

基于离散多项式相位变换和分数阶傅里叶变换的加速目标检测算法

庞存锁^{1,2}

(1.北京理工大学电子工程系,北京 100081; 2.中北大学信息工程学院,山西太原 030051)

摘要: 本文提出了一种离散多项式相位变换(DPT)和分数阶傅里叶变换(FRFT)相结合的 LFM 检测方法.首先,分析了经典 DPT 算法中调频分辨率与互相关时延、积累脉冲长度以及积累性能之间的相互关系,指出时延较小的 DPT 算法与经典 DPT 算法相比,检测性能提高约 3dB,但调频率估计误差大.其次,针对这一问题,提出在 DPT 基础上,利用 FRFT 进一步提高调频率估计精度,当输入信噪比大于 -11dB 时,在分数阶域引入一维牛顿迭代法可提高运算速度;最后,给出了算法复杂度和估计误差的理论分析并用实验结果验证了算法的有效性.

关键词: 加速目标检测; 离散多项式相位变换; 分数阶傅里叶变换; 牛顿迭代法

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 01-0184-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.030

An Accelerating Target Detection Algorithm Based on DPT and Fractional Fourier Transform

PANG Cun-suo^{1,2}

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Institute of Information Engineering, North University of China, Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: The echo of accelerating targets can be approximated as a linear frequency modulated signal which may degrade the MTD's coherent integration performance. This paper presents an LFM detection method based on both discrete polynomial phase transform (DPT) and the fractional Fourier transform (FRFT). First, the interrelation between frequency resolution, cross-correlation delay, pulse length and integration performance of the classic DPT algorithm are analyzed. The result shows that detection performance of the DPT algorithm with a small time delay can be improved 3dB than classical algorithm. This is helpful to detect accelerating target under low SNR, but causes large parameter estimation error. Second, based on DPT algorithm, the FRFT is applied to further improve the accuracy of chirp rate estimation. When the input signal-to-noise ratio (SNR) is greater than -11 dB, one-dimensional Newton's iteration method can help to improve the operation speed in the fractional domain. Finally, the algorithm complexity and the theory of estimation error are presented, and the validity of proposed algorithm is verified by simulation results which make the theory perfect.

Key words: accelerating Target Detection; DPT; FRFT; Newton's iteration method

1 引言

传统雷达通常假定目标到雷达的径向速度不变,但实际情况下,一定雷达视线夹角(LOS)下,目标速度是时变的,这个时变速度在短的积累时间内对目标多普勒频率检测影响可以忽略.然而,当积累时间变长时,如跟踪雷达中可达到秒级积累时间^[1],这时需考虑速度时变引起的加速度影响.另外,随着隐身技术和超高加速飞行器的发展,如 F22 可达 2g 的加速度,弹道导弹末端可达 5g 的加速度,高加速目标引起的回波信号可近似为

线性调频信号(LFM),因此,对于高加速目标的检测也可视为对 LFM 信号的检测和参数估计问题.针对高斯白噪声中线性调频信号的参数估计问题,文献[2]提出采用粗搜索和精搜索相结合的方式估计频率和调频率参数,但未对粗搜索的方法及低信噪比情况下参数估计进行性能分析.文献[3]运用 MLE 对 LFM 脉冲雷达的距离,速度,加速度进行了分析,并运用霍夫变换对距离和速度参数进行了估计,这类算法运算量大,且在低信噪比下估计参数误差较大.文献[4]提出了采用匹配滤波的理论对目标速度,加速度参数进行估计.文献[5,6]利

用分数阶傅里叶变换 (FRFT) 对 LFM 信号的聚焦性对线性调频信号进行参数估计. 文献[6]分析了高加速目标多普勒频率变化率对目标检测性能的影响, 指出其回波为 LFM 信号, 并利用 FRFT 对目标的加速度进行估计, 但在未知目标先验信息的情况下, 运算量大. 另外, 在时频分析方面, Wigner-Ville 分布 (WVD) 等也可用于线性调频信号分析. 但以上这些方法都存在运算量大的问题^[7-9].

