

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.02.003

引用格式:王晓峰,张国毅,张旭洲. 基于平滑 RAT 的多相码信号参数估计[J]. 电讯技术,2014,54(2):126-131. [Wang Xiao-feng,Zhang Guo-yi,ZHANG Xu-zhou. Parameter Estimation of Polyphase Coded Signal Based on Smoothed Radon-Ambiguity Transform[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(2):126-131.]

基于平滑 RAT 的多相码信号参数估计*

王晓峰^{1,**}, 张国毅^{1,2}, 张旭洲²

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001; 2. 空军航空大学 信息对抗系, 长春 130022)

摘 要:针对 Radon-ambiguity 变换(RAT)在估计多相码信号(Frank 码、P1、P2、P3、P4 码)调制参数时受噪声影响严重的问题,提出了基于平滑 Radon 变换的多相码信号参数估计方法。首先理论上分析了噪声影响多相码信号 RAT 估计性能的原因,进而通过二次平滑估计出信号 RAT 的噪声基底包络,最后在去除噪声基底的 RAT 平面中完成多相码信号调制参数的估计。仿真实验表明,该方法调频率和码元宽度估计的信噪比门限相比传统 RAT 方法分别降低了1 dB和4 dB。

关键词:多相码信号;参数估计;Radon-ambiguity 变换;抗噪性

中图分类号:TN971 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)02-0126-06

Parameter Estimation of Polyphase Coded Signal Based on Smoothed Radon-Ambiguity Transform

WANG Xiao-feng¹, ZHANG Guo-yi², ZHANG Xu-zhou²

(1. Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Department of Information Electronic Countermeasure, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem that the noise seriously affects the estimated performance when the Radon-Ambiguity transform(RAT) estimates the modulated parameter of polyphase coded radar signals (Frank, P1, P2, P3 and P4), this paper proposes a polyphase coded signals parameter estimation algorithm based on the smoothed Radon-Ambiguity transform. Firstly, the reason that noise seriously affects the estimated performance of RAT is analyzed in theory, and then the noise basement envelope is estimated through the double smoothing. Finally, the modulated parameter estimation of polyphase coded signals is accomplished in the RAT plane where the noise basement has been eliminated. Simulation experiment results show that the proposed method's parameter estimation SNR threshold of frequency modulation slope and the code-width has reduced by 1 dB and 4 dB compared with traditional RAT respectively.

Key words: polyphase codes signal; parameter estimation; radon-ambiguity transform; anti-noise

1 引 言

截获信号的参数估计是情报搜集活动中的一个重要环节,只有正确估计出信号调制参数才能准确地识别辐射源和产生相干干扰。多相码信号是一类由线性调频信号导出的脉冲压缩信号,兼具频率调

制与相位编码的优良性能,成为目前低截获概率雷达(LPI)常用的信号形式^[1-2]。因此,多相码信号 的参数估计成为近来研究的热点问题^[3-7]。

多相码信号产生于线性调频信号,具有和线性调频信号相似的时频特性,即在时频平面表现为几

* 收稿日期:2013-10-21;修回日期:2014-01-10 Received date:2013-10-21;Revised date:2014-01-10

** 通讯作者:wx870516@126.com Corresponding author:wx870516@126.com

条平行的脊线,因此目前对多相码信号的参数估计主要是基于其时频特征^[8-10]。文献[8]提出了多相码信号的模糊函数(Ambiguity Function, AF)检测算法,但没有研究参数估计问题。文献[9]提出了基于 Radon-ambiguity 变换(RAT)多相码连续波信号参数估计问题,首先估计信号扫频率,然后利用周期调制在 AF 时延轴上表现出的周期性估计调制周期,进而获得子码率估计。对于多相码脉冲信号,文献[10]证明了 AF 幅度图像中距离主脊线最近的脊线在时延轴和多普勒轴上截距分别代表信号编码周期和子码率,并且利用这一结论给出了多相编码脉冲信号编码周期和子码率估计方法。但实际电子侦察中,截获信号会不可避免地混入噪声,噪声的存在改变了 RAT 的峰值分布特征,对参数估计的准确性有严重影响。

