

基于 FRFT 与 Keystone 变换的运动目标参数估计算法

田瑞琦* 鲍庆龙 王丁禾 陈曾平
(国防科技大学自动目标识别重点实验室 长沙 410073)

摘要: 目标运动参数估计精度是衡量雷达探测系统性能的重要指标。该文为解决目标运动参数的估计问题,建立了运动目标回波模型,在利用分数阶傅里叶变换(FRFT)估计加速度的过程中采用数据融合提高估计精度,在估计出加速度的基础上通过 Keystone 变换和速度模糊通道解决距离走动(RCM)和多普勒模糊问题。仿真实验表明算法在估计精度和计算量上具有优势,并且对白噪声具有较好的鲁棒性。

关键词: 分数阶傅里叶变换(FRFT); Keystone 变换; 参数估计; 多普勒模糊

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)05-0511-07

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14058

An Algorithm for Target Parameter Estimation Based on Fractional Fourier and Keystone Transforms

Tian Rui-qi Bao Qing-long Wang Ding-he Chen Zeng-ping
(ATR Key Laboratory National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An important standard to measure the effectiveness of radar acquisition systems is the accuracy of target parameter estimation. To solve the estimation problem, the echo model of moving targets is established and the FRactional Fourier Transform (FRFT) is subsequently used to estimate the acceleration; further, data fusion is used to raise estimation accuracy. Finally, Range Cell Migration (RCM) and Doppler ambiguity are solved by using the Keystone transform and the ambiguity channels based on the estimated acceleration. The simulation results show high accuracy, complexity, and noise robustness.

Key words: FRactional Fourier Transform (FRFT); Keystone transform; Parameter estimation; Doppler ambiguity

1 引言

在雷达探测系统中,回波相位特性^[1]取决于目标相对雷达的运动关系。恒定的速度产生恒定的频移,恒定的加速度产生恒定的线性调频项。当目标相对于雷达做匀加速直线运动时目标回波为 LFM (Liner Frequency Modulation)信号,并且 LFM 信号的参数与目标运动参数密切相关,因此可将目标运动参数估计问题转化为 LFM 信号的参数估计问题。

近些年来出现了多种利用时频分析对 LFM 信号参数进行估计的算法。例如, Wigner-Vile 变换将原本的 1 维信号在 2 维时频平面上显示出来,文献[2]中指出 LFM 信号的 Wigner-Vile 分布为沿直线分布的冲激线谱,具有很好的时频凝聚性,但在处理多信号分量时,会出现分量间的交叉项问题,

虽然通过核函数能够将其抑制,但 LFM 信号的时频凝聚性大大降低,严重影响参数估计精度。文献[3,4]联合 Wigner-Vile 分布和 Hough 变换对 LFM 信号的 Wigner-Vile 时频分布平面做直线积分,该算法虽然解决了交叉项问题,但因为 Hough 变换的引入使得算法的运算速度变慢,并且在计算过程中丢掉了信号的初始相位。文献[5]利用 FRFT (FRactional Fourier Transform)来估计目标运动参数,其实质为信号的时频分布在 FRFT 域上的投影,该算法运算量远小于文献[3,4]的运算量,但 FRFT 无法估计目标初始距离,并且对于高速运动目标还存在着多普勒模糊问题。文献[6]采用 Radon 变换与 FRFT 变换相结合的方法,避免了多普勒模糊问题的出现,并且在低信噪比的条件下能够很好地实现多个运动目标的检测与参数估计,但算法在实现过程中计算量较大,难以满足工程实现的实时性的要求。

本文提出一种联合 FRFT 与 Keystone 变换的方法估计目标运动参数。首先对目标回波做 FRFT

2014-03-27 收到, 2014-07-10 改回; 2014-09-05 网络优先出版

国家自然科学基金青年科学基金项目(81401489)资助课题

*通信作者: 田瑞琦 tianruiqi050804@126.com

估计加速度,并在此过程中利用数据融合增强目标信号的能量凝聚性以提高估计精度。在加速度补偿之后的距离多普勒平面内分析了距离走动和多普勒模糊问题,通过 Keystone 变换矫正距离走动,并对设定的多个模糊通道进行搜索解除多普勒模糊,从而估计出目标初始速度和初始距离,最后通过仿真实验验证算法的有效性。

