

文章编号: 1001 - 893X(2012)09 - 1486 - 06

# 基于 FrFT 的线性调频-伪码调相复合调制雷达信号 截获与特征提取\*

向崇文<sup>1,2</sup>, 黄 宇<sup>1</sup>, 王泽众<sup>1</sup>, 刘 锋<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001; 2. 解放军 91960 部队, 广东 汕头 515074)

**摘 要:** 针对线性调频-伪码调相复合调制雷达信号(LFM-PRBC)的截获与特征提取问题, 提出了一种基于分数阶傅里叶变换(FrFT)平面切割与相关检测相结合的新方法。理论分析和计算机仿真验证表明, 该方法具有较好的有效性和准确性, 能快速完成高斯白噪声背景下低信噪比复合调制雷达信号的截获与特征提取, 有一定的实际应用价值。

**关键词:** 低截获概率雷达; 线性调频; 伪码调相; 复合调制; 分数阶傅里叶变换; 特征提取

**中图分类号:** TN974 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.014

## Interception and Feature Extraction of LFM-PRBC Combined Modulation Radar Signal Based on FrFT

XIANG Chong-wen<sup>1,2</sup>, HUANG Yu<sup>1</sup>, WANG Ze-zhong<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 2. Unit 91960 of PLA, Shantou 515074, China)

**Abstract:** For the problem that interception and feature extraction of linear frequency modulation-pseudo random binary codes(LFM-PRBC) phase modulation combined radar signal, a novel method composed of cutting plane and correlation detection based on the Fractional Fourier Transform (FrFT) is presented. Through theoretical analysis and computer simulation, its validity and accuracy are suitable to achieve feature extraction of combined modulation radar signal quickly with a low signal to noise ratio(SNR) in Gaussian white noise background. This method has application value.

**Key words:** LPI radar; linear frequency modulation; pseudo random binary codes phase modulation; combined modulation; Fractional Fourier transform; feature extraction

### 1 引 言

现代战场电磁环境日益复杂, 电子战双方斗争更加激烈。低截获概率雷达(Low Probability of Intercept, LPI)采用经过精心波形设计的雷达信号, 在有效探测和跟踪目标的同时, 降低甚至避免被非合作截获接收机发现的概率。在众多的 LPI 雷达信号中, 线性调频信号(LFM)和二相编码信号(BC)由于

实现简单而得到了广泛应用。脉内线性调频-脉间伪随机二相编码复合调制雷达信号(LFM-PRBC)弥补了单一信号的不足而融合了两者的优点<sup>[1-6]</sup>。LFM-PRBC 复合调制雷达信号是一种大时宽带宽信号, 具有比单一的伪码调相信号、线性调频信号更优秀的脉冲压缩性能<sup>[1]</sup>。模糊函数在零点附近呈图钉型, 具有更好的距离和速度分辨率<sup>[2]</sup>, 与单一的调制信号相比, 其低截获概率性能更优良<sup>[5-6]</sup>。根据

\* 收稿日期: 2012-02-20; 修回日期: 2012-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60902054)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 60902054)

伪随机码的不同,线性调频信号可以与巴克码、m 序列、Gold 序列等伪码进行复合调制。

因此,这类新型信号对传统雷达侦察接收机构成了威胁和挑战,研究在非合作条件下的信号截获与特征提取意义重大。文献[7]提出了基于平滑伪维格纳分布(SPWVD)阈值分割和互相关检测相结合的方法,尽管可以在一定程度上消除交叉项影响,但是,降低了时频聚集性,而且运算复杂度大。该方法在信噪比大于 -5 dB 的情况下,能够很好地检测出复合信号的各项参数。随着信噪比减小到 -5 dB 后,该方法已经无法检测子脉冲宽度、线性调频初始频率及带宽、复合信号编码方式,只能检测出复合信号的编码个数和子脉冲间隔。分数阶傅里叶变换(FrFT)是线性变换,有效地抑制了维格纳分布(WVD)等二次变换交叉项的影响。FrFT 可以理解为信号在时频平面绕原点的旋转,对线性调频信号(LFM)具有最好的时频聚集性,目前已有多种快速算法,可用来处理该类信号。本文首先利用基于 FrFT 的平面切割方法,提取脉内线性调频参数载频  $f_c$  和带宽  $B$ 、二相编码子脉冲宽度  $T$  和码长  $P$  等参数,然后利用相关检测提取信号的伪码相位信息,实现 LFM-PRBC 复合调制信号的截获与特征提取。

