

DOI: 10.7652/xjtuxb201908016

采用长时间相参积累技术的高速机动目标检测快速算法

黄响, 张林让, 唐世阳

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对雷达接收的高速机动目标回波能量较弱的问题,提出一种采用长时间相参积累技术的高速机动目标检测快速算法。首先,利用慢时间反转变换对速度和加加速度引起的三阶距离徙动和多普勒徙动进行同时校正;其次,根据搜索的加速度构造二次相位补偿函数,以校正加速度引起的二阶距离徙动和多普勒徙动,并实现目标能量的相参积累;最后,利用恒虚警技术对相参积累结果进行处理,以确定目标是否存在。与无需运动参数搜索的时间反转变换-二阶楔石变换-吕氏分布(TRT-SKT-LVD)算法相比,该算法简化了操作流程,避免了因插值运算造成的性能损失,且不受雷达回波冗余信息和运动参数估计范围的限制。仿真结果表明,与基于多维运动参数搜索的雷顿-分数阶模糊函数(RFRAF)和广义楔石变换-广义去调频(GKT-GDP)算法相比,该算法由于仅需对加速度参数进行搜索,因此计算复杂度降低近 2 个数量级,运算时间仅为原来的 1/100。

关键词: 目标检测;相参积累;距离徙动;多普勒徙动

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)08-0121-08

A Fast Detection Algorithm for High-Speed Maneuvering Targets Based on Long-Time Integration

HUANG Xiang, ZHANG Linrang, TANG Shiyang

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

Abstract: A new fast detection algorithm for high-speed maneuvering target utilizing the long-time coherent integration technique is proposed to solve the problem that the energy of radar echoes is weak for high-speed maneuvering targets. First, the slow time reversing transform is utilized to correct both the third-order range migration (RM) and Doppler frequency migration (DFM) induced by velocity and jerk. Then, a quadratic phase compensation function based on the searching acceleration is constructed to correct the second-order RM and linear DFM caused by the acceleration and to realize the coherent integration of the target's energy. Finally, the constant false alarm technique is used to determine whether there exists a target. Compared with the method of time reversing transform, second-order Keystone transform and Lv's distribution (TRT-SKT-LVD), the proposed method simplifies the operational processes and avoids the performance loss induced by the interpolation. Furthermore, the proposed method is not restricted by the redundant information of radar echo and the estimation range of motion parameters. Simulation results and comparisons with the Radon-fractional ambiguity function

(RFRAF) method and the generalized Keystone transform-generalized Dechirp process (GKT-GDP) method based on multi-dimensional motion parameter search show that the proposed method reduces the computational complexity by nearly two orders of magnitude because of the only search of acceleration, and the computation time is only one percent of the original.

Keywords: target detection; coherent integration; range migration; Doppler frequency migration

随着科学技术的不断发展,越来越多的高速目标出现在雷达探测领域^[1-3]。这些目标具有高超音速、强机动性和小雷达散射截面积等典型特点,如美国的 SR-71 战略侦察机可以实现马赫数为 3 的高速飞行;以 X-43A 为代表的高超飞行器加速度可以达到 $10g$ 。传统的雷达检测方法面临着距离徙动和多普勒徙动等重大挑战,尤其是强机动性下多普勒徙动的复杂表现形式加剧了目标检测的难度。如何针对上述问题实现高速机动目标的快速检测,是当前雷达探测领域亟需解决的问题^[4-5]。

在目前的高速目标检测算法中,楔石变换(KT)^[6-7]和雷顿-傅里叶变换(RFT)算法^[8-10]最为成熟。它们均能在低信噪比下实现线性距离徙动的校正和目标能量的有效积累,但无法解决因目标机动性而造成的高阶距离徙动和多普勒徙动问题,所以只局限于高速匀速目标的检测。针对匀加速运动的高速目标,许多学者在 KT 和 RFT 变换的基础上,提出了很多有效算法^[11-16],如雷顿-分数阶傅里叶变换(RFRFT)^[12]、楔石-去调频(KT-DP)^[14]和 KT-RFT^[16]等。这些算法的主要思想是将多普勒徙动的补偿转化为线性调频信号的检测和估计,但对于强机动目标,加加速度带来的影响不可忽略。

针对加加速度的运动模型,文献[17]提出的雷顿-分数阶模糊函数(RFRAF)算法可以实现距离徙动和多普勒徙动的同时校正,但它需要距离、速度、加速度、加加速度以及分数阶傅里叶变换阶数这 5 维参数空间的同时搜索,运算量巨大。文献[18]提出的广义楔石变换-广义去调频(GKT-GDP)算法可以实现距离徙动与多普勒徙动的分步校正,但仍需要加加速度、加速度及速度模糊数的参数搜索,运算量依旧很大。为了实现高速机动目标的快速检测,文献[19]首先利用时间反转变换(TRT)实现线性距离徙动与三阶距离徙动的校正,再利用二阶楔石变换(SKT)实现二阶距离徙动的校正,最后转换到距离时域利用吕氏分布(LVD)实现多普勒徙动的校正和目标能量的积累。然而,这种 TRT-SKT-LVD 算法的运算流程过于复杂,且 SKT 变换会造成性能损失,同时 LVD 也会受到冗余信息和参数

