

一种新的高速多目标快速参数化检测算法

郑纪彬* 朱文涛 苏涛 何学辉

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对线性调频脉冲压缩雷达参数化检测高速多目标时受到距离徙动、多普勒扩散和速度模糊的影响, 该文首先采用联合频域变标脉冲压缩处理与吕方法(LvM, 2011)实现目标信号的相参积累, 然后在其基础上采用基于多普勒频率模糊数搜索的方法完成高速多目标的参数化检测。算法所提出的频域变标脉冲压缩处理可同步完成距离维的徙动补偿与多普勒维的模糊数补偿, 降低了实现目标参数化检测的计算复杂度, 且由于算法采用相参积累方式, 在低信噪比下可以进行精确的目标检测和运动参数估计。相参积累算法运算量分析、计算机仿真以及实测数据处理结果验证了该文所提算法的有效性。

关键词: 目标检测; 运动参数估计; 频域变标脉冲压缩处理; 吕方法; 相参积累

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0381-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00843

Novel Algorithm for Fast Parametric Detection of High-speed Multi-target

Zheng Ji-bin Zhu Wen-tao Su Tao He Xue-hui

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

Abstract: Detecting high-speed multi-target is affected by range migration, Doppler spread and velocity ambiguity in the linear frequency modulation pulse compression radar. In order to solve these problems, the joint frequency-domain scaling pulse compression processing and Lv's Method (LvM, 2011) is utilized to realize coherent integration of target signal firstly. And then, parametric detection for high-speed multi-target is completed with Doppler frequency ambiguity searching based method. The computational load of target parametric detection is reduced by the proposed frequency-domain scaling pulse compression processing, which can compensate range migration and Doppler frequency ambiguity simultaneously. The performance of the target detection and moving parameters estimation is improved owing to the utilization of the coherent integration in low signal-to-noise ratio. With the computational load analysis, computer simulation and raw radar data results, the validity of the proposed algorithm is demonstrated.

Key words: Target detection; Moving parameters estimation; Frequency-domain scaling pulse compression processing; Lv's Method (LvM); Coherent integration

1 引言

现代雷达通过信号长时间积累检测低可观测目标, 积累时间达到秒级或更长, 然而长时间信号积累用于高速、多目标的检测和运动参数的估计会受到距离徙动、多普勒扩散以及速度模糊的影响^[1], 因此, 研究高效的长时间信号积累算法, 对现代战争的胜利起到重要作用。基于非相参积累方式, PHT (Parallel Hough Transform) 算法^[2]利用叠加原理实现雷达回波信号的快速积累, 然而算法不适用于存在加速度的目标, 且受信噪比影响大。文献[3-5]提出基于相参积累的 Radon-Fourier 变换算法, 但是对目标多普勒扩散的严格限制条件导致算法不适用

于存在加速度的目标。针对多普勒扩散影响目标参数化检测的问题, 文献[6]提出 SPFRFT (Scaling Processing and FRactional Fourier Transform) 算法, 其适用于存在距离徙动及多普勒扩散的情况, 然而算法的目标运动参数估计性能有限。文献[7,8]基于 SKWT (Stretch Keystone-Wigner Transform) 算法对目标运动参数进行精确估计, 算法涉及到距离徙动、速度模糊及多普勒扩散问题, 但是算法的应用受制于高计算复杂度、基于搜索方式的双线性变换以及信号的非相参积累方式。考虑算法计算复杂度及运动参数估计效果, 文献[9]提出了基于非线性最小熵准则的运动参数精确估计算法, 但是算法基于最小熵准则受信噪比影响大, 不适用于多目标检测及同一距离频域单元存在多目标的情况。在文献[9]的基础上, 文献[10]提出了利用 Keystone 变换、多普勒频率模糊数搜索结合解线频调的方式进行目

2012-07-02 收到, 2012-09-03 改回

国家自然科学基金(61001204)资助课题

*通信作者: 郑纪彬 jibin_zheng@sina.cn

标参数化检测, 该算法适用于多目标情况, 但是多普勒频率模糊数估计采用的是非相参处理方式, 在低信噪比条件下无法完成目标信号的检测和运动参数估计, 因而会影响到该算法的性能。