针对此问题,本文首先分析了噪声对 RAT 特征的影响,并给出了噪声基底的产生原因,在此基础上提出了一种基于平滑 RAT 的多相码信号参数估计算法。该算法首先估计截获信号的噪声基底包络,然后在去除噪声基底的 RAT 中完成多相码信号调制参数估计。仿真结果表明,平滑 RAT 具有较强的抗噪性,适合于低信噪比下多相码信号的参数估计。

2 信号模型

多相码信号的解析表达式为

$$s(t)=A\exp[\mathrm{j}(2\pi f_c t+\varphi_k)],0\leq t\leq T\quad(1)$$

式中, A 为信号幅度, f_c 为载频, φ_k 为相位调制函数, T 为编码周期。不同的相位调制函数代表不同的多相码信号。Frank 码、P1、P2 码是对步进线性调频波形的近似,采用 q 个频率阶跃,每个频率上采样 q 个离散相位。而 P3、P4 码是按 Nyquist 采样率对线性调频信号的相位进行采样^[1]。令码元宽度为 t_b ,编码长度为 N_c ,信号带宽为 B ,则多相码信号的各项参数之间存在以下关系:

$$t_b=1/B\quad(2)$$

$$T=N_c t_b\quad(3)$$

3 基于 RAT 的参数估计

信号 AF 定义为^[8]

$$\mathrm{AF}(\tau,v)=\int_{-\infty}^{+\infty}s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi vt}\mathrm{d}t\quad(4)$$

多相码信号的 AF 表现为多条平行的脊线,且

主脊线过原点。图 1 为 Frank 码信号的 AF,其他多相码信号具有类似的 AF 特征^[4]。如图 1 所示,时频脊线斜率即为多相码信号调频率:

$$\hat{m}=\arctan(\alpha_0)\quad(5)$$

多相码信号时频脊线间隔 d 、带宽 B 和编码周期 T 的关系如下:

$$B=d\sec\alpha_0\quad(6)$$

$$T=d\csc\alpha_0\quad(7)$$

利用 B 和 T 即可得出码元宽度 t_b 和编码长度 N_c 的估计值:

$$\hat{t}_b=1/B\quad(8)$$

$$\hat{N}_c=T/\hat{t}_b\quad(9)$$

因此,多相码的参数估计主要是对脊线倾斜角 α_0 和脊线间隔 d 的估计。

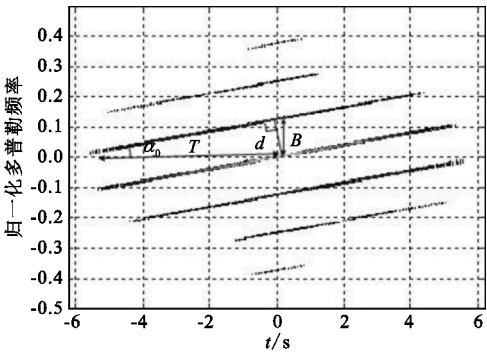


图 1 Frank 码 AF
Fig. 1 The AF of Frank code

Radon 变换是一种广义直线积分变换,信号的 RAT 是 AF 平面内沿直线 $v=v_0+m\tau$ 的积分:

$$\Re(u,\alpha)=\int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{AF}(u\cos\alpha-w\sin\alpha,u\sin\alpha+w\cos\alpha)\mathrm{d}w=\frac{1}{|\sin\alpha|}\left|\int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{AF}(\tau,v_0+m\tau)\mathrm{d}\tau\right|\quad(10)$$