## 2 分数阶傅里叶变换定义

分数傅里叶变换算子  $F^a$  通过实变量  $a$  将函数  $x$  变换为  $X_a = F^a(x)$ ,定义可以表述为整体积分变换:

$$X_a(u) = \{F^a[x(t)]\} = \int_{-\infty}^{+\infty} K_a(u, t)x(t)dt \quad (1)$$

式中,  $a$  为 FrFT 的阶数,  $u$  为分数阶域(FrFD),旋转角  $\alpha = a \cdot \frac{\pi}{2}$ ,则 FrFT 变换核  $K_a(u, t)$  为

$$K_a(u, t) = \begin{cases} A_a \exp[j\pi(t^2 \cot\alpha - 2tucsc\alpha + u^2 \cot\alpha)], & \alpha \neq n\pi \\ \delta(u - t), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(u + t), & \alpha = (2n \pm 1)\pi \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$A_a = \sqrt{(1 - j\cot\alpha)} = \frac{\exp\{-j[\pi \operatorname{sgn}(\sin\alpha)/4 - \alpha/2]\}}{\sqrt{|\sin\alpha|}} \quad (3)$$

$X_a(u)$  的逆变换为

$$x(t) = F^{-a}[X_a(u)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X_a(u)K_{-a}(u, t)du \quad (4)$$

由上式可知,信号  $x(t)$  可以分解为一组系数为  $X_a(u)$  的正交 Chirp 基  $K_{-a}(u, t)$  的线性组合。随着变换阶数  $a$  从 0 连续增长到 1,展示出了信号从时域逐步变化到频域的所有特征。

## 3 分数阶傅里叶变换数值计算

由于离散分数阶傅里叶变换(DFrFT)的计算比 DFT 的计算要复杂的多,尽管国内外学者提出了很多种 FrFT 的快速数值计算方法,但兼顾 FrFT 的各种性质和实际计算复杂度,目前还没有一种 FrFT 的快速计算方法满足以上所有要求。1996 年,由 Ozaktas 等学者提出了一种计算量与 FFT 相当快速近似分数阶傅里叶变换算法,本质是实现信号的离散取样值与连续 FrFT 的离散取样值之间的映射,计算复杂度仅为  $O(N \ln N)$ <sup>[8]</sup>。这种离散采样型算法引起了国内外学者的广泛关注,使 FrFT 从理论逐步走向工程实践,从而在信号处理领域得到广泛应用。文献[9]对算法进行了改进,消除了采样点数奇偶限制条件,实现任意阶数  $a$  的变换。文献[10]在此基础上,提出了一种二相型算法,精度高、计算速度更快,本文采用这种算法。

离散采样型算法计算前要求对信号时域和频域进行量纲归一化<sup>[8]</sup>。在实际应用中,所获得的是一组原始连续信号经采样后得到的离散观测数据,其中观测时间  $t_0$  和采样频率  $f_s$  为已知。因此,本文采用文献[11]中的离散尺度化法进行量纲归一化处理。

## 4 LFM-PRBC 信号模型

LFM-PRBC 复合调制雷达信号可以表示为 LFM 信号与 PRBC 信号的卷积形式:

$$s(t) = u_L(t) \otimes u_B(t) \quad (5)$$

$$u_L(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c t + j\pi k t^2) \quad (6)$$

其中,  $\operatorname{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1, 0 \leq t \leq T \\ 0, t > T \end{cases}$ ;

$$u_B(t) = \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{m=0}^{P-1} c_m \delta(t - mT) \quad (7)$$