高速目标距离徙动校正后得到慢时间维LFM信号, 时频分析方法是目前LFM信号参数估计的主流算法, 如: RWT (Radon-Wigner Transform) [11], SKWT^[7,8], DCFT (Discrete Chirp-Fourier Transform)^[12], FRFT (FRactional Fourier Transform)^[6], 其中RWT算法的双线性特点导致其计算复杂度较高且受信噪比影响大, SKWT算法利用Keystone变换对WVD (Wigner-Ville Distribution)进行改进, 通过加权因子搜索抑制交叉项, 相比RWT算法, 其抗噪声性能有所提高。DCFT算法和FRFT算法均为线性算法, 且参数估计性能高。上述时频分析方法共同特点——仅是LFM信号参数估计的搜索过程, 算法不能直接代表LFM信号^[13]。相比之下, 时频分析方法——吕方法^[13]无需参数搜索操作, 参数估计精度高, 抗噪声性能与DCFT算法及FRFT算法性能相近, 可唯一代表LFM信号, 且在高载频雷达信号处理中, 吕方法运算量小于上述时频分析方法。

针对以上分析, 该文提出一种基于吕方法的高速多目标快速参数化检测算法。在多目标及存在距离徙动、多普勒扩散和速度模糊的情况下, 算法首先采用联合频域变标脉冲压缩处理与吕方法实现目标信号能量的相参积累, 然后在其基础上采用基于多普勒频率模糊数搜索的方法完成高速多目标的参数化检测。相参积累算法运算量分析及计算机仿真验证了本文所提算法在计算复杂度和目标参数化检测性能方面的优越性, 并通过实测数据处理结果证明了本文算法的工程实用性。

2 高速多目标信号模型

假设脉冲多普勒(PD)雷达发射的第 m 个线性调频脉冲信号的基带形式如下:

$$x(\hat{t}, t_m) = \text{rect}[\hat{t}/T_p] \exp[j\pi\gamma\hat{t}^2] \quad (1)$$

其中 $\text{rect}[x] = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & |x| > 1/2 \end{cases}$, \hat{t} 是发射脉冲的时间变量, 为快时间; m 是发射脉冲序列索引, t_m 为慢时间; T_p 表示发射脉冲宽度; γ 为调频斜率。

假设目标相对于雷达的位置关系以及运动情况如图1所示, Y 轴指向为雷达径向方向, 目标相对于雷达初始距离 $R_{01}, R_{02}, \dots, R_{0i}$, 以偏离径向方向 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i$, 初始速度 $v'_{01}, v'_{02}, \dots, v'_{0i}$ 以及加速度 a'_1, a'_2, \dots, a'_i 做匀加速直线运动, 在慢时间 t_m 时刻沿 Y

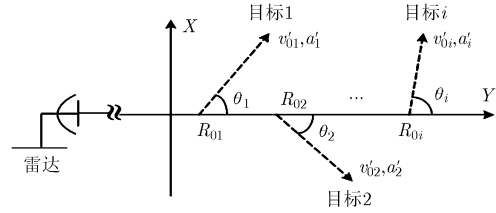


图1 目标相对于雷达的位置关系及运动情况

轴方向相对于雷达的距离为 $R_1(t_m), R_2(t_m), \dots, R_i(t_m)$, 那么根据直角三角形以及矢量的性质可得

$$R_i(t_m) = R_{0i} + v'_{0i} \cos(\theta_i) t_m + \frac{1}{2} a'_i \cos(\theta_i) t_m^2 \quad (2)$$

由以上分析可以得到基带回波信号对应的频域表示:

$$\begin{aligned} S(f, t_m) = & \sum_i A_i \text{rect}\left[\frac{f}{\gamma T_p}\right] \exp\left[-j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f \frac{2R_{0i}}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f \left(\frac{2v'_{0i} t_m}{c} + \frac{a'_i t_m^2}{c}\right)\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2R_{0i}}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2v'_{0i} t_m}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{a'_i t_m^2}{c}\right] + n(f, t_m) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $v_{0i} = v'_{0i} \cos(\theta_i)$ 为目标的映射径向初始速度; $a_i = a'_i \cos(\theta_i)$ 为目标的映射径向加速度; A_i 为第 i 个目标的回波幅度; f_c 为雷达载频; $n(\hat{t}, t_m)$ 为加性高斯白噪声; 第 3 个指数项表示目标由于速度和加速度产生的距离徙动; 第 6 个指数项表示目标恒定加速度导致的多普勒扩散。整个积累时间内由加速度引起的包络变化远小于距离分辨率, 因此加速度引起的距离徙动可以忽略不计^[6], 则式(3)频域信号近似式可表示为

$$\begin{aligned} S'(f, t_m) = & \sum_i A_i \text{rect}\left[\frac{f}{\gamma T_p}\right] \exp\left[-j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f \frac{2R_{0i}}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f \frac{2v'_{0i} t_m}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2R_{0i}}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2v'_{0i} t_m}{c}\right] \\ & \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{a'_i t_m^2}{c}\right] + n(f, t_m) \end{aligned} \quad (4)$$

