

中图分类号: TN971.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-2230(2018)02-0007-05

LPI 雷达信号脉内调制识别

王春雨, 齐兴龙, 王晓峰

(空军航空大学, 长春 130022)

摘要:针对低截获概率(LPI)雷达信号的识别问题,提出了一种基于自适应分解和多重相位差分的识别方法。该方法首先在自适应分解的基础上,提取调频率和分量能量之比作为分类特征。然后,基于多重相位差分,提取变换后信号的前后段均值比和拟合曲线斜率作为分类特征,完成了LPI雷达信号的完整分类。仿真实验结果表明,该方法无需先验信息,抗噪性好,识别正确率高。

关键词:LPI 雷达信号;自适应信号分解;相位差分;脉内调制识别

DOI:10.3969/j.issn.1674-2230.2018.02.002

Intra-Pulse Modulation Recognition of LPI Radar Signal

WANG Chun-yu, QI Xing-long, WANG Xiao-feng

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to recognize the intra-pulse modulation type of low probability interpretation (LPI) signals, a recognition algorithm based on adaptive decomposition and multiple phase difference is proposed. Based on the adaptive signal decomposition, the ratio of frequency modulation rate to energy of components is used to as classification features. And then, the multiple phase difference of observed signal is calculated. The mean value ratio of former segment to latter segment and slope of fitting curve are abstracted as classification features. Simulation shows that the proposed algorithm could completely classify the LPI radar signal without prior information, and has a good anti-noise performance and a high recognition performance.

Key words: LPI radar signal; adaptive signal decomposition; phase difference; intra-pulse modulation recognition

1 引言

低截获概率(LPI)信号具有低功率、宽带宽以及良好的隐蔽性与抗干扰性,已广泛应用于雷达、通信等领域,传统截获接收机很难检测与识别LPI雷达信号。LPI雷达常用的波形主要有:对称三角线性调频连续波(STLFMCW)、跳频信号(Costas跳频信号)、多相码信号(P1, P2, P3, P4和Frank码)等^[1]。

对于多相码信号的调制方式识别问题,相关研究人员提出了一些方法。文献[2]提出从接收信号的Choi-William时频分布中提取特征参数进行调制方式识别。在信噪比高于3dB时识别成功率高于96%。文献[3]和文献[4]利用Wigner分布和正交镜像滤波器对调频连续波和P4码雷达信号进行识别,在中等信噪比条件下具有较佳的性能。文献[5]利用高阶谱分析技术提取LPI

收稿日期:2017-09-30;修回日期:2017-10-13

作者简介:王春雨(1983—),女,副教授,主要研究方向为雷达电子对抗;齐兴龙(1972—),男,副教授,主要研究方向为雷达电子对抗;王晓峰(1987—),男,讲师,主要研究方向为信号与信息处理。

雷达信号特征, 并利用前向反馈的多层神经网络对其进行分类, 在-3dB 时可以达到较好的效果。文献[6]对变换到基带的多相码信号进行载频和码元估计, 接着构造本地参考信号和相关接收机, 最后运用似然估计对多相码进行分类识别, 可以在-5dB 时达到99%的正确识别率。但该方法对参考信号的同步性、载频和码元宽度的估计精度要求很高, 难以用于实际应用。文献[7]提出基于分数阶傅里叶变换和自适应信号分解的 LPI 雷达信号调制方式识别的方法, 该方法可以识别 STLFMCW、跳频信号和多相码信号, 但只能将多相码信号分成 P2、P4 码和 Frank/P1/P3 码 3 类。

本文提出了一种基于自适应分解和多重相位差的 LPI 信号调制方式识别方法, 该方法能够在较低信噪比下识别出各型 LPI 雷达信号, 仿真实验验证了识别算法的有效性。