估计范围的限制^[20]。

本文在以上研究的基础上,提出一种新的基于长时间相参积累的高速机动目标快速检测算法。首先在距离频域-慢时间域利用慢时间反转变换校正线性距离徙动、三阶距离徙动和多普勒徙动,再构造距离频域-慢时间域二次相位补偿函数,并利用能量积累函数实现二阶距离徙动和多普勒徙动的同时校正,最后在距离-多普勒域实现目标能量积累。相比于 RFRAF 和 GKT-GDP 算法,本文所提算法极大地降低了运算复杂度;相比于 TRT-SKT-LVD 算法,本文算法简化了操作流程,避免了因插值运算造成的性能损失,且不受雷达回波冗余信息和运动参数估计范围的限制。

1 高速机动目标信号模型

假设脉冲多普勒雷达发射的波形为线性调频信号,则该脉冲串信号可表示为

$$S_i(t_f, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_f}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c(t_f + t_m) + j\pi\gamma t_f^2] \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 是矩形窗函数; T_p 、 f_c 和 γ 分别表示发射信号的脉冲宽度、载频和调频斜率; $t_f \in [-T_r/2, T_r/2]$ 和 $t_m \in [-T/2, T/2]$ 分别为快时间变量和慢时间变量; T_r 和 T 分别表示脉冲重复周期和相参积累时间。

假设运动场景中有 K 个带加加速度的高速机动目标,其相对雷达的运动模型如图 1 所示,其中: $R_{0,k}$ 、 $V_{0,k}$ 、 $A_{1,k}$ 和 $A_{2,k}$ ($k=1, 2, \dots, K$)分别为第 k 个目标相对于雷达的初始距离、初始速度、初始加速度以及加加速度; θ_k ($k=1, 2, \dots, K$)为第 k 个目标偏离雷达视线的角度。目标的斜距历程为

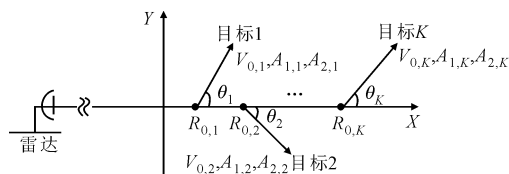


图1 高速机动目标的运动模型

$$R_k(t_m) = R_{0,k} + V_{0,k} \cos(\theta_k) t_m + \frac{1}{2} A_{1,k} \cos(\theta_k) t_m^2 + \frac{1}{6} A_{2,k} \cos(\theta_k) t_m^3 \quad (2)$$

假设在观测时间内 θ_k 不发生变化,定义 $v_{0,k} = V_{0,k} \cos(\theta_k)$, $a_{1,k} = A_{1,k} \cos(\theta_k)$ 和 $a_{2,k} = A_{2,k} \cos(\theta_k)$, 其中, $v_{0,k}$ 、 $a_{1,k}$ 和 $a_{2,k}$ 分别为第 k 个目标的初始径向速度、加速度和加加速度,则式(2)可简化为

$$R_k(t_m) = R_{0,k} + v_{0,k} t_m + \frac{1}{2} a_{1,k} t_m^2 + \frac{1}{6} a_{2,k} t_m^3 \quad (3)$$

雷达接收到的基带回波信号可表示为

$$S_r(t_f, t_m) = \sum_{k=1}^K \{ \sigma_{0,k} \text{rect}\{[t_f - R_k(t_m)/c]/T_p\} \cdot \exp[-j4\pi R_k(t_m)/\lambda] \exp[j\pi\gamma(t_f - 2R_k(t_m)/c)^2] \} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{0,k}$ 为第 k 个目标的散射系数; $\lambda = c/f_c$ 为发射信号波长; c 为光速。

对式(4)进行脉冲压缩处理可得

$$S_c(t_f, t_m) = \sum_{k=1}^K \{ \sigma_{1,k} \text{sinc}[B(t_f - 2R_k(t_m)/c)] \cdot \exp[-j4\pi R_k(t_m)/\lambda] \} \quad (5)$$