2 基本原理

2.1 回波信号建模

假设目标相对雷达做匀加速直线运动,初始位移为 R_0 ,初始速度为 v_0 ,加速度为 a ,则接收到的基带回波信号为:

$$s_r(t, t_m) = Ap(t - t_r) \exp(-j2\pi f_c t_r) \quad (1)$$

式中 t 代表快时间, $t_m = mT_r$ 代表慢时间,发射信号的表达式为 $p(t) = \text{rect}(t/T_p)$, T_r 为脉冲重复间隔,目标时延

$$t_r(t_m) = \frac{2\left(R_0 - v_0 t_m - \frac{1}{2} a t_m^2\right)}{c}$$

在快时间 t 一定的条件下,慢时间域信号表达式为:

$$s(t_m) = A \exp\left(j2\pi \frac{2v_0 t_m}{\lambda}\right) \exp\left(j2\pi \frac{a t_m^2}{\lambda}\right) \exp\left(-j2\pi \frac{2R_0}{\lambda}\right) \quad (2)$$

若雷达发射 Chirp 信号,则 $p(t) = \text{rect}(t/T_p) \cdot \exp(j\pi\mu t^2)$,式(2)变为:

$$\begin{aligned} s(t_m) = A \exp & \left[-j\pi\mu \frac{4\left(R_0 - v_0 t_m - \frac{1}{2} a t_m^2\right)t}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[j\pi\mu \frac{4\left(R_0 - v_0 t_m - \frac{1}{2} a t_m^2\right)^2}{c^2} \right] \\ & \cdot \exp \left(j2\pi \frac{2v_0 t_m}{\lambda} \right) \exp \left(j2\pi \frac{a t_m^2}{\lambda} \right) \exp \left(-j2\pi \frac{2R_0}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

又 $v_0 + at_m \ll c$,且快时间 $t \ll T_r$,在 Chirp 信号调频率设置合理的情况下,式(3)前两个指数项的频率近似为零,即 $(2\mu t(v_0 + at_m)/c) \rightarrow 0$, $-(4\mu \cdot (R_0 - v_0 t_m - 0.5at_m^2)(v_0 + at_m)/c^2) \rightarrow 0$,因此式(3)中的前两项可忽略不计,化简后表达式与式(2)相同。

可见,当雷达发射 Chirp 脉冲信号时,慢时间域目标回波为 LFM 信号,并且调频率为 $(2a)/\lambda$,

中心频率为 $(2v_0)/\lambda$ 。因此对目标运动参数的估计可以转化为对该 LFM 信号参数的估计。

2.2 分数阶傅里叶变换原理

信号 $x(t)$ 的 FRFT 的定义为:

$$F^p[x(t)] = X_\alpha(u) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) K_\alpha(t, u) dt \quad (4)$$

式中 $K_\alpha(t, u)$ 为 FRFT 的变换核, p 为 FRFT 阶次, $\alpha = (\pi/2)p$ 。 $K_\alpha(t, u)$ 表达式为:

$$K_\alpha(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1-j\cot\alpha}{2\pi}} \exp\left\{j\frac{t^2+u^2}{2}\cot\alpha - tu\csc\alpha\right\}, & \alpha \neq n\pi \\ \delta(t-u), & \alpha = 2n\pi \\ \delta(t+u), & \alpha = (2n\pm 1)\pi \end{cases} \quad (5)$$