2 LPI 雷达信号的自适应分解识别

STLFMCW 信号包括正、负调频斜率两部分, 两部分的调频率大小相等、符号相反。Costas 跳频信号的时频分布表现为多条斜率为零的平行直线。多相码信号的时频分布表现为具有同一调频率的多分量线性调频信号。因此, 通过比较调频率就可以把 STLFMCW 信号、Costas 跳频信号从多相码信号中区分出来^[7]。

设 $D = \{h_r(n) | \gamma \in \Gamma\}$, Γ 表示原子的参数集, D 为单位能量原子的集合。信号表示为一系列时频原子的线性组合:

$$x(x) = \sum_{k=0}^M \hat{b}_k h_{rk} \quad (1)$$

自适应分解的过程就是寻找与信号最匹配的基函数, 条件为:

$$|\hat{b}_k|^2 = \max |\langle x_k(n), h_{rk}(n) \rangle|^2 \quad (2)$$

$$x_k(n) = x_{k-1}(n) - \hat{b}_k h_{rk} \quad (3)$$

其中, $x_k(n)$ 是 $x_{k-1}(n)$ 分解后剩下的残差, $x_0(n) = x(n)$ 。此处选择矩形线性调频小波作为自适应分解基函数, 其表达式具有如下形式:

$$h_{rk}(t) = \frac{1}{T_k} \text{rect}\left(\frac{t-t_k}{T_k}\right) * \exp[\omega(t-t_k) + u_k(t-t_k)^2/2] \quad (4)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t-t_k}{T_k}\right) = \begin{cases} 1 & t_k \leq t < T_k + t_k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Ratio} = |\hat{b}_1|^2 / |\hat{b}_2|^2 \quad (6)$$

其中, T_k 、 u_k 、 t_k 和 f_k 分别代表信号的时宽、调频率、时延和初始频率。分解所得分量的能量为 $|\hat{b}_k|^2$ 。我们仅需得到调频率和两个最强分量的能量, 所以只需对信号进行两次分解。由式(6)计算出两个最强分量的能量之比, 得到分类特征向量 $[\mu_1 \mu_2 \text{Ratio}]$ 。信号调制类型判决规则如下:

$$\begin{aligned} \mu_1 = -\mu_2 \neq 0 &\Rightarrow \text{STLFMCW} \\ |\mu_1| \approx |\mu_2| < \varepsilon &\Rightarrow \text{Costas } \varepsilon \text{ 为很小的正数} \\ \mu_1 \approx \mu_2 \neq 0 &\Rightarrow \begin{cases} \text{Ratio} < 5 \Rightarrow \text{P1/P3/Frank} \\ 5 \leq \text{Ratio} \leq 18 \Rightarrow \text{P2} \\ 18 < \text{Ratio} \Rightarrow \text{P4} \end{cases} \end{aligned}$$

3 LPI 雷达信号的多重相位差识别

3.1 P1/P3/Frank 码的特征分析

P1/P3/Frank 码三种多相码的频率特性在很多时频分析工具中均表现为多条平行直线, 在高阶谱中也几乎有同样的特征, 难以区分。因此, 本文从这三种码最本质的码型特征出发, 利用相位差分法提取出具有明显类间区别的特征值。

首先, 对多相码信号进行载频估计, 将其变换到基带上。由于多相码信号的频谱具有一定的带宽, 最大谱线对应的频率一般不等于载频, 可以采用功率谱的重心频率作为载频的估计值。为减少噪声对载频估计的影响, 对功率谱进行平滑^[9]。

$$R_s(k) = \frac{1}{L} \sum_{l=k}^{k+L-1} |R(l)|^2 \quad (7)$$

其中, $R(l)$ 为接收信号的频谱, L 为平滑窗宽度。平滑处理后, 计算功率谱的 3dB 带宽中心作为载频的估计值。假设 $R_s(k_0)$ 是平滑后功率谱的最大幅度值, 搜索出 $R_s(k)$ 中所有大于 $0.5R_s(k_0)$ 的谱线, 这些谱线所占带宽即 3dB 带宽。按式(6)计算其重心。

