

## 基于运动参数非搜索高速机动目标检测

章建成\* 苏涛 吕倩

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文提出一种新的高速机动目标检测与参数估计算法。首先,通过二阶Keystone变换(KT)消除距离频率与慢时间的二次耦合,并计算对称瞬时自相关函数(SIAF)。其次,对SIAF不同维依次进行尺度逆傅里叶变换(SIFT)、尺度傅里叶变换(SFT)和快速傅里叶变换(FFT)实现能量积累,在新的参数空间进行峰值检测得到径向速度模糊数和径向加速度估计值。最后,根据估计的参数构造补偿函数对距离徙动和多普勒扩散进行补偿,并通过KT算法实现目标检测和距离、模糊径向速度的估计,结合补偿的径向速度模糊数计算出模糊径向速度。由于不需要进行参数搜索,并且SIFT和SFT均能通过FFT快速实现,因此算法计算量得到大幅度减小。仿真实验验证了该算法的有效性。

**关键词:** 目标检测; 参数估计; 尺度变换; 对称瞬时自相关函数

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)06-1460-08

**DOI:** 10.11999/JEIT151042

## High-speed Maneuvering Target Detection Based on Non-searching Estimation of Motion Parameters

ZHANG Jiancheng SU Tao LÜ Qian

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** A novel algorithm for high-speed maneuvering target detection and parameter estimation is proposed. Firstly, the second-order Keystone Transform (KT) is utilized to remove the quadric coupling between the range frequency and the slow time, after that, the Symmetric Instantaneous Autocorrelation Function (SIAF) is calculated. Secondly, in order to achieve energy accumulation, Scaled Inverse Fourier Transform (SIFT), Scaled FT (SFT), and Fast FT (FFT) are successively performed on the different dimensions of the SIAF to obtain a new parameter space, then peak detection is carried out to achieve the estimation of radial velocity ambiguity integer and radial acceleration. Finally, a compensation function is constructed to compensate the range migration and the Doppler spread, then the KT algorithm is employed to realize target detection and the estimation of target's range and ambiguous radial velocity, with the radial velocity ambiguity integer and ambiguous radial velocity, the unambiguous radial velocity can be calculated. Since the brute-force searching procedure is eliminated, moreover, the SIFT and the SFT can be implemented with the FFT operation, the computational complexity of proposed algorithm is greatly reduced. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Target detection; Parameter estimation; Scaled transform; Symmetric Instantaneous Autocorrelation Function (SIAF)

### 1 引言

高速机动目标检测与运动参数估计是雷达领域一个重要研究方向<sup>[1-9]</sup>。对于高速机动目标而言,距离徙动(距离走动和弯曲)、多普勒扩散对目标检

测与参数估计的性能产生很大的影响,如何有效地校正距离徙动,消除多普勒扩散是高速机动目标检测的重点与难点。

Radon-FT(RFT)算法<sup>[7]</sup>通过对目标运动轨迹的搜索,有效地克服距离走动的影响,该算法具有很好的抗噪声性能,在低SNR的场景下,能够实现匀速运动目标的检测。但是需要在距离、速度2维参数空间进行搜索,对于机动目标而言,距离弯曲和多普勒扩散使得RFT算法性能严重下降。

针对RFT算法不适用于机动目标检测的问题,文献[8]利用分数阶傅里叶变换(Fractional FT,

收稿日期: 2015-09-14; 改回日期: 2016-01-22; 网络出版: 2016-03-29

\*通信作者: 章建成 zjc7836@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61001204), 中央高校基本科研业务费专项资金(JY0000902020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61001204), Fundamental Research Funds for the Central Universities (JY0000902020)

FRFT)对线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号具有较好的聚集性原理提出 Radon-FRFT(RFRFT)算法。该算法通过对距离、速度、加速度 3 维参数空间进行搜索, 实现机动目标检测与参数估计, 能够消除距离弯曲和多普勒扩散对目标检测的影响。由于需要进行 3 维参数空间搜索, 所以 RFRFT 算法相对 RFT 算法在性能上的改善是建立在增加计算量的基础上。

在 RFRFT 算法的基础上, 文献[9]利用性能更好的时频分析算法——吕分布(LV's Distribution, LVD)<sup>[10,11]</sup>, 提出一种 Radon-LVD(RLVD)算法。该算法同样对距离、速度、加速度 3 维参数空间进行搜索, 在中心频率-调频率(Centroid Frequency-Chirp Rate, CFR)域实现目标检测与参数估计。因为使用了性能更好时频分析算法, 所以与 RFRFT 算法相比, RLVD 算法具有更好的检测与参数估计性能, 但是仍需要对 3 维参数空间进行搜索, 所以 RLVD 算法计算量同样很大。

上述 RFT, RFRFT 和 RLVD 算法均是通过运动参数搜索来消除距离徙动和多普勒扩散对目标检测的影响, 所以该类算法计算量与参数搜索空间的范围相关, 当需要搜索参数范围比较大时, 计算量将会非常大。基于此, 文献[12]提出一种基于 SIFT 高速目标检测算法, 该算法通过峰值检测估计目标速度, 并根据估计的速度构造补偿函数对距离走动进行校正, 再通过恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测技术实现目标检测, 该算法避免了参数搜索过程, 有效地减小了目标检测的计算量, 但是该算法只适用于匀速运动目标的检测。

综合以上算法的优点与不足, 本文提出一种基于运动参数非搜索高速机动目标检测算法。首先, 通过二阶 KT 消除距离频率与慢时间的二次耦合, 并计算对称瞬时自相关函数(SIAF)。其次, 依次对 SIAF 的距离频率维、慢时间维和时延维分别进行 SIFT, SFT 和 FFT 处理实现能量积累, 并在新的参数空间进行峰值检测得到径向加速度、径向速度模糊数的估计值。再次, 根据径向加速度、径向速度模糊数的估计值构造补偿函数对距离徙动和多普勒扩散进行补偿, 补偿后再通过 KT 处理对剩余的距离走动进行校正。最后, 距离徙动和多普勒扩散被完全补偿后, 对距离频率维和慢时间维分别进行 IFFT 和 FFT 处理实现能量积累, 在距离-多普勒空间进行 CFAR 检测, 并根据检测出的目标估计目标的距离和模糊速度, 结合补偿的速度模糊数和估计的模糊速度可计算目标不模糊速度。该算法不需要进行繁琐的参数搜索过程, SIFT 和 SFT 均能用