图 1 显示了 LFM 信号时频分布与 FRFT 变换的关系。在时频平面上,时间轴沿逆时针方向旋转 $\pi/2$ 后便是频率轴。当 p 等于 0 时 FRFT 就是原信号,也就是信号在时间轴上的表示。 p 等于 1 时 FRFT 则是原信号的傅里叶变换,也是信号在频率轴上的表示。当 p 从 0 变化到 1 时,信号平滑地从原始信号变化到傅里叶变换,因此信号的 p 阶 FRFT 可以认为是该信号在 p 阶分数阶傅里叶变换域中的表示,而 p 阶分数阶傅里叶变换域正是时频平面内时间轴逆时针方向旋转 $\alpha = (\pi/2)p$ 角度后得到的,见图 1 中的 u 轴。

2.3 Keystone 变换原理

Keystone 变换^[7]能够较好地解决径向匀速直线运动目标在长时间积累过程中出现的跨距离单元走动问题,使得不同回波的能量在同一个距离单元内得到积累。

对式(1)在快时间域做傅里叶变换得到

$$S_r(f, t_m) = AP(f) \exp\left[-j2\pi(f + f_c) \frac{2(R_0 - v_0 t_m)}{c}\right] \quad (6)$$

Keystone 变换通过设定虚拟时间解快时间频域与慢时间域的耦合关系,虚拟时间 $\tau_m = ((f + f_c)/f_c)t_m$,将其代入式(6)后乘以脉冲压缩函数得到

$$\begin{aligned} S(f, \tau_m) = \frac{A}{\sqrt{\mu}} \text{rect}\left(\frac{f}{B}\right) \exp\left(-j\frac{2\pi R_0}{\lambda}\right) \\ \cdot \exp\left(-j\frac{2\pi f R_0}{c}\right) \exp(j2\pi f_d \tau_m) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $f_d = (2v_0)/\lambda$ 表示目标的多普勒频率,对式(7)做快时间域逆傅里叶变换得到

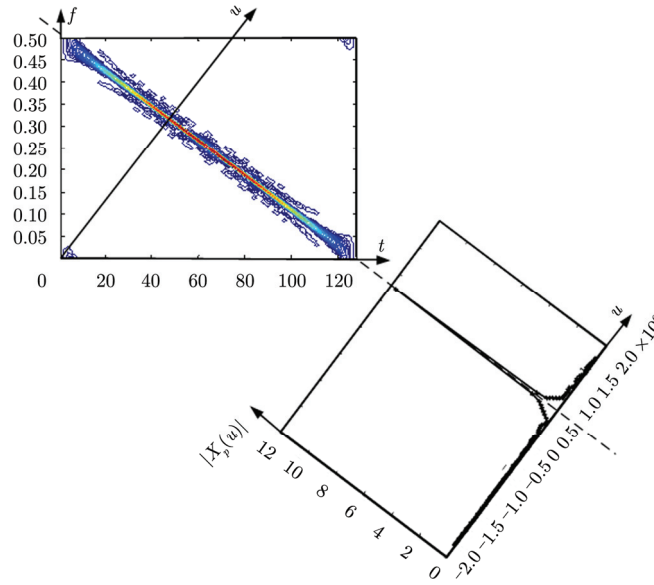


图 1 LFM 信号时频分布与 FRFT 变换的关系

Fig. 1 Relationship of time frequency distribution and FRFT of LFM signal

$$s(t, \tau_m) = A\sqrt{BT_p} \exp\left[-j\frac{2\pi R_0}{\lambda}\right] \cdot \text{sinc}\left[B\left(t - \frac{R_0}{c}\right)\right] \exp(j2\pi f_d \tau_m) \quad (8)$$

由式(8)可见，Keystone 变换后脉冲压缩结果中不同回波的峰值对应时刻均为 $t_{\text{peak}} = R_0/c$ ，这表明不同回波的能量集中在同一个距离单元内，因此距离走动得到补偿。