在 AF 平面内,多相码信号主脊线沿时间轴和频率轴的位移分别表示离散的编码周期和带宽,如图 1 所示。图 2(a)为图 1 所示 AF 进行 Radon 变换的结果,搜索最大峰值位置即可得到调频率的估计值;最佳旋转角度 α_0 切面会出现多个峰值,如图 2(b)所示,峰值间距为多相码信号脊线之间的间隔 d 。将脊线间隔和角度 α_0 代入式(6)~(9)即可得出码元宽度和编码个数的估计值。

由于主脊线必过原点,因此实际应用中无需计算全部 Radon 变换,只需要首先计算 $v_0=0$ 的 Radon 变换完成调频率的估计,然后再计算最佳旋转角度 α_0 的 Radon 变换估计脊线间隔。

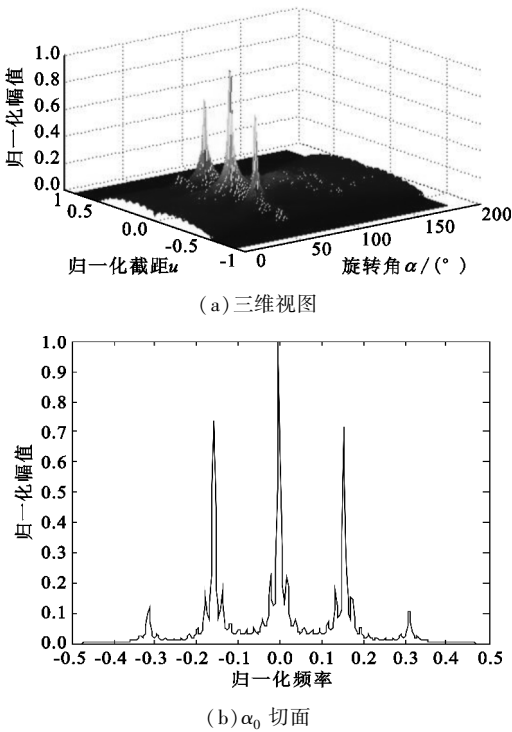


图2 Frank 码 RAT
Fig. 2 The RAT of Frank code

实际截获信号中会不可避免的混入噪声,实验表明 RAT 在处理含噪声信号时会产生十分严重的“钟形”噪声基底,如图 3 (a) 所示。噪声基底的存在严重影响了参数估计的准确性,图 3 (b) 为信噪比 -6 dB 时 RAT 在角度 α_0 的切面图。

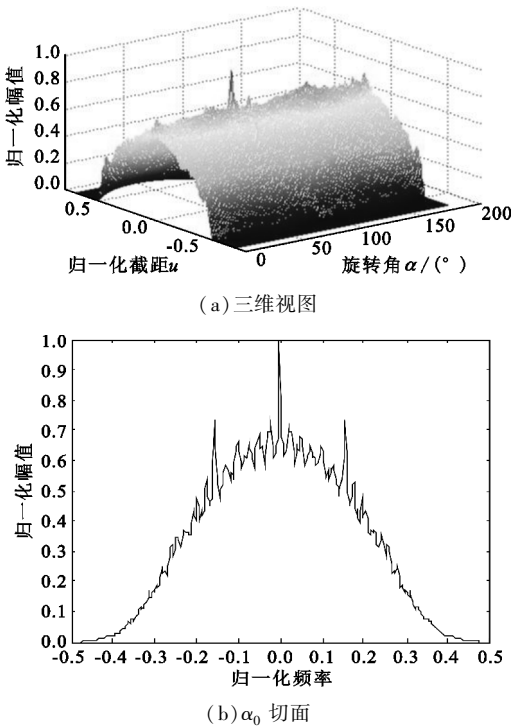


图3 含噪声 Frank 码 RAT
Fig. 3 The RAT of noised Frank code

由图 3 可知信号的副脊线峰值小于噪声基底值,实际中是无法准确检测的,因此会错误估计脊线间隔,进而得出错误的码元宽度和编码长度估计值。并且随着信噪比的进一步降低,主脊线峰值同样会受到噪声基底的影响。