FFT 快速实现, 所以计算量远小于搜索类算法, 并且该算法适用于多目标检测。

## 2 机动目标信号模型

假设雷达发射的波形为 LFM 信号:

$$s_i(t) = \text{rect}(t/T_r) \exp[j\pi(2f_c t + \gamma t^2)] \quad (1)$$

其中  $\text{rect}\left(\frac{t}{T_r}\right) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_r/2 \\ 0, & |t| > T_r/2 \end{cases}$ ,  $t$  为快时间,  $T_r$  为脉冲宽度,  $f_c$  为载频,  $\gamma$  为调频率。

假设有  $K$  个匀加速运动目标, 目标相对雷达初始距离、径向速度、径向加速度分别为  $r_i, v_i, a_i$ , 在  $t_m$  时刻第  $i$  个目标相对雷达的距离为  $r_i(t_m) = r_i + v_i t_m + a_i t_m^2/2$ ,  $m$  为脉冲序列,  $t_m$  为慢时间, 下变频后的基带回波为

$$\begin{aligned} S_r(t, t_m) = & \sum_{i=1}^K \rho_i \text{rect}\left(\frac{t - 2r_i(t_m)/c}{T_r}\right) \\ & \cdot \exp\left[j\pi\gamma\left(t - \frac{2r_i(t_m)}{c}\right)^2\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2r_i(t_m)}{c}\right] + \mathbf{n}(t, t_m) \quad (2) \end{aligned}$$

$\rho_i$  表示第  $i$  个目标幅度, 假设为常量,  $c$  表示电磁波传播速度,  $\mathbf{n}(t, t_m)$  为加性复高斯白噪声。

脉冲压缩后得到

$$\begin{aligned} S_c(t, t_m) = & \sum_{i=1}^K \rho_{ci} \text{sinc}\left[B\left(t - \frac{2r_i(t_m)}{c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{2r_i(t_m)}{\lambda}\right] + \mathbf{N}(t, t_m) \quad (3) \end{aligned}$$

$\mathbf{N}(t, t_m)$  为脉冲压缩后噪声。

## 3 基于运动参数非搜索机动目标检测

### 3.1 加速度、速度模糊数估计

以无噪声场景下单目标为例进行分析, 脉冲压缩后回波在距离频率-慢时间域形式如式(4):

$$\begin{aligned} S_c(f_r, t_m) = & \rho_c \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r) \frac{2(r + vt_m + at_m^2/2)}{c}\right] \quad (4) \end{aligned}$$

其中  $f_r$  为距离频率,  $B = \gamma T_r$  为带宽。高速目标速度存在模糊, 即  $v = N_{am} v_a + v_0$ ,  $v_0$  为目标模糊速度, 满足  $|v_0| \leq v_a/2$ ,  $N_{am}$  为目标速度模糊数,  $v_a = \lambda \text{PRF}/2$  为盲速,  $\lambda = c/f_c$  为载波波长, PRF 为脉冲重复频率。

假设目标加速度不存在模糊, 由于  $\exp(-j4\pi f_c N_{am} v_a t_m/c) = 1$ <sup>[1,12]</sup>, 式(4)可整理为

$$\begin{aligned} S_c(f_r, t_m) = & \rho_c \operatorname{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r)\frac{2r}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r)\frac{2v_0 t_m}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_r \frac{2N_{am} v_a t_m}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r)\frac{at_m^2}{c}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知, 距离频率与慢时间存在线性耦合和二次耦合, 线性耦合与目标速度有关, 而二次耦合与目标的加速度有关, 二次耦合可通过二阶 KT 进行消除, 令  $t_m = [f_c/(f_c + f_r)]^{1/2} t_n$ , 二阶 KT 后得

$$\begin{aligned} S_c(f_r, t_n) = & \rho_c \operatorname{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r)\frac{2r}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi(1 + f_r/f_c)^{1/2} f_c \frac{2v_0 t_n}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_r \left(\frac{f_c}{f_c + f_r}\right)^{1/2} \frac{2N_{am} v_a t_n}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{at_n^2}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

对于窄带雷达  $f_r \ll f_c$ , 将  $(1 + f_r/f_c)^{1/2}$  进行一阶泰勒展开, 即  $(1 + f_r/f_c)^{1/2} \approx 1 + f_r/(2f_c)$ , 结合  $f_r [f_r/(f_c + f_c)]^{1/2} \approx f_r$ , 则式(6)可整理为

$$\begin{aligned} S_c(f_r, t_n) \approx & \rho_c \operatorname{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r)\frac{2r}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_r \frac{2\bar{v} t_n}{c}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{2v_0 t_n}{\lambda}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{at_n^2}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\bar{v} = N_{am} v_a + v_0/2$ 。计算式(7)的 SIAF, 采用文献[12]定义的 SIAF。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_1(f_r, t_n, \tau_n) = & S_c(f_r, t_n + \tau_n) S_c^*(f_r, t_n - \tau_n) \\ = & \rho_c^2 \operatorname{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left[-j2\pi f_r \frac{4\bar{v} \tau_n}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{4v_0 \tau_n}{\lambda}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{4at_n \tau_n}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中\*表示共轭,  $\tau_n$  为时延变量。

由式(8)可知  $f_r$  与  $\tau_n$  之间存在耦合, 该耦合可通过 SIFT<sup>[12]</sup>消除, SIFT 定义如式(9):

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_2(t_r, t_n, \tau_n) = & \int_{\tau_n f_r} \mathbf{R}_1(f_r, t_n, \tau_n) \exp(j2\pi t_r \tau_n f_r) d(\tau_n f_r) \\ = & \rho_c^2 \exp\left[-j2\pi \frac{4v_0 \tau_n}{\lambda}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{4at_n \tau_n}{\lambda}\right] \\ & \cdot \int_{\tau_n f_r} \operatorname{rect}\left(\frac{\tau_n f_r}{B\tau_n}\right) \exp\left[j2\pi\left(t_r - \frac{4\bar{v}}{c}\right)\tau_n f_r\right] \\ & \cdot d(\tau_n f_r) = \rho_1 \operatorname{sinc}\left[B\tau_n\left(t_r - \frac{4\bar{v}}{c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{4v_0 \tau_n}{\lambda}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{4at_n \tau_n}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $t_r$  为对  $\tau_n f_r$  进行 SIFT 处理对应的尺度快时间。

