

## 基于 FRT-MLVD 的无源雷达机动目标徙动补偿算法

赵勇胜, 胡德秀, 靳科, 刘智鑫, 赵拥军

(战略支援部队信息工程大学数据与目标工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 无源雷达机动目标长时间相参积累过程中, 目标的运动参数会引起距离徙动和多普勒徙动, 导致回波信号能量分散和检测性能恶化。为实现含有第二加速度的变加速运动目标相参积累, 提出了一种基于频域序列反转变换 (FRT) 和改进吕分布 (MLVD) 的相参积累算法。首先, 利用 FRT 去除信号的距离徙动, 将回波能量积累至同一距离单元; 然后, 利用 MLVD 对该距离单元内的回波进行处理, 估计出目标加速度和第二加速度; 在补偿目标的加速度和第二加速度引起的多普勒徙动后, 利用 Keystone 变换 (KT) 校正目标速度引起的线性徙动, 实现距离和速度的估计。仿真结果表明, 所提算法可有效补偿无源雷达中机动目标的距离徙动和多普勒徙动, 对变加速目标的积累效果和检测概率显著优于现有算法。

**关键词:** 机动目标; 相参积累; 无源雷达; 频域序列反转变换; 改进吕分布; Keystone 变换

**中图分类号:** TN971

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019158

## Migration compensation algorithm for maneuvering target in passive radar based on FRT-MLVD

ZHAO Yongsheng, HU Dexiu, JIN Ke, LIU Zhixin, ZHAO Yongjun

School of Data and Target Engineering, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** During the long coherent integration time in passive radar, the motion parameters (such as high speed, acceleration and jerk motion, etc.) will bring about range migration (RM) and Doppler frequency migration (DFM), further deteriorate the integration performance. To realize the coherent integration of maneuvering targets with jerk motion, a method based on frequency reversing transform (FRT) and modified Lv's distribution (MLVD) called FRT-MLVD was proposed to achieve the coherent integration and motion parameters estimation. More specifically, the FRT was firstly proposed to remove RM. Then the MLVD was employed to estimate the acceleration and jerk parameters. After compensating the DFM induced by the acceleration and jerk motion, the residual RM was corrected and the velocity and range was achieved via the KT operation. Simulation results demonstrate that the proposed method can effectively compensate the RM and DFM induced by the target motion parameters in passive radar, and for maneuvering targets with jerk motion, the proposed method achieves a better integration and detection performance over existing methods.

**Key words:** maneuvering target, coherent integration, passive radar, frequency reversing transform, modified Lv's distribution, Keystone transform

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2019-06-06

通信作者: 胡德秀, paper\_hdx@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61703433)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61703433)

## 1 引言

无源雷达 (PR, passive radar) 是一种利用环境中非合作辐射源电磁信号作为外辐射源的特殊双基地雷达系统, 该体制雷达自身并不辐射电磁波, 而是被动地接收目标反射/散射的外辐射源电磁信号来探测目标<sup>[1]</sup>。这种与传统有源雷达截然不同的工作方式, 使 PR 系统具备多种优点, 包括隐蔽性高、不占用频率资源、抗干扰及抗摧毁能力强、体积小、成本低、易部署等。因此, 多年来该体制雷达一直是雷达领域的研究热点。

无源雷达接收机通常布设两副天线, 分别用于接收外辐射源直达信号和目标回波信号<sup>[2]</sup>。相比于噪声干扰, 无源雷达接收的目标回波信号通常非常微弱。因此, 无源雷达需要对回波信号进行相参积累, 从而提高回波的信噪比。目前, 无源雷达最常用的相参积累方法是互模糊函数 (CAF, cross ambiguity function)<sup>[3]</sup>。然而, 对于一些高速机动目标, 如弹道导弹、高超声速飞机、高空高速巡航导弹、临近空间飞行器等<sup>[4]</sup>, 在积累时间内会发生严重的距离徙动 (RM, range migration) 和多普勒徙动 (DFM, Doppler frequency migration)。此外, 无源雷达在探测远距离小雷达截面积 (RCS, radar cross section) 目标时, 为了提高积累增益, 需要尽可能地延长积累时间。随着积累时间的延长, 目标运动参数导致的距离徙动和多普勒徙动将越发显著。而距离徙动和多普勒徙动的存在将导致回波能量分散和检测性能恶化。因此, 研究无源雷达的相参积累徙动补偿方法成为提高无源雷达目标探测能力的关键。