3 高速多目标快速检测及运动参数精确估计

3.1 基于相参积累的联合频域变标脉冲压缩处理与吕方法快速检测方法

根据式(4)的基带回波信号频域表示形式, 定义

频域变标脉冲压缩处理公式为

$$H(f, t_m, \hat{v}) = \text{rect}\left[\frac{f}{\gamma T_p}\right] \exp\left[-j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f \frac{2\hat{v}}{c} t_m\right] \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2\hat{v}}{c} t_m\right] \quad (5)$$

其中 \hat{v} 是为实现频域变标脉冲压缩处理而假定的一个目标速度。

利用式(5)对基带回波信号做频域变标脉冲压缩处理，并转换到时域可以得到

$$s_{rm}(\hat{t}, \hat{v}, t_m) = \sum_i A_i B \text{sinc}\left[B\left(\hat{t} - \frac{2R_{0i} + 2(v_{0i} - \hat{v})t_m}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2R_{0i}}{c}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})t_m}{c}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{a_i t_m^2}{c}\right] + n(\hat{t}, \hat{v}, t_m) \quad (6)$$

式(6)中目标信号的距离维徙动与多普勒维模糊数均同时得到补偿，其中 $\text{sinc}(a) = \sin(\pi a) / \pi a$ ，可见只要 $v_{0i} - \hat{v} = 0$ ，目标距离徙动便可被补偿掉。由 PD 雷达的设计原则可知：若相参积累时间内目标距离徙动不超过半个距离单元，距离徙动可以忽略。例如，雷达发射信号载频 $f_c = 10$ GHz，带宽 $B = 4$ MHz，视频采样率 $f_s = 5$ MHz，脉宽 $T_p = 80$ μ s，脉冲重复频率 $\text{prf} = 1000$ Hz，脉冲积累数 $m = 200$ ，距离 $r = 106$ km，目标速度 $v = 861$ m/s，加速度 $a = 30$ m/s²，仅考虑频域变标脉冲压缩处理，则目标距离徙动不超过半个距离单元的最大目标速度为 93.75 m/s，此时 \hat{v} 取值可设定为 [0 m/s, 180 m/s, ..., 720 m/s, 900 m/s]。

式(6)信号中存在多普勒扩散项，仍会引起相参积累损失，因此还需要进行多普勒扩散补偿处理。利用吕方法能够对线性调频信号进行能量聚集、抗噪声性能高、计算量小以及估计精度高的优势^[13]，对 $s_{rm}(\hat{t}, \hat{v}, t_m)$ 的每个距离单元进行吕方法操作。为方便表示，只考虑 $s_{rm}(\hat{t}, \hat{v}, t_m)$ 慢时间维多分量 LFM 信号：

$$s'_{rm}(\hat{v}, t_m) = \sum_i Y_i \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})t_m}{c}\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{a_i t_m^2}{c}\right] + n(\hat{v}, t_m) \quad (7)$$

其中 Y_i 为 LFM 信号幅度值。多分量 LFM 信号 $s'_{rm}(\hat{v}, t_m)$ 的瞬时自相关函数 $R'_{s_{rm}}(\hat{v}, t_m, \tau, a)$ 为

$$R'_{s_{rm}}(\hat{v}, t_m, \tau, a) = \sum_i Y_i^2 \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})}{c}(\tau + a)\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2a_i}{c} t_m(\tau + a)\right] + \sum_i \sum_{j, j \neq i} R'_{s_{rm}i s_{rm}j}(\hat{v}, t_m, \tau, a) + n(\hat{v}, t_m, \tau, a) \quad (8)$$

其中 τ 为瞬时自相关函数延迟值； a 为吕方法中的固定延迟值； $\sum_i \sum_{j, j \neq i} R'_{s_{rm}i s_{rm}j}(\hat{v}, t_m, \tau, a)$ 为瞬时自相关函数信号交叉项^[13]； $n(\hat{v}, t_m, \tau, a)$ 为瞬时自相关函数噪声项。

对瞬时自相关函数 $R'_{s_{rm}}(\hat{v}, t_m, \tau, a)$ 进行 Keystone 变换，令 $t_m = t_n / [h(\tau + a)]$ ：

$$K'_{s_{rm}}(\hat{v}, t_n, \tau, a, h) = \sum_i Y_i^2 \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})}{c}(\tau + a)\right] \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2a_i}{hc} t_n\right] + \sum_i \sum_{j, j \neq i} R'_{s_{rm}i s_{rm}j}(\hat{v}, t_n, \tau, a, h) + n(\hat{v}, t_n, \tau, a, h) \quad (9)$$

