

基于频率轴反转的 机动目标距离徙动补偿方法

贺雄鹏, 廖桂生, 许京伟, 魏嘉琪

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 机动目标在长时间积累时间内发生严重的距离徙动与多普勒徙动, 影响雷达对目标的检测性能. 针对该问题, 该文提出一种基于频率轴反转变换与广义自相关变换的机动目标检测与高阶运动参数估计快速算法. 首先在距离频域利用频率轴反转变换校正距离徙动, 信号变为立方相位信号; 然后利用广义自相关变换与广义变尺度傅里叶变换实现信号降阶与参数非搜索估计; 最后利用估计参数对原始信号解调频, 并完成目标能量的积累. 与现有的 Keystone, 广义 Radon-Fourier 变换, Radon-吕分布和 Radon-分数阶傅里叶变换相比, 本文方法可以快速校正距离徙动, 实现非搜索的目标参数估计, 达到低计算复杂度与检测性能的折中. 仿真实验表明, 该方法可有效完成机动目标的检测与参数估计.

关键词: 机动目标检测; 运动参数估计; 立方相位信号; 频率轴反转变换

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1496-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.032

Range Migration Compensation Method for Maneuvering Target Based on Frequency Axis Reversal

HE Xiong-peng, LIAO Gui-sheng, XU Jing-wei, WEI Jia-qi

(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The integration and detection performance for the maneuvering targets may slide down due to the defocusing effects of the range migration and the Doppler frequency migration in the long integration time. To address these issues, we propose a fast non-searching method based on frequency axis reversal and generalized autocorrelation function. In this algorithm, the frequency axis reversal transform is applied to correct the range migration in the range frequency domain. Then the received signal becomes cubic phase signal and both generalized autocorrelation function and generalized scaled Fourier transform (GSCFT) are applied to finish the signal reduction and the estimation of the moving target. Finally, estimated parameters are employed to dechirp the echo and the target is well focused in the range-Doppler domain. Compared with the existing methods such as Keystone, GRFT (Generalized Radon Fourier Transform), RLVD (Radon-Lv's Distribution) and RFRFT (Radon Fractional Fourier Transform), the presented algorithm can fast eliminate the range migration and obtain the motion parameters without any searching procedure and can achieve a good balance between the computational cost and the detection ability. Several simulation experiments are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: maneuvering target detection; motion parameters estimation; cubic phase signal; frequency axis reversal transform

1 引言

随着航空航天技术的发展, 具有高机动性的运动

目标对常规雷达的探测能力构成了严峻的挑战, 速度与加速度已经不能准确描述目标动态历程, 需要研究更加高阶的运动参数估计与机动目标检测方法^[1-4]. 参

数估计性能与目标输出信噪比对于雷达目标检测、目标跟踪与识别等具有重要意义,脉冲相参积累可以有效提高目标输出信噪比,因此通过补偿不同脉冲之间的相位起伏,实现雷达检测性能与目标参数估计性能的提升^[5,6].然而,由于目标的机动性,在积累时间内会产生距离徙动(Range Migration, RM)和多普勒徙动(Doppler Frequency Migration, DFM)现象,导致相参积累性能下降,有效校正距离徙动与消除多普勒徙动成为机动目标检测的重点与难点.

在积累时间内,目标的径向速度会引起距离走动和多普勒频偏,目标的径向加速度、加加速度会导致距离弯曲和多普勒扩散现象.一阶Keystone变换通过对慢时间轴进行尺度变换来实现距离走动校正^[7,8].文献[9,10]提出Radon-Fourier变换(RFT)方法,通过搜索目标运动参数,可有效的在积累时间内对目标信号进行相干积累,但是运算复杂度高.一阶Keystone变换和RFT方法均没有考虑目标加速度产生的距离弯曲和多普勒扩散问题.

为了解决目标加速度导致的距离弯曲和多普勒扩散,文献[11]提出了RFRFT(Radon Fractional Fourier Transform)方法,文献[12]提出了RLCT(Radon-Linear Canonical Transform)方法,文献[13]提出了RLVD(Radon-Lv's Distribution)方法,文献[14~16]提出了基于时频分析类的方法.然而,这些方法只考虑了目标的低阶运动参数,对于复杂运动特性的机动目标,在积累时间内,目标的高阶运动参数(一般考虑到加加速度可以满足需求)引起的距离徙动与多普勒徙动不容忽视,上述所提方法均没有考虑目标的加加速度,导致积累性能下降.