目前, 对于徙动补偿的研究多集中在脉冲体制的主动雷达系统<sup>[5-9]</sup>, 而对于无源雷达系统的目标徙动问题的研究则较少。但近年来, 随着人们对于无源雷达关注度的提升, 陆续出现了一些针对无源雷达目标徙动问题的研究。这些研究可以分为 2 种思路: 一种是通过在无源雷达信号模型中引入速度和加速度影响因子, 来修正互模糊函数, 从而延长相参积累的时间, 但是这类算法的计算复杂度高, 难以满足无源雷达信号处理的实时性要求<sup>[10-12]</sup>; 另一种是对信号进行分段处理, 段内为快时间, 段间为慢时间。文献[13-14]将信号分段后, 沿快时间匹配滤波, 然后通过 Keystone 变换 (KT, Keystone transform) 校正了目标的距离徙动, 但该算法未考

虑目标机动性, 仅适用于匀速目标。文献[15]在信号模型中考虑了目标的加速度, 并利用 Keystone 变换和时频变换分别校正了距离徙动和多普勒徙动, 但其忽略了加速度引起的距离弯曲及速度距离徙动校正时在加速度指数项新引入的快时间频率和慢时间的耦合关系。文献[16]针对匀加速目标, 提出了一种基于 Keystone 变换结合傅里叶变换分段计算的高速机动目标检测方法, 其对分段后的信号利用 Keystone 变换校正目标速度引起距离徙动, 再对慢时间进行二次分段, 并结合傅里叶变换的分段计算完成径向加速度差的距离徙动和多普勒徙动校正, 使相参积累时间不再受速度和加速度的限制。但是, 上述研究并不适用于变加速运动目标。对于变加速运动目标, 其第二加速度对信号长时间相参积累的影响不可忽略<sup>[17]</sup>。因此, 有必要进一步针对无源雷达中变加速运动目标的相参积累问题进行研究。

为了对变加速运动目标进行相参积累, 不仅需要校正补偿速度和加速度引起的距离徙动和多普勒徙动, 还需要校正补偿目标第二加速度引起的三阶距离徙动和多普勒徙动 (又称为多普勒弯曲), 这对信号处理提出了更高的要求。广义 Radon 傅里叶变换 (GRFT, generalized Radon Fourier transform) 理论上可以实现任意高阶运动目标的参数估计和徙动校正, 但是存在的盲速旁瓣和计算量过大的缺陷, 限制了其在实际中的应用<sup>[18]</sup>。本文针对无源雷达系统的变加速运动目标长时间相参积累检测问题, 首先提出了一种频域序列反转变换 (FRT, frequency reversing transform), 该变换可以有效去除目标信号中的距离徙动, 将信号能量积累至同一距离单元内。该距离单元内的信号可以看作二次调频 (QFM, quadratic frequency modulated) 信号。QFM 信号是一种常见的非平稳信号, 它的初始频率、调频率、二次调频率是表征 QFM 信号频率特性的基本参数, 且估计问题一直备受关注并形成了一系列的有效算法<sup>[19-22]</sup>, 其中, 改进吕分布 (MLVD, modified Lv's distribution) 算法能够以高分辨率对 QFM 信号进行快速参数分析, 并具有良好的抗噪声性能<sup>[22]</sup>。因此, 本文在去除距离徙动后, 利用 MLVD 算法估计目标加速度和第二加速度, 最后, 在补偿目标加速度和第二加速度引起的距离徙动和多普勒徙动后, 利用 Keystone 变换校正了目标速度引起的距离徙动, 实现了目标回波的长时间相参积累。

相比于现有的徙动补偿算法，本文所提算法充分考虑了第二加速度对距离徙动和多普勒徙动的影响，对变加速运动目标具有良好的积累效果，仿真实验验证了所提算法的有效性。

## 2 信号模型

考虑如图 1 所示的双基地无源雷达目标探测模型。其中，外辐射源和接收机的位置向量分别为  $\mathbf{x}_T$  和  $\mathbf{x}_R$ ，基线距离向量为  $\mathbf{l} = \mathbf{x}_T - \mathbf{x}_R$ 。运动目标在初始时刻的位置向量为  $\mathbf{x}(0)$ ，此时到外辐射源和接收机的距离向量分别为  $\mathbf{r}_1(0) = \mathbf{x}(0) - \mathbf{x}_T$  和  $\mathbf{r}_2(0) = \mathbf{x}(0) - \mathbf{x}_R$ 。假设目标做变加速运动，其速度为  $\mathbf{v}$ ，加速度为  $\mathbf{a}$ ，第二加速度为  $\mathbf{k}$ ，则  $t$  时刻目标运动至位置  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(0) + \mathbf{v}t + \frac{1}{2}\mathbf{a}t^2 + \frac{1}{6}\mathbf{k}t^3$ ，此时到外辐射源和接收机的距离向量分别为  $\mathbf{r}_1(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_T$  和  $\mathbf{r}_2(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_R$ 。