其中 h 为 Keystone 尺度变换值，保证加速度 a_i 无模糊估计，其取值需满足 $ah = 1$ 。对信号 $K'_{s_{rm}}(\hat{t}, \hat{v}, t_n, \tau, a, h)$ 中 t_n 维和 τ 维分别进行快速傅里叶变换操作：

$$F'_{s_{rm}}(\hat{v}, f_{t_n}, f_{\tau}, a, h) = \sum_i Y_i^2 \delta\left(f_{t_n} + f_c \frac{2a_i}{hc}\right) \delta\left(f_{\tau} + f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})}{c}\right) \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})}{c} a\right] + \sum_i \sum_{j, j \neq i} F'_{s_{rm}i s_{rm}j}(\hat{v}, f_{t_n}, f_{\tau}, a, h) + F_n(\hat{v}, f_{t_n}, f_{\tau}, a, h) \quad (10)$$

式(10)中 $\sum_i \sum_{j, j \neq i} F'_{s_{rm}i s_{rm}j}(\hat{t}, \hat{v}, f_{t_n}, f_{\tau}, a, h)$ 能量呈余弦振荡式分布，对信号检测及参数估计影响较小^[13]， f_{t_n} 维目标信号能量集中于频率点 $f'_{t_n} = -f_c[2(v_{0i} - \hat{v})/c]$ ， f_{τ} 维目标信号能量集中于频率点 $f'_{\tau} = -f_c[2a_i/(hc)]$ 。

联合频域变标脉冲压缩处理与吕方法快速参数化检测方法中的速度补偿取值分辨率较低，对于低重复频率雷达发射信号，将导致 f_{t_n} 维欠采样。根据文献[10]算法定义式(10)信号的欠采样表示形式：

$$-f_c \frac{2(v_{0i} - \hat{v})}{c} = f_{t_n, d_{i0}} + n_{ki} \text{prf} \quad (11)$$

其中 $f'_{t_n, d_{i0}}$ 和 n_{ki} 分别为第 i 个目标模糊多普勒频率和

多普勒频率模糊数, prf 为雷达信号重复频率。

由以上分析可知, 根据设定的速度补偿值范围可得

$$\left(\hat{v}'_{0i}, f'_{t_m d_{0i}}, a'_i\right) = \arg \max_{\hat{v}} \left| \text{LvM} \left[s_{rm}(\hat{t}, \hat{v}, t_m) \right] \right| \quad (12)$$

其中 \hat{v}'_{0i} 为目标速度估计值, $f'_{t_m d_{0i}}$ 模糊多普勒频率估计值, a'_i 为目标精确的加速度估计值。

3.2 基于多普勒频率模糊数搜索的运动参数精确估计

根据 3.1 节估计得到的目标运动参数定义频域变标脉冲压缩处理公式为

$$D(f, t_m) = \text{rect} \left[\frac{f}{\gamma T_p} \right] \exp \left[-j\pi \frac{f^2}{\gamma} \right] \cdot \exp \left[-j2\pi (f + f_c) \left(\frac{2v'_0 - f'_{t_m d_{0i}} \lambda}{c} t_m + \frac{a'_i t_m^2}{c} \right) \right] \quad (13)$$

其中 λ 为雷达信号波长。利用式(13)对基带回波信号做频域变标脉冲压缩处理, 并化简得到 $M_{RM}(f, t_m)$:

$$\begin{aligned} M_{RM}(f, t_m) &= \sum_i A_i \text{rect} \left[\frac{f}{\gamma T_p} \right] \exp \left[-j2\pi (f + f_c) \frac{2R_{0i}}{c} \right] \\ &\cdot \exp \left[-j2\pi \frac{f}{f_c} n_{ki} \text{prf} t_m \right] \exp \left[-j2\pi n_{ki} \text{prf} t_m \right] \\ &+ n(f, t_m) \end{aligned} \quad (14)$$

则式(14)相对应的解模糊操作函数 $M(f, n'_{ki}, t_m)$ 可定义为

$$M(f, \hat{n}_k, t_m) = \exp \left[j2\pi \frac{f}{f_c} \hat{n}_k \text{prf} t_m \right] \quad (15)$$