对于目标加加速度导致的多普勒徙动,文献[17,18]研究了基于多项式相位模型的参数估计方法,然而,此类方法的前提是目标信号位于一个距离单元内,或者已经将回波包络校正到一个距离单元的情况,没有考虑距离徙动.

因此,本文提出了一种基于频率轴反转变换和广义自相关变换的运动目标距离徙动校正与高阶运动参数估计算法.首先通过频率轴反转变换快速校正距离徙动,然后利用广义自相关函数与广义变尺度傅里叶变换实现信号的降阶与目标加速度和加加速度的快速估计;最后利用动目标检测技术(MTD)在距离-多普勒域完成目标能量积累.

2 回波信号模型

假设雷达发射线性调频(LFM)信号,

$$s_{\text{trans}}(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j\pi\mu\hat{t}^2) \exp(j2\pi f_c \hat{t}) \quad (1)$$

其中 $\text{rect}(\hat{t}) = \begin{cases} 1, & |\hat{t}| \leq T_p/2 \\ 0, & |\hat{t}| > T_p/2 \end{cases}$, \hat{t} 表示快时间, T_p 为脉冲宽度, μ 为调频率, f_c 为载频.忽略目标斜距历程中阶次超过4阶的运动参数,目标与雷达的瞬时斜距表示为

$$r(t_m) = r_0 + \phi_1 t_m + \frac{1}{2} \phi_2 t_m^2 + \frac{1}{6} \phi_3 t_m^3 \quad (2)$$

其中, r_0 表示目标距离雷达的初始斜距, ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 分别表示为目标的径向速度、加速度和加加速度, t_m 表示慢时间.不考虑噪声分量,基带回波信号表示为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A_0 \text{rect}\left(\hat{t} - 2r(t_m)/c/T_p\right) \exp\left(-j\frac{4\pi r(t_m)}{\lambda}\right) \exp\left[j\pi\mu\left(\hat{t} - \frac{2r(t_m)}{c}\right)^2\right] \quad (3)$$

其中, A_0 表示目标的回向散射系数, c 表示光速, $\lambda = \frac{c}{f_c}$ 表示信号波长.经过脉冲压缩处理后,信号表示为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A_1 \text{sinc}\left[B\left(\hat{t} - \frac{2\left(r_0 + \phi_1 t_m + \frac{1}{2}\phi_2 t_m^2 + \frac{1}{6}\phi_3 t_m^3\right)}{c}\right)\right] \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c\left(r_0 + \phi_1 t_m + \frac{1}{2}\phi_2 t_m^2 + \frac{1}{6}\phi_3 t_m^3\right)}{c}\right) \quad (4)$$

其中, B 表示信号带宽, A_1 表示脉冲压缩之后的信号幅度, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ 表示 sinc 包络函数.

由式(4)可见,回波信号包络随 t_m 变化,包络变化量超过一个距离单元($\Delta r = c/2B$)时,产生距离徙动.其中, r_0 不会对距离徙动造成影响, ϕ_1 产生距离走动, ϕ_2 和 ϕ_3 导致距离弯曲.另外,考虑目标的加加速度,式(4)的指数项为关于慢时间的立方相位函数,指数项的 ϕ_1 引起多普勒频偏, ϕ_2 和 ϕ_3 导致多普勒扩散.若采用传统的动目标检测(MTD)技术对信号相参积累,会导致信号能量散焦,降低积累增益,因为MTD要求目标在驻留时间内不发生距离徙动.可见,距离徙动和多普勒徙动增大了目标信号的积累难度,为了提高积累性能,需要消除距离徙动和多普勒徙动.

3 本文算法原理

3.1 基于频率轴反转变换的距离徙动校正

首先利用本文提出的频率轴反转变换消除机动目标距离徙动,具体原理如下:

将式(4)的回波信号变换到距离频域,即

$$S_1(f_r, t_m) = \text{FT}[s_r(\hat{t}, t_m)] = A_2^{[1]} \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left[-j\frac{4\pi(f_c + f_r)r(t_m)}{c}\right] \quad (5)$$

其中, $A_2^{[1]}$ 为目标信号幅度, f_r 为 \hat{t} 对应的距离频率.对上式中的 f_r 离散化,得

$$\begin{aligned}
S_1(f_r, t_m) &= \text{FT}[s_r(\hat{t}, t_m)] \\
&= A_2^{[1]} \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_c r(t_m)}{c}\right) \\
&\quad \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r(t_m)}{c} \left(-\frac{N-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2}\right) \cdot \frac{F_s}{N}\right]
\end{aligned} \quad (6)$$