式中,  $0 \leq t \leq PT$ 。

本文中,二相编码信号取 13 位巴克码,  $P = 13$ ,  $\{c_m\} = [1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1]$ 。在高斯白噪声背景下,雷达侦察接收机截获的信号模型可以表示为

$$x(t) = s(t) + w(t), 0 \leq t \leq PT \quad (8)$$

式中,  $w(t)$  是均值为 0、方差为  $\sigma_w^2$  的复高斯白噪声, 信号的输入信噪比为  $SNR_{in} = A^2/\sigma_w^2$ ,  $A$  为信号  $s(t)$  的幅度。

## 5 LFM-PRBC 信号 FrFT 分析

假设信号的时宽  $\Delta t = t_0$ , 时域区间为  $[-t_0/2, t_0/2]$ , 信号的带宽  $\Delta f = f_s$ , 频域区间为  $[-f_s/2, f_s/2]$ , 量纲归一化因子  $S = (t_0/f_s)^{1/2}$ 。经过量纲归一化后, 时间频率平面  $(t, f)$  转化为量纲为 1 的新坐标系  $(x, v)$ , 宽度为  $[-\sqrt{f_s \cdot t_0}, 2\sqrt{f_s \cdot t_0}/2]$ , 信号的调频斜率  $k' = \tan\beta, 0 \leq \beta \leq \pi/2$ , 信号的 FrFT 最佳旋转角  $\beta = \alpha + \pi/2 = a \cdot \pi/2$ 。复合信号在归一化后的时频平面分布如图 1 所示。

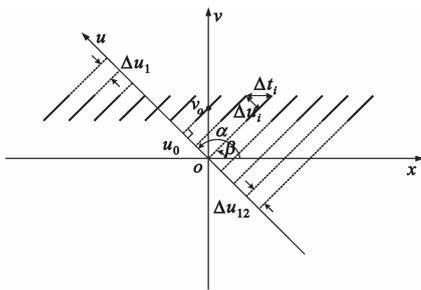


图 1 归一化时频平面 LFM-PRBC 的分布图

Fig.1 LFM-PRBC in the normalized time frequency plane

经转化归一化前后的参数得到

$$k = \frac{f}{t} = \frac{v/S}{x \cdot S} = k'/S^2 = -\cot(a \cdot \pi/2)/S^2 \quad (9)$$

$$f_0 = v_0/S = u_0 \cdot \csc(a \cdot \pi/2)/S \quad (10)$$

$$\Delta T_i = \Delta t_i \cdot S = \Delta u_i \cdot \sec(a \cdot \pi/2) \cdot S \quad (11)$$

## 6 LFM-PRBC 信号特征提取

### 6.1 平面切割

LFM 信号在特定阶数的投影(即  $|X_a(u_{\max})|^2$ ) 达到最大值, 而高斯白噪声在整个平面上基本呈平坦分布, 其检测与参数估计过程就是在  $(\alpha, u)$  平面进行峰值搜索<sup>[12]</sup>。由文献[13]可知: 各段 LFM 信号的尖峰高度值  $|S_a[u_{\max}(i)]|^2$  是等幅的, 附加高斯白噪声后, 信号  $x(t)$  的峰值  $|X_a[u_{\max}(i)]|^2$  在点  $(a, u_{\max}(i))$  处发生随机起伏, 并具有一定的起伏方差。信号  $|X_a[u_{\max}(i)]|^2$  的方差与 LFM 信号的尖峰高度值  $|S_a[u_{\max}(i)]|^2$  比值为