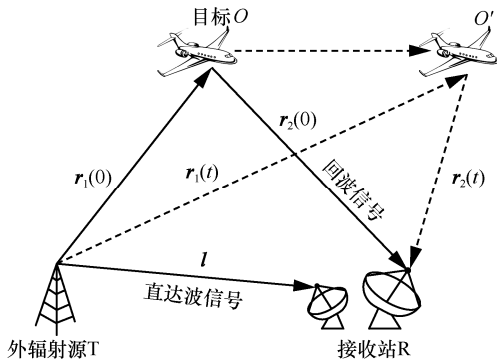


图 1 无源雷达目标探测模型

基于上述假设， $t$  时刻外辐射源的直达波与其经过目标反射后的回波信号到达接收站的路径差为  $r(t) = \|\mathbf{r}_1(t)\| + \|\mathbf{r}_2(t)\| - \|\mathbf{l}\|$ 。假设外辐射源发射的基带信号为  $s(t)$ ，载频为  $f_c$ ，信号传播速度为  $c$ ，则  $t$  时刻接收到的外辐射源直达波信号  $y_r(t)$  和目标回波信号  $y_s(t)$  可以表示为

$$y_r(t) = A_r s(t) \quad (1)$$

$$y_s(t) = A_s s\left(t - \frac{r(t)}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{r(t)}{c}\right) \quad (2)$$

通过重叠分段的方式<sup>[13]</sup>，人为地划分快慢时间，可将 2 路信号划分为等效脉冲序列，即

$$y_r(t_f, t_m) = A_r s(t_f) \quad (3)$$

$$y_s(t_f, t_m) = A_s s\left(t_f - \frac{r(t_m)}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{r(t_m)}{c}\right) \quad (4)$$

其中， $t_f$  为快时间， $t_m = mT_r$  ( $m = 0, 1, \dots, M-1$ ) 为慢时间， $T_r$  为等效脉冲重复时间。需注意的是，在划分快慢时间时，需保证在一个慢时间内，目标的距离和多普勒变化分别小于距离分辨率和多普勒分辨率。接下来，对 2 路信号进行脉冲压缩。对式(3)和式(4)分别进行傅里叶变换 (FT, Fourier transform)，得

$$Y_r(f_r, t_m) = A_r S(f_r) \quad (5)$$

$$Y_s(f_r, t_m) = A_s S(f_r) \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r) \frac{r(t_m)}{c}\right] \quad (6)$$

其中， $S(f_r) = \text{FT}[s(t_f)]$ 。将式(5)的共轭和式(6)相乘并进行傅里叶逆变换 (IFT, inverse Fourier transform)，得

$$p(t_f, t_m) = \text{IFT}\left[Y_r^*(f_r, t_m) Y_s(f_r, t_m)\right] = A_1 s'\left(t_f - \frac{r(t_m)}{c}\right) \exp\left(-j2\pi f_c \frac{r(t_m)}{c}\right) \quad (7)$$

其中， $A_1$  为信号幅度， $s'(t_f) = \text{IFT}\left[|S(f_r)|^2\right]$ ，其峰值位于  $t_f = 0$  处。

将  $r(t_m)$  进行泰勒级数展开，得

$$r(t_m) = \sum_{l=0}^{+\infty} \frac{1}{l!} a_l t_m^l \quad (8)$$

其中， $a_l = \left. \frac{d^l r(t_m)}{dt_m^l} \right|_{t_m=0}$  为目标运动参数，其中  $a_0$  为

目标的初始双基地距离， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  分别为目标的双基地速度、双基地加速度与双基地第二加速度<sup>[11-12]</sup>， $a_0 \sim a_3$  具体计算式为

$$a_0 = r(0) = \|\mathbf{r}_1(0)\| + \|\mathbf{r}_2(0)\| - \|\mathbf{l}\| \quad (9)$$

$$a_1 = \left( \frac{\mathbf{r}_1(0)}{\|\mathbf{r}_1(0)\|} + \frac{\mathbf{r}_2(0)}{\|\mathbf{r}_2(0)\|} \right) \mathbf{v} = -2 \cos \frac{\beta}{2} \mathbf{n}_\perp \mathbf{v} \quad (10)$$

$$a_2 \simeq \left( \frac{\mathbf{r}_1(0)}{\|\mathbf{r}_1(0)\|} + \frac{\mathbf{r}_2(0)}{\|\mathbf{r}_2(0)\|} \right) \mathbf{a} = -2 \cos \frac{\beta}{2} \mathbf{n}_\perp \mathbf{a} \quad (11)$$

$$a_3 \simeq \left( \frac{\mathbf{r}_1(0)}{\|\mathbf{r}_1(0)\|} + \frac{\mathbf{r}_2(0)}{\|\mathbf{r}_2(0)\|} \right) \mathbf{k} = -2 \cos \frac{\beta}{2} \mathbf{n}_\perp \mathbf{k} \quad (12)$$