其中, N 为距离频率采样点数(本文设 N 为奇数), F_s 为距离维采样率. 根据 f_r 的对称性, 将数据沿着距离维进行反转, 得到 $\overleftarrow{S}_1(f_r, t_m)$,

$$\begin{aligned}
\overleftarrow{S}_1(f_r, t_m) &= A_2^{[1]} \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi f_c r(t_m)}{c}\right) \\
&\quad \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi r(t_m)}{c} \left(\frac{N-1}{2}, \dots, 1, 0, -1, \dots, -\frac{N-1}{2}\right) \cdot \frac{F_s}{N}\right]
\end{aligned} \quad (7)$$

其中, “ \leftarrow ”表示快时间频率反转符号. 从连续的角度理解上述频率轴反转变换, 即

$$\overleftarrow{S}_1(f_r, t_m) = S_1(-f_r, t_m) \quad (8)$$

将 $\overleftarrow{S}_1(f_r, t_m)$ 与原始信号 $S_1(f_r, t_m)$ 相乘, 可得

$$\begin{aligned}
S_2(f_r, t_m) &= S_1(f_r, t_m) \cdot \overleftarrow{S}_1(f_r, t_m) \\
&= (A_2^{[1]})^2 \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left(-j \frac{8\pi f_c r(t_m)}{c}\right) \\
&\quad \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi r(t_m)}{c} \left\{\left(-\frac{N-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N-1}{2}\right) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(\frac{N-1}{2}, \dots, 1, 0, -1, \dots, -\frac{N-1}{2}\right)\right\} \cdot \frac{F_s}{N}\right\} \\
&= A_2 \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left(-j \frac{8\pi f_c r(t_m)}{c}\right)
\end{aligned} \quad (9)$$

其中, $A_2 = (A_2^{[1]})^2$. 可见, 频率轴反转变换消除了相位项中所有 t_m 与 f_r 耦合的相位, 保留了与载频 f_c 有关的相位. 对上式进行距离维 IFT, 得

$$\begin{aligned}
R_1(\hat{t}, t_m) &= \text{IFT}_{f_r}[S_2(f_r, t_m)] \\
&= A_2 \text{sinc}(B\hat{t}) \exp\left(-j \frac{8\pi f_c r(t_m)}{c}\right)
\end{aligned} \quad (10)$$

至此, 完成了距离徙动校正, 信号包络相对于 t_m 为常数. 传统的距离徙动校正算法, 如 Keystone 类算法和参数搜索类算法, 都是对有限阶次(例如速度、加速度)的距离徙动进行校正, 不能解决残留的高次项带来的影响, 仅消除了部分距离频率 f_r 与慢时间 t_m 的耦合, 存在偏差. 而本文所提出的距离徙动校正算法, 通过距离频域的相关变换, 完全消除了 f_r 与 t_m 之间的耦合, 不局限于式(2)中的 3 阶项, 可以对 f_r 与任意阶次 t_m 解耦合, 理论上实现精确的距离徙动校正.

3.2 多普勒徙动校正与参数估计

距离徙动校正后, 信号包络不再随 t_m 变化, 式(10)变为下列的立方相位函数:

$$R_1(t_m) = A_3 \exp\left(-j \frac{8\pi}{\lambda} \left(r_0 + \phi_1 t_m + \frac{1}{2} \phi_2 t_m^2 + \frac{1}{6} \phi_3 t_m^3\right)\right) \quad (11)$$

其中, $A_3 = A_2 \text{sinc}(B\hat{t})$.

本文采用文献[19]的非线性变换核对式(11)变换, 表达式如下:

$$\begin{aligned}
R_C(t_m, \tau) &= R_1(t_m + \tau + \tau_0) R_1(t_m - \tau - \tau_0) \\
&\quad \cdot R_1^*(t_m - \tau + \tau_0) R_1^*(t_m + \tau - \tau_0)
\end{aligned} \quad (12)$$

其中, $*$ 和 τ 分别表示复共轭符号和时延变量. τ_0 表示固定时延, 根据文献[19], 本文设定固定时延 τ_0 的最优值为信号长度的 0.089 倍.

