

文章编号 1004-924X(2014)11-3122-07

低截获概率雷达信号检测方法的优化及应用

李 娜^{1,2*}, 王 珂¹, 李保珠²

(1. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘要:针对利用循环谱理论检测低截获概率(LPI)雷达信号存在计算量大的问题,提出了一种优化的快速傅里叶变换(FFT)累积算法来更新信号处理设备的软件程序。分析了原软件中信号处理的过程,提出了采用并行流水型结构的优化方法;利用前一个滑动窗口内采样信号的FFT,推导出下一时刻采样信号序列的FFT;通过减少重复采样点,减少计算量。然后,利用循环谱检测中4个象限的循环谱的对称性,减少计算象限数,并采用一维搜索进行峰值检测,从而进一步减少计算量。理论推导显示,改进方法减少了计算复杂度和计算量。最后,利用提出的方法对常用的线性调频(LFM)和二进制相移键控(BPSK)信号进行了分析。结果表明,在相同条件下,利用改进的算法及一维搜索,计算时间可缩短为原算法的1/25左右。另外,算法改进后检测信号的幅度值仅减小了不到10%,不影响后续处理对循环谱参数的估计。

关键词:雷达信号;信号检测;循环谱;低截获概率;傅里叶变换(FFT)累积算法

中图分类号:TN957.51 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.3122

Optimization and application of LPI radar signal detection method

LI Na^{1,2*}, WANG Ke¹, LI Bao-zhu²

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: lina0629@163.com

Abstract: As Low-Probability-of-Intercept (LPI) signal detection algorithm based on cyclic spectrum theory has a very large amounts of calculation, this paper proposes an optimized algorithm, Fast Fourier Transform(FFT) accumulation, to update the software program. The signal processing of the original software is analyzed, and the new algorithm based on a parallel signal processing structure is proposed. The new algorithm derives the next FFT sampling signal sequence by the previous FFT sampling signal sequence in a sliding window. By reducing the repeated sampling points, the new algorithm reduces the amount of calculation. In view of the symmetry of the four quadrant of the cyclic spectrum, the quadrant to be calculated is decreased. Moreover, by using one-dimensional search peak detection, the amount of calculation is reduced further. Theoretical derivation demonstrates that the complexity and calculation amounts of the proposed algorithm are reduced obviously. Finally, through verifying the Linear Frequency Modulation (LFM) and Binary Phase Shift Keying(BPSK) signals, it indicates that the calculation time is reduced to about 1/25 that of the

收稿日期:2014-07-10;修订日期:2014-08-15.

基金项目:吉林省教育厅“十二五”规划春苗专项资金资助项目

original algorithm. In addition, the amplitude values of signals in the optimized algorithm are reduced less than 10%, which not affects the estimation of parameter of a cyclic spectrum.

Key words: radar signal; signal detection; cyclic spectrum; Low-Probability-of-Intercept(LPI); Fast Fourier Transform(FFT) algorithm accumulation

1 引言

低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)雷达因具有时宽带宽积大、抗干扰、低功率、高分辨和低截获等特性,显著提高了其战场的生存能力,使得传统的非合作截获接收机难以检测。因此,LPI雷达信号检测成为当今雷达信号处理的研究热点之一。

在雷达、通信等大多数实际应用场景中,由于受人工周期信号的调制,信号的统计特性往往表现出周期性,故可引入循环平稳信号进行描述和研究^[1]。与传统方法相比,循环平稳特性不仅反映了信号的非平稳性,还能准确地反映信号的本质特性;与一般非平稳信号相比,循环平稳信号具有频谱冗余特性,因而具有潜在的抗干扰能力。由于不同循环平稳信号的循环频谱不同,因而可将这一信息作为信号的特征参量用于信号检测与分类。