造成噪声基底原因有两个,一是由于信号的 AF 平面为矩形,使得 Radon 变换中不同直线的积分长度不同;二是由于有限长的噪声信号,使得噪声幅值在 AF 平面分布不均匀。现分别阐述噪声基底产生的原因。

信号的 AF 平面是一个矩形平面,这使得 Radon 变换中每次直线积分的长度不同。如图 4 (a) 所示,直线 l_1 、 l_2 都经过坐标原点,但 Radon 变换中沿直线 l_1 的积分累计大于沿直线 l_2 的积分累计,即截距相同而不同角度的 Radon 变换,参与积分数据点数不同;直线 l_2 、 l_3 的角度相同,但 Radon 变换中沿直线 l_2 的积分累计大于沿直线 l_3 的积分累计,也就是说角度相同而截距不同的 Radon 变换,参与积分的数据也是不同的。因此,即使平面是幅值均为 1 的单位平面,随着角度与截距的变化, Radon 变换的结果也不是固定的,这是产生“钟形”基底的一个原因。

理论上噪声在 AF 平面上是均匀分布的,不会对 Radon 变换的峰值产生影响,但理论分析的前提是噪声为无限长,而实际信号中的噪声都是有限长的,因此在 AF 平面上并不是均匀分布的。信号的 AF 是对信号瞬时自相关的傅里叶变换,当信号为有限长时,随着延时 τ 的不断增大,参与瞬时自相关运算的信号长度将不断减少,傅里叶变换后的 AF 幅值也会减小,这正是 LFM 信号的 AF 分布脊线呈现斜刀刃状的原因。而当信号为噪声时,AF 平面呈现出中间幅值最大,向四周扩散减小的趋势,如图 4 (b) 所示。这是“钟形”基底产生的另一个原因。

要想准确检测出信号 RAT 的峰值,就要去除噪声基底的影响。若已知噪声的能量,就能够根据 RAT 的表达式计算出噪声基底包络,然后用截获信号的 RAT 减去噪声基底包络即可去除噪声基底的影响,但实际截获信号的信噪比未知,因此无法给出 RAT 的噪声基底包络。针对此问题,本文提出一种平滑 RAT 方法,用以抑制噪声基底的影响,提高多相码信号参数估计的抗噪性。

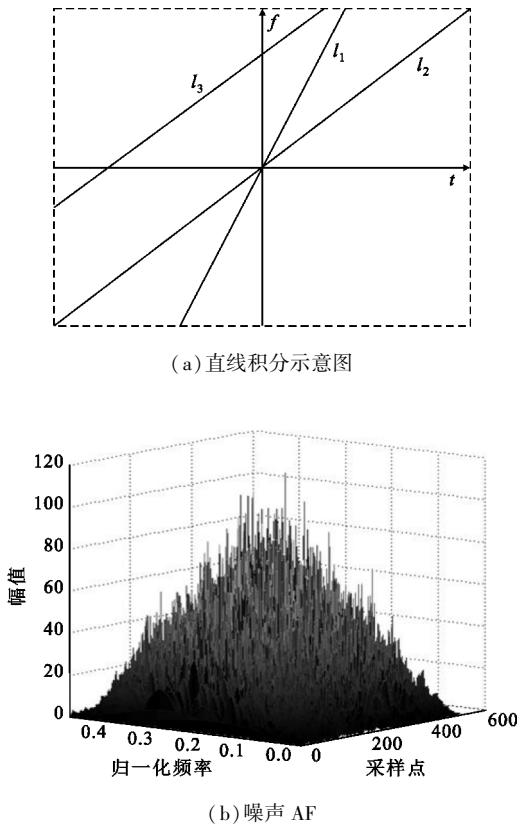


图 4 噪声基底原因
Fig.4 The reason of noise basement

4 平滑 RAT 的参数估计

由于实际信号的信噪比往往是未知的,因此无法准确给出噪声基底的包络。为抑制噪声基底对多相码信号参数估计的影响,提出对信号 RAT 进行二次平滑,用以估计信号的噪声基底包络,然后将估计出的噪声基底从信号 RAT 中去除。