式中: B 为信号带宽; $\sigma_{1,k}$ 为第 k 个目标经过脉冲压缩处理后的复数幅度。

式(5)的 sinc 函数项表示信号包络受慢时间的影响,即便在较短的积累时间下高速运动的目标也会使信号包络发生线性距离徙动现象;在长积累时间下, $a_{1,k}$ 和 $a_{2,k}$ 也可能造成二阶及三阶距离徙动现象。同时,式(5)中的指数项表明目标的多普勒频率不再是一个定值。当 $a_{1,k}$ 和 $a_{2,k}$ 满足下式时,信号将发生二阶及三阶多普勒徙动现象

$$|2a_{1,k}T/\lambda| > \rho_d; \quad |a_{2,k}T/(2\lambda)| > \rho_d \quad (6)$$

式中: $|\cdot|$ 为绝对值运算; $\rho_d = 1/T$ 为多普勒分辨率。距离徙动和多普勒徙动现象将使目标能量扩散在不同距离及多普勒单元中,从而导致雷达检测性能的大幅下降。

2 徙动现象快速校正算法

若直接对 $S_c(t_f, t_m)$ 进行处理,需要多维运动参数的联合搜索,运算量极大^[8]。为了实现距离徙动的快速校正,首先运用快速傅里叶变换(FFT)将 $S_c(t_f, t_m)$ 变换到距离频率-慢时间域,即

$$S_c(f, t_m) = \sum_{k=1}^K \left\{ \sigma_{2,k} \text{rect}(f/B) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi(f+f_c)}{c} \left(R_{0,k} + v_{0,k} t_m + \frac{1}{2} a_{1,k} t_m^2 + \frac{1}{6} a_{2,k} t_m^3 \right) \right] \right\} \quad (7)$$

此时,距离徙动表现为距离频率 f 与慢时间 t_m 的耦合,包括速度、加速度以及加加速度等复杂形式。要同时消除这种耦合,难度极大,这里提出一种分步去除方法,主要包括时间反转变换和频域二次相位补偿两大步,以下分别进行介绍。

2.1 慢时间反转变换

在文献[21]中, M 个脉冲的慢时间序列为

$$t_m = \left\{ -\frac{T}{2}, -\frac{T}{2} + \frac{T}{M}, \dots, -\frac{T}{2} + \frac{M-1}{M}T, \frac{T}{2} \right\} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$S_c(f, t_m) = \sum_{k=1}^K \{ \sigma_{2,k} \text{rect}(f/B) \exp[-j4\pi(f+f_c)R_{0,k}/c] \cdot \exp[-j4\pi(f+f_c)v_{0,k}(-T/2, \dots, T/2)/c] \cdot \exp[-j2\pi(f+f_c)a_{1,k}(-T/2, \dots, T/2)^2/c] \cdot \exp[-j2\pi(f+f_c)a_{2,k}(-T/2, \dots, T/2)^3/3c] \} \quad (9)$$

对慢时间序列进行反转可得

$$t_{m \leftarrow} = \left\{ \frac{T}{2}, -\frac{T}{2} + \frac{M-1}{M}T, \dots, -\frac{T}{2} + \frac{T}{M}, -\frac{T}{2} \right\} \quad (10)$$

脉压信号 $S_c(f, t_m)$ 经时间序列反转后变为

$$S_c(f, t_{m \leftarrow}) = \sum_{k=1}^K \{ \sigma_{2,k} \text{rect}(f/B) \exp[-j4\pi(f+f_c)R_{0,k}/c] \cdot \exp[-j4\pi(f+f_c)v_{0,k}(T/2, \dots, -T/2)/c] \cdot \exp[-j2\pi(f+f_c)a_{1,k}(T/2, \dots, -T/2)^2/c] \cdot \exp[-j2\pi(f+f_c)a_{2,k}(T/2, \dots, -T/2)^3/3c] \} \quad (11)$$

式(9)和式(11)具有以下两个特点:①慢时间序列奇数次幂的相位项是共轭的;②慢时间序列偶数次幂的相位项是相同的。利用这两个特点,构造如下慢时间反转变换

$$S_n(f, t_m) = S_c(f, t_m) S_c(f, t_{m \leftarrow}) =$$

$$\sum_{k=1}^K \{ \sigma_{2,k}^2 \text{rect}(f/B) \exp[-j8\pi(f+f_c)R_{0,k}/c] \cdot \exp[-j4\pi(f+f_c)a_{1,k}t_m^2/c] + S_{\text{cross}}(f, t_m) \} \quad (12)$$

$$S_{\text{cross}}(f, t_m) = \sum_{p=1}^K \sum_{q=1, q \neq p}^K \{ \sigma_{2,p} \sigma_{2,q} \text{rect}(f/B) \cdot \exp[-j4\pi(f+f_c)(R_{0,p} + R_{0,q})/c] \cdot \exp[-j4\pi(f+f_c)(v_{0,p} - v_{0,q})t_m/c] \cdot \exp[-j2\pi(f+f_c)(a_{1,p} + a_{1,q})t_m^2/c] \cdot \exp[-j2\pi(f+f_c)(a_{2,p} - a_{2,q})t_m^3/3c] \} \quad (13)$$