由式(9)可知,  $\bar{\mathbf{R}}_2(t_r, t_n, \tau_n)$  在  $t_r$  维为 sinc 函数, 由于  $t_r$  的间隔为  $1/f_s$ ,  $f_s$  为快时间采样率, 因此  $\operatorname{sinc}[B\tau_n(t_r - 4\bar{v}/c)]$  在主瓣内幅值变化比较缓慢, 如果主瓣较宽, 会影响到后续峰值检测的精度, 因此减小主瓣宽度将会有利于后续峰值检测, 所以本文利用 SIFT 的尺度性质, 令尺度因子为  $\eta$ , 式(9)变成

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_2(t_r, t_n, \tau_n) = & \rho_1 \operatorname{sinc}\left[B\eta\tau_n\left(t_r - \frac{4\bar{v}}{\eta c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{4v_0 \tau_n}{\lambda}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{4at_n \tau_n}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (10)$$

$\eta > 1$  时, 相当于对  $\mathbf{R}_2(t_r, t_n, \tau_n)$  在  $t_r$  维进行了压缩处理, 使得  $\mathbf{R}_2(t_r, t_n, \tau_n)$  在  $t_r$  维的主瓣跨越的分辨单元数变少, 有利于后续峰值检测。SIFT 可通过 Chirp-z 变换<sup>[13,14]</sup>快速精确实现, 计算量为  $O(3M^2 N \log_2 N)$ ,  $M$  为积累脉冲数,  $N$  为距离单元数。

由式(10)可知,  $\tau_n$  与  $t_n$  间存在耦合, 如果直接对  $t_n$  进行 FFT 处理将得到

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_3(t_r, \bar{f}_t, \tau_n) = & \rho_2 \operatorname{sinc}\left[B\eta\tau_n\left(t_r - \frac{4\bar{v}}{\eta c}\right)\right] \\ & \cdot \delta\left(\bar{f}_t + \frac{4a\tau_n}{\lambda}\right) \exp\left[-j2\pi \frac{4v_0 \tau_n}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知, 目标能量在  $\tau_n - \bar{f}_t$  空间沿  $\bar{f}_t = -4a\tau_n/\lambda$  分布, 类似于脉冲压缩后回波存在“距离走动”, 因此直接对式(11)沿  $\tau_n$  轴进行 FFT 处理不能实现能量积累。可通过 SFT<sup>[15]</sup>消除  $t_n$  与  $\tau_n$  间的耦合并实现能量积累, 为了能够灵活调节加速度的分辨率, 利用 SFT 尺度性质, 对式(10)进行 SFT 处理后得

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_3(t_r, f_t, \tau_n) = & \int_{\tau_n t_n} \mathbf{R}_2(t_r, t_n, \tau_n) \exp(-j2\pi \xi f_t \tau_n t_n) d(\tau_n t_n) \\ = & \rho_2 \operatorname{sinc}\left[B\eta\tau_n\left(t_r - \frac{4\bar{v}}{\eta c}\right)\right] \delta\left(f_t + \frac{4a}{\lambda \xi}\right) \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{4v_0 \tau_n}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $f_t$  为对  $\tau_n t_n$  进行 SFT 处理对应的尺度慢时间频率,  $\xi$  为尺度因子, SFT 可通过 Chirp-z 快速精确实现。

SFT 处理后, 目标能量在  $\tau_n - f_t$  空间沿与  $\tau_n$  轴平行的直线  $f_t = -4a/\lambda \xi$  分布, 与式(11)相比,  $t_n$  与  $\tau_n$  之间的耦合得到消除, 并实现了能量积累, 再对  $\tau_n$  进行 FFT 处理得到

$$\mathbf{R}_4(t_r, f_t, f_r) \approx \rho_3 \text{sinc} \left[ B\eta \left( t_r - \frac{4\bar{v}}{\eta c} \right) \right] \cdot \delta \left( f_t + \frac{4a}{\lambda \xi} \right) \delta \left( f_r + \frac{4v_0}{\lambda} \right) \quad (13)$$

$f_r$  为  $\tau_n$  对应的频率。

经以上处理后，目标在  $t_r, f_t, f_r$  3 维参数空间内积累出峰值，峰值的坐标与目标运动参数有关，因此，可通过峰值检测<sup>[12,14]</sup>估计目标运动参数。 $t_r$  的分辨率  $\Delta t_r = 1/f_s$ ，所以  $\bar{v}$  分辨率  $\Delta \bar{v} = \eta c / 4f_s$ ，选择合适的尺度因子  $\eta$ ，可以推算出目标速度模糊数，记为  $\hat{N}_{am}$ 。 $f_t$  的分辨率为 PRF/ $M$ ，则加速度分辨率为  $\Delta a = \lambda \xi \text{PRF} / (4M)$ ，加速度估计值记为  $\hat{a}$ 。

与基于 SIFT 目标检测算法<sup>[12]</sup>一样，目标速度较大时， $\hat{f}_r$  与真实值存在偏差，因此本文不使用峰值在  $f_r$  维坐标信息，加速度、速度模糊估计后，可采用 KT 算法实现目标模糊速度  $v_0$  的估计。

### 3.2 目标检测与速度、距离估计

3.1 节中在 3 维参数空间检测出的峰值不一定是目标，只是根据检测出峰值的坐标得到一个  $\bar{v}$  和加速度  $a$  的估计值，本节分析本文算法目标检测与速度、距离估计的实现。

首先，根据估计的加速度  $\hat{a}$  和速度模糊数  $\hat{N}_{am}$  构造补偿函数

$$\mathbf{H}(\hat{N}_{am}, \hat{a}, t_m) = \exp \left[ j2\pi f_r \frac{2\hat{N}_{am} v_{am} t_m}{c} \right] \cdot \exp \left[ j2\pi (f_c + f_r) \frac{\hat{a} t_m^2}{c} \right] \quad (14)$$