通过产生噪声基底原因的分析可知,任意旋转角度的噪声基底随截距的变化呈现出相同的变化规律,因此可以用 $\alpha \neq \alpha_0$ 的任意角度的 RAT 近似噪声基底,如图 3(a) 所示。由于实际最佳旋转角 α_0 未知,以及采用单一角度近似噪声基底误差较大,因此可以通过计算 RAT 沿旋转角度方向的均值,得出噪声基底的估计值。由图 3(a) 可知,信号峰值和噪声突变点会影响均值的计算,因此在计算均值之前需要对信号 RAT 结果进行截距方向的平滑,减少信号峰值和噪声突变点对均值的影响。

$$\Re(\zeta, \alpha) = \frac{1}{L+1} \sum_{k=-L/2}^{L/2} \Re(u+k, \alpha) \quad (11)$$

式中, L 为平滑长度。

对截距平滑后的 RAT 计算沿旋转角度方向的

均值:

$$\hat{\Phi}(u) = \frac{1}{M} \sum_{\alpha} \Re(\zeta, \alpha) \quad (12)$$

式中, M 为角度搜索个数, $\hat{\Phi}(u)$ 为噪声基底的估计值。估计出噪声基底后,用截获信号 RAT 减去噪声基底包络的估计值得到平滑 RAT:

$$\Re_s(u, \alpha) = \Re(u, \alpha) - \hat{\Phi}(u) \big|_{\alpha} \quad (13)$$

其中, $\cdot \big|_{\alpha}$ 表示对每一个搜索角度的运算。图 5 为图 3 所示 RAT 的噪声基底估计结果,图 6 为去除噪声基底后旋转角度 α_0 的 Radon 变换结果。仿真结果表明,去除噪声基底后的 RAT 有效抑制了噪声对脊线峰值的影响,经过平滑后的信号主副脊线相比传统 RAT 均得到了增强,提高了参数估计的抗噪性。

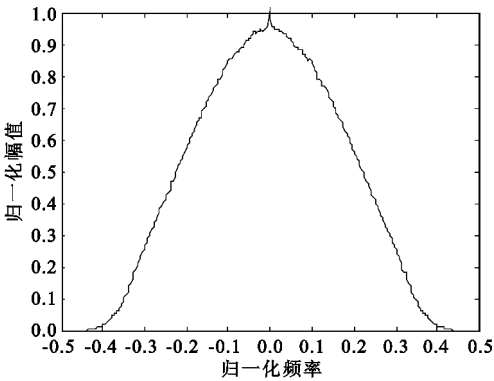


图 5 噪声基底估计值
Fig.5 The estimated value of noise basement

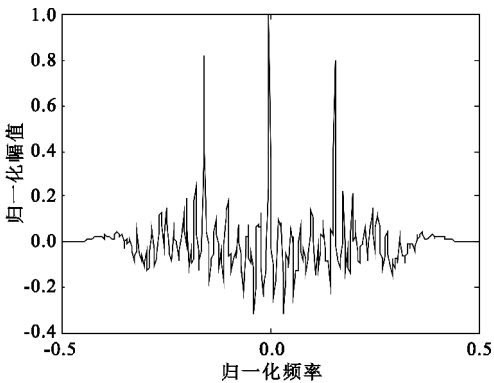
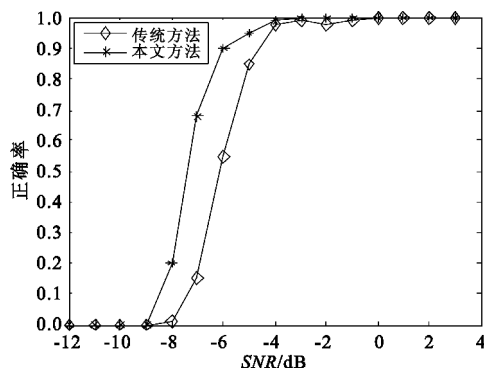


