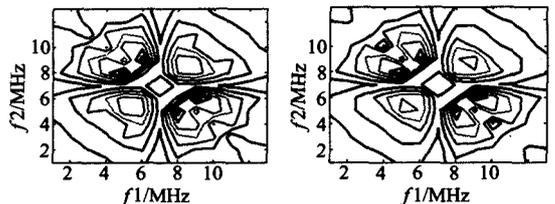


图 2 脉冲星 B2111 + 46 分别在 610MHz(左)和 1330MHz(右)信号累积脉冲轮廓的双谱等高线图
Fig. 2 Contour lines of the bispectrum of the average pulse profile for PSR B2111 + 46 at 610MHz (left) and 1330MHz (right)

识算法需区别不同的脉冲星, 同时对由频率造成的同一颗脉冲星脉冲信号波形的不一致具有一定的抵抗能力. 由图 1 和图 2 可以看出, 同一颗脉冲星的脉冲信号在不同频段具有很相似的双谱图; 而不同脉冲星脉冲信号的双谱特征具有明显的差异. (2) 双谱图两频率轴间的较大幅值点反映了两频率的主要耦合分量, 这些点可以作为脉冲星信号累积脉冲轮廓特征的一种描述, 具有平移不变性, 且与功率谱相比, 双谱保留了更多的幅度和相位信息. (3) 双谱技术抑制了高斯噪声, 对加性噪声、乘性噪声以及二者的混合噪声也有较好的抑制效果^[5,6].

1.2 一维选择线谱鉴别测度

选择双谱采用 Fisher 类别可分离度来判断一个双谱值在信号类型识别中的作用.

记 $w = (w_1, w_2)$ 和 $B(w) = B(w_1, w_2)$, 假定 $\{B_k^{(i)}(w)\}_{k=1, \dots, N_i}$ 和 $\{B_k^{(j)}(w)\}_{k=1, \dots, N_j}$ 是在训练阶段得到的样本双谱集合, 其中下标 k 表示第 k 组观测数据计算得到的双谱, 上标 i 和 j 表示信号的类型, 而 N_i 和 N_j 分别是第 i 类和第 j 类信号的观测数据的个数. 其 Fisher 类别可分离度定义为^[7]:

$$m^{(i,j)}(w) = \frac{\sum_{l=i,j} p^{(l)} [\text{mean}_k(B_k^{(l)}(w)) - \text{mean}(\text{mean}_k(B_k^{(l)}(w)))]^2}{\sum_{l=i,j} p^{(l)} \text{var}_k(B_k^{(l)}(w))}, \quad i \neq j, \quad (4)$$

式中, $p^{(l)}$ 为随机变量 $B(l) = B_k^{(l)}(w)$ 的先验概率. $\text{mean}_k(B_k^{(l)}(w))$ 和 $\text{var}_k(B_k^{(l)}(w))$ 分别代表第 l 类信号在频率 $w = (w_1, w_2)$ 处的所有样本双谱的平均值和方差, 而 $\text{mean}_l(\text{mean}_k(B_k^{(l)}(w)))$ 表示所有类型信号在频率 w 处样本双谱的总体中心.

一维选择线谱需判断整个特征向量在类别识别中作用的大小, 因此重新定义类别可分离度如下:

定义 $C_i(k)$ 和 $C_j(k)$ 分别为第 i 类和第 j 类信号的一维线谱特征向量, $C_i(k)$ 和 $C_j(k)$ 皆为统计值, 其方差分别为 $D_i(k)$ 和 $D_j(k)$.

$$C_x(k) = \bigcap_{f=1}^n \{F_{xf}(w_1(k), w_2(k))\}, \quad (5)$$

$$D_x(k) = \bigcup_{f=1}^n \{F_{xf}(w_1(k), w_2(k))\}, \quad (6)$$

C_x 反应了第 x 类目标双谱分布的共性, D_x 反应了第 x 类目标双谱分布的范围^[8]. 对 C_x 与 D_x 进行归一化处理. $F_{xf}(w_1(k), w_2(k))$ 为频率 $(w_1(k), w_2(k))$ 处的双谱值.