用式(14)对式(5)进行补偿得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1(f_r, t_m) &= \mathbf{H}(\hat{N}_{am}, \hat{a}, t_m) \cdot \mathbf{S}_c(f_r, t_m) \\ &= \rho_c \text{rect} \left( \frac{f_r}{B} \right) \exp \left[ -j2\pi (f_c + f_r) \frac{2r}{c} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[ -j2\pi (f_c + f_r) \frac{2v_0 t_m}{c} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

再对式(15)进行 KT 处理，令  $t_m = f_c t_n / (f_c + f_r)$ ，KT 处理后得到

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_2(f_r, t_n) &= \rho_c \text{rect} \left( \frac{f_r}{B} \right) \exp \left[ -j2\pi (f_c + f_r) \frac{2r}{c} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[ -j2\pi \frac{2v_0 t_n}{\lambda} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)可知，距离徙动和多普勒扩散被完全消除，再对式(16)沿距离频率  $f_r$  轴进行 IFFT 处理，并沿慢时间  $t_n$  进行 FFT 处理得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_3(t, f_d) &= \rho_0 \text{sinc} \left[ B \left( t - \frac{2r}{c} \right) \right] \delta \left( f_d + \frac{2v_0}{\lambda} \right) \\ &\quad \cdot \exp \left[ -j2\pi \frac{2r}{\lambda} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

上述处理后，目标在距离-多普勒空间内积累出

峰值，然后再进行 CFAR 检测，根据检测出目标的坐标估计目标的距离  $\hat{r}$  和模糊速度  $\hat{v}_0$ ，结合补偿的速度模糊数可以计算出目标的不模糊速度估计值。

### 3.3 多目标检测

以上分析都是基于单目标假设，由于计算 SIAF 为非线性运算，因此多目标场景下，除了各自目标的自 SIAF 外，目标间还存在互 SIAF，即交叉项。下面以两目标为例对交叉项进行分析，目标  $p$  和目标  $q$  相对雷达初始距离、径向速度、径向加速度分别为  $r_p, v_p, a_p, r_q, v_q, a_q$ 。则交叉项为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,1}(f_r, t_n, \tau_n) &= \mathbf{S}_{cp}(f_r, t_n + \tau_n) \mathbf{S}_{cq}^*(f_r, t_n - \tau_n) \\ &\quad + \mathbf{S}_{cq}(f_r, t_n + \tau_n) \mathbf{S}_{cp}^*(f_r, t_n - \tau_n) \end{aligned} \quad (18)$$

依次进行 SIFT, SFT 和 FFT 处理后，交叉项积累结果为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_r) &= \text{FFT}_{\tau_n} \left\{ \text{SFT}_{\tau_n t_n} \left[ \text{SIFT}_{\tau_n f_r} \left( \mathbf{R}_{c,1}(f_r, t_n, \tau_n) \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

不同参数条件下，交叉项积累结果  $\mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_r)$  如下所示：

$$(1) v_p = v_q, r_p = r_q, a_p \neq a_q.$$

$$(a) f_t = \pm 2|\Delta a|/\xi :$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_r) &= \frac{-\rho_{cp}\rho_{cq}}{\sqrt{2|\Delta a|\pi^2(f_r + 2\nabla v)^2}} \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left[ B\eta \left( t_r - \frac{2\nabla \bar{v}}{\eta} \right) \right] \delta \left( f_t + \frac{2\nabla a}{\xi} \right) \\ &\quad \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{4} \text{sgn}(\Delta a) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

$$(b) f_t \neq \pm 2|\Delta a|/\xi :$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_r) &= \frac{4\rho_{cp}\rho_{cq}|\Delta a(f_r + 2\nabla v)|}{\left[ 4\Delta a^2 - (\xi f_t + 2\nabla a)^2 \right]^{3/2}} \text{sinc} \left[ B\eta \left( t_r - \frac{2\nabla \bar{v}}{\eta} \right) \right] \\ &\quad \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{4} \text{sgn}(\Delta a) + \frac{\pi}{4} \text{sgn} \left[ 4\Delta a^2 - (\xi f_t + 2\nabla a)^2 \right] \right] \\ &\quad \cdot \left\{ -2\pi \frac{\Delta a(f_r + 2\nabla v)^2}{4\Delta a^2 - (\xi f_t + 2\nabla a)^2} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

$$(2) v_p = v_q, r_p \neq r_q.$$

$$(a) t_r = 0 :$$

$$\mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_r) = 0 \quad (22)$$

$$(b) t_r \neq 0 :$$

$$(i) a_p = a_q :$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_r) &= \frac{4\rho_{cp}\rho_{cq}\eta|\Delta r|}{(\eta t_r - 2\nabla \bar{v})^2} \\ &\quad \cdot \cos \left[ 2\pi \left( 2f_c \Delta r + (f_r + 2\nabla v) \frac{2\Delta r}{\eta t_r - 2\nabla \bar{v}} \right) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

(ii)  $a_p \neq a_q$  :

$$\mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_\tau) = \frac{4\sqrt{2}\rho_{cp}\rho_{cq}\eta\Delta r^2}{\sqrt{|\Delta a||\eta t_r - 2\nabla\bar{v}|^3}} \cos \left\{ 2\pi \left[ \frac{(\xi f_t)^2 + 4\Delta a \xi f_t \left( \frac{2\Delta r}{\eta t_r - 2\nabla\bar{v}} \right)^2}{4\Delta a} - 2f_c \Delta r - \frac{2\Delta r(f_\tau + 2\nabla v)}{\eta t_r - 2\nabla\bar{v}} - \frac{\text{sgn}(\Delta a)}{8} \right] \right\} \quad (24)$$

(3)  $v_p \neq v_q$  .