Gardner^[2]对循环平稳理论进行了深入研究,实现了对具有周期循环平稳特征信号的检测。循环谱算法主要分为:FFT累积法(FFT Accumulation Method, FAM)、分段谱相关算法(Strip Spectral Correlation Algorithm, SSCA)、直接频率平滑算法(Direct Frequency Smoothed Method, DFSM)。其中,FAM与SSCA算法相对成熟。目前国内外已有不少文献对循环谱进行了改进:其中,Brousseau和Salt提出了用自相关函数的时间积分实现谱相关函数估计^[3-4];Dandawate等提出了检测循环平稳性的最优X2检验方法^[5];黄春琳、金艳等人提出了利用循环自相关函数进行信号检测^[6-7];郑鹏等人采用一维搜

索进行信号检测^[8-10],在一定程度上提高了信号检测的实时性。但是上述算法都是在检测后期,对处理进行改进,只对减少所得三维图像的搜索计算量做了大量研究。以上3种算法中,FAM与SSCA算法的计算量都远远低于DFSM算法,但是计算量仍比较大,不能迅速进行处理。另外,FAM算法要比SSCA算法的计算效果要好,易于提取特征参数。

为此,本文对FAM算法进行了改进。为了减少计算复杂度,采用并行处理进行采样信号的FFT运算代替对离散信号矩阵的FFT运算。在信号进行FFT时,利用前一时刻信号的FFT推导出下一时刻信号的FFT,最终实现FAM的改进,同时,运用现有的通过非零循环频率上一维峰值搜索检测方法,进一步减少计算量,实现了LPI雷达信号的盲检测。

2 循环谱理论

循环自相关函数^[11-12]可写为:

$$R_x^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X\left(t + \frac{\tau}{2}\right) X^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\alpha t} dt. \quad (1)$$

式中: α 为循环频率; $R_x^\alpha(\tau)$ 是信号自相关函数的广义傅里叶系数。

由循环自相关函数的傅里叶变换可得到谱相关密度函数:

$$S_X^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-j2\pi\alpha\tau} d\tau. \quad (2)$$

由于现实信号为有限长,在工程实践中循环谱密度可以通过时间平滑来获得。如图1所示,信号的总观测时间为 Δt ,短时FFT窗口长度为 T_w ,则循环谱的估计值为:

$$S_X^s(f) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-(\Delta t/2)}^{t+(\Delta t/2)} S_{x_{T_w}}(u, f) du, \quad (3)$$

式中:

$$S_{x_{T_w}}(u, f) = \frac{1}{T_w} X_{T_w} \left[u, f + \frac{\alpha}{2} \right] X_{T_w}^* \left[u, f - \frac{\alpha}{2} \right], \quad (4)$$

且 $X_{T_w}(u, f) = \int_{t-(T/2)}^{t+(T/2)} x(u) e^{-j2\pi fu} du$ 为滑动短时 FFT 变换。在图 1 中, 每个短时 FFT 获得的频谱分量的分辨率为 $\Delta f = 1/T_w$, 循环频率的分辨率为 $\Delta\alpha = 1/\Delta t$ 。为避免出现混叠和循环泄露, 滑动因子 $L = T_w/4$ 。由此可以看出, $S_X^s(f)$ 为 $x(t)$ 在 $f + (\alpha/2)$ 处频谱分量的瞬时相关。

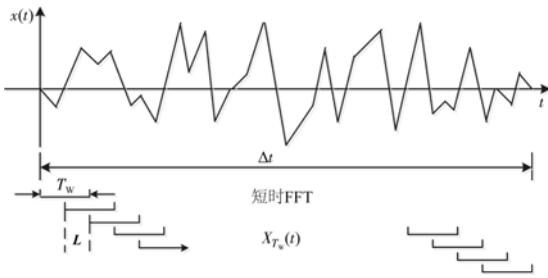


图 1 时间平滑短时 FFT 循环谱密度估计

Fig. 1 Cyclic spectrum density estimation for short-time smoothing FFT

工程应用中多对信号进行离散化处理, 且信号长度有限。这里采用的是时间平滑 FAM 算法, 式(3)、式(4)在离散条件下估计的时间平滑谱相关密度函数为:

$$S_{x_N}^s(n, k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{1}{N'} X_{N'} \left[n, k + \frac{\gamma}{2} \right] X_{N'}^* \left[n, k - \frac{\gamma}{2} \right] \right], \quad (5)$$