第 i 类和第 j 类之间的距离定义为:

$$d^{(i,j)} = \sqrt{\sum_{k=1}^K C_i(k) \times C_j^*(k)}. \quad (7)$$

$d^{(i,j)}$ 越小, 表明类 i 与 j 之间的距离越远. 第 i 类的方差定义为:

$$\text{var}_i = \sum_{k=1}^K D_i(k) \times C_i^*(k). \quad (8)$$

var_i 越小, 表明类 i 的分布离 $C_i(k)$ 越远, 即方差越大. 假定各类脉冲星信号取相同的先验概率 $p^{(l)}$. 类别可分离度可重新定义为:

$$m^{(i,j)} = \frac{\sum_{l=i,j} \text{var}_l}{\sum_{k=1}^K C_i(k) \times C_j^*(k)}, \quad i \neq j, \quad (9)$$

$$R^{(i,j)} = \frac{1}{m^{(i,j)}}. \quad (10)$$

上式表明, $d^{(i,j)}$ 越小, var_i 越大, $m^{(i,j)}$ 越大, 类 i 与 j 可分离度越大; 相反, 类 i 与 j 可分离度越小. $R^{(i,j)}$ 定义为类 i 与 j 之间相关性, $R^{(i,j)}$ 越大, 则类 i 与 j 可分离度越小.

1.3 构建一维选择线谱特征向量的步骤

设线谱长度为 N , 总共有 M 类信号. 计算第 i 类信号一维选择线谱的步骤如下:

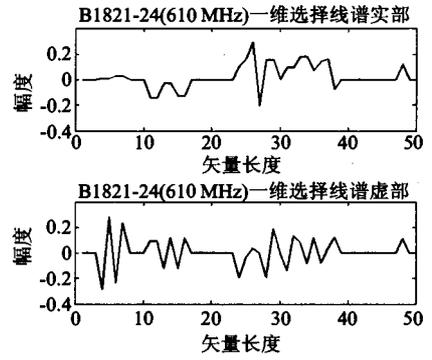


图3 脉冲星 B1821-24 脉冲信号一维选择线谱图: 上图为实部图, 下图为虚部图

Fig. 3 One-dimension selected line spectra for PSR B1821-24. The top is the real component, while the lower is the imaginary component

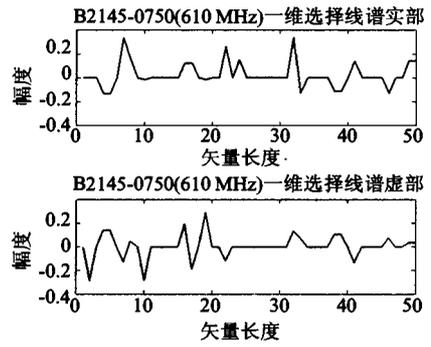


图4 脉冲星 B2145-0750 脉冲信号一维选择线谱图: 上图为实部图, 下图为虚部图

Fig. 4 One-dimension selected line spectra for PSR B2145-0750. The top is the real component, while the lower is the imaginary component

(1) 分别计算 M 类信号的双谱. 根据一定的先验知识选择 K 个点构成试探序列;

(2) 在试探序列中选择 N 点构成一维线谱初值;

(3) 分别计算第 i 类信号与其余信号 N 点线谱的类别可分离度. 并计算类别可分离度的均值与方差;

(4) 在试探序列 K 中选择新的点更新 N 点线谱. 然后重复步骤(3);

(5) 以最大均值、最小方差的原则确定第 i 类信号最终的线谱向量;

(6) 重复(2)(3)(4)(5)步计算其它类信号的一维选择线谱向量.

2 辨识实验

利用上面提出的一维选择线谱方法分别对

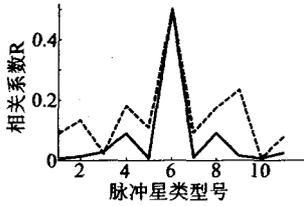


图5 脉冲星 B1821-24 与其它脉冲星的特征向量相关性比较(实线为采用选择线谱方法;虚线为采用选择双谱方法)
Fig. 5 Comparison of the cross-correlation magnitude of feature vectors for PSR B1821-24 with others (The solid lines stand for the results by using the method of selected line spectra; The dashed lines stand for the results by using the method of selected bispectra)

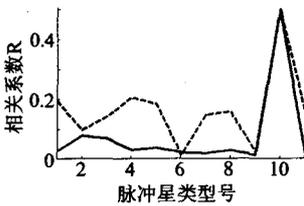


图6 脉冲星 B2145-0750 与其它脉冲星的特征向量相关性比较(实线为采用选择线谱方法;虚线为采用选择双谱方法)
Fig. 6 Comparison of the cross-correlation magnitude of feature vectors for PSR B2145-0750 with others (The solid lines stand for the results by using the method of selected line spectra; The dashed lines stand for the results by using the method of selected bispectra)