由式(12)可知:对于单目标,经慢时间反转变换后,由速度引起的一阶距离徙动、由加加速度引起的三阶距离徙动和多普勒徙动得以完全消除,只剩下由加速度引起的二阶距离徙动和多普勒徙动需要进一步校正,但对于多目标,时间反转变换的非线性会引进交叉项。关于交叉项对多目标检测造成的影响,将在2.3节予以详细分析。

2.2 二次相位补偿函数

为了校正由加速度引起的距离徙动和多普勒徙动,文献[19]提出用SKT变换和LVD分布两步处理的方法,但该方法操作繁杂,运算量大,同时SKT变换因为插值运算会造成性能损失,LVD分布需要至少1s的冗余信息并且受到参数估计范围的限制^[20]。本文利用一步处理法即二次相位补偿函数法进行校正,其主要思想是通过构造距离频域-慢时间域的二次相位补偿函数将目标能量集中在同一变换单元中上,再利用能量积累函数估计出加速度的值。构造的二次相位补偿函数定义为

$$C(f, t_m; a_{s,k}) = \exp[j4\pi(f + f_c)a_{s,k}t_m^2/c] \quad (14)$$

式中: $a_{s,k} \in [-a_{\max}, a_{\max}]$ 为目标的搜索加速度; $a_{\max}$ 为搜索加速度的最大值。

将式(12)与式(14)相乘可得

$$S(f, t_m; a_{s,k}) = S_n(f, t_m)C(f, t_m; a_{s,k}) = \sum_{k=1}^K \{ \sigma_{2,k}^2 \text{rect}(f/B) \exp[-j8\pi(f + f_c)R_{0,k}/c] \cdot \exp[-j4\pi(f + f_c)(a_{1,k} - a_{s,k})t_m^2/c] + S_{\text{cross}}(f, t_m) \} \quad (15)$$

由于构造的频域二次相位函数为线性变换,因此不会引入交叉项。为了分析方便,接下来的分析将不再继续考虑交叉项。

沿快时间维对式(15)作快速逆傅里叶变换(IFT)得

$$S(t_f, t_m; a_{s,k}) = \sum_{k=1}^K \left\{ \sigma_{3,k} \text{sinc} \left[B \left(t_f - \frac{4R_{0,k}}{c} - \frac{2(a_{1,k} - a_{s,k})t_m^2}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (a_{1,k} - a_{s,k})t_m^2 \right] \exp \left(-j \frac{8\pi R_{0,k}}{\lambda} \right) \right\} \quad (16)$$

由式(16)可知,当搜索的加速度与目标真实的加速度相匹配时,目标能量将集中于同一个距离单元中,此时,能量积累将达到最大值。因此,可构造如下能量积累函数对加速度进行估计

$$S(t_f; a_{s,k}) = \int_{t_m} S(t_f, t_m; a_{s,k}) dt_m \quad (17)$$

目标的加速度可按下式估计

$$\hat{a}_{s,k} = \arg \max_{a_{s,k}} |S(t_f; a_{s,k})| \quad (18)$$

由式(16)可知,对加速度的估计将会影响距离徙动和多普勒徙动的补偿。假设 $\Delta a_k = a_{1,k} - a_{s,k}$,则当

$$\Delta a_k T^2/4 > \rho_r; \quad 4\Delta a_k T/\lambda > \rho_d \quad (19)$$

时,剩余的距离徙动和多普勒徙动将会使雷达的检测性能遭受损失,其中 $\rho_r = c/(2B)$ 为雷达的距离分辨率。相比于距离徙动,多普勒徙动更易发生,因此在选取 $a_{s,k}$ 的搜索间隔时,可以多普勒分辨率作为参考标准,联合大步长的粗搜索和小步长的精搜索,实现精确的加速度估计。

在获取精确的加速度估计值之后,匹配的频域二次相位补偿函数变为

$$C(f, t_m) = \exp \left[j \frac{4\pi(f + f_c)}{c} \hat{a}_{s,k} t_m^2 \right] \quad (20)$$

按式(15)对剩余的距离徙动和多普勒徙动进行补偿,并将信号变为距离-多普勒域可得

$$S(t_f, f_m) = \sum_{k=1}^K \left\{ \sigma_{4,k} \text{sinc} \left[B \left(t_f - \frac{4R_{0,k}}{c} \right) \right] \cdot \text{sinc}(Tf_m) \exp \left(-j \frac{8\pi R_{0,k}}{\lambda} \right) \right\} \quad (21)$$