式中: $X_{N'}(n, k) = \sum_{n=0}^{N'} \omega(n) x(n) e^{-j2\pi kn/N'}$ 为 $x(n)$ 的离散短时 FFT; $\omega(n)$ 是数据窗函数; k 和 γ 是 f 和 α 的离散值; 采样频率 f_s 下 Δt 内信号离散采样总数为 N ; 离散短时 FFT 的点数为 N' , 则 $\Delta f \cdot \Delta t = N/N'$ 。

3 算法改进及仿真验证

3.1 改进的时间平滑 FFT 积累算法

改进算法的核心思想是改进滑动 FFT; 考虑第 m 次滑动 FFT 窗口内的 N' 点采样序列 $\{x(m), \dots, x(m+N'-1)\}$, 令 $\omega(n) = 1$ 为矩形窗, 进行 FFT 得:

$$X_k^m = \sum_{n=0}^{N'-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N'}. \quad (6)$$

窗口滑动平移 $N'/4$ 个采样点后, 得到第 $m+1$ 次采样的 FFT:

$$X_k^{m+1} = \sum_{n=0}^{N'-1} x \left[n + m + \frac{N'}{4} \right] e^{-j2\pi kn/N'}. \quad (7)$$

令 $q = n + \frac{N'}{4}$ 代入式(7)得:

$$X_k^{m+1} = \sum_{n=0}^{\frac{5N'}{4}-1} x(q+m) e^{-j2\pi k(q-N'/4)/N'} = e^{j\frac{1}{2}\pi k} \left[\sum_{q=\frac{N'}{4}}^{N'-1} x(q+m) e^{-j2\pi kq/N'} + \sum_{q=N'}^{\frac{5N'}{4}-1} x(q+m) e^{-j2\pi kq/N'} \right], \quad (8)$$

式中: $\sum_{q=\frac{N'}{4}}^{N'-1} x(q+m) e^{-j2\pi kq/N'}$ 为第 m 次采样点 $\{x[m + \frac{N'}{4}], \dots, x(m+N'-1)\}$ 的 $\frac{3N'}{4}$ 点 FFT, $\sum_{q=N'}^{\frac{5N'}{4}-1} x(q+m) e^{-j2\pi kq/N'}$ 为 $\{x(m+N'), \dots, x[m + \frac{5N'}{4}-1]\}$ 的 $\frac{N'}{4}$ 点 FFT。

由式(8)可知, 第 $m+1$ 次采样信号的 FFT 为第 m 次后 $3N'/4$ 个采样值的 FFT 与最新 $N'/4$ 个采样值的 FFT, 再进行一次相移。表 1 显示在已知第 m 次 FFT 下, 就可以推得下一序列的 FFT, 仅用 $\left[N' + \frac{N'}{8} \text{lb} \frac{N'}{4} \right]$ 以复数乘法和 $\frac{N'}{4} \text{lb} \frac{N'}{4}$ 以复数加法运算, 就可以实现由 X_k^m 到 X_k^{m+1} 的计算。无需重新计算 $\frac{N'}{2} \text{lb} N'$ 复数乘和 $N' \text{lb} N'$ 复数加的 N' 点 FFT 运算, 从而有效减少了运算量。

表 1 列出了改进前后计算量的变化。

表 1 算法改进前后短时 FFT 计算量

Tab.1 Short-time FFT computation of algorithm before and after modified

	需要新计算 FFT 点数	复数乘法计算量		复数加法计算量	
		滑动窗口	相移	滑动窗口	相移
改进前算法	N'	$\frac{N'}{2}lbN'$	0	$N'lbN'$	0
改进后算法	$\frac{N'}{4}$	$\frac{N'}{8}lb\frac{N'}{4}$	N'	$\frac{N'}{4}lb\frac{N'}{4}$	0
节约计算量	*	$\frac{3N'}{8}lb\frac{N'}{4}$		$\frac{3N'}{4}lb\frac{N'}{4} + \frac{N'}{2}$	