将式(11)代入式(12), 得

$$R_C(t_m, \tau) = A_3^4 \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (16\phi_3 \tau_0 t_m \tau + 16\phi_2 \tau_0 \tau)\right) \quad (13)$$

由式(13)可见, t_m 和 τ 相互耦合. 如果沿着 t_m 做

FFT, 信号能量将沿着斜线 $f_{t_m} + \frac{16\phi_3 \tau_0 \tau}{\lambda} = 0$ 分布, 其中, f_{t_m} 表示 t_m 对应的频率. 所以, 仅通过 t_m 维 FFT 无法完成信号能量的积累. 本文采用文献[20]提出的广义变尺度傅里叶变换(GSCFT)对 $R_C(t_m, \tau)$ 中的耦合项进行消除. GSCFT 的表达式如下所示,

$$\begin{aligned}
T_1(f_{[\xi \tau_{t_m}]}, \tau) &= \int_{\tau_{t_m}} [A_3^4 \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (16\phi_3 \tau_0 t_m \tau + 16\phi_2 \tau_0 \tau)\right) \\
&\quad \times \exp(-j 2\pi \xi \tau t_m f_{[\xi \tau_{t_m}]})] d(\tau_{t_m}) \\
&= A_3^4 \exp\left(-j \frac{32\pi \phi_2 \tau_0}{\lambda} \tau\right) \delta\left(f_{[\xi \tau_{t_m}]} + \frac{16\phi_3 \tau_0}{\lambda \xi}\right)
\end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 表示狄利克雷函数, ξ 表示缩放因子, $f_{[\xi \tau_{t_m}]}$ 为 $t_m \tau$ 对应的尺度频率域. 通过调节 ξ 可有效改善参数模糊问题, GSCFT 可利用 chirp-z 变换快速实现. 然后沿着 τ 维进行 FFT, 得

$$\begin{aligned}
T_2(f_{[\xi \tau_{t_m}]}, f_\tau) &= \text{FFT}_\tau [T_1(f_{[\xi \tau_{t_m}]}, \tau)] \\
&= A_3^4 \delta\left(f_\tau + \frac{16\phi_2 \tau_0}{\lambda}\right) \delta\left(f_{[\xi \tau_{t_m}]} + \frac{16\phi_3 \tau_0}{\lambda \xi}\right)
\end{aligned} \quad (15)$$

其中, f_τ 表示 τ 对应的频率域, $\text{FFT}_\tau(\cdot)$ 表示沿着 τ 维进行 FFT. 经过上述处理后, $T_2(f_{[\xi \tau_{t_m}]}, f_\tau)$ 在 $\left(-\frac{16\phi_3 \tau_0}{\lambda \xi}, -\frac{16\phi_2 \tau_0}{\lambda}\right)$ 处形成峰值, 通过峰值检测技术估计出参数 ϕ_3 和 ϕ_2 .

$$\hat{\phi}_3 = -\frac{\hat{f}_{[\xi \tau_{t_m}]} \lambda \xi}{16\tau_0}, \hat{\phi}_2 = -\frac{\hat{f}_\tau \lambda}{16\tau_0} \quad (16)$$

然后, 利用 $\hat{\phi}_3$ 和 $\hat{\phi}_2$ 构造参考函数, 对式(11)的高阶项进行补偿, 通过 t_m 维的 FFT 即可完成参数 ϕ_1 的估计与信号能量的相参积累.

本文所提算法描述如算法 1.

算法 1 基于频率轴反转的机动目标检测算法

1. 回波信号进行距离维脉冲压缩处理后,变换到距离频域,得 $S_1(f_r, t_m)$;
2. 对 $S_1(f_r, t_m)$ 进行频率轴反转变换,得 $\overleftarrow{S}_1(f_r, t_m)$;
3. 将 $\overleftarrow{S}_1(f_r, t_m)$ 与 $S_1(f_r, t_m)$ 相乘并进行距离维 IFFT,得 $R_1(i, t_m)$, 完成距离校正;
4. 对目标信号所在距离单元数据做广义自相关变换,得 $R_C(t_m, \tau)$;
5. 对 $R_C(t_m, \tau)$ 做 GSCFT 处理以及时延变量维 FFT,得 $T_2(f_{[\xi r_m]} \setminus f_r)$;
6. 利用峰值提取技术得到目标加加速度以及加速度,构造补偿函数对 $R_1(i, t_m)$ 中目标所在距离单元数据做 dechirp 处理,之后进行方位维 FFT 估计目标速度(高速目标补偿多普勒模糊数即可);
7. 利用估计参数补偿原始信号,通过 MTD 技术对补偿后的信号做相参积累,并进行 CFAR 检测;

4 计算复杂度分析

GRFT^[21]算法对目标运动参数搜索估计,可以实现任意参数模型的最佳估计. 本文在计算复杂度方面与 GRFT 算法,两维频域匹配滤波算法^[1],Keystone 算法,和 RFT 算法进行对比. 为了便于比较,假设距离维点数为 N ,方位维点数为 M ,对于速度、加速度和加加速度的搜索次数均为 L ,通常情况下 L 大于 N 和 M .