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_\tau) &= \frac{4\sqrt{2}\rho_{cp}\rho_{cq}\eta\xi \left[ \xi^2 \Delta \bar{v}^2 (f_\tau + 2\nabla v) - \Delta r \Delta \bar{v} (\xi f_t + 2\nabla a) + \xi^2 \Delta a \Delta r (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}) - \xi^2 \Delta \bar{v} \Delta v (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}) \right]^2}{\left( 2\Delta \bar{v} (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}) (\xi f_t + 2\nabla a) + \xi^2 \Delta a (\eta t_r - 2\nabla\bar{v})^2 + 4\xi^2 \Delta \bar{v}^2 \Delta a \right)^{5/2}} \\ &\cdot \cos \left\{ 2\pi \left[ \frac{(\xi^3 \Delta \bar{v}^2 (f_\tau + 2\nabla v) - \Delta r \Delta \bar{v} (\xi f_t + 2\nabla a) + \xi^3 \Delta a \Delta r (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}) - \xi^3 \Delta \bar{v} \Delta v (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}))^2}{\left( 2\Delta \bar{v} (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}) (\xi f_t + 2\nabla a) + \xi^2 \Delta a (\eta t_r - 2\nabla\bar{v})^2 + 4\xi^2 \Delta \bar{v}^2 \Delta a \right) \xi^2 \Delta \bar{v}^2} \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{\Delta a \Delta r^2 - 2\Delta r \Delta v \Delta \bar{v} + 2f_c \Delta r \Delta \bar{v}^2}{\Delta \bar{v}^2} - \frac{1}{8} \text{sgn} \left[ 2\Delta \bar{v} (\eta t_r - 2\nabla\bar{v}) \left( f_t + \frac{2\nabla a}{\xi} \right) + \xi \Delta a (\eta t_r - 2\nabla\bar{v})^2 + 4\xi \Delta \bar{v}^2 \Delta a \right] \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

其中  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数,  $\Delta r = r_p - r_q/c$ ,  $\Delta \bar{v} = (\bar{v}_p - \bar{v}_q)/c$ ,  $\nabla \bar{v} = (\bar{v}_p + \bar{v}_q)/c$ ,  $\Delta v = (v_{0p} - v_{0q})/\lambda$ ,  $\nabla v = (v_{0p} + v_{0q})/\lambda$ ,  $\Delta a = (a_p - a_q)/\lambda$ ,  $\nabla a = (a_p + a_q)/\lambda$ , 由于篇幅限制本文没有给出交叉项的详细证明。

由以上交叉项结果可知: 式(21), 式(23)~式(25)交叉项均呈余弦震荡, 因此交叉项不能同自身项一样积累, 式(22)交叉项为零。

下面分析式(20)交叉项分布, 式(20)的条件为

$$v_p = v_q, r_p = r_q, a_p \neq a_q, f_t = \pm 2|\Delta a|/\xi \quad (26)$$

如果  $\mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_\tau)$  能够积累出峰值, 则峰值坐标为  $(2\nabla\bar{v}/\eta, -2\nabla a/\xi, -2\nabla v)$ , 由式(26)可知, 该峰值在  $f_t$  维坐标必须与条件中  $f_t = \pm 2|\Delta a|/\xi$  相同, 所以“ $\nabla a = \pm|\Delta a|$ ”必须满足

$$a_p + a_q = \pm |a_p - a_q| \quad (27)$$

因为“ $a_p \neq a_q$ ”, 所以式(27)成立条件为“ $a_p, a_q$  中有一个为零、另外一个不为零”。假设  $a_p \neq 0$ ,  $a_q = 0$ 。由于“ $v_p = v_q$ ”, 所以交叉项  $\mathbf{R}_{c,4}(t_r, f_t, f_\tau)$  积累峰值坐标为  $(4\bar{v}_p/(\eta c), -4a_p/(\lambda\xi), -4v_{0p}/\lambda)$ 。

由式(13)可知, 目标  $p$  自身项积累峰值坐标为  $(4\bar{v}_p/(\eta c), -4a_p/(\lambda\xi), -4v_{0p}/\lambda)$ , 所以交叉项与  $p$  目标自身项积累峰值位置相同, 因此该情况下交叉项有利于峰值检测。

综上, 目标间的交叉项积累结果对自身项的检测影响较小。需要说明的是: 当目标回波 SNR 相差较大时, 弱目标有可能被强目标间的交叉项淹没, 这种情况下, 先通过峰值检测对强目标的速度模糊数和加速度进行估计, 然后通过 Clean 技术<sup>[12]</sup>将强目标在回波中剔除, 再对弱目标进行检测。

### 3.4 尺度因子选择

因为 KT 不适用于多普勒频谱存在模糊的情

况, 式(8)在计算 SIAF 时需要使用当前积累时间内前后各  $M/2$  个冗余脉冲, 假设积累时间为  $T_a$ , 则目标在  $2T_a$  内加速度不能存在模糊, 所以目标加速度需满足  $|a| < \lambda\text{PRF}/(4T_a)$ , 因此  $\Delta a$  可选为  $\lambda\text{PRF}/(2MT_a)$ , 3.1 小节中分析了加速度分辨率为  $\lambda\xi\text{PRF}/4M$ , 所以尺度因子  $\xi$  可设置为  $2/T_a$ 。需要说明的是: 实际应用中, 可根据先验信息预估目标加速度范围, 并结合实际雷达参数, 最大程度上设置较小的尺度因子  $\xi$ , 以提高加速度估计分辨率。

$\bar{v}$  分辨率  $\Delta\bar{v} = \eta c/(4f_s)$ , 因为  $\bar{v} = N_{am} \cdot v_a + v_0/2$ , 所以只要  $\Delta\bar{v} < v_a/2$ , 则可以根据  $\bar{v}$  的估计值推算出速度模糊数, 所以  $\eta < f_s\text{PRF}/f_c$ 。

## 4 算法实现与计算量分析

### 4.1 算法实现

图 1 给出了本文提出的算法实现流程图, 其中  $I$  为峰值检测时检测出峰值的个数, 算法实现步骤如下:

步骤 1 下变频、脉冲压缩后, 进行距离维 IFFT, 然后再进行二阶 KT 处理, 得到  $\mathbf{S}_c(f_r, t_n)$ ;

步骤 2 计算  $\mathbf{S}_c(f_r, t_n)$  的 SIAF, 得到  $\mathbf{R}_1(f_r, t_n, \tau_n)$ , 对  $\mathbf{R}_1(f_r, t_n, \tau_n)$  不同维分别进行 SIFT, SFT 和 FFT 处理, 得到  $\mathbf{R}_4(t_r, f_t, f_\tau)$ ;

步骤 3 在参数空间进行峰值检测, 如果检测出  $I$  个峰值, 根据峰值坐标估计径向速度模糊数和径向加速度, 初始化  $i = 1$ , 转入步骤 4; 否则程序结束;