在距离频率-多普勒域中,目标能量被积聚在同一个距离-多普勒单元中,且多普勒单元始终位于频率为0处。利用CFAR技术对 $S(t_f, f_m)$ 进行处理,即可完成目标的检测^[14]。

2.3 交叉项影响分析

多目标情形下,慢时间反转变换因其非线性会产生交叉项,交叉项的数学表达式如式(13)所示。由于二次相位补偿函数及后续的IFFT、FFT变换处理均为线性变换,不会再次产生交叉项,因此分析交叉项对多目标检测的影响时,可采用式(13)。由式(13)可知,交叉项对自聚焦项的影响取决于多目标的运动参数,具体表现如下。

(1)当多目标位于不同的距离单元时,信号交叉项的能量会分散在与自聚焦项不同的距离单元中,其他运动参数的差异更会使交叉项的能量进一步分散在不同的多普勒单元中,从而不会对多目标的检测造成很大影响。

(2)当多目标位于同一距离单元时,信号交叉项的能量积累受其他运动参数制约,具体有3种表现方式:①当多目标的径向速度和加加速度不完全相同时,信号的交叉项无法完全消除速度带来的线性距离徙动和加加速度造成的距离徙动及多普勒徙动,从而造成能量分散不同的多普勒单元中,对自聚

焦项的影响较小;②当多目标的径向速度和加加速度完全相同,但加速度的大小不同时,式(14)构造的二次相位补偿函数会进一步根据加速度的差异对多目标进行有效检测;③当多目标的径向速度和加加速度完全相同,加速度的大小相等,但方向相反时,交叉项能量会聚集在同一距离-多普勒单元中,影响多目标个数的判断,但此时交叉项对应二次相位补偿函数的搜索加速度为零,因此可根据加速度的值作进一步甄别,确定多目标的真实个数。

(3)当多目标之间的散射系数相差很大时,由运动参数相同而造成的交叉项对自聚焦项的影响很大,此时可以采用 CLEAN 技术进行处理^[14]。

综上分析,在一般多目标的运动场景下,时间反转变换可以有效地抑制交叉项对自聚焦项的影响,构造的二次相位补偿函数也会进一步地实现多目标的分离,从而实现多目标的检测。

3 算法实现及运算量分析

3.1 算法实现

- 本文所提算法的具体实现步骤如下。
- (1)对接收的雷达回波进行下变频、脉冲压缩并沿快时间维进行 FFT,得到回波距离频域-慢时间域数据 $S_c(f, t_m)$ 。
- (2)将 $S_c(f, t_m)$ 沿慢时间序列反转得到 $S_c(f, t_m, \leftarrow)$,构造时间反转变换 $S_n(f, t_m)$ 以校正线性距离徙动、三阶距离徙动和因加加速度造成的多普勒徙动。
- (3)根据高速机动目标的先验信息确定加速度的搜索范围 $[-a_{\max}, a_{\max}]$,搜索间隔采用变步长法,即先采用大步长确定加速度的粗估计值,再采用小步长确定加速度的精估计值。
- (4)根据加速度的搜索范围和搜索间隔构造频域二次相位补偿函数 $C(f, t_m; a_{s,k})$,利用能量积累函数,估计运动目标的加速度 $\hat{a}_{s,k}$ 。
- (5)用估计的加速度构建匹配的频域二次相位补偿函数 $C(f, t_m)$,校正由加速度引起的二阶距离徙动及多普勒徙动。

(6)将步骤(5)补偿后的信号沿距离频率维作 IFFT 变换,并沿慢时间维作 FFT 变换,得到距离-多普勒域数据 $S(t_i, f_m)$;利用恒虚警技术对 $S(t_i, f_m)$ 检测单元矩阵进行处理,以判定目标是否存在。

3.2 运算量分析

为了进一步说明本文所提算法在运算量上的优势,采用 TRT-SKT-LVD、RFRAF 和 GKT-GDP 算

法进行对比分析。假设积累的脉冲个数为 M ,距离单元数为 N ,时延采样点为 N_d ,搜索的速度数、加速度数、加加速度数和分数阶傅里叶变换的阶数分别为 N_v 、 N_a 、 N_k 和 N_o 。由于时间反转变换的复杂度为 $O(MN)$,构造频域二次相位补偿函数的计算复杂度为 $O(N_a MN \lg N)$,因此本文所提算法的计算复杂度为 $O(N_a MN \lg N)$;TRT-SKT-LVD 算法的计算复杂度为 $O(5N_d N M \lg M + N_d N M \lg N + 2M N \lg N + N M^2 + N M)$;RFRAF 算法的计算复杂度为 $O(N_v N_a N_k N_o N M \lg M)$;GKT-GDP 算法的计算复杂度约为 $O(N_a N_k N M \lg M)$ 。假设 $M = N = N_d = N_v = N_a = N_k = N_o$,则本文所提算法、TRT-SKT-LVD、RFRAF 和 GKT-GDP 算法的计算复杂度分别为 $O(N^3 \lg N)$ 、 $O(6N^3 \lg N)$ 、 $O(N^6 \lg N)$ 和 $O(N^4 \lg N)$ 。这充分证明了本文所提算法具有较高的运算效率。