B0355 + 54、B1821-24、B2145-0750 等 11 颗脉冲星进行了特征提取与信号辨识实验. 图 3 为脉冲星 B1821-24 脉冲信号平均脉冲轮廓的一维选择线谱图,图 4 为脉冲星 B2145-0750 脉冲信号平均脉冲轮廓的一维选择线谱图. 由图 3、4 可见,一维选择线谱很好地反映了 2 颗脉冲星信号之间的差异. 表 1 列出了脉冲星 B1821-24 和 B2145-0750 分别与其他脉冲星特征模板向量之间的类别可分离度. 表 1 中的数据越大,则对应两颗脉冲星的可分辨程度越大,否则,可分辨程度越小. 由表 1 可以看出,同类脉冲星信号之间的类别可分离度最小,而不同类脉冲星信号之间具有较大的类别可分离度,可以依此对脉冲星类别进行辨识. 表 2 比较了同一颗脉冲星辐射脉冲信号在不同频段的一维选择线谱向量与其特征模板向量的相关性. 不同类脉冲星辐射脉冲信号一维选择线谱向量间的相关性小于 0.5,表 2 中数据越大,则两一维选择线谱向量间的相关性越大. 表 2 中数据表明采用一维选择线谱,同一颗脉冲星的辨识并不因频率的变化而失效. 图 5、6 对本文提出的一维选择线谱方法与选择双谱方法在不同类别间特征

向量相关性上进行了比较. 图中横坐标表示脉冲星类型号(参考表 1 的定义),纵坐标表示由公式(10)定义的相关性. 实线表示采用一维选择线谱方法获得的结果;虚线为采用选择双谱方法获得的结果. 图 5 显示了脉冲星 B1821-24 与其它脉冲星特征向量的相关性大小,由于在本测试中脉冲星 B1821-24 的类型号为 6,因此在图 5 中,横坐标为 6 处出现最大值,其它点的值表示脉冲星 B1821-24 与其它类型脉冲星特征向量的相关性. 图 6 中,脉冲星 B2145-0750 的类型号 10 处出现最大值. 由图 5、6 可以看出,采用本文提出的一维选择线谱方法可以获得比选择双谱方法更低的相关性.

3 结论

分析了脉冲星累积脉冲轮廓的双谱特征,针对双谱图中高分辨性能点的提取,提出了一维选择线谱算法. 对多颗脉冲星的多频段信号进行的辨识实验表明:(1)脉冲星辐射脉冲信号特征提取中,双谱保留了更多的幅度和相位信息;(2)脉冲信号频率的变化对辨识结果的影响不大;(3)与选择双谱辨识算法相比,一维选择线谱使特征向量具有更大的类间可分离度,因此具有更好的辨识效果. 一维选择线谱算法对提取脉冲星辐射脉冲信号特征向量具有一定的实用价值,脉冲星辐射脉冲信号辨识对基于脉冲星的航天器空间定位、定姿具有重要意义. 进一步的研究工作包括整理更多的脉冲星数据并进行辨识研究,及研究基于神经网络等智能技术的脉冲星识别技术.

表 1 脉冲星 B1821-24、B2145-0750 分别与 B0355 + 54 等 11 颗脉冲星的一维选择线谱特征向量之间的类别可分离度

Table 1 Interclass separability between feature template vectors of PSR B1821-24, PSR B2145-0750 and others

脉冲星特征模板向量	(6) B1821-24	(10) B2145-0750.
(1) B0355 + 54	148. 7129	39. 1400.
(2) B0531 + 21	77. 2216	13. 0151.
(3) B0613 - 0200	36. 1746	14. 6344.
(4) J1751 - 3323	11. 0200	33. 4738.
(5) B1237 + 25	141. 9191	27. 5558.
(6) B1821 - 24	2. 0000	45. 8680.
(7) B1919 + 10	93. 4659	53. 4329.
(8) B1929 + 10	11. 1565	36. 0696.
(9) B1937 + 21	67. 5726	78. 3451.
(10) B2145 - 0750	141. 3117	2. 0000.
(11) J1713 + 0747	40. 6915	55. 3353

6 小结

本文首先简单介绍了线阵列静态红外地平仪的工作原理和系统方案,然后针对目前国内探测器信噪比较差的问题,在对地平信号全局特征进行分析的基础上,设计了一种基于匹配滤波的地平仪定姿算法.该方法在工程上容易实现,仿真证明能够在信噪比很差的情况下有效提高静态红外地平仪的定姿精度.此外,本文的方法也可扩展到二维相关运算,用于面阵焦平面的静态地平仪定姿.相信该方法对国内静态红外地平仪技术的发展会提供一定的参考.