3 联合 FRFT 和 Keystone 变换的雷达信号处理方法

3.1 基于 FRFT 的目标加速度估计算法

LFM 信号在时频平面上表现为背鳍形直线，如图 1 所示，直线与频率轴的交点表示初始频率 f_0 ，斜率为 LFM 信号的调频率 u_0 。在某一特定的 FRFT 域上信号能量凝聚性最佳，又由于噪声的能量均匀分布于时频平面，不会出现能量凝聚现象。因此以旋转角度 α 为变量，以某一步长遍历一个角度周期后得到信号在不同 u 域上的表示，形成变量为 α 和 u 的 2 维参数空间，该参数空间内 LFM 信号的能量会在某一点处形成峰值，当峰值超过某一阈值证明回波中存在目标，设峰值点坐标为 (α_0, u_0) 。由图 1 中几何关系可知

$$\left. \begin{aligned} \{\alpha_0, u_0\} &= \arg \max_{\alpha, u} |X_\alpha(u)|^2 \\ u_0 &= -\cot \alpha_0 \\ f_0 &= u_0 \csc \alpha_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式(2)和式(9)可知目标的加速度与 LFM 信号调频率的关系式为：

$$\frac{2a}{\lambda} = -\cot \alpha_0 \quad (10)$$

利用式(10)求解目标加速度时还应考虑信号处理过程中数据离散化问题。离散分数阶傅里叶变换的实现算法有很多，其中 Ozaktas 提出的分解型快速算法^[8]被广为应用，该算法将 FRFT 分解为卷积的形式，其输出与连续 FRFT 的输出比较接近。在算法起初需要对离散数据进行量纲归一化处理，归一化处理分尺度变换方法和数据补零/截取法两种。本文选用尺度变化法来实现量纲归一化，这使得变换前后数据发生了畸变，因此在求得调频率和初始频率之后还需要利用尺度因子进行反变换才能得到真实的 LFM 信号参数。由尺度因子为 $S = \sqrt{T/f_r}$ ，则目标真实加速度表达式为：

$$a = \frac{(-\cot \alpha_0)\lambda}{2S^2} = \frac{(-\cot \alpha_0)\lambda f_r}{2T} \quad (11)$$

3.2 基于 FRFT 的数据融合与检测

当信噪比较低时即使回波中存在目标，单组慢时间域回波信号做 FRFT 后其能量凝聚效果也达不到检测概率的要求，因此需要利用多组慢时间域信号进行数据融合，增强能量凝聚性，以提高检测概率。本文针对两种数据融合准则^[9]，根据本文特定的应用背景选择有效的数据融合方法。

单元选大准则是对多组 FRFT 2 维参数空间中每个单元进行选大处理，其表达式为：

$$X'(\alpha, u) = \max_i |X_i(\alpha, u)| \quad (12)$$

选大操作使得采样幅度损失小,但对噪声也做了选大处理,当回波信噪比较低时参数空间内没有明显的能量积累峰值,因此单元选大准则不适合本文的应用条件。

单元求和准则是对多个参数空间结果的叠加,其表达式为:

$$X^l(\alpha, u) = \sum_{i=1}^K |X_i(\alpha, u)| \quad (13)$$

单元求和准则将各组数据中目标和噪声都叠加,但目标的相关性远大于噪声的相关性,噪声均匀分布于时频平面,目标则表现出凝聚性,因此叠加后信噪比较大。在本文应用背景下,各组数据中局部信噪比差异较小,因此选取单元求和准则来对多组慢时间域信号做数据融合处理。

3.3 基于Keystone变换的目标初始速度和初始距离估计算法

依照前两小节算法利用FRFT估计目标加速度后对基带回波做2次相位补偿,补偿后的回波中只有1次相位,可将其看做匀速直线运动目标的回波。通过Keystone变换补偿距离走动后在慢时间域做多普勒处理,由距离多普勒平面峰值便可求得目标初始速度和初始距离。当存在多普勒模糊时,同样可以实现距离补偿。假设模糊多普勒频率为 f_{da} ,则目标真实的多普勒频率为:

$$f_d = f_{da} + kf_r \quad (14)$$

k 表示多普勒模糊数,最大模糊数根据目标的速度范围来设定。将式(14)代入式(7)中的多普勒指数项得

$$\exp(j2\pi f_d \tau_m) = \exp(j2\pi f_{da} \tau_m) \exp(j2\pi k f_r \tau_m) \quad (15)$$