为了减小运算量, 文献[10]提出了离散多项式相位变换分析法 (DPT), 该方法通过瞬时互相关的方法, 把 MLE 中对频率和调频率的二维搜索转变为两个一维搜索, 运算复杂度由 $o(N^2)$ 变为 $o(N \log_2 N)$, 但该方法时延 τ 的估计范围较小, 且低信噪比下参数估计性能下降严重. 文献[11, 12]提出利用旋转求和抽取 (RAD) 的方法提高 DPT 对 LFM 参数估计范围, 但该方法在 0dB 以上估计性能接近 CRB 方法, 在低信噪比时估计性能下降. 文献[13]基于内插方法对 DPT 算法进行了改进, 其原理是在时延 τ 左右取 8 个点进行平均然后求取调频率的估计, 该方法仍存运算量大的问题. 本文从最大似然估计思想出发, 分析了经典 DPT 算法估值性能受限的原因, 推导了 DPT 算法最大和最小频率分辨率, 指出时延越小, 输出信噪比越大. 当 $\tau = 1$ 时相比经典 DPT 算法输出信噪比理论上提高约 3dB, 但这时调频率参数模糊度较大; 为此, 文中提出一种 DPT-FRFT 相结合的调频率估计方法, 提高了调频率估计精度, 且运算复杂度为 $o(N \log_2 N)$ 低于其他方法.

2 加速运动目标回波参数估计

加速运动目标会导致回波在多普勒频率维走动, 引起 MTI 积累方法性能下降. 为此需研究相应的检测和参数估计方法. 为了简化分析, 文中主要研究窄带雷达对高加速目标的检测问题, 加速目标回波可近似为 LFM 信号, 可表示为:

$$s(n) = A \exp(j2\pi(f_0 n T + 0.5 k n^2 T^2)) + w(n) \quad (1)$$

式中 A 为脉压后信号幅值, T 为脉冲重复间隔, n 为积累脉冲数, $k = 2a/\lambda$ 为信号的调频率, a 为目标加速度, λ 为信号波长, $w(n)$ 是均值为 0, 方差为 δ^2 的复高斯白噪声, 其输入信噪比 $SNR_{in} = A^2/\delta^2$.

DPT 算法是检测该类信号的经典检测方法^[11], 它通过瞬时互相关的方法获取调频率的估计, 其互相关的输出为:

$$z(t, t + \tau) = \sum_{n=1}^{N-\tau} s_{n+\tau} s_n^* \exp(-j2\pi f n T) \quad (2)$$

由式(2)可得调频率估计参数 \hat{k} , 即:

$$\hat{k} = f/\tau T \quad (3)$$

式(3)也可表示为:

$$\hat{k} = \frac{f}{\tau T} = \frac{m f_s^2}{(N - \tau) \tau} = \frac{m f_s^2}{-(\tau - \frac{1}{2}N)^2 + \frac{1}{4}N^2} \quad (4)$$

式中 τ 为信号时延, f_s 为采样频率, m 为 FFT 域幅值最大处对应的频率点数.

式(4)表明: 当信号采样点数和采用频率 f_s 一定时, \hat{k} 的分辨率大小与时延 τ 有关, 这里定义 \hat{k} 的最大最小分辨率分别为:

$$\Delta \hat{k}_{\max} = \frac{4f_s^2}{N^2}, \tau = \frac{N}{2} \quad (5)$$

$$\Delta \hat{k}_{\min} = \frac{f_s^2}{N - \tau}, \tau \approx 1 \quad (6)$$

以上结果与文献[10]得出的时延 $\tau = N/2$ 时的估值精度最高, $\tau = 1$ 时的估计精度最低相一致; 但 τ 越小输出信噪比越高.

由式(2)可得信号和噪声输出功率为:

$$P_{\text{out}} \Big|_{\text{signal}} = (N - \tau)^2 A^4 \quad (7)$$

$$P_{\text{out}} \Big|_{\text{noise}} = \sum_{n=1}^{N-\tau} |A^2 \delta^2 + A^2 \delta^2 + \delta^4| \\ = (N - \tau)(2A^2 \delta^2 + \delta^4) \quad (8)$$

根据式(7)、(8)得 DPT 算法的输出信噪比 SNR_{out} 为:

$$SNR_{\text{out}} = \frac{(N - \tau) SNR_{\text{in}}^2}{1 + 2 SNR_{\text{in}}} \quad (9)$$

由式(9)知 τ 越小输出信噪比越高, 有利于微弱加速目标检测, 如 τ 为 1, $N/2$ 时的输出信噪比比值为 $SNR_{\text{out}(\tau=1)}/SNR_{\text{out}(\tau=N/2)} \approx 3\text{dB}$, 但由式(6)知 τ 越小分辨率越低, 影响参数估计精度, 需研究 τ 小时提高参数估计精度的方法.