其中 \hat{n}_k 为根据 3.1 节速度补偿取值分辨率所确定的多普勒频率模糊数范围中的取值。

式(14)与式(15)相乘完成解模糊处理, 并转换到时域可以得到

$$\begin{aligned} m_{rm}(\hat{t}, \hat{n}_k, t_m) &= \sum_i A_i \text{sinc} \left[\hat{t} - \frac{2R_{0i}}{c} - \frac{(n_{ki} - \hat{n}_k) \text{prf} t_m}{f_c} \right] \\ &\cdot \exp \left[-j2\pi \frac{2R_{0i}}{\lambda} \right] \exp \left[-j2\pi n_{ki} \text{prf} t_m \right] \\ &+ n(\hat{t}, \hat{n}_k, t_m) \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)中, 若 $n_{ki} - \hat{n}_k = 0$, 则多普勒频率模糊数所造成的距离徙动通过解模糊处理被补偿。由此根据设定的多普勒频率模糊数补偿值范围, 通过代价函数式(17)可以得到式(11)对应的目标多普勒频率模糊数:

$$n'_{ki} = \arg \max_{n_k} \left| \text{FFT} \left[m_{rm}(\hat{t}, \hat{n}_k, t_m) \right]_{t_m} \right| \quad (17)$$

其中 n'_{ki} 为多普勒频率模糊数估计值, n_k 为多普勒频率模糊数取值范围。

由代价函数式(12)和式(17)参数估计值及式(11)可求得目标精确的速度估计值 v'_{0i} 为

$$v'_{0i} = \hat{v}'_{0i} - \frac{f'_{t_m d_{0i}} + n_{ki} \text{prf}}{2} \lambda \quad (18)$$

4 相参积累算法运算量分析

根据 3.1 节和 3.2 节的分析可知, 若频域变标脉冲压缩处理不能够完成多普勒维模糊数补偿, 那么 3.2 节中的多普勒频率模糊数搜索范围将随 3.1 节中的速度估计值改变, 在多目标情况下, 需根据每个目标的估计速度生成不同的解模糊操作函数, 则实际情况下生成和存储的个数应由目标最大速度决定, 假定为 L_1 。相比之下, 频域变标脉冲压缩处理的多普勒维模糊数补偿操作可以将 3.2 节中解模糊处理的模糊数搜索取值固定于速度补偿取值分辨率所确定的多普勒频率模糊数范围中, 假定生成和存储的解模糊操作函数个数为 L_2 。在雷达参数设置同上例的情况下, 经计算可得 $L_1 = 60$, $L_2 = 6$, 可以看出频域变标脉冲压缩处理的多普勒维模糊数补偿操作将生成和存储的解模糊操作函数个数减小了 9 倍。

联合 Kestone 变换与吕方法、联合 Kestone 变换与 FRFT 算法以及联合 Kestone 变换与 DCFT 算法均可实现目标基于相参积累的参数化检测, 然而对于速度未知的高速目标, 其多普勒频率模糊数较大, Kestone 变换解模糊处理将导致以上相参积累算法计算复杂度较高。相比之下, 本文算法频域变标脉冲压缩处理中的速度搜索个数相比 Kestone 变换中的多普勒频率模糊数个数较小, 且多普勒频率模糊数搜索是较小多普勒频率模糊数范围内的 1 维操作, 这大大降低了本文算法基于相参积累实现目标参数化检测的计算复杂度。假定雷达信号相参积累有效脉冲数为 N , 距离单元数为 J , M_n 为 Kestone 变换多普勒频率模糊数范围中的多普勒频率模糊数取值个数, Z_a 为 FRFT 中角度搜索范围内角度取值个数或 DCFT 中加速度搜索范围内加速度取值个数, L_v 为 3.1 节中频域变标脉冲压缩处理的速度取值个数, L_k 为多普勒频率模糊数范围内的多普勒频率模糊数取值个数, 则上述相参积累算法的运算量如表 1 所示。

在雷达与目标参数设置同上例, 各算法参数估计精度及范围相同的条件下, $M_n = 60$, $Z_a = 200$, $L_v = 11$, $L_k = 6$, 则根据表 1 可知: 已有相参积累算

表 1 相参积累算法运算量比较

相参积累算法	算法运算量
联合 Kestone 变换 与吕方法	$M_n J \cdot O(N^2 \lg N)$
联合 Kestone 变换 与 FRFT 算法	$M_n J \cdot O(Z_n N \lg N)$
联合 Kestone 变换 与 DCFT 算法	$M_n J \cdot O(Z_n N \lg N)$
本文相参积累算法	$L_c J \cdot O(N^2 \lg N) + L_k J \cdot O(N/2 \cdot \lg N)$