而式(7)中的 f_d 实际上是模糊后的多普勒频率 f_{da} ,因此对(7)需要乘以补偿因子 $\exp(j2\pi k f_r \tau_m)$ 后

再分别对各模糊通道做慢时间域傅里叶变换,目标的多普勒模糊数与所有通道中最大峰值所在的多普勒通道号相对应,这样便可解除欠采样带来的多普勒模糊,并求得目标真实的多普勒频率。

根据第3节的描述可将本文运动目标参数估计算法的步骤概括如下:

(1) 提取 N 组慢时间域回波信号做FRFT得到 N 个2维参数空间,利用单元叠加融合准则对 N 个FRFT的2维参数空间做数据融合,增大目标回波的能量凝聚性。

(2) 若数据融合后2维参数空间中的峰值超过某一经验阈值 T_1 便证明回波中存在目标,利用峰值处的坐标和式(11)便可以估计出目标的加速度 \hat{a} 。

(3) 利用估计出的加速度 \hat{a} 将原始基带回波中的2次相位项补偿掉,此时补偿后的回波可以看成是匀速直线运动目标的回波,对其做匹配滤波同时利用Keystone变换补偿距离走动。为解除多普勒模糊,在Keystone变换之前设定 K 个模糊通道,分别对每个通道的数据平面做匹配滤波和Keystone变换。

(4) 将 K 个多普勒模糊通道分别做上述处理,再对慢时间维做FFT得到 K 个2次相位补偿后不同模糊通道的距离多普勒平面。 K 个平面中峰值最大处对应的多普勒通道号便是目标的多普勒模糊数,再根据该峰值坐标便可估计出目标的初始速度 \hat{v}_0 和初始距离 \hat{R}_0 。

本文算法信号处理流程图如图2所示。

4 仿真实验

4.1 数据融合与加速度估计实验

系统参数设置如表1所示。数据融合前单组慢时间域回波的FRFT 2维参数空间如图3所示,30

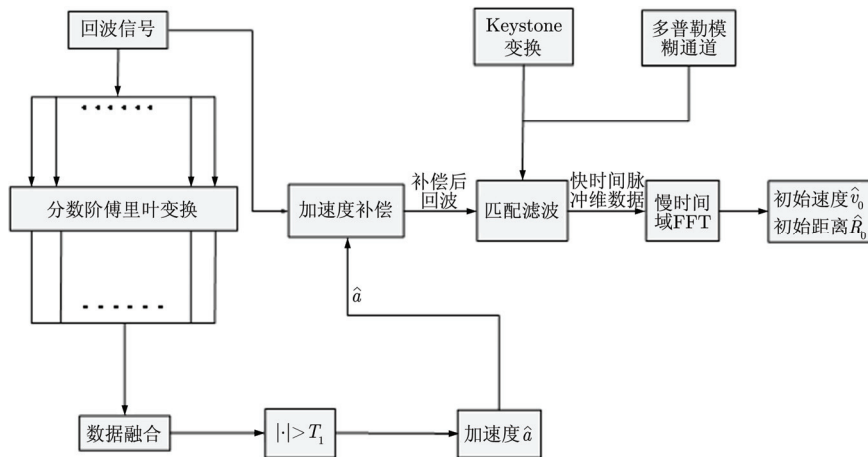


图2 本文算法信号处理流程图

Fig. 2 Flow chart of proposed algorithm

组回波数据融合后的参数空间如图 4。对比两幅图可以看出信噪比为-20 dB 时，单组回波做 FRFT 后目标能量凝聚性还不足以达到检测要求，但从多组回波数据融合的结果来看目标被突显出来，证明数据融合能增强目标回波的能量凝聚性。

表 1 系统参数设置

Tab. 1 Set of system parameters

初始条件	参数值
载频(MHz)	550
采样频率(MHz)	40
带宽(MHz)	35
脉冲重复间隔(ms)	1
脉冲时宽(μs)	250
回波信噪比(dB)	-20
数据融合组数(组)	30
目标径向初始速度(m/s)	320
目标径向初始加速度(m/s ²)	100
目标径向初始距离(m)	10000