步骤 4 根据步骤 3 中得到的参数估计值构造补偿函数  $\mathbf{H}_i(\hat{N}_{am_i}, \hat{a}_i, t_m)$ , 对  $\mathbf{S}_c(f_r, t_m)$  进行补偿得到  $\mathbf{S}_1(f_r, t_m)$ , 再进行 KT 得到  $\mathbf{S}_2(f_r, t_n)$ ;

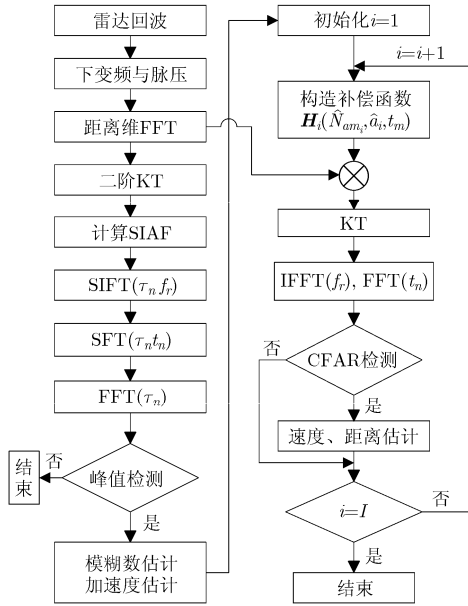


图 1 本文提出算法实现流程图

步骤 5 对  $S_2(f_r, t_n)$  沿  $f_r$  进行 IFFT 处理, 沿  $t_n$  进行 FFT 处理, 得到  $S_3(t, f_d)$ , 在距离-多普勒空间进行 CFAR 检测, 如果检测到目标, 则估计目标的距离和径向模糊速度, 并转入步骤 6; 否则直接转入步骤 6;

步骤 6 如果  $i < I$ , 令  $i = i + 1$ , 跳转到步骤 4; 否则程序结束。

### 4.2 计算量分析

假设积累脉冲数为  $M$ , 距离单元数为  $N$ ,  $M$  点 FFT 计算量为  $M \log_2 M/2$ 。RLVD 算法一次搜索计算量为  $O(3M^2 \log_2 M)$ <sup>[10]</sup>, 所以 RLVD 算法总计算量为  $O(3N_v N_a N M^2 \log_2 M)$ ,  $N_v$  和  $N_a$  分别表示速度和加速度搜索次数, 搜索间隔为多普勒分辨单元, 即速度和加速度搜索间隔分别为  $\Delta v = \lambda \text{PRF}/(2M)$  和  $\Delta a = \lambda/T_a^2$ <sup>[9]</sup>。

本文提出的算法计算量主要集中在对 SIAF 不同维分别进行 SIFT, SFT 和 FFT 处理上, 由于  $\bar{v}$  的分辨率  $\Delta \bar{v} = \eta c/(4f_s)$ , 根据目标速度范围, SIFT 处理后, 可以截取部分  $t_r$  进行后续处理。以第 5 节仿真实验参数为例, 假设目标速度范围为  $[-3000, 3000]$ , 则可以选择  $t_r$  中间 100 个值进行后续处理, 因此本文提出算法计算量为  $O(3M^2 N \log_2 N) + O(7M^2 N_i \log_2 M/2)$ ,  $N_i$  为选取  $t_r$  值的个数。综上, 本文提出的算法计算量远小于 RLVD 算法计算量。

## 5 仿真实验与分析

雷达参数: 发射波形为 LFM 信号, 带宽  $B = 8$  MHz, 脉宽  $T_r = 60 \mu\text{s}$ , 载波波长  $\lambda = 0.3$  m, PRF = 1000 Hz, 快时间采用率  $f_s = 10$  MHz, 积累脉冲

数  $M = 500$ 。目标 1 和目标 2 初始距离、径向速度、径向加速度分别为 105 km, 1551 m/s, 54.1 m/s<sup>2</sup>, 105.45 km, 1460 m/s, 48.3 m/s<sup>2</sup>。

根据以上参数, 尺度因子可设置为  $\eta = 8$ ,  $\xi = 2$ 。可以计算出盲速  $v_a = 150$  m/s,  $\bar{v}$  的分辨率  $\Delta \bar{v} = 60$  m/s。加速度分辨率  $\Delta a = 0.3$  m/s<sup>2</sup>。

**实验 1 无噪声情况下, 本文算法主要步骤仿真结果** 图 2(a)为  $R_2$  在  $t_n$  轴的切面图, 图中平行时延轴的直线为目标, 由于目标 1 和目标 2 速度模糊数相同, 因此目标能量在  $t_r$  维重合在一起。为了比较, 图 2(d)给出了 SIAF 沿  $f_r$  轴直接 IFFT 结果切面图, 中间一条斜线为目标, 与图 2(a)相似, 目标 1 和目标 2 能量重合在一起, 目标旁边两条斜线为目标间的交叉项, 对比图 2(a)与图 2(d)可知, SIFT 处理后,  $f_r$  与  $t_n$  之间耦合被消除, 有利于能量进一步积累。

图 2(b)为  $R_3$  在  $t_r = 4\bar{v}/\eta c$  处切面图, 图中平行时延轴的两条直线分别为目标 1 和目标 2。图 2(e)为  $R_2$  沿  $t_n$  轴直接 FFT 结果切面图, 对比图 2(b)与图 2(e)可知, SFT 处理后,  $t_n$  与  $\tau_n$  间耦合被消除, 再对  $\tau_n$  进行 FFT 能够实现能量再次积累, 积累结果如图 2(c)所示。图 2(c)中两个峰值坐标分别为 (31.65, 54.0) 和 (-27.45, 48.3), 由峰值可以估计目标 1 的模糊速度为 63.3 m/s, 加速度为 54.0 m/s<sup>2</sup>, 目标 2 的模糊速度为 -54.9 m/s, 加速度为 48.3 m/s<sup>2</sup>。因为目标 2 真实加速度值不在分辨单元上, 因此存在 0.1 m/s<sup>2</sup> 的误差。由以上实验结果可知, 本文算法能够实现加速度精确估计。但是如果通过峰值在  $f_r$  维位置估计目标模糊速度误差较大, 因此本文不使用该方法估计模糊速度。