$$\begin{aligned} \frac{\text{var}[|X_a[u_{\max}(i)]|^2]}{|S_a[u_{\max}(i)]|^2} &= 2 \frac{|A_\alpha|^2}{(2\Delta x)^2} A^2 / (SNR_{in})^2 + \\ &2 \frac{|A_\alpha|^2}{(2\Delta x)^2} (2N+1) A^2 / (SNR_{in}) \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)看出, 信号尖峰的相对起伏幅度由最大频率值  $\Delta x$ 、采样点数  $N$ 、输入信噪比  $SNR_{in}$  和旋转角  $\alpha$  确定。信号尖峰的相对起伏幅度与信噪比的关系如下: 当信噪比  $SNR_{in}$  降低时, 尖峰的相对起伏幅度增大。由于复合调制信号在频域附近完全重叠, 导致在进行二维搜索时, 频域附近出现伪峰值超过实际信号在最佳旋转角的信号投影的峰值, 直接影响了信号的检测与参数估计。在设计雷达截获接收机时, 根据截获接收机担负的任务, 设置变换阶数搜索范围  $a \in [a_{\min}, 2]$ , 避免频域附近(即  $a=1$ ) 伪峰值的影响, 步进值  $p$ 。

(1) 通过二相算法快速计算信号 FrFT  $X_a(u)$  后取模平方  $|X_a(u)|^2$ , 然后进行二维峰值搜索。

(2) 以  $c^2$  倍  $\max(|X_a(u)|^2)$  为界限进行平面切割, 得到新的二维平面  $(a, u)$ , 由式(12)可知, 适当选择  $c$  才能得到峰值点, 否则, 容易得到噪声起伏点, 形成误判。

(3) 在新平面  $(a, u)$  内, 对任意变换阶  $a$  上的  $|X_a(u)|^2$  进行叠加, 即对旋转角  $\alpha$  平面内的信号投影的能量叠加, 得到最大值对应的 FrFT 阶数  $\hat{a} = \arg \max_a \sum_u |X_a(u)|^2$ , 信号峰值的投影点依次为  $\hat{u}_{\max}(i), i=1, 2, \dots, h$ , 得到码长估计  $\hat{P} = h, \Delta u_i = \hat{u}_{\max}(i+1) - \hat{u}_{\max}(i)$ ;

(4) 由式(9)和式(10)得到调频率和中心频率分别为

$$\hat{k} = -\cot(\hat{a} \cdot \pi/2)/S^2 \quad (13)$$

$$\hat{f}_0 = \hat{u}_0 \cdot \csc(\hat{a} \cdot \pi/2)/S \quad (14)$$

(5) 由式(11)得到复合信号的巴克码元宽度

$$\hat{T} = \frac{1}{h-1} \sum_{i=1}^{h-1} \Delta T_i = \frac{1}{h-1} \sec(a \cdot \pi/2) \cdot S \cdot \sum_{i=1}^{h-1} \Delta u_i \quad (15)$$

则信号的载频  $\hat{f}_c = \hat{f}_0 - \hat{k} \cdot \hat{T}/2$ , 带宽  $\hat{B} = \hat{T} \cdot \hat{k}$ 。

### 6.2 相关检测

相关函数是研究平稳随机信号的一个基本概念。互相关函数可以理解为两个信号的乘积的时间平均, 是研究平稳随机过程非常重要的统计量, 它可以用来了解两个未知信号之间的相似程度或两个已

知信号时间的关系;由于具有很强的抗噪声能力,该方法经常用于微弱信号中提取有用信号<sup>[7]</sup>。

对于信号  $x(t)$  和  $y(t)$ ,互相关函数

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t - \tau)dt \quad (16)$$

当  $x(t) = y(t)$ ,自相关函数

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t - \tau)dt \quad (17)$$

且有:

$$R_x(\tau)_{\max} = R_x(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)^2 dt \quad (18)$$

可以将复合信号看做 13 段重复周期为  $T$  的 LFM 信号,将第 1 段分别与 13 段进行相关处理,则相位为 0 的相关函数  $R_{xy}(\tau) > 0$ ,其码元为 1,相位为  $\pi$  的相关函数  $R_{xy}(\tau) < 0$ ,其码元为 -1。