其中， $\mathbf{n}_\perp$  为双基地椭圆在目标位置  $\mathbf{x}(0)$  处切面的

单位法向量（即双基地意义上的径向向量）， $\beta$ 为目标初始时刻的双基地角度。需要指出的是，式(11)中目标速度分量  $\mathbf{v}$  在积累时间内也会造成一定的双基地加速度分量，但其通常远小于目标加速度  $\mathbf{a}$  引起的双基地加速度分量，因此可以忽略<sup>[14]</sup>。同样地，式(12)中目标速度  $\mathbf{v}$ 、加速度  $\mathbf{a}$  引起的双基地第二加速度分量也被忽略，即双基地第二加速度主要由目标加速度  $\mathbf{k}$  引起。更具体地说，目标的双基地速度  $a_1$ 、双基地加速度  $a_2$ 、双基地第二加速度  $a_3$  分别主要由目标速度  $\mathbf{v}$ 、加速度  $\mathbf{a}$ 、第二加速度  $\mathbf{k}$  在径向上的投影决定。因此，对于变加速目标，在进行相参积累时，可以将目标的瞬时双基地距离泰勒级数展开式近似为三阶多项式<sup>[23-24]</sup>

$$r(t_m) = a_0 + a_1 t_m + \frac{1}{2} a_2 t_m^2 + \frac{1}{6} a_3 t_m^3 \quad (13)$$

结合式(7)和式(13)可以看出，目标的距离徙动包括目标双基地速度引起的线性距离徙动，以及双基地加速度和第二加速度引起的二阶和三阶距离徙动（距离弯曲）。目标的多普勒徙动包括目标双基地加速度引起的线性多普勒徙动，以及目标双基地第二加速度引起的二阶多普勒徙动（多普勒弯曲）。距离徙动和多普勒徙动的存在，都会使回波能量在积累时间内分散在不同的距离和多普勒单元，导致积累增益降低。

### 3 基于 FRT-MLVD 的目标运动参数估计算法

为了消除距离徙动，本文提出了一种频域序列反转变换，该变换可以实现慢时间  $t_m$  与距离频率  $f_r$  的解耦合，从而消除距离徙动，将信号能量集中至同一距离单元。然后利用改进吕分布方法对该距离单元内的回波信号进行处理，实现对目标运动参数的估计。

#### 3.1 基于 FRT 的距离徙动消除

将  $p(t_f, t_m)$  沿  $t_f$  维进行傅里叶变换至距离频率  $f_r$  维，得

$$P(f_r, t_m) = A_2 |S(f_r)|^2 \exp\left[-j2\pi(f_c + f_r) \frac{r(t_m)}{c}\right] \quad (14)$$

其中， $A_2$  为信号幅度。

本文提出的频域序列反转变换定义为：将  $P(f_r, t_m)$  在  $f_r$  维进行序列反转，也就是将  $f_r$  维由  $-\frac{f_s}{2} \sim \frac{f_s}{2}$  反转排列为  $\frac{f_s}{2} \sim -\frac{f_s}{2}$ ，从而得到频域反转

序列  $\overline{P(f_r, t_m)}$  为

$$\overline{P(f_r, t_m)} = P(-f_r, t_m) = A_2 |S(f_r)|^2 \exp\left[-j2\pi(f_c - f_r) \frac{r(t_m)}{c}\right] \quad (15)$$

将式(14)中的  $P(f_r, t_m)$  和式(15)中的频域反转序列  $\overline{P(f_r, t_m)}$  相乘，得

$$R_1(f_r, t_m) = P(f_r, t_m) \overline{P(f_r, t_m)} = A_2^2 |S(f_r)|^4 \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \left(a_0 + a_1 t_m + \frac{1}{2} a_2 t_m^2 + \frac{1}{6} a_3 t_m^3\right)\right] \quad (16)$$

从式(16)可以看出，将  $P(f_r, t_m)$  和其频域反转序列  $\overline{P(f_r, t_m)}$  相乘后，指数项中关于距离频率  $f_r$  的部分被对消掉，从而将慢时间  $t_m$  与距离频率  $f_r$  之间的耦合解除，使目标的距离徙动得到校正。

#### 3.2 基于 MLVD 目标加速度和第二加速度估计

将式(16)沿  $f_r$  进行 IFT，得

$$R_2(t_f, t_m) = \text{IFT}_{f_r} \{R_1(f_r, t_m)\} = A_3 s''(t_f) \exp\left[-j \frac{4\pi f_c}{c} \left(a_0 + a_1 t_m + \frac{1}{2} a_2 t_m^2 + \frac{1}{6} a_3 t_m^3\right)\right] \quad (17)$$