在不同信噪比条件下，经过 1000 次 Monte Carlo 仿真实验，目标加速度估计的平均相对误差如表 2 所示。由表中数据可知，误差随信噪比的增大呈递减趋势，当信噪比高于-15 dB 时，平均相对

误差基本低于 0.03，估计精度已达到较高水平，当信噪比高于 5 dB 时，加速度平均相对误差在一个很小的范围之内波动。可见 FRFT 在能量凝聚性方面具有突出优势，适用于低信噪比条件下的运动目标检测与参数估计。

4.2 初始速度和初始距离估计实验

按照表 1 中的目标参数设置，目标速度已超过无模糊速度 $v = (\lambda f_r) / 4 = 136.3 \text{ m/s}$ ，因此存在速度模糊。若在加速度补偿后不矫正距离走动直接做动目标检测(MTD)处理，其结果如图 5 所示。图 6 为加速度补偿之后利用 Keystone 变换矫正距离走动并解除速度模糊后得到的最佳积累结果。图 5 中目标能量分散，并且由于速度模糊没有解除，无法根据多普勒频率估计出目标运动速度。图 6 中目标能量在某一个距离单元中得到积累，距离单元走动得以矫正，并且由于多普勒通道的设置解除了速度模糊，由此可准确估计出目标的真实初始速度。

4.3 不同参数估计算法的对比实验

文献[10]根据先验信息在一定范围内搜索加速度和速度，通过 2 次相位和 1 次相位补偿的方法估计目标参数。文献[11,12]利用 Hough 变换的思想将目标的直线航迹与参数空间中的点对应起来，从参数空间中点累加峰值反推目标运动参数。本节通过不同信噪比下的仿真实验来比较各算法参数估计精度。

图 7-图 9 为参数最小分辨单元相同的情况下，信噪比对参数估计精度的影响曲线。从图 7 和图 8

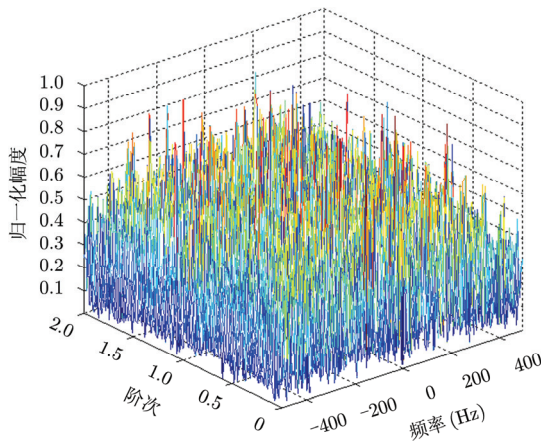


图 3 数据融合前的 FRFT 2 维参数空间

Fig. 3 Parameter space of FRFT before data fusion

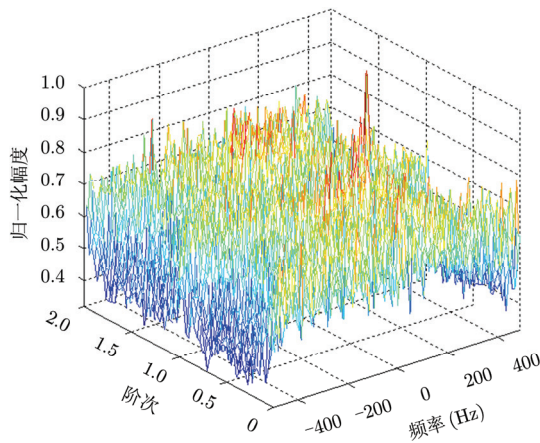


图 4 数据融合后的 FRFT 2 维参数空间

Fig. 4 Parameter space of FRFT after data fusion

表 2 信噪比对参数估计精度的影响

Tab. 2 Influence of SNB on parameter estimation

SNR (dB)	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15
加速度平均相对误差($\times 10^{-2}$)	5.52	3.85	3.24	2.07	1.74	0.84	0.76	0.73	0.74