$$k_0 = \frac{\sum k R_s(k)}{\sum R_s(k)} \quad (8)$$

式中 k 为带宽内的谱线序号, 由此得到载频的估计值为 $\hat{f}_c = k_0/T$, T 为采样时间。构造参考信号将接收到的信号搬移到基带。

$$s_0(n) = s(n) * \exp[-j2\pi \hat{f}_c nT] \quad (9)$$

其中, $n=1, 2, \dots, N$, N 为采样点; $s(n)$ 为接收到的信号的离散形式。接着对基带信号进行解相位运算^[11]:

$$p(n) = \text{imag} \left\{ \ln \left[\frac{s_0(n)}{\sqrt{\text{real}^2[s_0(n)] + \text{imag}^2[s_0(n)]}} \right] \right\} \quad (10)$$

其中, $\text{real}[\cdot]$ 为取实部运算, $\text{imag}[\cdot]$ 为取虚部运算, $p(n)$ 位于区间 $[0, 2\pi]$ 。对解出的相位进行多重相位差分:

$$p'(n) = \frac{\sum_{j=1}^N p(i+j) - \sum_{j=0}^{N-1} p(i-j)}{2M\pi} \quad (11)$$

式中, M 为相位差分重数。若 M 取得过小无法很好地抑制噪声, 取得过大容易将相位的变化平滑得不明显。文献[10]提出 M 取 10 ~ 30 较好, 鉴于多相码信号的突变较二相码、四相码更小, 本文取 M 为 10 ~ 20, 经仿真验证有较好效果。

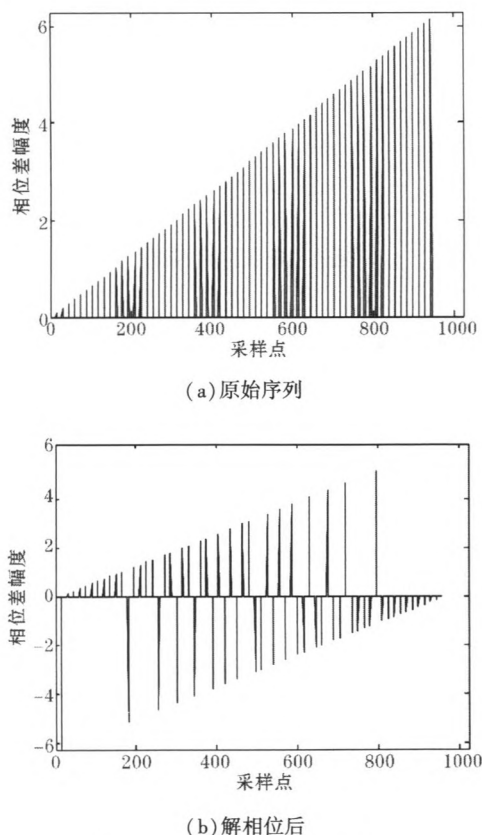


图1 P3码一重相位差分结果

图1是在无噪声条件下对P3码进行一重相位差分后的结果。仿真采用的多相码码长为64, 采样点数为1024。图2(a)是对由P3码相位公式生成的原始相位进行相位差分的结果; 图2(b)是在变换到基带的P3码解相位后进行一重相位差分的结果。利用式(10)解出的相位是模糊的, 其

范围为 $[0, 2\pi]$, 这也造成解相位后的相位差分结果与原相位进行相位差分的结果有一定差别。所以, 解相位后的一重相位差分结果的幅度范围也是 $[0, 2\pi]$ 。为减少幅度变化对特征提取的影响, 先对幅度值进行归一化。为方便特征提取, 将幅度值为负的部分去掉, 结果如图2。