本文算法中,广义自相关变换运算量级为 $O(M^2)$,广义变尺度傅里叶变换(通过 chirp-z 变换实现)运算量级为 $O(M^2 \log_2 M)$,时延维 FFT 运算量级为 $O(M^2 \log_2 M)$,因此总的运算复杂度仍然为 $O(M^2 \log_2 M)$. 两维频域匹配滤波算法对加速度进行搜索,运算复杂度为 $O(L(MN \log_2 M + MN \log_2 N))$,高于本文所提算法. GRFT 算法需要对三个参数进行搜索,因此计算复杂度为 $O(L^3 NM)$,运算量远大于本文所提算法. 若采用插值方式,Keystone 算法的运算复杂度为 $O[N \cdot M^2]$. RFT 需要搜索目标初始距离与速度,计算复杂度为 $O(L^2 NM + NM \cdot \log_2 M)$. 表 1 给出了五种算法的运算复杂度结果. 表 2 给出了相同系统参数与目标仿真参数下(见表 3 与表 4),五种算法的运行时间对比结果.(算法在 MATLAB R2015b 运行,计算机配置为: Intel(R) Core(TM) 四核 i5-3570 (3.4GHz), RAM 为 4GB.) 可见,相比与其它 4 种方法,本文算法运算复杂度极低.

表 1 计算复杂度分析

算法	计算复杂度
GRFT	$O(L^3 NM)$
两维频域匹配滤波	$O(L(MN \log_2 M + MN \log_2 N))$
本文所提算法	$O(M^2 \log_2 M)$
Keystone	$O[N \cdot M^2]$
RFT	$O(L^2 NM + NM \cdot \log_2 M)$

表 2 运算时间分析

算法	运算时间
GRFT	944.65s
两维频域匹配滤波	15.467s
本文所提算法	1.599s
Keystone	9.484s
RFT	39.526s

5 实验与分析

本节在零均值复高斯白噪声背景和实测噪声(含有杂波)背景下,通过点目标仿真实验来验证本文方法对运动目标聚焦的有效性. 雷达系统仿真参数见表 3.

表 3 雷达系统参数

载频	带宽	采样频率	脉冲重复频率	相干积累时间
0.15GHz	20MHz	20MHz	1000Hz	1s

5.1 单目标实验分析

首先分析单个目标在高斯白噪声背景下的积累性能,目标运动参数见表 4. 图 1(a)~(d)给出了基于本文方法的运动目标处理结果,图(e)与(f)分别给出 Keystone 和 RFRFT 方法的聚焦结果. 由图 1(a)可见,原始数据距离脉压后,机动目标存在距离走动和弯曲现象. 图 1(b)给出了频率轴反转包络校正的结果,校正后的目标信号位于一个距离单元之内. 图 1(c)给出了 GSCFT 处理后的调频率与二次调频率分布,可以看出,信号在新的两维变换域平面内形成明显峰值,与式(15)相互对应. 通过峰值检测技术,得出估计的加速度与加加速度分别为 49.81 m/s^2 和 29.95 m/s^3 ,实际值分别为 50 m/s^2 和 30 m/s^3 ,经过 dechirp 处理后得到速度的估计值为 149.98 m/s ,实际值为 150 m/s . 图 1(d)给出了本文方法结果,由图可见,点目标已经精确聚焦. 作为对比,图 1(e)与(f)分别给出 Keystone 和 RFRFT 方法的聚焦结果,由图可见,这些方法均出现了不同程度的能量散焦,进而降低目标检测概率.

表 4 目标运动参数

	初始斜距 (km)	径向速度 (m/s)	径向加速度 (m/s^2)	径向加 加速度 (m/s^3)	目标信噪比 (脉压前) (dB)
目标	100	150	50	30	-8

为了验证本文方法在实测噪声与杂波背景下的有效性,在实测的噪声与杂波数据中加入单点目标进行验证. 实测数据为 L 波段 PD 雷达空域扫描模式下获得的噪声回波数据(包含气象杂波). 雷达系统参数如表 5 所示,目标运动参数为:径向速度 200 m/s ,加速度 20 m/s^2 和加加速度 10 m/s^3 ,输入信杂噪比 SCNR 为

-7dB. 图 2(a) ~ (c) 给出了基于本文方法的运动目标处理结果,图(a)为脉压后目标运动轨迹,图(b)为频率轴反转变换后目标轨迹. 图(c)给出了 GSCFT 处理后的

二次调频率与调频率分布结果. 可见,在噪声与杂波背景下,目标信号能够精确聚焦.