法实现信号相参积累的运算量约是本文算法的 6 倍。本文算法所对应的原理仿真图如图 2 所示，其中两个虚线框分别代表 3.1 节方法和 3.2 节方法。

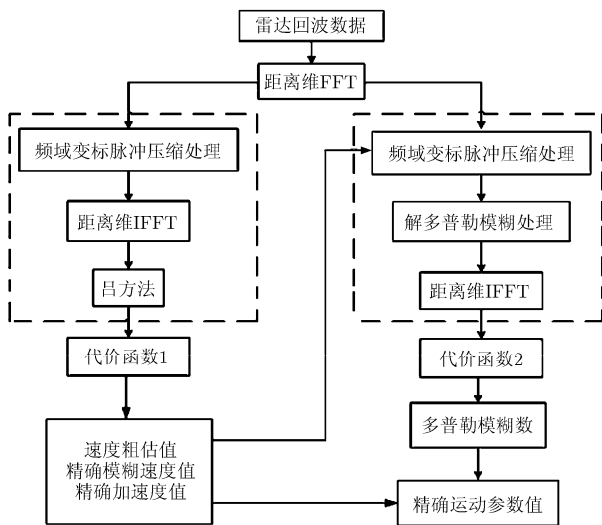


图 2 本文算法原理仿真图

5 计算机仿真及实测数据处理结果

5.1 计算机仿真

雷达和目标仿真参数的设定如表 2 所示。

计算机仿真实验中，固定延迟值 a 取为 0.25，尺度变换值 h 取为 4，则无模糊估计径向加速度最大值 $a_{\max} = 60 \text{ m/s}^2$ ，加速度估计分辨率 $a_{\text{res}} = 0.3 \text{ m/s}^2$ ，完全可以满足实际战场环境中雷达完成信号相参积累的要求。根据雷达仿真参数取值，基于相参积累的联合频域变标脉冲压缩处理与吕方法的目标距离

表 2 雷达和目标仿真参数

仿真参数	参数值	仿真参数	参数值
载频	10 GHz	目标 1 初始距离	101.8 km
脉冲宽度	80 μs	径向加速度	30 m/s^2
重复频率	1000 Hz	径向速度	487 m/s
信号带宽	5 MHz	目标 2 初始距离	101.2 km
视频采样率	6 MHz	径向加速度	24 m/s^2
有效脉冲积累数	200	径向速度	764 m/s

徙动不超过半个距离单元的最大目标速度为 33.3 m/s ，则频域变标脉冲压缩处理中的径向速度补偿值可设定为：[0 m/s , 70 m/s , 140 m/s , 210 m/s , ..., 700 m/s , 770 m/s , 840 m/s , 910 m/s]。

实验 1 在雷达回波信号信噪比 -30 dB 条件下进行目标检测，对两目标的常规检测（目标回波做脉冲压缩后数据做纵向 FFT 进行信号能量积累）结果如图 3(a)所示，文献[9]算法基于非线性最小熵准则，受信噪比影响大，不适用于多目标检测情况，其对目标 1 的检测结果如图 3(b)所示，文献[10]算法和本文算法相对文献[9]算法抗噪声性能高，适合于多目标的情况，检测结果分别如图 3(c), 3 (d)所示，两图由 2 次并行处理结果直接相加而成。

常规检测受距离徙动、多普勒扩散和速度模糊的影响严重，由检测结果图 3(a)可以看出在低信噪比下无法检测出目标。如图 3(b)所示，文献[9]算法基于最小熵准则在存在距离徙动的条件下进行目标检测，抗噪声性能差。文献[10]算法利用非相参积累方式进行目标检测，信号能量的积累效果差，由检测结果图 3(c)可以看出，在低信噪比条件下不能得到正确的检测结果。相比之下，本文算法在消除距离徙动、多普勒扩散和速度模糊的基础上，使用相参积累进行目标检测，能够对信号能量进行很好的积累，如图 3(d)所示，可以看出本文算法目标检测效果明显优于前 3 种算法。

实验 2 选择目标 1 运动参数作为仿真参数，在参数估计精度相同的条件下，使用基于非相参积累的文献[10]算法及本文算法进行计算机仿真。对每一次运动参数估计做 1000 次 Monte Carlo 实验，计算机仿真结果如图 4 所示，图 4(a)以及图 4(b)分别为目标速度和加速度估计误差图。

文献[10]基于非相参积累算法进行目标的运动参数估计，其抗噪声性能差，在低信噪比条件下不能够正确的估计出目标运动参数。相比之下，本文算法采用相参积累方式，抗噪声性能优，由图 4 看出本文算法能够在低信噪比条件下正确地估计出目标的运动参数。