3 基于 DPT-FRFT 的调频率参数估计

针对经典 DPT 方法 τ 越小调频率估计误差越大的问题, 本节在 DPT 方法基础上, 利用 FRFT 进一步提高调频率估计精度, 同时当输入信噪比大于 -11dB 时, 在分数阶域引入一维牛顿迭代法可完成调频率参数的快速估计.

3.1 DPT-FRFT 算法

将式(3)中 DPT 方法粗估后的调频率 \hat{k} 代入式(1), 可得补偿后的信号 $s'(n)$ 为:

$$s'(n) = s(n) \exp(-j\pi k n^2 T^2) \\ = A \exp(j2\pi(f_0 n T + 1/2 k' n^2 T^2)) + w(n) \quad (10)$$

其中 $k' = k - \hat{k}$ 为补偿后剩余调频率大小, $|k'_{\max}| \leq \hat{k}/2$.

由文献[6]可得 FRFT 检测未知加速目标时, 调频率的搜索次数可表示为:

$$\text{num} = \text{floor}\left(\frac{K}{\Delta k}\right) \quad (11)$$

其中 K 为目标最大加速度引起的调频率, $\Delta k \approx \lambda/$

$(NT)^2$ 为搜索步长。

利用式(11)对 $s'(n)$ 信号进行调频率估计的搜索次数为:

$$\text{num}'_{\max} = \text{floor}\left(\frac{k'}{\Delta k}\right) \approx \frac{mN^2}{2(N-\tau)\tau} \approx \frac{mN}{2\tau}, \tau \approx 1 \quad (12)$$

设雷达波长为 0.1m, 积累脉冲数为 256, 脉冲重复时间为 800 μ s, 最大加速度为 5g, 当 $\tau = 20$ 时, 式(12)需要的搜索次数为 6, 远低于文献[6]中的搜索次数 20, 可参见表 1. 表 1 说明详见 4.2 节。

3.2 基于 FRFT 的一维牛顿迭代法调频率参数估计

据式(12)可知 DPT-FRFT 算法的搜索次数与积累脉冲数成正比, 当积累时间较长时, FRFT 仍需要较多的搜索次数, 参考文献[14,15]可将牛顿迭代法引入 FRFT

$$\begin{aligned} X(f', k') &= \left| 1 + \sum_{n=1}^N \exp[j2\pi(-nf' + (-n^2k'))] + \exp[j2\pi(nf' + (n^2k'))] \right| \\ &= \left| 1 + \sum_{n=1}^N 2\exp[j2\pi n^2 k' \cos 2\pi n f'] \right| \\ &= \sqrt{\left(1 + 2 \sum_{n=1}^N \cos 2\pi n^2 k' \cos 2\pi n f'\right)^2 + \left(2 \sum_{n=1}^N \sin 2\pi n^2 k' \cos 2\pi n f'\right)^2} \end{aligned} \quad (13)$$

据式(13)可得 $X(f', k')$ 关于 f', k' 对称, 即:

$$X(f', k') = X(-f', -k') \quad (14)$$

式(14)也可表示为与旋转角度 α 的关系, 即:

$$X_{\alpha}(u) = X_{-\alpha}(u) \quad (15)$$

由式(15)知 $|X_{\alpha}(u)|$ 关于 α 对称, 且为 α 的凸函数. 根据牛顿迭代法在解凸函数方面的优势^[15,16], 可在 FRFT 域引入牛顿迭代法完成搜索角 α 的最佳匹配, 其一维牛顿迭代过程可表示为:

$$\alpha'_{n+1} = \alpha_n - \lambda_n \frac{|X^2(\alpha_n)|}{|X'^2(\alpha_n)|} \quad (16)$$

其中, $\alpha_n = -\text{arccot}(k'_n)$, α'_{n+1} 为第 n 次迭代结果, λ_n 为第 n 次迭代搜索步长. 该方法的主要运算为一次一维的搜索和函数 $X^2(\alpha_n)$ 的一阶偏导数计算. 其偏导数的计算可通过 $X^2(\alpha_n)$ 数值差分获得, 计算复杂度为 $o(N)$, 迭代结束条件为: $|\alpha_{n+1} - \alpha_n| \leq \xi$, ξ 为 FRFT 分辨率. 该算法同文献[16]相比, 简化了迭代维数, 同时利用数值差分方法求偏导运算量较低。