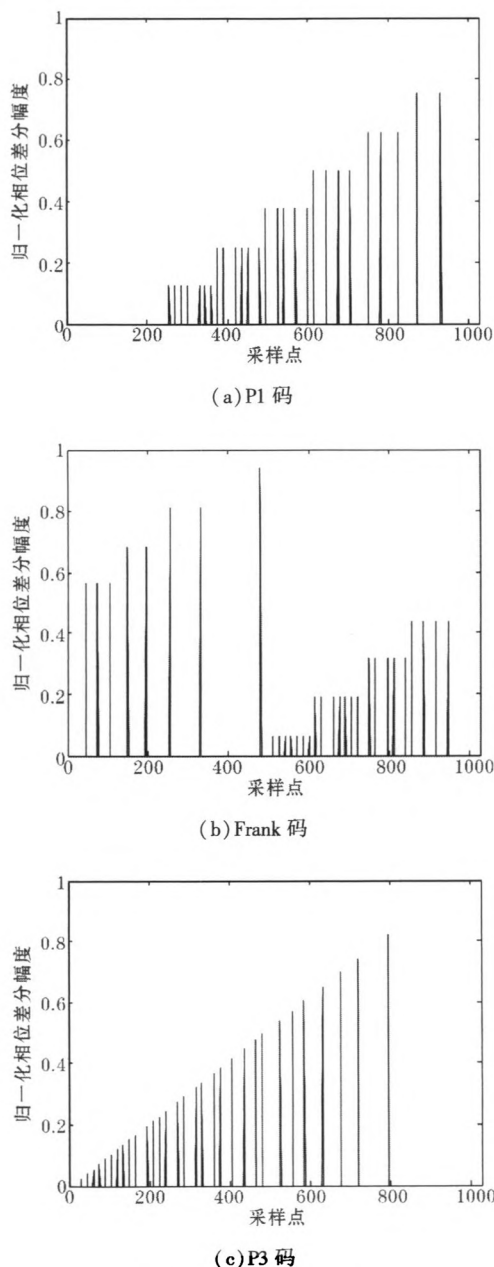
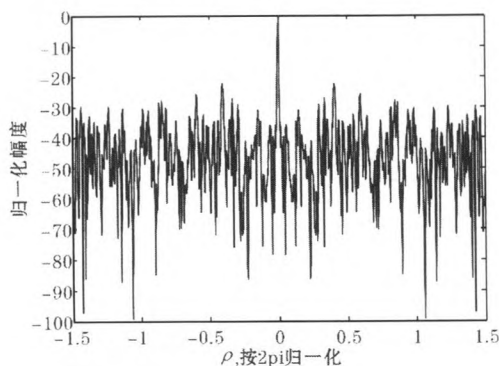


图2 一重相位差分结果

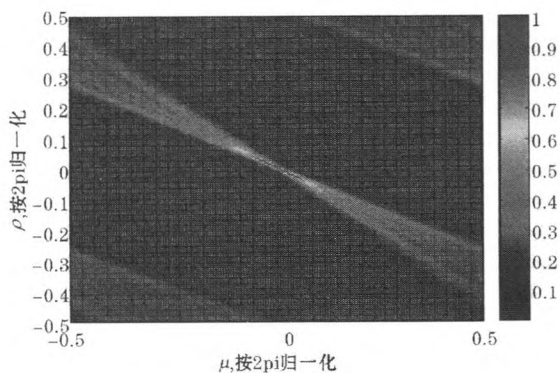
图2是在无噪声条件下一重相位差分结果。由图3可知, Frank码和P3码的相位幅度值呈一直上升的趋势, P1码则是前半段幅度值较大, 后半段缓慢上升, 且前半段的幅度值明显高于后半

段的。因此,本文提取变换后的多相码的前后半段幅度均值之比作为识别特征 λ_1 , 将 P1 和 P3/Frank 码分开。

从图 2 中可知,在无噪声的条件下,P3 码和 Frank 码的区别是比较明显的。Frank 码变换后的相位幅度是呈阶梯状上升的,且起始段有很长一段的零值区,P3 码变换后的相位幅度则沿一条直线从原点一直上升。然而,这些区别在噪声的影响下都会变得难以辨认,如图 3。