3.2 改进算法的计算量仿真分析

在 FAM 中, 整个估计过程需要计算 $\left[\frac{4N}{N'}-3\right]$ 次 N' 点 FFT。算法改进后, 除第 1 次滑动窗口外, 需要进行 N' 点 FFT。

根据式(8)可得, 复数乘法的总计算量减少

$$C_{na} = \left(\frac{4N}{N'}-4\right) \cdot \frac{3N'}{8}lb\frac{N'}{4} = \left[\frac{3N'}{2}(N-N')lb\frac{N'}{4}\right], \quad (9)$$

复数加法总计算量减少

$$C_{ma} = \left(\frac{4N}{N'}-4\right) \cdot \left[\frac{3N'}{4}lb\frac{N'}{4} + \frac{N}{2}\right] = [(N-N')(3lbN'+2)]. \quad (10)$$

由于 $\Delta f \cdot \Delta t = N/N'$, 则算法的计算量可以看成是 $\Delta f \cdot \Delta t$ 的函数。由于处理器内核性能不同, 考虑到乘法运算复杂度与加法复杂度成 10 倍关系, 算法改进前后的计算量如图 2 所示。

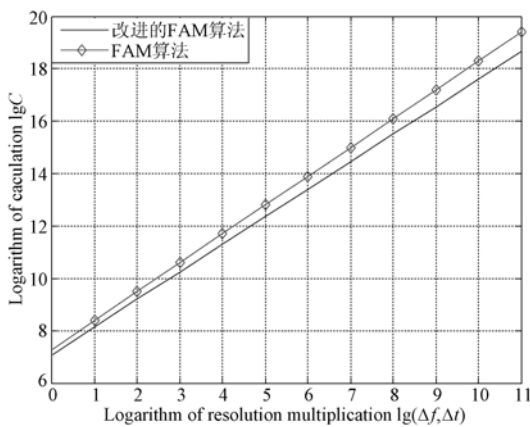


图 2 算法改进前后的运算量

Fig.2 Computation of algorithm before and after modifying

由图 2 可知, 虽然图中两曲线相差不大, 但对运算量做了对数运算, 所以改进后算法的运算量已大大减少, 并随着 $\Delta f \cdot \Delta t$ 的增大, 效果越来越明显。

4 仿真验证实验

由于 LFM 与 BPSK 信号具有时宽带宽积大、距离和多普勒分辨率高、单位频带内能量小等特性, 是一种典型的 LPI 雷达信号。本文将分别对 LFM、BPSK 信号进行对比仿真分析。

4.1 LFM 信号的仿真实验分析

LFM 信号参数设置为: 信号载波频率 $f_c = 1$ kHz, 采样频率 $f_s = 7$ kHz, 调制周期 $t_m = 20 \times 10^{-3}$ s, 调频斜率 $\nabla F = 250$, 信噪比为 -10 dB, 算法改进前后 LFM 信号循环谱密度包络如图 3~图 6 所示。