4 性能分析

4.1 实验验证

为了验证算法性能, 本节给出了上述算法的执行步骤, 仿真分析结果, 实测数据分析结果。

(1) 算法步骤

算法流程如图 1 所示。

步骤:

(a) 根据文献[6]计算 DPT($\tau = N/2$)算法对 $s(n)$ 信号的最小检测信噪比, 本文算法所允许的最小检测

表 1 本文算法运算效率和参数估计性能分析

加速度	信噪比	A		B		C	
		$ \hat{a} - a $	复乘次数比值	$ \hat{a} - a $	复乘次数比值	$ \hat{a} - a $	复乘次数比值
20m/s ²	-9dB	0.16	0.01	0.13	0.22	0.04	0.14
	-10dB	-	-	0.12	0.22	0.14	0.14
	-11dB	-	-	0.13	0.22	0.18	0.14
40m/s ²	-9dB	0.11	0.01	0.08	0.11	0.08	0.07
	-10dB	-	-	0.07	0.11	0.12	0.07
	-11dB	-	-	0.08	0.11	0.21	0.07

注: “-”表示不满足检测概率 > 90% 的信噪比要求, “ \hat{a} ”表示加速度估计值, “ a ”表示加速度理论值

算法中以完成调频率的快速搜索和估计。

由文献[10]可知采用最大似然估计法可将式(1)表示为式(13)。

信噪比理论上比其低约 3dB。

(b) 为了满足最小信噪比检测要求, 需根据信号 $s(n)$ 长度 N 折中考虑延迟长度 τ ; τ 越小, 本文算法信噪比提高越接近 3dB, 但较小的 τ 会带来大的参数估计误差, 导致后续搜索算法运算量增加. 根据式(4)~式(9)对不同序列长度 N 分析表明: τ 在 $0.05N \sim 0.2N$ 之间时信噪比提高在 2dB ~ 3dB 之间, 参数估计误差比 DPT($\tau = N/2$) 算法高约 2 ~ 10 倍, 本文选择 τ 为 $0.05N$ 。

(c) FRFT 域牛顿迭代算法的初始值可从前面的算法获得, 迭代步长需根据参数估计精度和运算效率折中考虑, 步长越大收敛快, 但误差较大, 步长越小误差小, 但收敛慢. 本文仿真中迭代步长选择为 $0.1\Delta k$ 。



图 1 DPT 改进算法流程

(2) 仿真分析

仿真实验为 LFM 雷达对一加速运动目标进行探测, 雷达波长 λ 为 0.1m, 积累脉冲数 N 为 4096, 脉冲重复频率 PFR 为 8kHz, 目标最大加速度 a 为 40m/s², 输入信噪比的变化范围为 -15dB ~ 0dB, 间隔 1dB, 分别运行 1000 次 Monte Carlo 模拟比较了四种算法的检测性能及参数估计误差, 如图 2 ~ 3 所示. 由图 2 可见, 当输入信噪比大于 -11dB 时, 本文所提算法的检测概率大于 90%, 相比文献[10]中的算法性能提高 2dB 以上; 需指出高信噪比下 FRFT(牛顿迭代)算法的迭代次数大约为

6次,远低于C算法的运算速率.图3给出了四种算法仿真结果与CRB的误差关系,当信噪比大于 -10dB 时,四种算法相对于CRB的误差关系基本不再发生变化,其中DPT($\tau=200$)+FRFT算法与CRB的误差最小.另外牛顿迭代算法在信噪比低于 -10dB 时,误差大于未采用迭代的算法.