其中， $A_3$  为信号幅度， $s''(t_f) = \text{IFT}\{|S(f_r)|^4\}$ ，其峰值位于  $t_f = 0$  处。也就是说，利用 FRT 消除距离徙动后，信号能量落在了距离单元  $t_f = 0$  内。为便于分析，只考虑该距离单元内的信号，即

$$R_2(t_m) = A_4 \exp\left[j2\pi \left(\phi_1 t_m + \frac{1}{2} \phi_2 t_m^2 + \frac{1}{6} \phi_3 t_m^3\right)\right] \quad (18)$$

其中， $A_4$  为信号幅度， $\phi_1 = -\frac{2f_c}{c} a_1$ ， $\phi_2 = -\frac{2f_c}{c} a_2$ ， $\phi_3 = -\frac{2f_c}{c} a_3$ 。从式(18)可以看出， $R_2(t_m)$  是关于  $t_m$  的二次调频信号。这里，采用 MLVD 算法估计 QFM 信号的参数。

首先，式(18)的对称参数自相关函数为

$$R_3(t_m, \tau_m) = \left[ R_2\left(t_m + \tau_m + \frac{\alpha}{2}\right) R_2\left(t_m - \tau_m - \frac{\alpha}{2}\right) \right] \left[ R_2\left(t_m + \tau_m - \frac{\alpha}{2}\right) R_2\left(t_m - \tau_m + \frac{\alpha}{2}\right) \right]^* \quad (19)$$

其中， $\tau_m$  为时延变量。根据文献[25-26]，将  $\alpha$  的值设置为  $0.089M$ ， $\alpha$  的值设置为 1。将式(18)代入

式(19), 得

$$R_3(t_m, \tau_m) = A_4^4 \exp\{j2\pi[2\phi_2\varpi(2\tau_m + \alpha) + 2\phi_3\varpi t_m(2\tau_m + \alpha)]\} \quad (20)$$

可以看到, 式(20)的指数项中慢时间  $t_m$  与时延变量  $\tau_m$  存在耦合。为了消除该耦合关系, 采用如式(21)所示的变量代换。

$$t_m = \frac{t_n}{h(2\tau_m + \alpha)} \quad (21)$$

其中,  $h$  为尺度变换因子, 需满足  $\alpha h = 1$ , 因此将  $h$  设置为 1<sup>[26]</sup>。将式(21)代入式(20), 得

$$R_4(t_n, \tau_m) = A_4^4 \exp\left\{j2\pi\left[2\phi_2\varpi(2\tau_m + \alpha) + 2\phi_3\varpi \frac{t_n}{h}\right]\right\} \quad (22)$$

显然, 通过变量代换后, 慢时间  $t_m$  与时延变量  $\tau_m$  的耦合被去除。此时, 对式(22)沿  $t_n$  维进行快速傅里叶变换 (FFT, fast Fourier transform), 可得

$$Q_n(f_{t_n}, \tau_m) = \text{FFT}_{t_n}[R_4(t_n, \tau_m)] = A_4^4 \exp\{j2\pi[2\phi_2\varpi(2\tau_m + \alpha)]\} \delta\left(f_{t_n} - \frac{2\phi_3\varpi}{h}\right) \quad (23)$$

其中,  $f_{t_n}$  为对应于  $t_n$  的频域变量,  $\delta(\bullet)$  为狄拉克函数。对式(23)沿  $\tau_m$  维进行 FFT, 可得

$$Q_{\tau_m}(f_{t_n}, f_{\tau_m}) = \text{FFT}_{\tau_m}[Q_n(f_{t_n}, \tau_m)] = A_4^4 \exp(j4\pi\phi_2\varpi\alpha) \delta(f_{\tau_m} - 4\phi_2\varpi) \delta\left(f_{t_n} - \frac{2\phi_3\varpi}{h}\right) \quad (24)$$

其中,  $f_{\tau_m}$  为对应于  $\tau_m$  的频域变量,  $Q_{\tau_m}(f_{t_n}, f_{\tau_m})$  的唯一峰值出现在  $(f_{\tau_m} = 4\phi_2\varpi, f_{t_n} = \frac{2\phi_3\varpi}{h})$ , 通过搜索  $Q_{\tau_m}(f_{t_n}, f_{\tau_m})$  的峰值所在位置, 可估计出 QFM 信号的调频率  $\phi_2$  和二次调频率  $\phi_3$  参数, 从中可进一步估计出目标双基地加速度  $a_2$  和双基地第二加速度  $a_3$ 。

### 3.3 目标双基地距离和速度估计

接下来, 利用估计出的目标运动参数  $a_2$  和  $a_3$  构建补偿函数, 如式(25)所示。

$$P_{\text{ref}}(f_r, t_m) = \exp\left[j\frac{2\pi(f_c + f_r)}{c}\left(\frac{1}{2}a_2 t_m^2 + \frac{1}{6}a_3 t_m^3\right)\right] \quad (25)$$