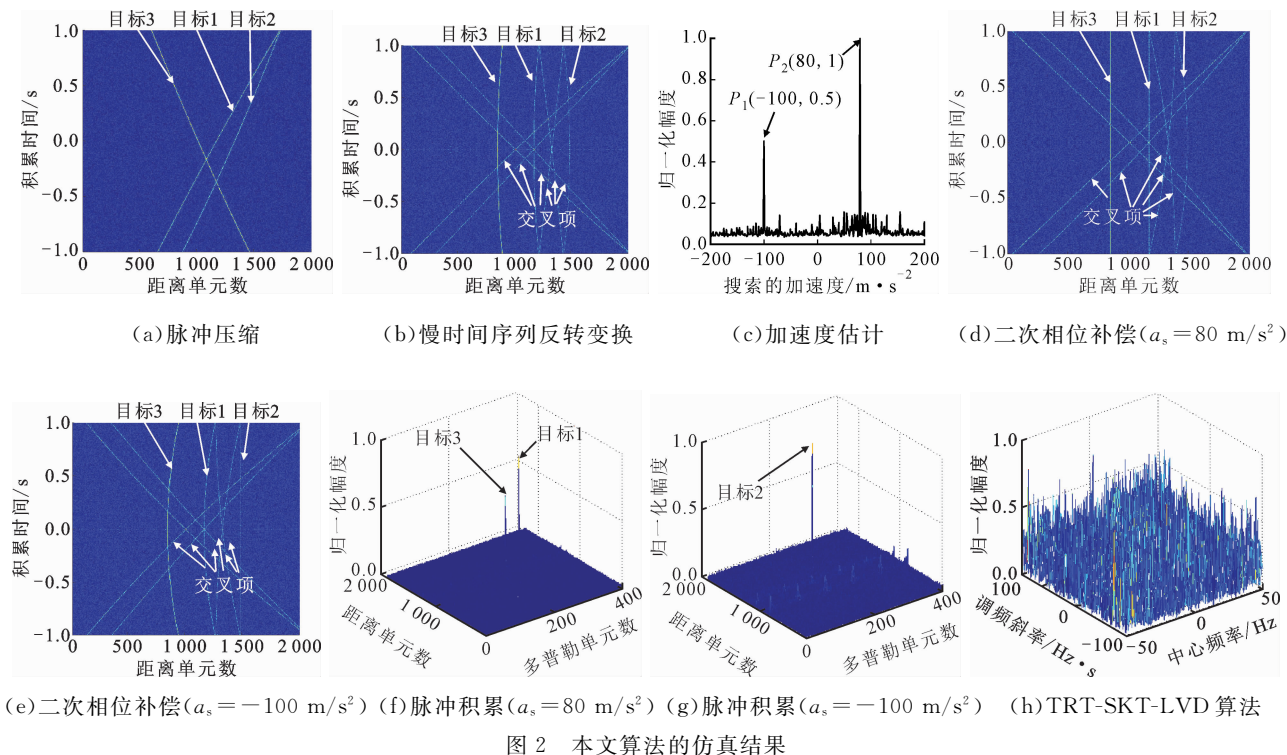
4 仿真实验及分析

雷达系统参数设定为:载频 $f_c = 10\text{ GHz}$,带宽 $B = 20\text{ MHz}$,脉冲宽度 $T_p = 10\text{ }\mu\text{s}$,脉冲重复频率 $f_r = 200\text{ Hz}$,采样频率 $f_s = 80\text{ MHz}$,脉冲积累个数 $M = 401$ 。

实验 1 验证本文所提算法的仿真性能。仿真场景中有 3 个运动目标,它们的运动参数设置如表 1 所示。本文算法的仿真结果如图 2 所示。图 2a 中的脉冲压缩结果表明,由于运动目标的高速强机动性,目标脉冲压缩后的能量不再积聚在同一个距离单元中,会出现严重的距离徙动现象。图 2b 显示了慢时间反转变换后信号在距离时域-慢时间域的仿真结果,它表明慢时间反转变换会使目标信号的线性和三阶距离徙动得以补偿,只剩下因加速度引起的二阶距离徙动项;同时慢时间反转变换会引入交叉项,但交叉项的线性和三阶距离徙动却无法得以完全补偿。图 2c 为利用能量积累函数估计的加速度结果,从图中可以看出,这种方法能实现加速度的准确估计。图 2d~图 2e 表明经频域二次相位补偿后,目标的二阶距离徙动得到有效补偿,目标的能量位于