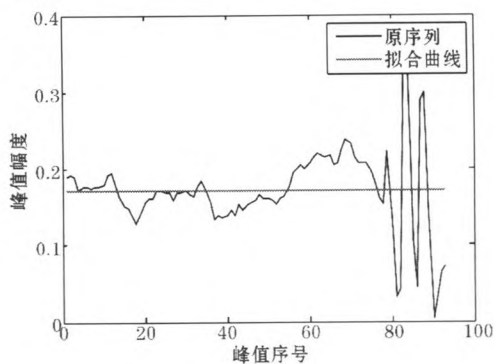
(a) Frank 码(0dB)



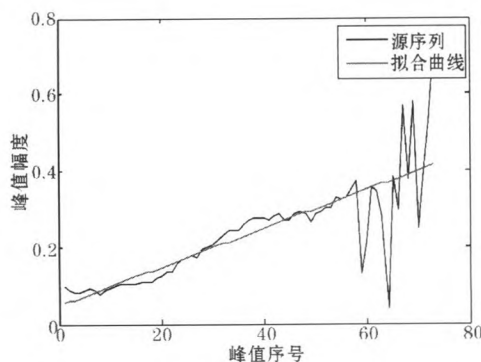
(b) P3 码(0dB)

图 3 多重相位差分后 Frank 码和 P3 码对比

图 3 中,多相码码长为 64,采样点数为 1024。与图 2 相比,图 3 中 Frank 码前端为零的区域在噪声的影响下已无从辨认,它的阶梯性也无法辨认。但是 P3 码的幅度一直上升的趋势仍然比较明显;而 Frank 码的幅度却趋于一条直线,在噪声大的情况下甚至呈下降趋势。基于以上处理之后,先搜索出归一化幅度的峰值,然后利用式 (13) 对其进行平滑(提高抗噪声性能)。最后,对平滑后的结果作一次曲线拟合,曲线拟合结果如图 4 所示,将曲线的斜率作为识别特征 λ_2 。



(a) Frank 码



(b) P3 码

图 4 曲线拟合结果

3.2 利用 PNN 神经网络分类识别

通常接收到的多相码信号都具有低的信噪比,为提高算法的抗噪性,本文采用神经网络对提取后的特征值进行自动分类识别。概率神经网络(PNN)既能用线性学习算法来完成以往非线性学习算法所做的工作,同时又能保持非线性算法的高精度。

4 识别的整体框架

从图 5 中可知,本文将接收的信号分作两路并行处理。通过并行的处理方式可以提高识别的速度。第一路作自适应分解处理。首先,对接收信号进行自适应分解,接着提取最强的两个分量,根据调频率将信号分为 STLFMCW、Costas、和多相码信号。然后,利用 Ratio 的值将多相码信号分为 P4、P2 和 P1/P3/Frank 码。第二路信号作多重相位差分处理。首先,对接收到的信号作基带变换处理,在通过低通滤波器之后,分两路输出。一路提取特征值 λ_1 ,一路提取特征值 λ_2 。若自适

应处理通道的处理结果是 P1/P3/Frank 码, 则输出选通信号将 λ_1 和 λ_2 送入 PNN 神经网络完成 P1、P3 和 Frank 码的识别。

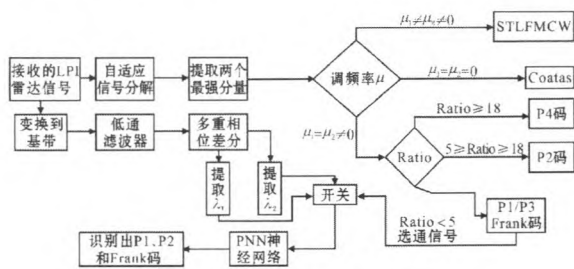


图5 识别的整体框架

5 仿真及性能分析

STLFMCW 带宽 4MHz, 载频 4MHz, 调频率分别为 0.5MHz/μs 和 -5MHz/μs。Costas 跳频信号有 7 个跳变频率为 {4, 7, 1, 6, 5, 2, 3} MHz。多相码信号 (P1, P2, P3, P4 和 Frank 码) 的载频为 4MHz, 码长均为 64。采样频率 16MHz (即归一化频率为 0.25), 采样点数为 1024。