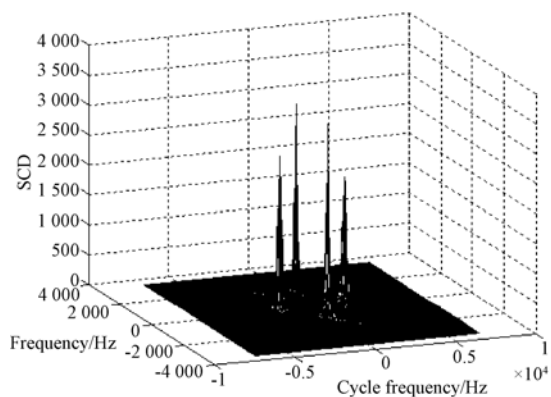


图 3 改进前 LFM 信号的循环谱幅度

Fig.3 Original cyclic spectrum of LFM

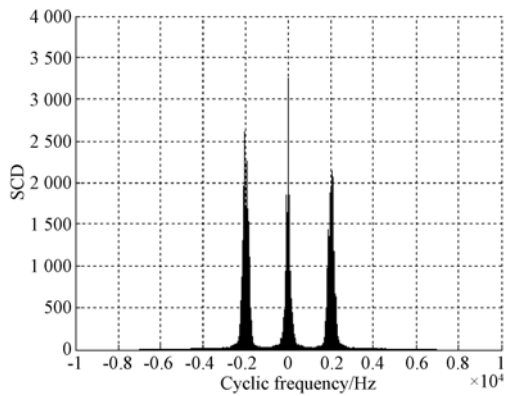


图 4 改进前 LFM 信号的二维循环谱幅度

Fig. 4 Original 2-D cyclic spectrum of LFM

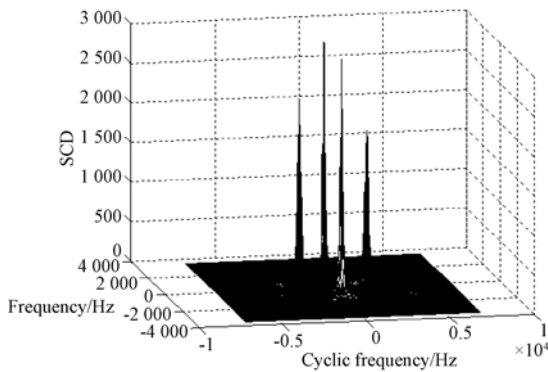


图 5 改进后 LFM 信号的循环谱幅度

Fig. 5 Cyclic spectrum of LFM after modifying

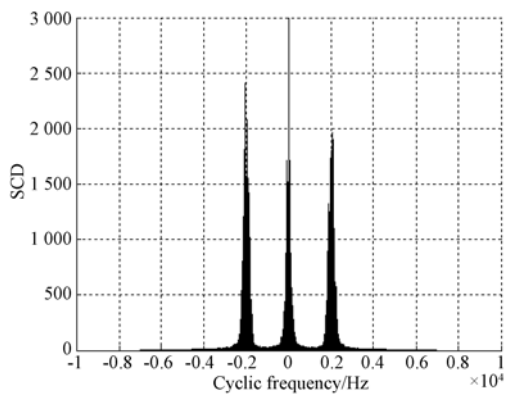


图 6 改进后 LFM 信号的二维循环谱幅度

Fig. 6 2-D cyclic spectrum of LFM after modifying

由图 3~图 6 可以看出,在循环频率 $\frac{\alpha}{2} = f_c = 1 \text{ kHz}$ 处均有最大峰值。改进后的循环谱密度信息与理论相吻合。通过比较图 4、图 6 可以看出,算法改进后仅仅对幅度有所影响,且幅度值减

小了不到 10%,对循环谱的参数估计没有影响。所以,将改进算法应用于 LFM 信号的检测。

仿真实验表明:在原算法的基础上进行一维搜索的计算时间为 4.2s,算法改进后且利用一维搜索的计算时间仅为 0.18 s,时间大约缩短为原算法的 1/23。

4.2 BPSK 信号的仿真实验分析

BPSK 信号参数设置:信号载波频率 $f_c = 1 \text{ kHz}$,采样频率 $f_s = 7 \text{ kHz}$,调制周期 $t_m = 7 \times 10^{-3} \text{ s}$,信噪比为 -10 dB , $N' = 64$, $\Delta t = 4 \text{ 096}$,算法改进前后 BPSK 信号循环谱密度包络如图 7~图 10 所示。