将补偿函数  $P_{\text{ref}}(f_r, t_m)$  与式(14)相乘, 得

$$R_5(f_r, t_m) = A_2 |S(f_r)|^2 \exp\left[-j\frac{2\pi(f_c + f_r)}{c}(a_0 + a_1 t_m)\right] \quad (26)$$

可以看到, 式(26)的指数项中慢时间  $t_m$  与距离频率  $f_r$  存在耦合。为了消除该耦合关系, 采用如下的 Keystone 代换

$$t_m = \frac{f_c}{f_c + f_r} t_n \quad (27)$$

将式(27)代入式(26), 得

$$R_6(f_r, t_n) = A_2 |S(f_r)|^2 \exp\left[-j\frac{2\pi(f_c + f_r)}{c} a_0\right] \exp\left[-j\frac{2\pi f_c}{c} a_1 t_n\right] \quad (28)$$

显然, 经过变量代换后, 慢时间  $t_m$  与距离频率  $f_r$  的耦合被去除。此时, 对式(28)沿  $f_r$  维进行 IFT, 沿  $t_n$  维进行 FT, 得

$$R_7(\tau, f) = A_6 s'\left(\tau - \frac{a_0}{c}\right) \text{sinc}\left[-j2\pi\left(f - \frac{f_c a_1}{c}\right)\right] \quad (29)$$

由式(29)可知,  $R_7(\tau, f)$  在  $(\tau = \frac{a_0}{c}, f = \frac{f_c a_1}{c})$  位置出现唯一峰值, 通过搜索该峰值所在位置, 可估计出目标的初始双基地距离  $a_0$  和双基地速度  $a_1$ 。

## 4 仿真实验

为评估本文所提算法的相参积累效果, 进行仿真实验。仿真场景为: 外辐射源信号的载频  $f_c = 1 \text{ GHz}$ , 带宽  $B = 1 \text{ MHz}$ , 采样频率  $f_s = 5 \text{ GHz}$ , 划分的脉冲重复时间  $T_r = 1.3 \text{ ms}$ , 积累脉冲数 1 024。待探测目标作变加速运动, 其运动轨迹满足  $r(t) \approx 10\,000 + 1\,000t + 50t^2 + 15t^3$ 。

### 4.1 FRT-MLVD 算法对目标回波信号的积累效果

利用本文所提算法对回波信号进行积累, 结果如图 2 所示。

图 2(a)给出了分段信号的脉冲压缩结果, 可以看出, 由于目标运动的影响, 积累时间内出现了严重的距离徙动。图 2(b)给出了 FRT 处理后的结果, 可以看到, 距离徙动被去除, 回波信号能量被集中到同一距离单元内。取该距离单元内的信号进行 MLVD 处理, 图 2(c)给出了 MLVD 的积累结果, 可以看出, 信号在调频率-二次调频率空间内形成高分辨率单一峰值, 通过搜索峰值所在位置, 即可估计出目标的加速度和第三加速度。利用估计出的目标加速度和第三加速度构造参考信号, 从而补偿目标加速度和第三加速度引起的距离和多普勒徙动, 图 2(d)给出了补偿二次和三次距离徙动后残留的