### 6.3 仿真分析

信号参数设置为:LFM-PRBC 信号载频  $f_c = 5$  MHz,巴克码元宽度  $T = 10 \mu s$ ,脉内线性调频带宽  $B = 5$  MHz,采样频率  $f_s = 40$  MHz,巴克码位数  $P = 13$ 。经大量仿真分析,选择  $c = 0.618$  黄金分割点,取  $p = 0.01, a_{\min} = 1.15$ 。此处定义信号正确检测的准则为:信号载频估计值的绝对误差不超过 10% 且巴克码相位信息准确获得,即:

$$\begin{cases} |\hat{f}_c - f_c| \leq 0.1f_c \\ \{\hat{c}_m\} = \{c_m\} \end{cases} \quad (19)$$

当信号检测结果满足上式,即认定为一次正确检测。图 2~4 给出了截获接收机进行特征提取的仿真示意图。为了验证本文方法的有效性,采用蒙特卡洛方法,信噪比  $SNR_{in}$  从 -10 dB 开始以 1 dB 为步长递增到 0 dB,各进行 1 000 次计算机模拟仿真。本文方法运算速度较快,在目前主流的普通 PC 机上运行时间仅约 1.850 0 s。

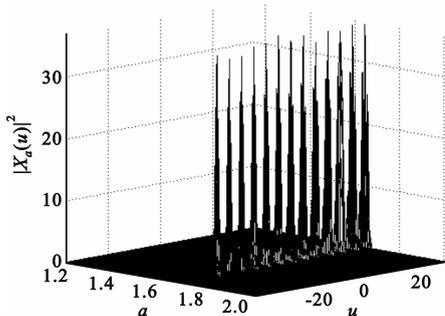


图 2 信号 FrFT 模平方平面切割处理后  $|X_a(u)|^2$  三维图  
Fig.2 3-D image of  $|X_a(u)|^2$  after cutting squared modulus of FrFT

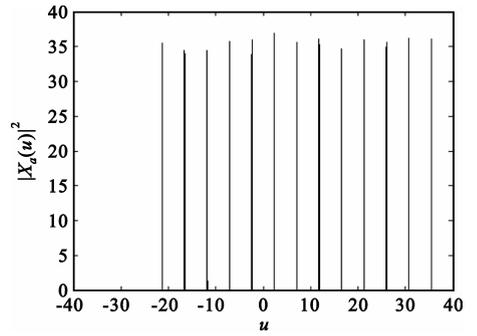


图 3  $\hat{a}$  阶的分数阶域  $u$  谱图  
Fig.3 Spectrogram in  $\hat{a}$  order FrFD

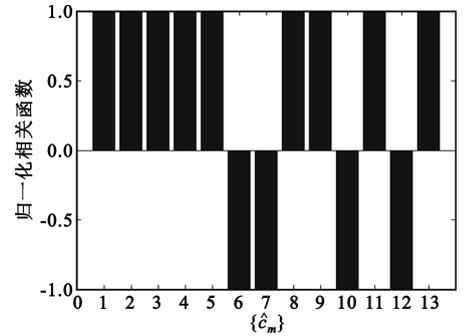


图 4 相关检测相位信息  
Fig.4 Phase correlation detection

最佳变换阶数  $\hat{a} = 1.650 0$ ,载频  $\hat{f}_c = 4.991 8$  和带宽  $\hat{B} = 5.021 2$ ,二相编码子脉冲宽度  $\hat{T} = 9.998 4$ ,码长  $\hat{P} = 13, \{\hat{c}_m\} = [1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1]$ 。

图 5 给出了信号正确检测的概率。

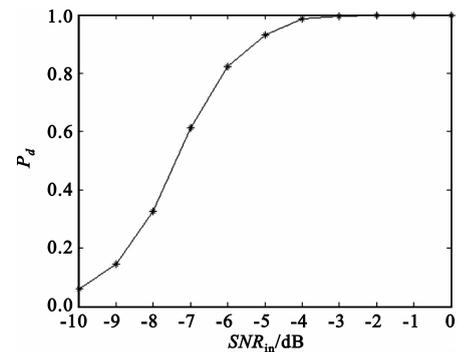


图 5 信号正确检测概率曲线  
Fig.5 The correct detection probability

从图 5 可以看出,信号的正确检测概率曲线在信噪比  $SNR_{in}$  从 -10 dB 到 -5 dB 缓慢上升,-5 dB 时达到  $P_d = 0.931$ ,随着信噪比  $SNR_{in}$  提高,正确检测概率  $P_d$  接近于 1。