实验 3 虚警概率设定为 $P_f = 10^{-7}$ ，选择目标 2 运动参数作为仿真参数，在参数估计精度相同的条件下，使用常规检测算法、基于非相参积累的文献[10]算法、理想情况(目标不存在距离徙动与多普勒扩散)及本文算法进行计算机仿真。对每一次检测概率做 1000 次 Monte Carlo 实验，计算机仿真结果如图 5 所示。

常规检测算法受目标距离徙动，速度模糊及多普勒扩散的影响严重，导致其检测概率较低。基于

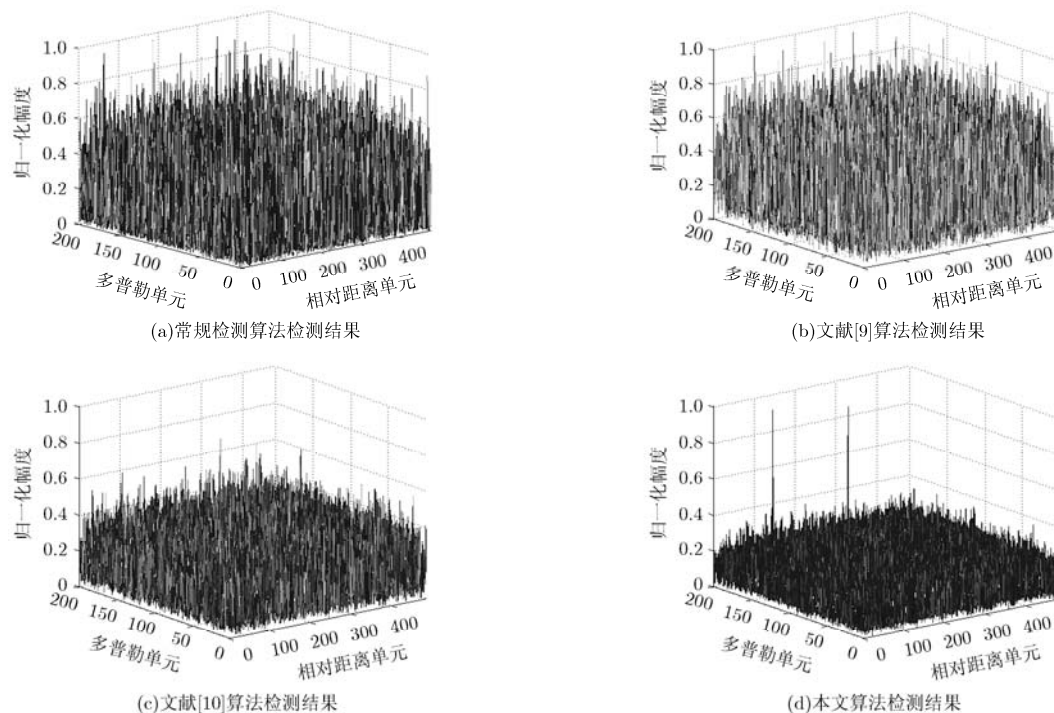


图3 各种算法检测结果

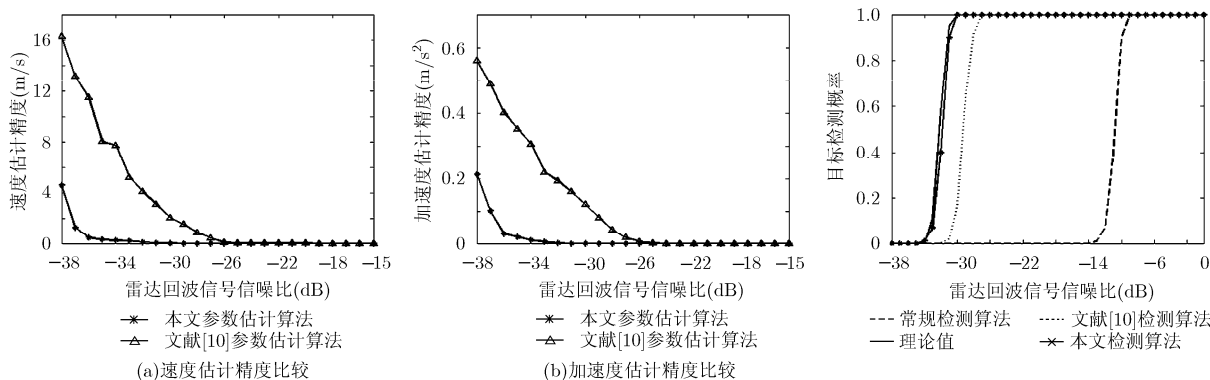


图4 各种算法参数估计性能比较

图5 各种算法的检测概率比较

非相参积累文献[10]算法对目标距离徙动、速度模糊及多普勒扩散进行了补偿,然而由于其采用非相参积累方式,导致其在低信噪比条件下不能够检测到目标。相比之下,本文算法采用相参积累方式进行目标检测,在低信噪比条件下可以正确地检测到目标。由图5看出,本文算法的检测概率值几乎达到了理想情况下的理论值,这说明对于高速目标的检测,本文算法的积累性能几乎达到理论最优。