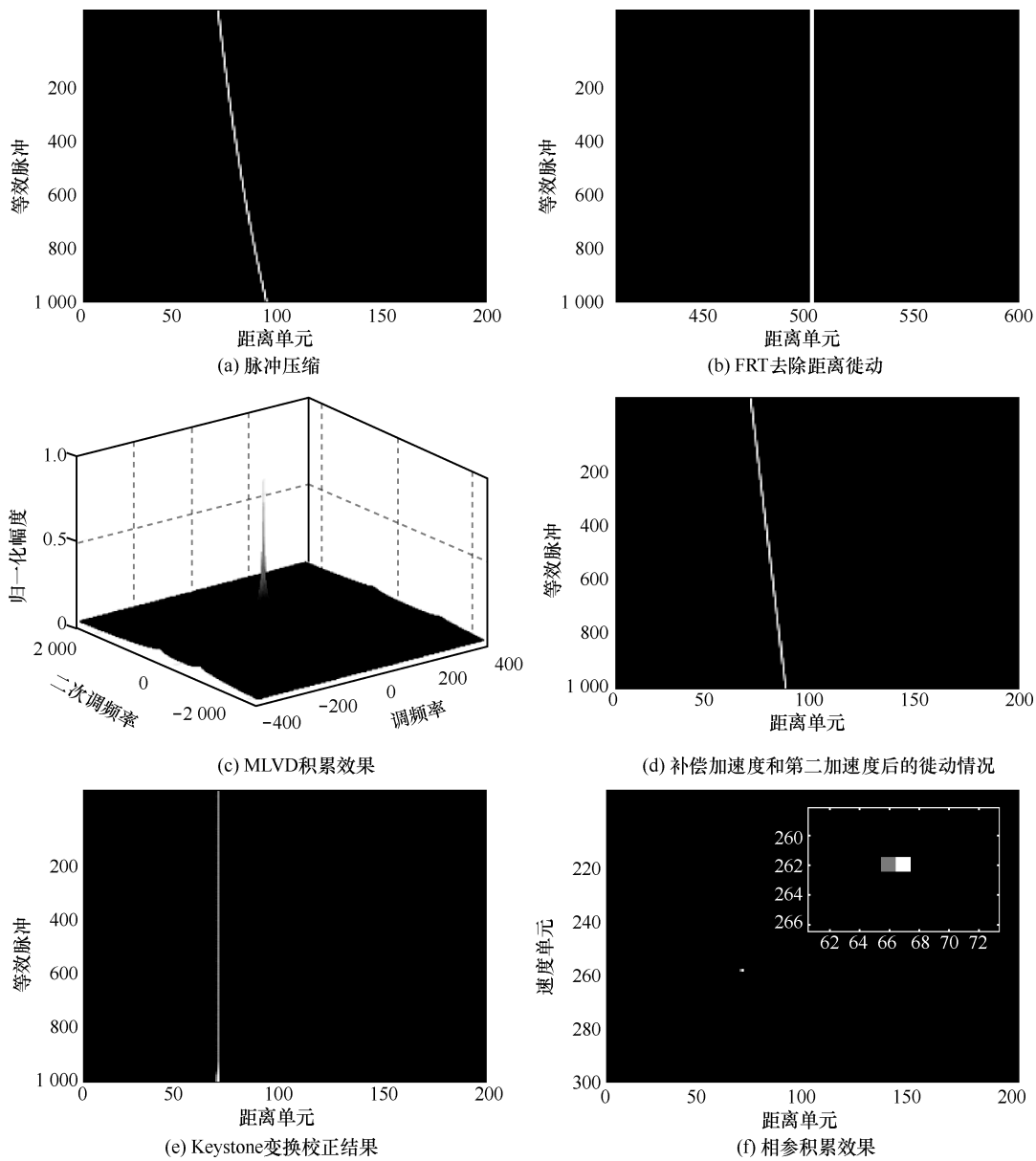


图 2 本文所提算法对目标积累效果

徙动情况。比较图 2(a)和图 2(d)可以看出，仅含有目标速度引起的线性徙动，说明 MLVD 估计出的目标加速度和第二加速度这 2 个参数的准确度很高，距离弯曲和多普勒弯曲被几乎完全消除。通过 Keystone 变换对补偿后的信号进行校正，图 2(e)给出了 Keystone 变换校正的结果，与图 2(d)比较可以看出，图 2(e)残留的线性徙动被校正，回波信号能量被集中到同一距离单元内。图 2(f)给出了对慢时间维进行 FFT 后的相参积累效果，从其局部放大图可以看出，信号能量被集中到了同一距离和速度单元内。

#### 4.2 不同信噪比条件下算法的估计精度

为了突出本文所提算法对回波信号积累效果的优越性，将本文所提算法与目前已有的几种无源雷达的目标回波积累算法进行了比较，如图 3 所示，包括互模糊函数(CAF)算法<sup>[3]</sup>、Keystone 变换(KT)算法<sup>[14]</sup>、包络插值结合分数阶傅里叶变换(EI-FRFT, envelope interpolation-fractional Fourier transform)算法<sup>[15]</sup>和 Keystone 变换结合傅里叶变换(KT-FT, Keystone transform-Fourier transform)算法<sup>[16]</sup>。回波信号的信噪比设置为-15 dB。