以 P4 码为例, 分析载频估计误差对多相码识别率的影响程度。在 5dB 的信噪比下, 对 P4 码进行 300 次 Monte Carlo 实验, 结果如图 6。由图 7 可知, 识别率在载频估计误差超过一定范围之后迅速下降。这是由于载频估计误差过大会导致基带变换后的残余频率过大, 相位差分的结果出现较大的误差, 导致识别率急剧下降。可见, 要保证本文算法的有效性必须保证载频估计误差在一定范围之内。文献[6]用实验验证了在信噪比大于 -10dB 时, 由式(7)、(8)估计的载频误差在 1% 范围之内。

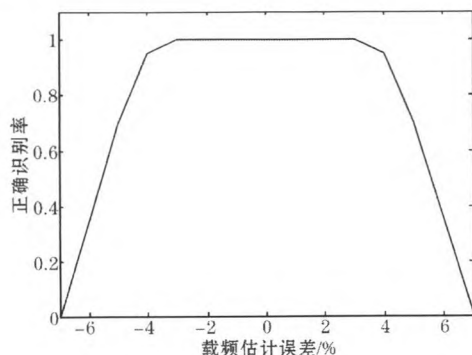


图6 P4 码正确识别率与载频估计误差关系

信噪比取 -6dB ~ 4dB, 间隔 2dB 对每种信号做 300 次 Monte Carlo 实验。不同信噪比下的 Monte Carlo 实验结果进行统计平均计算得到图 7 的分类性能曲线。

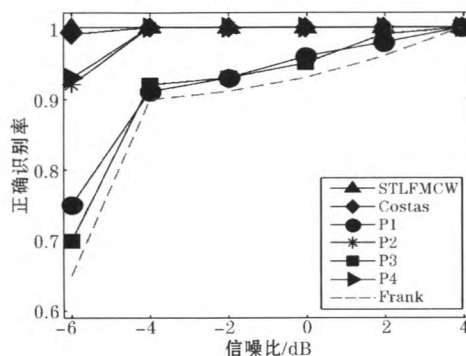


图7 不同信噪比下各信号分类性能

从图中可以看出, 本文算法对 STLFMCW 和 Costas 跳频信号的分类效果要优于多相码信号, 在信噪比 -6dB 时可以达到 100% 的识别率。而对于多相码信号, P4 和 P2 码的识别率要高于 P1/P3/Frank 码, 在信噪比高于 -4dB 时识别率达到了 100%。而 P1、P3 和 Frank 码的正确识别率在 -4dB 时可以达到 90%。相比较而言, Frank 码的识别率要低于 P3 和 P1 码的识别率, 这是由于在噪声的影响下 Frank 码的零值区域幅度可能远超过后面信号的幅值而被判为 P1 码。相比较而言, 采用自适应分解算法的识别率要高于采用相位差分算法的识别率。这是由于相位差分算法的抗噪性要逊于自适应分解算法。

6 结束语

本文采用自适应信号分解和多重相位差分算法完整地实现了对 LPI 雷达信号的分类识别。首先利用自适应信号分解获得了调频率和能量比两种分类特征, 将 LPI 雷达信号分为 STLFMCW、Costas、P2 码、P4 码和 P1/P3/Frank 码信号; 然后利用多重相位差分提取变换后信号前后段均值之比与拟合曲线斜率两种分类特征, 实现了对 P1/P3/Frank 码信号的分类识别。该方法为电子对抗侦察中 LPI 雷达信号识别提供了一种新思路。

(下转第 42 页)

于辐射源个体识别,依然取得了较好的分类识别结果。

参考文献:

- [1] ZHU X J. Semi-Supervised Learning Literature Survey [J]. Computer Science, 2008, 37(1): 63-77.
- [2] GIBSON B R, ROGERS T T, ZHU X J. Human Semi-Supervised Learning [J]. Topics in Cognitive Science, 2013, 5(1): 132-172.
- [3] KALISH C W, ROGERS T T, LANG J, et al. Can Semi-Supervised Learning Explain Incorrect Beliefs About Categories? [J]. Cognition, 2011, 120(1): 106-118.
- [4] ZHU X J, GIBSON B R, ROGERS T T. Co-Training as A Human Collaboration Policy [C]// Proc 25th AAAI Conf Artificial Intelligence, San Francisco, California: AAAI, 2011: 852-857.
- [5] ZHU X J, GIBSON B R, JUN K S, et al. Cognitive Models of Test-Item Effects in Human Category Learning [C]// Proc 27th International Conf Machine Learning, Haifa, Israel: ICML, 2010: 1247-1254.
- [6] CHEN Y M, LIN C M, HSUEH C S. Emitter Identification of Electronic Intelligence System Using Type-2 Fuzzy Classifier [J]. Systems Science & Control Engineering, 2014, 2(1): 389-397.
- [7] YUAN Y J, HUANG Z T, WU H, et al. Specific Emitter Identification Based on Hilbert Huang Transform Based Time Frequency Energy Distribution Features [J]. IET Communications, 2014, 8(13): 2404-2412.
- [8] 吕铁军. 通信信号调制识别研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2000.
- [9] CHAN Y T, GADBOIS L G. Identification of the Modulation Type of a Signal [J]. Signal Processing, 1989, 16(2): 149-154.
- [10] 蔡权伟. 多分量信号的信号分量分离技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [11] HUANG N E. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis [J]. Royal Society of London Proceedings, 1998, 454(1971): 903-99.

(上接第 11 页)

参考文献:

- [1] PACE P E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar [M]. Norwood, MA: Artech House, 2004.
- [2] LUND'EN J, TERHO L, KOIVUNEN V. Classifying Pulse Compression Radar Waveforms Using Time-Frequency Distributions [C]//CISS 2005 - 39th Conference on Information Sciences and Systems. Baltimore, USA: 2005:1-6.
- [3] MILNE P R, PACE P E. Wigner Distribution Detection and Analysis of FMCW and P-4 Polyphase LPI Waveforms [C]//2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Orlando: IEEE, 2002: 3944-3947.
- [4] COPELAND D B, PACE P E. Detection and Analysis of FMCW and P-4 Polyphase LPI Waveforms Using Quadrature Mirror Filter Trees [C]//2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Orlando: IEEE, 2002: 3960-3963.
- [5] ANJANEYULU L, MURTHY N S. Identification of LPI Radar Signals by Higher Order Spectra and Neural Network Techniques [C]//2008 IEEE International Conference on Electronic Design. Penang, Malaysia: IEEE, 2008: 1680-1683.
- [6] 邓振森,刘渝,杨姗姗. 多相码雷达信号调制方式识别 [J]. 数据采集与处理, 2008, 23(3): 265-269.
- [7] 袁伟明,王敏,吴顺君. 低截获概率雷达信号的调制识别研究 [J]. 信号处理, 2006, 22(2): 153-156.
- [8] LOPEZ RESUENO. Unknown Signal Diction via Atomic Decomposition [C]//Proc 11th IEEE Workshop on Statistical Signal Processing. Singapore: IEEE, 2001: 174-177.
- [9] PINTO E L, BRANDAO J C. A Comparison of Four Methods for Estimation the Power Spectrum of PSK Signals [C]//IEEE International Conference on Communications' 87: Communications - Sound to Light, Proceedings. New York: IEEE, 1987: 1749-1753.
- [10] 王丰华,黄知涛,姜文利. 一种有效的脉内调制信号识别方法 [J]. 信号处理, 2007, 23(5): 686-689.