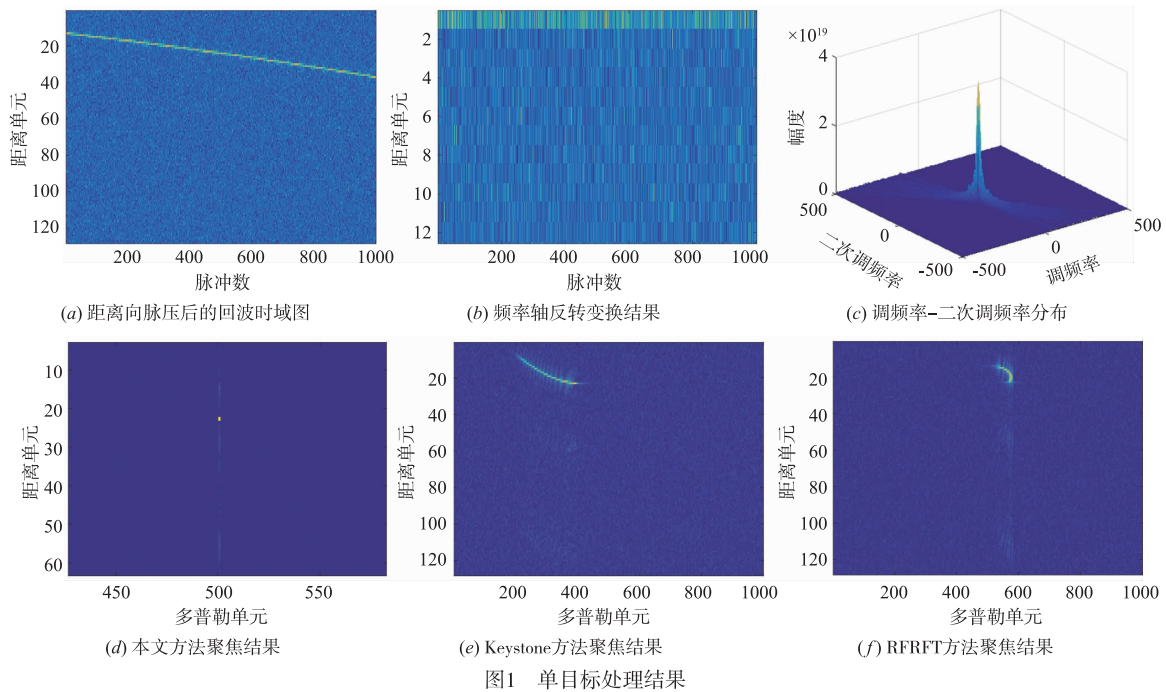


图1 单目标处理结果

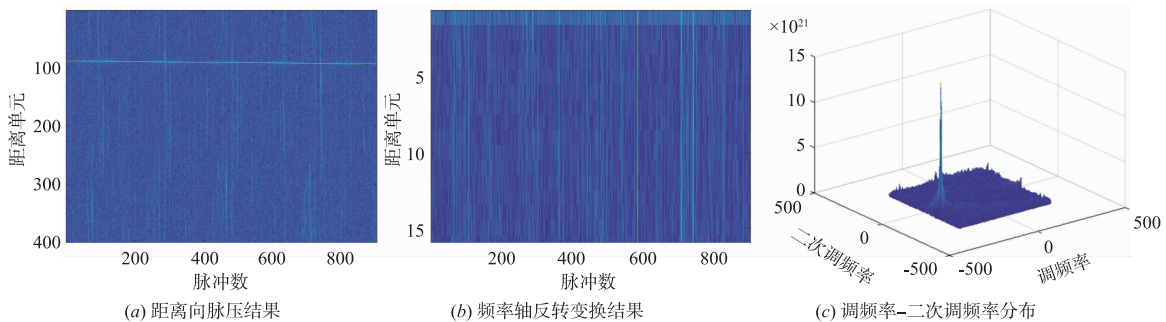


图2 本文方法处理结果

表5 雷达系统参数

载频	带宽	采样频率	脉冲重复频率	相干积累脉冲数
1.29GHz	2MHz	3MHz	520Hz	900

5.2 多目标实验分析

本小节进行基于本文方法的多目标仿真验证,雷达系统参数与 5.1 节相同,目标运动参数见表 6. 图 3 给出多目标处理结果. 由图 3(a) 可见,原始数据距离脉压后,两个机动目标均存在严重的距离走动和弯曲现象. 图 3(b) 给出了基于频率轴反转变换的距离徙动校正结果,由图可见,本文方法有效实现了多机动目标的距离徙动校正,校正后的多个目标信号位于一个距离单元之内,交叉项扩散到不同距离单元,只需要选取目标信号所在距离单元即可. 图 3(c) 给出了广义自相关

变换与 GSCFT 处理后的二次调频率与调频率分布结果,可见,通过两维积累,目标在新的变换域中形成明显的峰值,具有良好的交叉项抑制性能.