由图 7~图 10 可以看出,改进算法同样适用于 BPSK 信号。

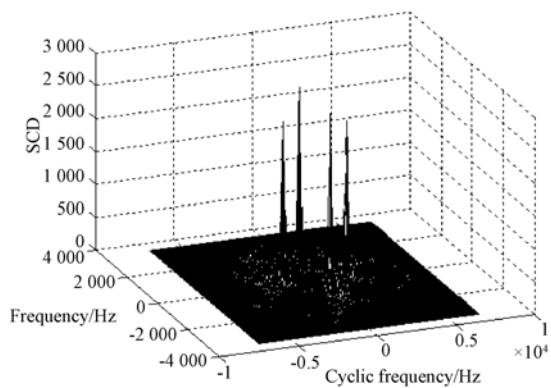


图 7 改进前 BPSK 信号的循环谱幅度

Fig. 7 Original cyclic spectrum of BPSK

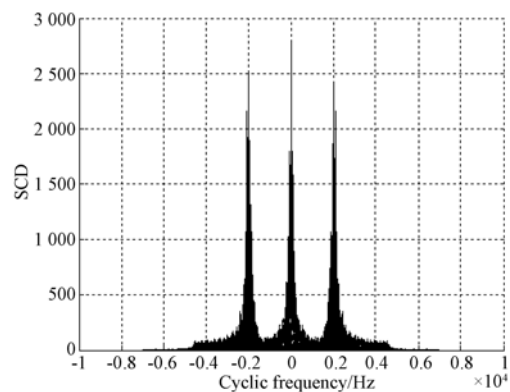


图 8 改进前 BPSK 信号的二维循环谱幅度

Fig. 8 Original 2-D cyclic spectrum of BPSK

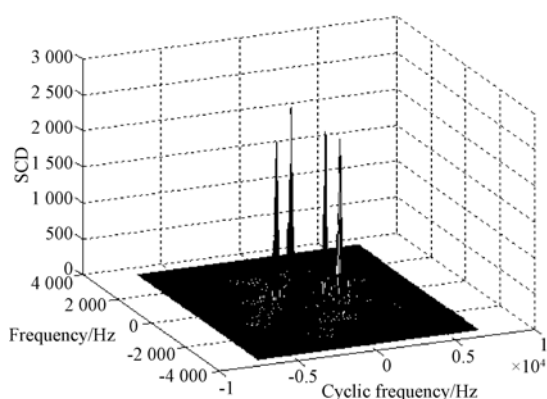


图 9 改进后 BPSK 信号的循环谱幅度

Fig. 9 Cyclic spectrum of BPSK after modifying

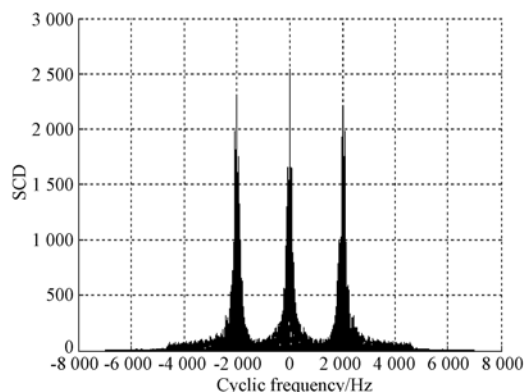


图 10 改进后 BPSK 信号的二维循环谱幅度

Fig. 10 2-D cyclic spectrum of BPSK after modifying

在循环频率 $\frac{\alpha}{2} = f_c = 1$ kHz 处均有最大峰值。

仿真结果表明:原始算法的计算时间为 3.1 s,算法

改进后的计算时间为 0.12 s,计算时间大约缩短为原来的 1/26,实时性得到有效提高。

通过分别对 LFM 信号与 BPSK 信号的仿真验证可以看出,改进算法具有普遍适应性。仿真结果表明,由于改进算法采用了并行处理,并且在 FFT 计算上复杂度减小了,实时性得到了很大改善,计算时间约为原算法的 1/25,虽然并行运算占用了一部分缓存,但是信号检测性能得到很大提高,这是值得的。

5 结 论

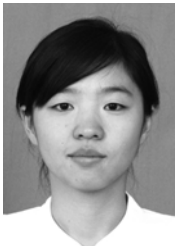
本文针对 LPI 雷达信号检测计算量大的问题进行了研究。采用并行流水型结构,利用前一个滑动窗口内采样信号的 FFT,推导出下一时刻采样信号序列的 FFT;通过减少重复采样点,减少计算量;经过理论推导,明确得到计算复杂度和计算量都减小的结论。利用循环谱的对称性,减少计算象限数,采用一维搜索进行峰值检测,进一步减少计算量。最后,本文利用常用的 LFM 和 BPSK 信号进行分析,结果表明,在相同条件下,改进后算法利用一维搜索的计算时间大约为原算法的 1/25。另外,改进后检测信号的信号幅度值仅减小了不到 10%,不影响后续处理对循环谱的参数估计。