表 1 多目标运动参数表

目标	初始距离 /km	速度 /m·s ⁻¹	加速度 /m·s ⁻²	加加速度 /m·s ⁻³	信噪比 /dB
1	250.0	1 000	80	30	-5
2	250.3	800	-100	36	-6
3	249.7	-800	80	-30	-3



同一距离单元中,但交叉项的能量却依旧分散在不同的距离单元中,从而证明了构造的二次相位补偿函数可以进一步抑制交叉项的影响。图 2f~图 2g 显示了各个目标在距离-多普勒域的脉冲积累结果。从图 2 中可以看出,目标能量积聚在同一个距离-多普勒单元中,形成峰值,而交叉项的能量却分散在不同的距离-多普勒单元中,从而证明本文算法可以有效地抑制交叉项的影响,实现多目标的检测。图 2h 显示了 TRT-SKT-LVD 算法的积累结果。由于 LVD 分布在此场景下失效,所以此方法无法实现目标能量的有效积累和目标的进一步检测。

实验 2 与其他方法运算时间的对比。仿真目标的运动参数与实验 1 中的目标 1 相同,计算机主要配置为 CPU: Intel Core i7-4970 3.6 GHz; RAM: 8 GB; 操作系统: Windows 7; 运行软件: Matlab R2012b。表 2 显示了本文所提算法与 RFRAF、GKT-GDP、TRT-SKT-LVD 算法的运算时间对比结果。由表 2 可见: 由于 RFRAF 算法需要 5 维运动参数的同时搜索,因此消耗的运算时间巨大; GKT-GDP 算法也是一种三维运动参数搜索过程,需要花费的时间也很大; 虽然 TRT-SKT-LVD 算法不需要运动参数的搜索,但需要对每个距离单元进行 LVD,消耗的时间也处于百秒级; 与上述 3 种方法相比,本文所提算法的运算时间处于秒级,运算时间大大缩短,更加利于工程上的实时应用。

表 2 4 种算法的运算时间比较

算法	运算时间/s
RFRAF	91 500.24
GKT-GDP	870.57
TRT-SKT-LVD	178.25
本文	2.72

实验 3 与其他方法检测性能的对比。仿真目标的运动参数与实验 1 中的目标 1 相同,虚警概率为 10^{-4} ,脉压后的信噪比区间为 $[-10\ 20]$ dB,选取 RFRAF、GKT-GDP 和 KT-DP 算法作为对比,对每一个信噪比下的算法进行 500 次蒙特卡罗试验,得到的检测性能曲线如图 3 所示。由图 3 可见,相比于 KT-DP 算法,本文所提算法能够有效地补偿加速度带来的三阶距离徙动和多普勒徙动,具有更优的检测性能。由于 GKT-GDP 算法需要 3 次 KT

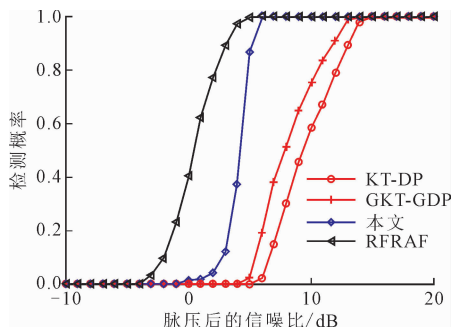


图 3 4 种算法的检测性能曲线

变换,会造成严重的性能损失。同时,它涉及多步运动参数的估计,有较高的信噪比要求。所以本文所提算法的检测性能要优于 GKT-GDP 算法。由于 RFRAF 算法是基于运算参数的联合搜索,因此它的检测概率随信噪比的变化要缓于本文所提的算法,具有更强的抗噪性,但由实验 2 可知,RFRAF 算法消耗的运算时间要远远大于本文所提算法。

5 结 论

高速机动目标在长相参积累时间内会发生复杂的距离徙动和多普勒徙动现象。针对该问题,本文提出一种快速校正算法。与现有算法相比,本文算法具有以下优点:①能够同时补偿因速度、加速度和加加速度造成的复杂距离徙动和多普勒徙动,适用的范围更广泛;②只需对加速度进行搜索,运算复杂度大大降低;③对多目标产生的交叉项能够有效抑制,可实现多个目标的检测;④多普勒模糊问题对于目标检测没有影响。需要注意的是,时间反转变换是非线性运算,对回波信噪比有一定的要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HUANG Xiang, TANG Shiyang, ZHANG Linrang, et al. Low-observable maneuvering target detection based on Radon-advanced discrete chirp Fourier transform [C]//2017 IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 0735-0738.
- [3] 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.
- [4] HUANG Penghui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, 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.
- [5] 章建成, 苏涛. 一种新的窄带雷达高速机动多目标检测算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(2): 21-27.

rithm for high-speed maneuvering multi-target with narrow-band radar [J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(2): 21-27.