表6 目标运动参数

运动参数	初始斜距 (km)	径向速度 (m/s)	加速度 (m/s ²)	加加速度 (m/s ³)	脉压前信噪比 (dB)
目标 1	100	600	100	80	-8
目标 2	100	400	-100	-60	-7

5.3 检测性能分析

在本节中,与典型算法进行对比,分析所提算法在加性复高斯白噪声背景下的目标检测性能. 为了便于分析,通过单目标蒙特卡洛仿真实验进行说明,雷达系

统参数与目标运动参数分别见表 3 与表 4. 虚警率 P_{fa} 设为 10^{-6} , 令输入信噪比 SNR (脉压前) 变化范围为

-20dB到 15dB, 步长为 5dB, 每一个信噪比进行 200 次蒙特卡洛实验.

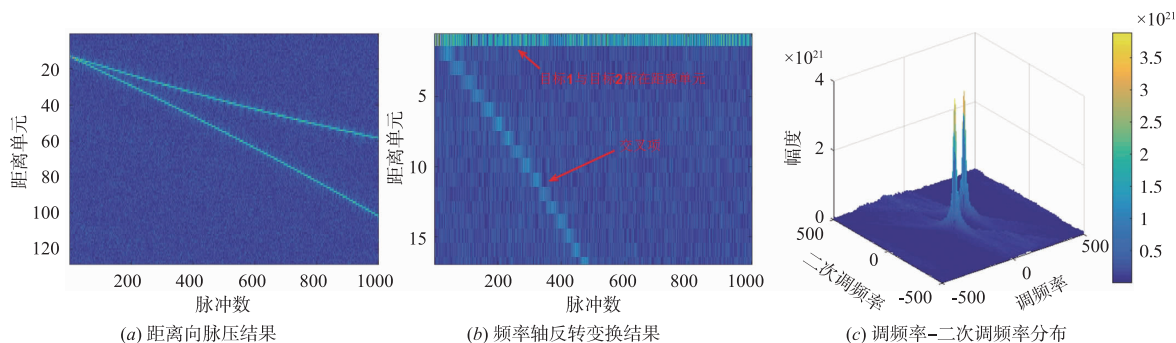


图3 多目标积累结果

图 4 为所提算法与 GRFT, 两维频域匹配滤波算法, Keystone, RFT 的检测概率随着输入信噪比 SNR 的变化结果. 仿真结果表明, RFT 与 Keystone 算法虽然有效消除了距离走动, 但是却不能解决加速度与加加速度导致的距离弯曲与多普勒扩散, 因此两者的检测性能较差. 两维频域匹配滤波算法能够有效估计出目标加速度, 补偿目标加速度产生的影响, 因此检测性能相对于 RFT 与 Keystone 算法有所提升. GRFT 算法通过对目标速度、加速度和加加速度搜索估计, 能够在低信噪比条件下实现参数最优匹配, 性能最佳; 然而参数搜索过程计算复杂度高, 耗时太长, 不利于工程实现. 本文所提算法通过非线性变换进行距离徙动校正与目标参数估计, 所以存在 SNR 损失, 抗噪声性能劣于 GRFT 算法, 适用于高信噪比条件下的机动目标检测; 但是本文计算复杂度极低, 不需要任何的参数搜索过程, 相同信噪比条件下, 检测性能明显优于 RFT、Keystone 和两维频域匹配滤波算法, 在检测性能与计算复杂度之间达到平衡.

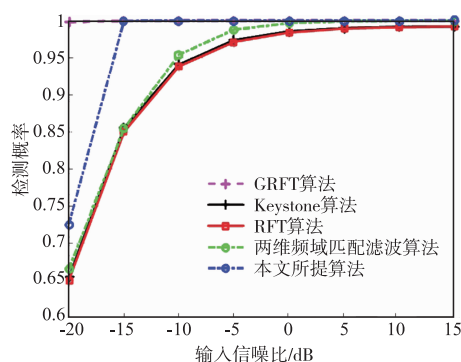


图4 检测概率

6 结束语

机动目标回波信号在脉冲积累时间内发生的距离徙动和多普勒扩散现象, 制约着雷达对运动目标的检

测性能. 本文讨论一种基于频率轴反转变换和广义自相关变换的运动目标检测方法. 本文算法优点如下: 通过频率轴反转变换可以快速有效地消除距离徙动, 实现距离频率与任意阶次慢时间的完全解耦合; 通过广义自相关变换与广义变尺度傅里叶变换可有效降低多项式信号阶数与抑制交叉项; 由于不需要对目标运动参数进行搜索估计, 因此本文算法运算复杂度较低, 便于工程实现. 理论分析和仿真实验证明本文方法的有效性.