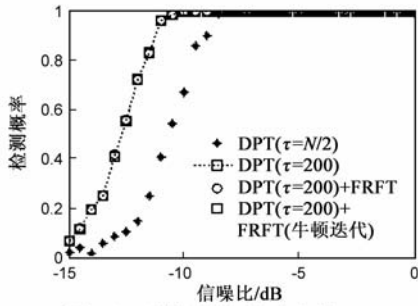


图2 四种算法检测性能比较

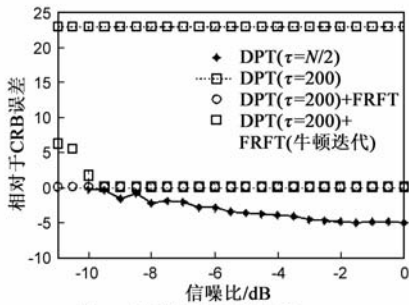


图3 四种算法误差估计

(3) 实测数据分析

利用上述方法对实测数据进行分析.图4为某雷达实测目标弹的加速度与时间关系图.雷达参数为:雷达载频约 3GHz ,采样频率 70kHz ,积累时间 600ms .下面给出了本文所讨论的算法在不同时间段[D1(0-200ms), D2(200ms-400ms), D3(400ms-600ms)]对调频率估计的比较结果.其中D为文献[6]中提到的调频率估计算法,由于其采用的是全局搜索方法,故其估计误差精度与CRB接近,其他方法测试结果可与此进行比较.从表2可以看出不同时间段中A算法对调频率的估计误差最大.这是由于图1中不同时间段的目标加速度并非稳定值(D1段变化最大),这导致所有算法的检测信噪比增

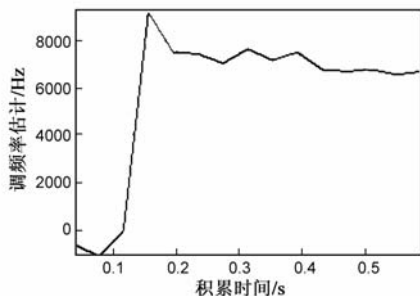


图4 实测弹调频率变化曲线

益降低,且A算法的参数估计性能最差.另外,可看出C算法在信噪比较低时参数估计性能低于B算法.D算法为全局搜索算法,故性能最优.

表2 不同算法的调频率估计对比

算法 数据	A (Hz)	B (Hz)	C (Hz)	D (Hz)
D1	8140	7841	7792/5	7850
D2	7268	7282	7280/5	7290
D3	6105	6069	6069/5	6079

注:“A”表示DPT($\tau=N/2$)算法,“B”表示DPT($\tau=200$)+FRFT算法,“C”表示DPT($\tau=200$)+FRFT(牛顿迭代)算法,“/5”表示迭代次数为5,“D”表示文献[6]FRFT算法

4.2 算法复杂度分析

为了验证算法的复杂度,给出了本文算法和文献[6]和文献[10]算法在估计LFM信号调频率时所用的复乘次数.文献[10]提到的DPT算法在 $\tau=N/2$ 时估计调频率参数所用的复乘次数约为 $N/4\log_2(N/2)$;文献[6]提到的方法需复乘次数约为 $N/2\log_2(N)(K/\Delta k)$,本文DPT-FRFT算法估计调频率时,DPT算法约需要 $(N-\tau)/2\log_2(N-\tau)$ 次复乘, τ 为较小的整数,引入FRFT后需要的复乘次数约为 $[(k-\hat{k})/\Delta k](N/2)\log_2 N$,当输入信噪比大于 -11dB 时,FRFT域引入一维牛顿迭代可将复乘次数约降为 $3N\log_2 N$.表1给出了在4.1中仿真参数设置条件下,当检测概率大于90%时,本文研究算法与文献[6]算法在不同加速度,不同信噪比下复乘次数比值,同时给出了各算法的加速度误差估计.从表1可以看出:(1)信噪比为 -9dB 时,A算法复乘次数最少,但当信噪比下降到 -11dB 时,该算法失效;(2)目标的加速度越大,B,C算法的运算效率越高于文献[6]的算法;(3)同一加速度下,当信噪比为 -11dB 时,C算法加速度估计误差大于B算法,且误差随着信噪比的降低进一步增加,但总的来说,以B算法满足检测概率得到的值作为牛顿迭代初始值并进行迭代,能够避免迭代过程中的局部收敛.

5 结论

高加速运动目标引起回波多普勒频率在脉间走动,造成MTD相参积累性能下降.本文提出一种DPT-FRFT的加速目标检测方法,分析了经典DPT算法中调频率分辨率与互相关时延,积累脉冲长度以及积累性能之间的相互关系,指出时延较小时用DPT算法能获得高的输出信噪比,有利于对微弱加速目标的检测,但存在参数估计误差大的问题.针对这一问题,提出利用FRFT对LFM信号能量聚焦的特点,在DPT算法基础上,进一步提高调频率参数估计精度,同时将牛顿迭代法引入FRFT域进行峰值检测,提高了参数估计速度.最后,利用Monte Carlo仿真实验和实测数据进行验证,

与经典 DPT 方法相比,该方法检测性能提高约 3dB;与文献[6]FRFT 方法相比,缩小了调频旋转角搜索范围;且当输入信噪比大于 -11dB 时,引入一维牛顿迭代法可进一步提高运算速度,使得算法具有工程应用价值.