图 6 平滑 RAT 的 α_0 切面
Fig.6 The α_0 section of smoothed RAT

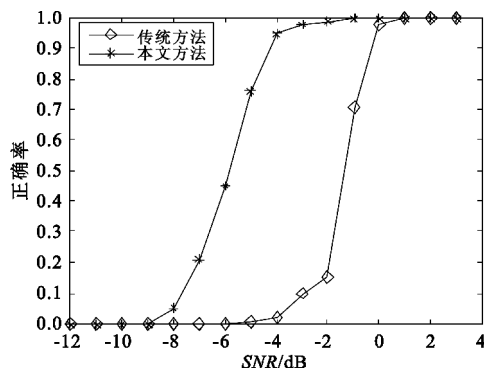
5 仿真实验

对本文算法进行计算机仿真验证,并与文献 [8] 的传统 RAT 方法进行比较。仿真参数设置如下:编码类型为 Frank 码,信号载频 $f_c = 10$ MHz,采

样频率 $f_s = 40$ MHz, 码元宽度 $t_b = 0.1 \mu\text{s}$, 编码长度 $N_c = 64$, 平滑长度 $L = 10$ 。信噪比从 -12 dB 到 3 dB, 步进设置为 1 dB, 每一个信噪比下进行 500 次蒙特卡洛仿真实验。分别采用传统 RAT 和平滑 RAT 估计多相码信号参数, 仿真结果如图 7 所示。



(a) 调频率估计正确率



(b) 码元宽度估计正确率

图 7 参数估计正确率

Fig. 7 The parameter estimation accuracy

由于参数估计性能主要受到噪声基底的影响, 当峰值位置正确时, 则参数估计正确; 若峰值位置错误, 则参数估计偏差会很大, 因此仿真实验中采用参数估计的正确率恒量参数估计性能, 当参数估计的相对误差在 0.2% 内, 则认为参数估计准确。由图 7 可以看出, 本文提出的平滑 RAT 相比传统 RAT 对噪声有更强的适应性, 传统方法调频率估计的信噪比门限约为 -7 dB, 经过平滑后调频率估计信噪比门限约为 -8 dB, 相比传统方法降低了 1 dB, 而码元宽度估计的信噪比门限相比传统方法降低了 4 dB。这是由于估计调频率的多相码信号主脊线位于截距为 0 处, 受噪声影响较小; 而估计码元宽度的副脊线位于“钟形”噪声基底的半坡处, 受噪声影响非常严重, 因此平滑效果十分明显。仿真结果表明了本文提出的平滑 RAT 具有更强的抗噪性, 相比传统方法

能够在更低的信噪比下准确估计多相码信号的调制参数。

此外, 本文还对采样精度对参数估计的影响进行了仿真测试, 结果表明传统 RAT 与平滑 RAT 的参数估计精度均会随采样精度的增加而提高, 但当采样精度相同时, 平滑 RAT 参数估计的信噪比门限始终低于传统平滑 RAT。

6 结束语

多相码信号是 LPI 雷达中常用的信号形式, 截获接收机必须准确估计多相码信号的调制参数才能正确识别辐射源和产生相干干扰波形。本文研究了 RAT 方法估计多相码信号调制参数问题, 在分析了 RAT 噪声基底产生原因的基础上, 提出了平滑 RAT 方法, 并以 Frank 码为例进行了仿真实验。仿真结果表明, 改进方法相比传统 RAT 具有更低的信噪比门限, 本文方法为实际截获信号的参数估计提供一种新的思路。

参考文献:

- [1] Pace P E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar [M]. Norwood, MA: Artech House, 2004: 113-166.
- [2] 李军, 刘娜, 刘红明, 等. 一种基于 Walsh 矩阵的正交多相码设计方法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(3): 577-583.
- LI Jun, LIU Na, LIU Hong-ming, et al. Method of Orthogonal Polyphase Code Sequence Design Based on Walsh Matrix [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2013, 28(3): 577-583. (in Chinese)
- [3] 杜清, 王建. P3/P4 多相码雷达信号检测与参数估计研究[J]. 科学技术与工程, 2013(19): 5673-5678.
- DU Qing, WANG Jian. Research of Detection and Parameter Estimation for P3/P4 Polyphase Codes Signal [J]. Science Technology and Engineering, 2013(19): 5673-5678. (in Chinese)
- [4] 徐会法, 胡晓峰, 张明智. 基于 FRFT 的几种典型相位编码信号检测与参数估计[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1048-1054.
- XU Hui-fa, HU Xiao-feng, ZHANG Ming-zhi. Detection and Parameter Estimation of Polyphase Code Signals Based on Fractional Fourier Transform [J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1048-1054. (in Chinese)
- [5] Akay O, Erozdin E. Use of Fractional Autocorrelation in Efficient Detection of Pulse Compression Radar Signals [C]//Proceedings of 2004 International Symposium on Control Communications and Signal Processing. Hammamet, Tunisia: IEEE, 2004: 33-36.

- [6] 王泽众,曹万平,刘锋,等. 基于周期 Wigner—Hough 变换的多相编码连续波雷达信号检测算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(6): 605–612.
WANG Ze-zhong, CAO Wan-ping, LIU Feng, et al. Code Continuous Wave Radar Signal Detection Algorithm Based on Periodic Wigner-Hough Transform[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute, 2012, 27(6): 605–612. (in Chinese)
- [7] Gulum T O, Pace P E, Cristi R. Extraction of Polyphase Radar Modulation Parameters Using a Wigner-Ville Distribution-Radon Transform[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas, US; IEEE, 2008: 1505–1508.
- [8] 李宏, 陈绍荣, 秦玉亮, 等. 一种多相编码脉压信号的检测与参数估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 310–314.
LI Hong, CHEN Shao-rong, QIN Yu-liang. Detection and Parameter Estimation Method for Polyphase-coded Pulse Compression Waveforms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 310–314. (in Chinese)
- [9] Jennison B K. Detection of Polyphase Pulse Compression Waveforms Using the Radon-Ambiguity Transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 335–343.
- [10] 徐海源, 黄知涛, 周一宇. 基于 Radon 变换的具有线性调频特性的多相码信号参数估计[J]. 信号处理, 2008, 24(2): 172–176.

XU Hai-yuan, HUANG Zhi-tao, ZHOU Yi-yu. Parameter Estimation Methods for Polyphase Codes Derived from LFM Waveforms Using the Radon Transform[J]. Signal Processing, 2008, 24(2): 172–176. (in Chinese)

作者简介:



王晓峰(1987—),男,河北承德人,2011年获硕士学位,现为博士研究生,主要研究方向为信号与信息处理;

WANG Xiao-feng was born in Chengde, Hebei Province, in 1987. He received the M. S. degree in 2011. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns signal

and information processing.

Email: wxf870516@126.com

张国毅(1965—),男,吉林长春人,2002年获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为信号与信息处理、电子对抗;

ZHANG Guo-yi was born in Changchun, Jilin Province, in 1987. He received the Ph. D. degree in 2002. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns signal and information processing, electronic warfare.

张旭洲(1982—),男,陕西户县人,2013年获硕士学位,现为讲师,主要研究方向为电子对抗。

ZHANG Xu-zhou was born in Huxian, Shaanxi Province, in 1982. He received the M. S. degree in 2013. He is now a lecturer. His research concerns electronic warfare.