- [6] ZHANG Shunsheng, ZENG Tao, LONG Teng, et al. Dim target detection based on keystone transform [C]//2005 IEEE Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 889-894.
- [7] YUAN Shijie, WU Tao, MAO Mao, et al. Application research of keystone transform in weak high-speed target detection in low-PRF narrowband chirp radar [C]//9th International Conference on Signal Process. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2452-2456.
- [8] 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.
- [9] XU Jia, YU Ji, PENG Yingning, 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.
- [10] YU Ji, XU Jia, PENG Yingning, et al. Radon-Fourier transform for radar target detection: III optimality and fast implementations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2): 991-1004.
- [11] 郑纪彬, 符渭波, 苏涛, 等. 一种新的高速多目标检测及参数估计方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(2): 82-88.

ZHENG Jibin, FU Weibo, SU Tao, et al. Novel detection and parameters estimation of a high-speed multi-target [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(2): 82-88.

- [12] 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.
- [13] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, et al. Coherent integration for maneuvering target detection based on Radon Lv's distribution [J]. IEEE Signal Processing Letter, 2015, 22(9): 1467-1471.
- [14] SU Junhai, XING Mengdao, WANG Genyuan, et al. High-speed multi-target detection with narrowband radar [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2010, 4(4): 595-603.
- [15] 陈小龙, 刘宁波, 王国庆, 等. 基于 Radon-分数阶傅

- 里叶变换的雷达动目标检测方法 [J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1074-1080.
- CHENG Xiaolong, LIU Ningbo, WANG Guoqing, et al. Radar detection method for moving target based on Radon-fractional Fourier transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1074-1080.
- [16] TIAN Jing, CUI Wei, SHEN Qing, et al. High-speed maneuvering target detection approach based on joint RFT and keystone transform [J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(6): 1-13.
- [17] CHEN Xiaolong, HUANG Yong, LIU Ningbo, et al. Radon-fractional ambiguity function based detection method of low-observable maneuvering target [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(2): 815-833.
- [18] KONG Lingjiang, LI Xiaolong, CUI Guolong, 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.
- [19] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, et al. Fast coherent integration for maneuvering target with high-order range migration via TRT-SKT-LVD [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(6): 2803-2814.
- [20] TIAN Jing, CUI Wei, XIA Xianggen, et al. A new motion parameter estimation algorithm based on SDFC-LVT [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(5): 2331-2346.
- [21] HUANG Penghui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, et al. An approach for refocusing of ground moving target without target motion parameter estimation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1): 336-350.

(编辑 刘杨)

(上接第 120 页)

- [15] YAO R, CHEN Y, LI G, et al. Iterative threshold algorithm for narrow-band interference suppression [C] // 22nd Wireless and Optical Communication Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2013: 252-256.
- [16] KIM I H, PANDE T. SINR analysis of a narrowband interference cancellation scheme in OFDM communication systems [C] // 58th IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2015: 7417627.
- [17] PANDE T, KIM I H, BATRA A. A method for narrowband interference mitigation in OFDM by minimizing spectral leakage [C] // 2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2015: 19-23.
- [18] 郝黎宏, 刘伟. 一种改进的单音干扰下 OFDM 系统盲信道估计算法 [J]. 电讯技术, 2013, 53(4): 498-503.
- HAO Lihong, LIU Wei. An improved blind channel estimation method for OFDM systems with signal tone interference [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(4): 498-503.
- [19] 毕晓君, 夏晓蕾. 基于自适应匹配追踪的 MIMO-OFDM 窄带干扰检测 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(9): 1287-1291.
- BI Xiaojun, XIA Xiaolei. Narrow band interference detection for MIMO-OFDM systems based on sparsity adaptive matching pursuit [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(9): 1287-1291.
- [20] AL-TOUS H, BARHUMI I, AL-DHAHIR N. Narrow-band interference mitigation using compressive sensing for AF-OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 6146-6159.
- [21] ELGENEDY M, AWADIN M M, HAMILA R, et al. Sparsity-based joint NBI and impulse noise mitigation in hybrid PLC-wireless transmissions [J]. IEEE Access, 2018, 6: 30280-30295.

(编辑 刘杨)

(上接第 39 页)

- [20] 邓飞跃, 强亚文, 杨绍普, 等. 一种自适应频率窗经验小波变换的滚动轴承故障诊断方法 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(8): 22-29.
- DENG Feiyue, QIANG Yawen, YANG Shaopu, et al. A fault diagnosis method of rolling element bearings with adaptive frequency window empirical wavelet transform [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(8): 22-29.

(编辑 武红江)