为了验证本文方法的准确性,采用蒙特卡洛方

法,信噪比  $SNR_{in}$  从  $-7$  dB 开始以  $1$  dB 为步长递增到  $0$  dB,进行信号的特征提取。仿真结果如表 1 所示。

通过表 1 可以看到,本文中的方法可以准确地进行特征提取,参数估计精度高。

表 1 各信噪比下 LFM-PRBC 信号参数估计结果  
Table1 Results of LFM-PRBC signal parameter estimation

信噪比 $SNR_{in}/dB$	最佳变换 阶数 $\hat{a}$	$\hat{a}$ 绝对 误差	载频 $\hat{f}$	$\hat{f}$ 绝对 误差	带宽 $\hat{B}$	$\hat{B}$ 绝对 误差	子脉冲 宽度 $\hat{T}$	$\hat{T}$ 绝对 误差	巴克码相位 (+ 为正确, - 为错误)
0	1.650 0	0.001 2	5.006 5	0.006 5	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-1	1.650 0	0.001 2	5.006 5	0.006 5	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-2	1.650 0	0.001 2	5.006 5	0.006 5	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-3	1.650 0	0.001 2	5.006 5	0.006 5	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-4	1.650 0	0.001 2	5.006 5	0.006 5	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-5	1.650 0	0.001 2	5.006 5	0.006 5	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-6	1.650 0	0.001 2	4.997 0	0.003 0	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+
-7	1.650 0	0.001 2	4.991 8	0.008 2	5.021 2	0.021 2	9.998 4	0.001 6	+

## 7 结束语

复合调制雷达信号对传统雷达侦察接收机构成了威胁和挑战,研究非合作接收条件下的信号特征提取对于电子侦察具有重要意义。本文选取了一种新型的 LFM-PRBC 复合调制雷达侦察信号,主要以分数阶傅里叶变换(FrFT)为工具,提出了一种实用的平面切割方法,并对信号进行相关检测,实现信号的截获与特征提取。通过理论分析和计算机仿真验证,该方法运算速度快,有效性和准确性较好,可实现高斯白噪声背景下低信噪比信号的截获与特征提取。但是,当低信噪比  $SNR_{in}$  下降到  $-7$  dB 时,正确检测概率  $P_d$  仅  $61.3\%$ ,检测性能有待提高,这也是作者下一步的研究方向和重点。

### 参考文献:

[1] 殷国平,曹旭平,崔占忠. 伪码调相与线性调频复合调制信号探测性能研究[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(2):280-282.  
YIN Guo-ping, CAO Xu-ping, CUI Zhan-zhong. Research on Detection Performance of Complex Modulation Signal Using Pseudo random Code Phase Modulation and Linear Frequency Modulation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007, 27(2):280-282. (in Chinese)

[2] 许巧明,史林,彭燕. 脉内线性调频、脉间二相码混合信号的脉冲压缩方法与性能分析[J]. 雷达与对抗,2003(3):19-22.  
XU Qiao-ming, SHI Lin, PENG Yan. Digital Processing and Analysis of the Mixed LFM-BC Signal[J]. Radar and ECM,

2003(3): 19-22. (in Chinese)

[3] 马银玲,田忠. 线性调频-巴克码雷达信号的分析与处理[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2005,23(1):9-12.  
MA Yin-ling, TIAN Zhong. Process and Analysis of Linear Frequency Modulation-Barker Codes Radar Signal[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition), 2005,23(1):9-12. (in Chinese)