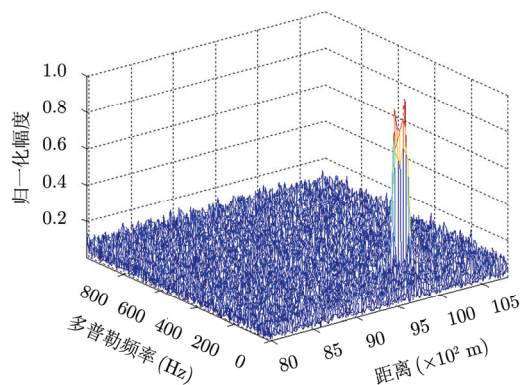


图5 加速度补偿后直接 MTD 积累结果

Fig. 5 Accumulation result of MTD after acceleration compensation

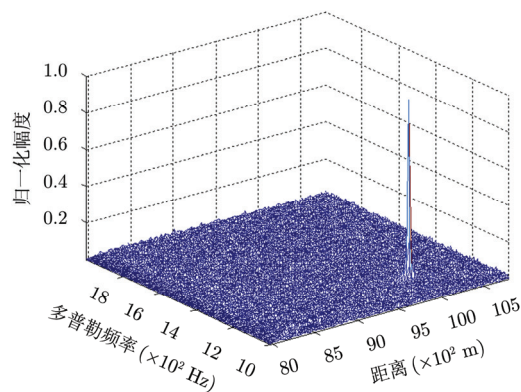


图6 本文算法积累结果

Fig. 6 Accumulation result of the proposed method

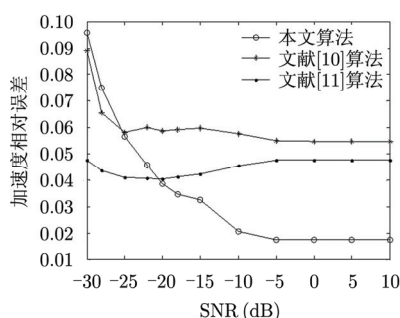


图7 加速度误差曲线

Fig. 7 Error curve of acceleration

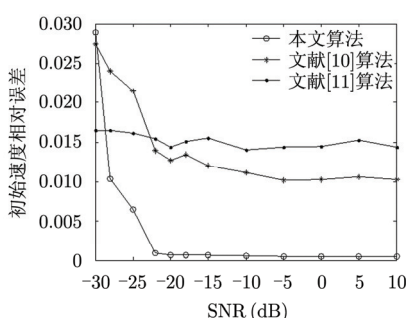


图8 速度误差曲线

Fig. 8 Error curve of velocity

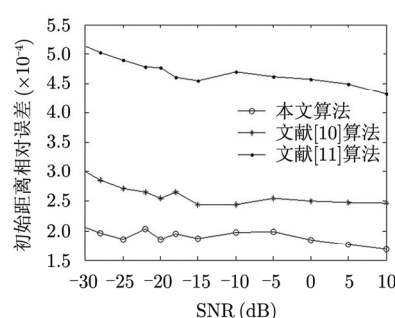


图9 距离误差曲线

Fig. 9 Error curve of range

可见当信噪比高于 -21 dB 时, 本文算法对加速度、初始速度的估计结果都优于文献[10]和文献[11]算法, 并且本文算法和文献[10]算法的相对误差随信噪比的增大呈下降趋势, 而文献[11]算法由于二量化处理使得算法本身对噪声不敏感, 在信噪比观察区间内相对误差的波动很小。从图9可以看出3种算法对距离的估计误差都维持在一个相对较低的水平, 信噪比的变化对距离估计误差的影响很小, 并且本文算法误差最小。