REFERENCES

- [1] YANG Lei, YANG Jie, LING Jian-Guo, et al. Real-time method for detecting multi-small targets in infrared large sight field[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 凌建国, 等. 一种红外大视场环境下的多小目标实时检测

方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 377—381.

- [2] YANG Lei, YANG Jie, ZHENG Zhong-Long. Detecting infrared small targets based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨磊, 杨杰, 郑忠龙. 海空复杂背景中基于自适应局部能量阈值的红外小目标检测. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(1): 41—45.
- [3] ZHANG Hua-Da, *Research of correction on the Static IRFPA Earth Sensor* [D]. Paper for master's degree of SITP (张华达. 红外面阵焦平面静态地平仪系统校正研究. 上海技术物理研究所硕士论文). 2004.
- [4] CHEN Jie. *Key Technology of Static IRFPA Earth Sensor for Micro-satellites* [D]. Paper for master's degree of SITP (陈杰. 小卫星静态红外地平仪关键技术研究. 上海技术物理研究所硕士论文). 2000.
- [5] BEI Zhi-Nian. *DSP of Static Infrared-earth-sensor* [D]. Paper for master's degree of SITP (贝治年. 静态红外地平仪信号处理技术研究. 上海技术物理研究所硕士论文). 2002.
- [6] HU Guang-Shu. *Digital Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua Press (胡广书. 数字信号处理. 北京: 清华大学出版社), 1997.

(上接 190 页)

表 2 同一颗脉冲星在不同频段脉冲信号的一维选择线谱与特征模板向量的相关性

Table 2 Correlation among one-dimension selected line spectrum of average pulse profiles for the same kind of pulsar signals at different frequencies

脉冲星类型	观测频率	与相应特征模板向量的相关性
B0329 + 54	8500MHz	0.5083.
	10550MHz	0.5583.
B1451 - 68	450MHz	0.5309
	674MHz	0.5154
	1520MHz	0.5107
B2111 + 46	400MHz	0.5014.
	610MHz	0.5404.
	800MHz	0.5399.
	10550MHz	0.5425

REFERENCES

- [1] Suneel I Sheikh, Darryll J Pines, Paul S Ray, et al. The use of x-ray pulsars for spacecraft navigation [J]. *Advances in the Astronautical Science*, 2005, 119: 105—119.
- [2] LIAO X, BAO Z. Circularly integrated bispectra: novel shift invariant features for high-resolution radar target recognition [J]. *Electron Letters*, 1998, 34: 1879—1880.
- [3] ZHANG Xian - Da , SHI Yu , BAO Zheng . A new feature

vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, 49(9): 1875—1885.

- [4] WANG Dang-Wei, MA Xin-Yi, WANG Shao-Gang, et al. New approach to radar target identification using a generalized likelihood ratio test [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王党卫, 马兴义, 王少刚, 等. 一种基于广义似然比检测的雷达目标识别新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(4): 311—315.
- [5] LIU Rong, LIU San-Yang, ZHAO Rui-Zhen. An auto-extraction method of spectral line for normal galaxy spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (刘蓉, 刘三阳, 赵瑞珍. 正常星系光谱的一种谱线自动提取方法. *光谱学与光谱分析*), 2006, 3: 583—586.
- [6] WU Bin, JI Hong-Bing, LI Peng. New method for moving dim target detection based on third-order cumulant in infrared image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (武斌, 姬红兵, 李鹏. 基于三阶累积量的红外弱小运动目标检测新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(5): 364—367.
- [7] ZHANG Xian-Da. *Modern Signal Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (张贤达. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社), 2002: 335—344.
- [8] JI Hong-Bing, GAO Xin-Bo, XIE Wei-Xin. Study of bispectrum signatures of radar targets and classification techniques [J]. *Journal of Xi' dian University* (姬红兵, 高新波, 谢维信. 雷达目标双谱特征分析与分类方法研究. *西安电子科技大学学报*), 1999, 26(6): 691—694.