[4] 章桂永,胡波. LFM-BC 脉压雷达信号处理系统的仿真[J]. 舰船电子对抗,2009,32(5):61-64.  
ZHANG Gui-yong, HU Bo. Simulation of Signal Processing System of LFM-BC Pulse Compression Radar[J]. Shipboard Electronic Countermeasure,2009,32(5):61-64. (in Chinese)

[5] 于超鹏,郝亮飞,谢金华. 线性调频和巴克码组合调制雷达信号[J]. 探测与控制学报,2009,31(5):20-24.  
YU Chao-peng, HAO Liang-fei, XIE Jin-hua. Hybrid Radar Signal Composed Modulation of Linear Frequency and Barker Phase Coded Modulation[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(5):20-24. (in Chinese)

[6] 沈伟,贾新海,赵拥军,等. 一种新的伪码-线性调频复合信号侦察性能分析[J]. 电子信息对抗技术,2012,27(1):1-6.  
SHEN Wei, JIA Xin-hai, ZHAO Yong-jun, et al. The Reconnaissance Performance Analysis of A New Radar Signal Combined PRBC and LFM[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2012, 27(1):1-6. (in Chinese)

[7] 郑重智,朱晓华. 脉间编码脉内调频复合雷达信号检测方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.  
ZHENG Zhong-zhi, ZHU Xiao-hua. Research on the detection methods of inter BC-intra FM combined radar signal[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

[8] Ozaktas H M, Arikan O, Kukay A A, et al. Digital Computa-

- tion of the Fractional Fourier Transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996,44(9):2141-2150.
- [9] Bultheel A, Sulbaran H E M. Computation of the Fractional Fourier Transform[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2004, 16(3): 182-202.
- [10] Bultheel A. A two-phase implementation of the fractional Fourier transform[R]//Report TW 588. Leuven: Department of Computer Science, K. U. Leuven, 2011.
- [11] 赵兴浩, 邓兵, 陶然. 分数阶傅里叶变换数值计算中的量纲归一化[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(4): 360-364.  
ZHAO Xing-hao, DENG Bing, TAO Ran. Dimensional Normalization in the Digital Computation of the Fractional Fourier Transform[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(4): 360-364. (in Chinese)
- [12] QI Lin, TAO Ran, ZHOU Si-yong, et al. Detection and parameter estimation of multi-component LFM signal based on the fractional Fourier transform[J]. Science in China(Ser. F) Information Sciences, 2004, 47(2): 184-198.
- [13] 刘锋, 徐会法, 陶然. 基于 FRFT 的对称三角 LFM CW 信号检测与参数估计[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1864-1870.  
LIU Feng, XU Hui-fa, TAO Ran. Detection and Parameter Estimation of Symmetrical Triangular LFM CW Signal Based on Fractional Fourier Transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(8): 1864-1870. (in Chinese)

## 作者简介:

**向崇文**(1986—), 男, 湖南桑植人, 2008 年获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为雷达侦察信号处理;

XIANG Chong-wen was born in Sangzhi, Hunan Province, in 1986. He received the B. S. degree in 2008. He is now a graduate student. His research concerns radar reconnaissance signal processing.

Email: dreamxiangfly@126.com

**黄宇**(1983—), 男, 湖南永州人, 2009 年获硕士学位, 现为博士研究生, 主要研究方向为复杂调制雷达信号截获与识别;

HUANG Yu was born in Yongzhou, Hunan Province, in 1983. He received the M. S. degree in 2009. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research interests include interception and identification of complex modulation radar signal.

**王泽众**(1983—), 男, 山东济南人, 2008 年获硕士学位, 现为博士研究生, 主要研究方向为复杂调制雷达信号截获与识别;

WANG Ze-zhong was born in Jinan, Shandong Province, in 1983. He received the M. S. degree in 2008. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns interception and identification of complex modulation radar signal.

**刘锋**(1960—), 男, 陕西宝鸡人, 2010 年获博士学位, 现为教授、博士生导师, 主要研究方向为电子信息战理论及应用。

LIU Feng was born in Baoji, Shaanxi Province, in 1960. He received the Ph. D. degree in 2010. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns the theory and application of electronic information war.