5.2 实测数据处理结果

采用某监视雷达的实测数据对本文算法进行验证,雷达积累脉冲数为5120。常规检测算法受目标速度产生的距离徙动及目标加速度产生的多普勒扩散影响,其检测结果如图6(a)所示。利用本文算法

对目标进行检测,其检测结果如图6(b)所示。由于本文算法可以在低信噪比条件下对目标的距离徙动及多普勒扩散进行补偿,从而保证目标信号能量得到有效的积累。

6 结论

长时间信号积累用于高速、多目标的检测和运动参数的估计会受到距离徙动、多普勒扩散以及速度模糊的影响,针对此问题,本文首先采用联合频域变标脉冲压缩处理与吕方法降低实现目标信号相参积累所需运算量,然后在其基础上采用基于多普勒频率模糊数搜索的方法完成高速多目标的参数化检测。相参积累算法运算量分析、计算机仿真以及实测数据处理结果验证了本文所提算法的有效性。

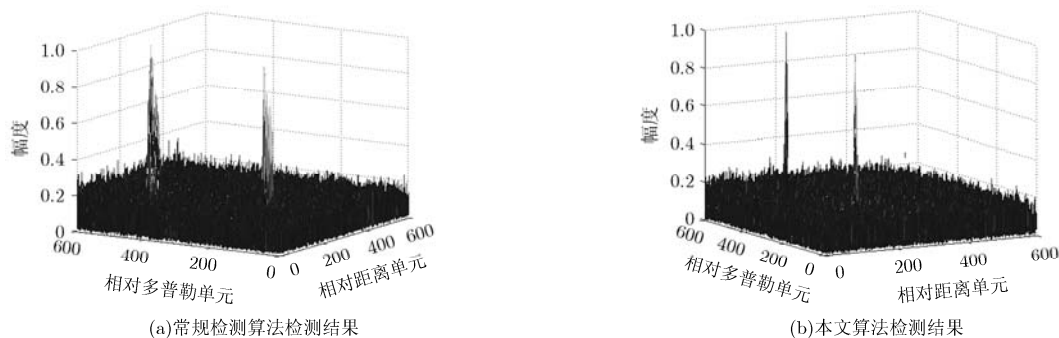


图6 实测数据处理结果

参考文献

- [1] 许述文. 窄带、宽带雷达机动目标检测技术研究[D]. [博士论文], 西安电子科技大学, 2011.
- [2] 庞存锁, 侯慧玲, 韩焱. 基于霍夫变换的高速微弱目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 754-757.
Pang Cun-suo, Hou Hui-ling, and Han Yan. High-speed weak target detection based on Hough transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 754-757.
- [3] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *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.
- [4] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *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.
- [5] Yu Ji, Xu Jia, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform for radar target detection, (III): optimality and fast implementation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 991-1004.
- [6] Tao Ran, Zhang Nan, and Wang Yue. 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] Lv Xiao-lei, Xing Meng-dao, Wang Chun-ru, *et al.* ISAR imaging of maneuvering targets based on the range centroid Doppler technique[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1): 141-153.
- [8] 钱江, 苏军海, 李凉海, 等. 利用 KWT 进行动目标成像的三通道 SAR-GMTI 快速目标运动参数估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1660-1666.
- [9] Qian Jiang, Su Jun-hai, Li Liang-hai, *et al.* Tri-channel SAR-GMTI high-speed target imaging and motion parameter estimation using KWT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1660-1666.
- [10] Xing Meng-dao, Su Jun-hai, Wang Gen-yuan, *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.
- [11] Su Jun-hai, Xing Meng-dao, Wang Gen-yuan, *et al.* High-speed multi-target detection with narrowband radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(4): 595-603.
- [12] Wood J C and Barry D T. Radon transformation of time-frequency distributions for analysis of multicomponent signals[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1994, 42(11): 3166-3177.
- [13] Xia Xiang-Gen. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(11): 3122-3133.
- [14] Lv Xiao-lei, Bi Guo-an, Wan Chun-ru, *et al.* Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(8): 3576-3591.

郑纪彬: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为宽窄带雷达目标检测、认知雷达。

朱文涛: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为认知雷达。

苏涛: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为面向雷达、声纳、通信的高速实时信号处理、认知雷达。