参考文献

- [1] Phillip Bello. Joint estimation of delay, Doppler, and Doppler rate[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1960, 6(3): 330 - 341.
- [2] Theagenis Abatzoglou. Fast maximum likelihood joint estimation of frequency and frequency rate[J]. IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems, 1986, 22(6): 708 - 714.
- [3] Theagenis Abatzoglou. Range, radial velocity, and acceleration MLE using radar LFM pulse train[J]. IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems, 1998, 34(4): 1070 - 1084.
- [4] E J Kelly, R P Wishner. Matched-filter theory for high-velocity, accelerating targets[J]. IEEE Transactions on military electronics, 1965, 9(1): 56 - 69.
- [5] 张南,陶然,王越.基于变标处理和分数阶傅里叶变换的运动目标检测算法[J].电子学报,2010,38(3):683 - 688.
ZHANG Nan, TAO Ran, WANG Yue. A target detection algorithm based on scaling processing and fractional Fourier transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 683 - 688. (in Chinese)
- [6] Tao R, Zhang N, Wang Y. Analysing and compensating the effects of range and Doppler frequency migrations in linear frequency modulation pulse compression radar [J]. IET Radar, Sonar&Navigation, 2011, 5(1): 12 - 22.
- [7] 刘建成,王雪松,肖顺平,王国玉.基于 Wigner-Hough 变换的径向加速度估计[J].电子学报,2005,33(12):2235 - 2238.
Liu Jian cheng, Wang Xue song, Xiao Shun Ping, et al. Radial acceleration estimation based on Wigner-Hough transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2235 - 2238. (in Chinese)
- [8] S Barbarossa, V Petrone. Analysis of polynomial-phase signals by an integrated generalized ambiguity function [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 44(2): 316 - 327.
- [9] Wang M S, Chan A K, Chui C K. Linear frequency-modulated signal detection using Radon-ambiguity transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(3): 571 - 586.

- [10] S Peleg, B Friedlander. The discrete polynomial-phase transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(8): 1901 - 1914.
- [11] P M Djuric, S M Kay. Parameter estimation of chirp signals [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(17): 2118 - 2126.
- [12] 徐政五,鲁晓倩,等.基于线性迭代预测的线性调频信号估计方法[J].西南交通大学学报,2009,44(5):693 - 696.
Xu Zhengwu, Lu Xiaoqian. Linear FM signal estimation method based on linear iterative prediction [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(5): 693 - 696. (in Chinese)
- [13] 周良臣,杨建宇,唐斌.一种高效的 LFM 信号参数估计方法及性能分析[J].电子学报,2007,35(6):1128 - 1132.
Zhou Liang-Chen, Yang Jian-yu, Tang Bin. An efficient parameter estimation and performance for LFM signal [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1128 - 1132. (in Chinese)
- [14] 邓振森,刘渝.正弦波频率估计的牛顿迭代方法初始值研究[J].电子学报,2007,35(1):104 - 107.
Deng Zhenmiao, Liu Yu. The starting point problem of sinusoid frequency estimation based on Newton's method [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 104 - 107. (in Chinese)
- [15] Rife D C, Boorstyn R R. Single tone parameter estimation from discrete-time observations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, IT-20(5): 591 - 598.
- [16] 齐林,陶然,周思永,等.基于分数阶 Fourier 变换的多分量 LFM 信号的检测和参数估计[J].中国科学 E 辑,2003,33(8):754 - 759.
Qi Lin, Tao Ran, Zhou Si-yong, et al. Detection and parameter estimation of multicomponent LFM signal based on the fractional Fourier transform [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2004, 47(2): 184 - 198. (in Chinese)

作者简介



庞存锁 男,1978 年 10 月出生,山西大同人.1999 年毕业于太原华北工学院电子信息工程系,其后留校在信息通信工程学院工作,2008 年进入北京理工大学电子工程系攻读博士学位.现为博士在读,从事雷达信号处理,高速微弱目标检测等方面的研究.

E-mail: 10801153@bit.edu.cn