参考文献:

- [1] 贾维敏,姚敏立,宋建社. 信号循环稳特性及其应用[J]. 现代雷达,2005,27(9):35-39.
JIA W M, YAO M L, SONG J SH. Cyclostationarity of signals and applications [J]. *Modern Radar*, 2005,27(9):35-39. (in Chinese)
- [2] GARDNER W. Exploitation of spectral Redundancy in cyclostationary signals [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1991, 8(2):14-36.
- [3] 郭裕兰,万建伟,鲁敏,等. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. 光学精密工程,2012,20(4):843-850.
GUO Y L, WAN J W, LU M, et al.. Three dimensional orientation estimation for radar target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(4):843-850. (in Chinese)
- [4] 张文秀,林君,周逢道,等. 分布式电磁接收系统多频标定信号的产生与检测[J]. 光学精密工程,2012,20(8):1862-1869.
ZHANG W X, LIN J, ZHOU F D, et al. Generation and detection of multi-frequency calibration signal for distributed electromagnetic receiver [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(8):1862-1869. (in Chinese)
- [5] DANDAWATE A V. Testing for presence of kth-order cyclostationarity [C]. *IEEE Signal Process-*

- ing Workshop on Higher-Order Statistics, 1993: 240-244.
- [6] 黄春琳,姜文利,周一宇. 对低截获概率相位编码信号检测的有限多循环检测器[J]. 电子学报,2002, 30(6):916-918.
HUANG CH L, JIANG W L, ZHOU Y Y. Finite multicycle detector of LPI phase-coded signals [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002,30(6): 916-918. (in Chinese)
- [7] 金艳. 低截获概率信号的循环平稳检测与参数估计研究[D]. 西安电子科技大学,2008.
JIN Y. *Research on Detection and Parameter Estimation of Low-Probability-of-Intercept Signals Based on Cyclostationarity* [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] LIN L, JI H B. Radar emitter recognition based on cyclostationary signatures and sequential iterative least-square estimation[J]. *Expert Systems with Applications*,2011;2140-2147.
- [9] PRITHIVIRAJ V, SARANKUMAR B, KALAIYARASAN A, et al.. Cyclostationary analysis method of spectrum sensing for cognitive radio [C]. *IEEE Wireless VITAE*,2011;1-5.
- [10] 郑鹏,张鑫,刘锋,等. 基于循环谱的 MPSK 信号盲检测[J]. 计算机仿真,2012,29(4):130-137.
ZHENG P, ZHANG X, LIU F, et al.. Blind detection of MPSK signals based on cyclic spectrum [J]. *Computer Simulation*,2012,29(4): 130-137. (in Chinese)
- [11] 林炜,彭华,王彬,等. 一种基于循环谱的突发信号盲检测算法[J]. 信号处理,2011, 27(12): 1920-1924.
LIN W, PENG H, WANG B, et al.. A blind detection algorithm of burst signal based on cyclic spectrum [J]. *Journal of Signal Processing*, 2011, 27(12):1920-1924. (in Chinese)
- [12] 王红军,毕光国. 一种改进的认知无线电循环功率谱特征检测算法[J]. 信号处理,2010,26(12): 1864-1869.
WANG H J, BI G G. A modified cyclic power spectrum feature detection algorithm for cognitive radio [J]. *Journal of Signal Proceeding*,2010, 26(12):1864-1869. (in Chinese)

作者简介:



李娜(1982—),女,河南安阳人,博士研究生,讲师,2003年于西北工业大学获得学士学位,2008年于解放军信息工程大学获得硕士学位,主要从事信号及信息处理方面的研究。E-mail: lina0629@163.com

导师简介:



王珂(1955—),男,河北秦皇岛人,博士、教授,博士生导师,1978年、1994年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位,2000年于吉林大学获博士学位,主要从事信号与信息处理、图像处理等方面的研究。E-mail: wangke@jlu.edu.cn