**实验 2 噪声中目标检测与运动参数估计** 以目标 1 为例, 回波 SNR(脉冲压缩前)为 -33 dB, 噪声为加性复高斯白噪声。

图 3(a)为  $R_4$  在  $f_r$  轴  $f_r = \hat{f}_r$  处切面图,  $\hat{f}_r$  为峰值在  $f_r$  维坐标, 根据峰值坐标得到加速度估计值为 54.0 m/s<sup>2</sup>,  $\bar{v}$  的估值 1500.0 m/s, 则  $\bar{v} \in (1470, 1530)$ , 满足该条件的速度模糊数为 10。图 3(b)为速度模糊数补偿值为 10, 加速度补偿值为 54.0 m/s<sup>2</sup>, KT 处理后再进行积累的结果, 由图 3(b)可知, 通过 CFAR 检测技术很容易检测出目标, 同时由图 3(b)可以估计目标模糊速度为 50.7 m/s, 结合补偿的速度模糊数 10, 可计算出目标 1 估计速度为 1550.7 m/s。

由本实验结果可以证明, 本文提出的算法在低 SNR 场景下, 能够实现高速机动目标检测与运动参数高精度估计。

**实验 3 与其他算法检测性能比较** 以目标 1

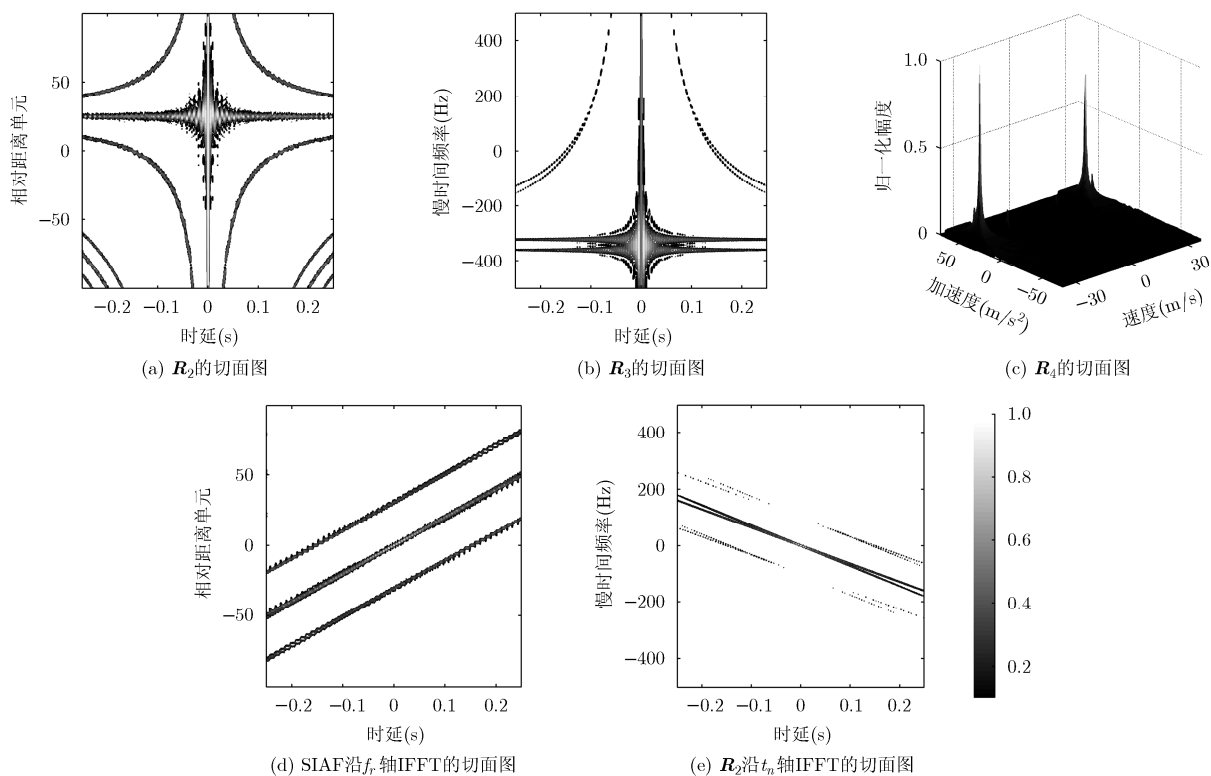


图2 本文算法主要步骤仿真结果

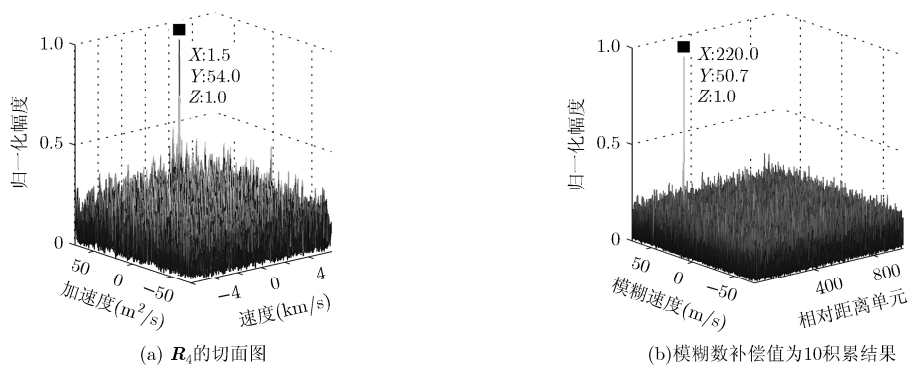


图3 目标参数估计与积累结果

为例, 虚警概率定为  $10^{-8}$ , 回波  $\text{SNR} = [-47, -5]$  dB, 间隔为 1 dB, 100 次蒙特卡洛实验, 动目标检测(Moving Target Detection, MTD)算法、RFT 算法、RLVD 算法和本文算法检测概率与回波 SNR 的关系曲线, 并给出了理想 MTD(距离徙动和多普勒扩散被完全补偿)检测性能。为了与本文算法进行比较, 在仿真中, RLVD 算法的检测概率的计算参照本文提出算法检测方法, 先在 CFCR 域进行峰值检测并估计加速度, 多普勒扩散补偿后再进行相参积累, 在距离-多普勒域进行 CFAR 检测。