参考文献

- [1] ZHU S Q, LIAO G S, YANG D, et al. A new method for radar high-speed maneuvering weak target detection and imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2014, 11(7): 1175 - 1179.
- [2] WANG D H, LIN C Y, et al. Long-time coherent integration method for high-speed target detection using frequency agile radar [J]. Electronics Letters, 2016, 52(11): 960 - 962.
- [3] ZHENG J B, SU T, LIU H W, et al. Radar high-speed target detection based on the frequency-domain deramp-keystone transform [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(1): 285 - 294.
- [4] ZHENG J B, SU T, ZHU W T, 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.
- [5] HUANG P H, LIAO G S, YANG Z W, et al. Long-time coherent integration for weak maneuvering target detection and high-order motion parameter estimation based on keystone transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(15): 4013 - 4026.
- [6] KONG L J, LI X L, CUI G L, et al. Coherent integration algorithm for a maneuvering target with high-order range

- migration [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(17):4474–4486.
- [7] PERRY R P, DIPIETRO R C, and FANTE R L. SAR imaging of moving targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1):188–200.
- [8] LI G, XIA X G, and PENG Y N. Doppler keystone transform: an approach suitable for parallel implementation of SAR moving target imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4):573–577.
- [9] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-Fourier transform (RFT) for radar target detection (I): Generalized Doppler filter bank processing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2):1186–1202.
- [10] XU J, YU J, PENG Y N, et al. Radon-Fourier transform for radar target detection (II): Blind speed sidelobe suppression [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4):2473–2489.
- [11] CHEN X L, GUAN J, LIU N B, 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.
- [12] CHEN X L, GUAN J, LIU N B, et al. Detection of a low observable sea-surface target with micromotion via the Radon-linear canonical transform [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(7):1225–1229.
- [13] LI X L, CUI G L, YI W, et al. Coherent integration for maneuvering target detection based on Radon-Lv's distribution [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(9):1467–1471.
- [14] CHEN V C, QIAN S. Joint time-frequency transform for radar range-Doppler imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2):486–499.
- [15] XIA X G. On bandlimited signals with fractional Fourier transform [J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, 3(3):72–74.
- [16] SUN H B, LIU G S, GU H, et al. Application of the fractional Fourier transform to moving target detection in airborne SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4):1416–1424.
- [17] WANG Y, JIANG Y C. ISAR imaging of a ship target using product high-order matched-phase transform [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4):658–661.
- [18] XIA X G. Dynamic range of the detection parameters for polynomial phase signals using multiple-lag diversities in high-order ambiguity functions [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(4):1378–1384.
- [19] DJUROVIĆ I, SIMEUNOVIC M, DJUKANOVIC S, et al. A hybrid CPF-HAF estimation of polynomial-phase signals: detailed statistical analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(10):5010–5023.
- [20] ZHENG J B, LIU H W, LIAO G S, et al. ISAR imaging of targets with complex motions based on a noise-resistant parameter estimation algorithm without nonuniform axis [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8):2509–2518.
- [21] XU J, XIA X G, PENG Y N, et al. Radar maneuvering target motion estimation based on generalized Radon-Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12):6190–6201.

作者简介



贺雄鹏 男, 1992年11月生于陕西榆林, 博士研究生, 主要研究方向为运动目标检测与参数估计、阵列信号处理和天基预警。
E-mail: xidian_hexp@163.com



廖桂生 男, 1963年6月生于广西桂林。现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 长江学者特聘教授。先后主持和承担国防973项目课题、国家“863”高新技术项目、国防科技预研、国家自然科学基金重点基金等十余项科研任务。现主要从事雷达探测系统信号处理, 包括空时自适应处理、天基预警和阵列信号处

理等研究领域。

E-mail: gsliao@xidian.edu.cn



许京伟 男, 1987年5月生于山东日照。现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室博士后, 主要研究方向为空时自适应处理, 频率分集阵列信号处理等。
E-mail: xujingwei1987@163.com



魏嘉琪 女, 1994年8月生于陕西西安, 博士研究生, 主要研究方向为 ISAR 成像和目标识别。
E-mail: 2638223737@qq.com