从运算量上来分析, 文献[10]算法需要在加速度和速度2维参数空间中搜索最佳补偿参数, 在参数最小分辨单元相同的条件下, 其运算量随搜索范围的增大而增大。在目标运动信息先验未知的情况下搜索参数范围较大, 算法的运算量较大。同样, 文献[11]算法在本文匀加速直线运动情况下搜索空间为3维, 加上目标运动信息先验未知, 使得算法运算复杂度显著增加。而本文算法只存在分数阶傅里叶变换中阶次 p 的1维搜索以及少数多普勒模糊通道的搜索, 其运算量远小于上述两者。

5 结束语

本文为解决径向匀加速直线运动目标的参数估

计问题, 通过分数阶傅里叶变换估计目标的加速度, 然后对2次相位补偿后的回波数据利用Keystone变换矫正距离走动, 并设定多个模糊通道解除速度模糊, 最终估计目标初始速度和距离。通过仿真实验, 证明了本文算法在估计精度和运算量上的优势, 并且对噪声具有较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] 陶然, 齐林, 王跃. 分数阶 Fourier 的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 60-90.
Tao Ran, Qi Lin, and Wang Yue. Theory and Applications of the Fractional Fourier Transform[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 60-90.
- [2] Peleg S and Porat B. Linear FM signal parameter estimation from discrete-time observations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System*, 1991, 27(4): 607-616.
- [3] 关欣, 仲利华, 胡东辉, 等. 一种基于RSPWVD-Hough变换的无源雷达多普勒展宽补偿方法[J]. *雷达学报*, 2013, 2(4): 430-438.
Guan Xin, Zhong Li-hua, Hu Dong-hui, et al. A compensation algorithm based on a RSPWVD-Hough Transform for Doppler expansion in passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(4): 430-438.

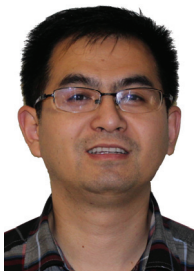
- [4] Geroleo F G and Brandt-Pearce M. Detection and estimation of LFM CW radar signals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 405-418.
- [5] Guan Jian, Chen Xiao-long, Huang Yong, *et al.* Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(5): 389-401.
- [6] Chen Xiao-long, Guan Jian, Liu Ning-bo, *et al.* Maneuvering target detection via radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(4): 939-953.
- [7] Kirkland D. Imaging moving targets using the second-order keystone transform[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(8): 902-910.
- [8] Ozaktas H M, Arikan O, Kutay M A, *et al.* Digital computation of the fractional Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(9): 2141-2150.
- [9] Nassar M O, Kanaan G, and Awad H A H. Framework for analysis and improvement of data-fusion algorithms[C]. IEEE International Conference on Management and Engineering, Chengdu, 2010: 379-382.
- [10] Liu Xiao-bei, Fan Fang-fang, Cao Bao-long, *et al.* Parameter estimation of LFM signal based on CAPON and One-dimensional Dechirp[C]. IEEE Conference on TENCON, Xi'an, 2013: 1-4.
- [11] Moqiseh A and Nayebi M M. Combinational Hough transform for surveillance radar target detection in a 3-D data map[C]. IEEE Radar Conference, Rome, 2008: 9-12.
- [12] Carlson B, Evans E, and Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform, Part III: detection performance with binary integration[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 116-125.

作者简介



田瑞琦(1990-), 女, 湖南常德人, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院硕士生, 主要从事雷达信号处理等方面的研究。

E-mail: tianruiqi050804@126.com



鲍庆龙(1981-), 男, 吉林梅河口人, 国防科学技术大学电子科学与工程学院讲师, 主要从事雷达信号处理方面的研究。

E-mail: cbpest@163.com

王丁禾(1989-), 男, 山东枣庄人, 国防科学技术大学电子科学与工程学院博士生, 主要从事雷达信号处理方面的研究。

E-mail: wdhtsh81@163.com



陈曾平(1967-), 男, 福建福清人, 教授, 博士, 博士生导师, 国家 863 专家组专家, 国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 国防科技重点实验室副主任, 主要从事雷达信号处理、自动目标识别等方面的研究。

E-mail: atrchen@sina.com