MTD 算法受到距离徙动和多普勒扩散的影响, 即使在高 SNR 下也不能检测出机动目标。RFT 算法有效地消除了距离走动的影响, 因此 RFT 算法检

测性能好于 MTD 算法, 然而距离弯曲和多普勒扩散使得该算法积累性能变差。RLVD 算法能够精确估计出目标的速度和加速度, 因此该算法具有很好的检测性能, 检测性能逼近理想 MTD。本文提出算法式(8)中 SIAF 的计算是在距离频域中进行的, 存在 SNR 损失<sup>[12]</sup>, 因此抗噪声性能没有 RLVD 算法好, 但是远好于 MTD, RFT 算法, 并且抗噪声性能仍可接受<sup>[7]</sup>, 虽然计算量高于 RFT 算法, 但是远小于 RLVD 算法, 因此本文提出的算法适合高速机动目标检测。

## 6 结束语

本文提出一种新的机动目标检测算法, 该算法

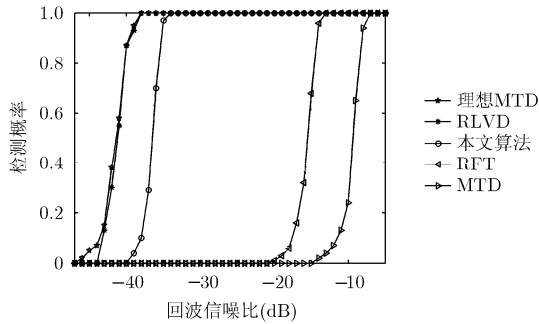


图 4 MTD, RFT, RLVD, 理想 MTD 与本文算法检测概率比较

通过二阶 KT 消除距离频率与慢时间的二次耦合, 然后计算 SIAF, 并依次对 SIAF 不同维进行 SIFT, SFT 和 FFT 处理实现能量积累, 在新的参数空间通过峰值检测实现径向加速度和径向速度模糊数的估计, 根据估计的参数构造补偿函数对距离徙动和多普勒扩散进行补偿, 然后通过 KT 对冗余距离走动进行校正, 能量相参积累后进行目标检测与距离、速度的估计。该算法不需要进行繁琐的参数搜索过程, 与已有算法相比, 大幅减小计算量。

### 参考文献

- [1] XING Mengdao, SU Junhai, WANG Genyuan, *et al.* New parameter estimation and detection algorithm for high speed small target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 214-224. doi: 10.1109/TAES.2011.5705671.
- [2] ZHU Shengqi, LIAO Guisheng, YANG Dong, *et al.* A new method for radar high-speed maneuvering weak target detection and imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(7): 1175-1179. doi: 10.1109/LGRS.2013.2283887.
- [3] 问翔, 刘宏伟, 包敏. 一种距离扩展目标的 Hough 变换检测器[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(5): 1104-1110. doi: 10.11999/JEIT14069.  
WEN Xiang, LIU Hongwei, and BAO Min. A Hough transformation detector for range spread target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1104-1110. doi: 10.11999/JEIT140692.
- [4] 田超, 文树梁. 基于非均匀 FFT 的长时间相参积累算法[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(6): 1374-1380. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01264.  
TIAN Chao and WEN Shuliang. A long-term coherent integration algorithm based on non-uniform fast Fourier transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1374-1380. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01264.
- [5] HUANG Penghui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, *et al.* Approach for space-based radar maneuvering target detection and high-order motion parameter estimation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(6): 732-741. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0192.
- [6] 郑纪彬, 朱文涛, 苏涛, 等. 一种新的高速多目标快速参数化检测算法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(2): 381-387. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00843.
- [7] ZHENG Jibin, ZHU Wentao, SU Tao, *et al.* Novel algorithm for fast parametric detection of high-speed multi-target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 381-387. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00843.
- [7] XU Jia, Yu Ji, PENG Yingning, *et al.* Radon-Fourier transform for radar target detection I: generalized Doppler filter bank[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1186-1202. doi: 10.1109/TAES.2011.5751251.
- [8] CHENG Xiaolong, GUAN Jian, LIU Ningbo, *et al.* Maneuvering target detection via radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(8): 939-953. doi: 10.1109/TSP.2013.2297682.
- [9] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, *et al.* Coherent integration for maneuvering target detection based on radon-Lv's distribution[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(9): 1467-1471. doi: 10.1109/LSP.2015.2390777.
- [10] LÜ Xiaolei, BI Guoan, WAN Chunru, *et al.* Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(8): 939-953. doi: 10.1109/TSP.2011.2155651.
- [11] LUO Shan, BI Guoan, LÜ Xiaolei, *et al.* Performance analysis on Lv's distribution and its applications[J]. *Digital Signal Processing*, 2013, 23(3): 797-807. doi: 10.1016/j.dsp.2012.11.011.
- [12] ZHENG Jibin, SU Tao, ZHU Wentao, *et al.* Radar high-speed target detection based on the scaled inverse Fourier transform[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 1108-1119. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2368174.
- [13] 吴兆平, 符渭波, 苏涛, 等. 基于快速 Radon-Fourier 变换的雷达高速目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(8): 1866-1871. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01180.  
WU Zhaoping, FU Weibo, SU Tao, *et al.* High speed radar target detection based on fast radon-Fourier transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(8): 1866-1871. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.01180.
- [14] ZHENG Jibin, SU Tao, ZHANG Long, *et al.* ISAR imaging of targets with complex motion based on the chirp rate-quadratic chirp rate distribution[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11): 7276-7289. doi: 10.1109/TGRS.2014.2310474.
- [15] XING M, WU R, LI Y, *et al.* New ISAR imaging algorithm based on modified Wigner Ville distribution[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 3(1): 70-80. doi: 10.1049/iet-rsn.20080003.

章建成: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为雷达目标检测与参数估计、SAR/ISAR 成像。  
苏涛: 男, 1968 年生, 教授, 研究方向为面向雷达、声呐、通信的高速实时信号处理, 认知雷达。  
吕倩: 女, 1991 年生, 博士生, 研究方向为雷达目标检测与参数估计、SAR/ISAR 成像。