从图 3 可以看出，仅有本文所提算法将回波信

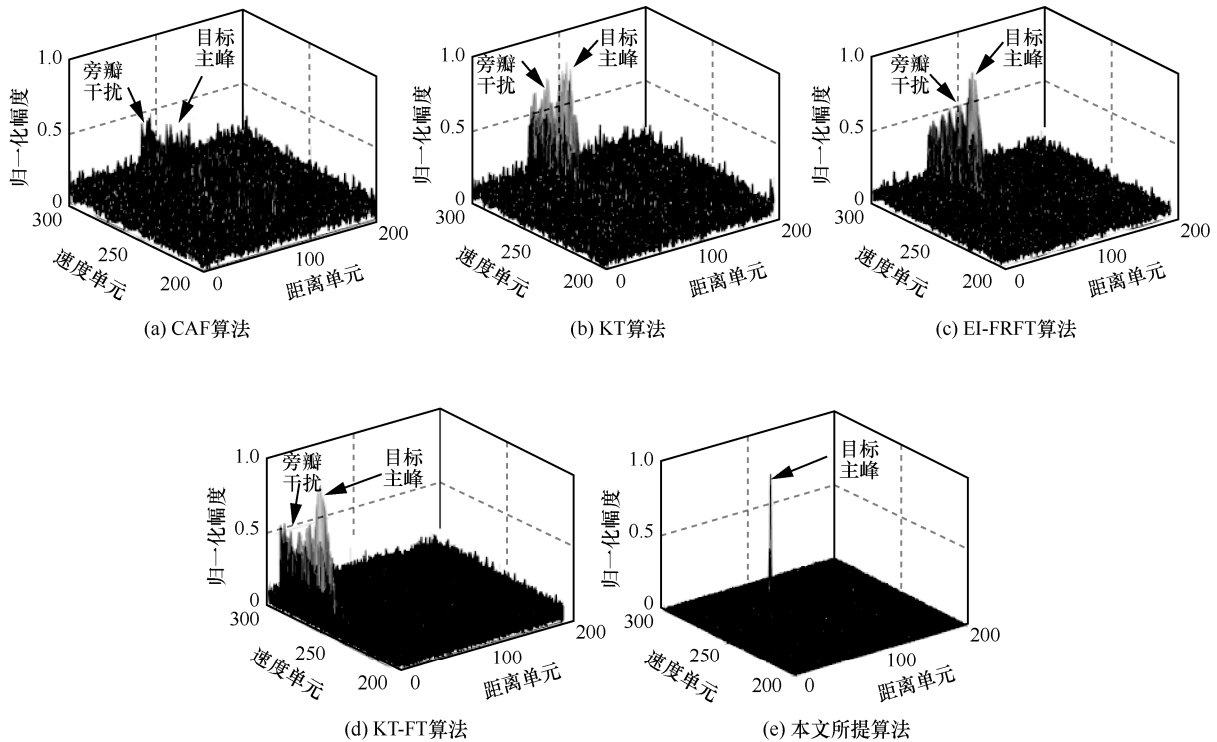


图 3 不同算法回波积累效果比较

号的能量集中在一点，积累后回波信号的能量最强。CAF 算法由于并未考虑任何徙动的影响，因此其积累效果最差，在目标主峰附近的旁瓣干扰非常大，甚至出现了高于目标主峰的伪主峰。KT 算法由于考虑了目标速度造成的徙动，因此与 CAF 算法相比，伪主峰被消除，但是在目标主峰附近，仍存在着严重的旁瓣干扰。EI-FRFT 算法相比于 KT 算法，旁瓣干扰得到一定程度的抑制，这主要得益于其信号模型中进一步考虑了目标加速度造成的徙动。相比于 EI-FRFT 算法，KT-FT 算法的旁瓣干扰得到进一步的抑制，但由于其算法模型中仅考虑了目标加速度的影响，忽略了第二加速度的影响，因此其积累后的目标主峰附近仍存在较强的旁瓣干扰。由于 CAF 算法、KT 算法、EI-FRFT 算法和 KT-FT 算法等现有算法均未考虑目标第二加速度造成的徙动，积累后的目标主峰附近均存在一定程度的旁瓣干扰，这将给目标检测造成严重的虚警和漏警。本文所提算法充分考虑了目标速度、加速度、第二加速度的影响，旁瓣干扰得到抑制，信号能量被更加集中在主瓣内。

### 4.3 不同信噪比条件下算法的检测概率

接下来，比较几种算法的目标检测性能。采用 CFAR 检测，将虚警率设置为  $P_f = 10^{-4}$ ，目标检测

概率由 1 000 次蒙特卡罗仿真统计得到。回波信噪比设置为  $-50 \sim 10$  dB，在该信噪比范围内，统计几种算法的检测概率，结果如图 4 所示。

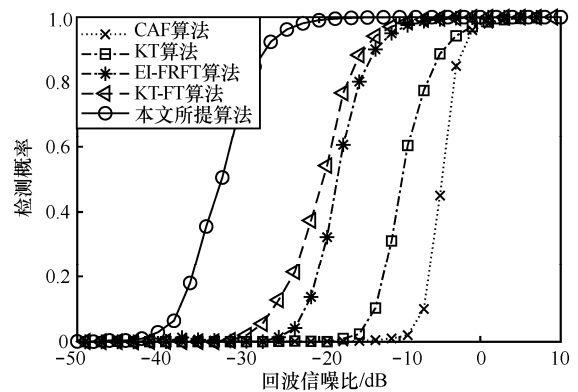


图 4 不同算法的检测性能曲线 ( $P_f = 10^{-4}$ )

从图 4 可以看出，同等条件下，本文所提算法的检测概率显著优于现有算法。CAF 算法由于完全没有考虑徙动的影响，因此其积累后检测性能最差。KT 算法由于考虑了目标速度引起的距离徙动，检测概率有所提升。EI-FRFT 算法与 KT-FT 算法相比，检测性能进一步提升，但由于忽略了第二加速度的影响，目标检测性能仍不甚理想。本文所提算法的目标检测性能显著优于 CAF 算法、KT 算法、

EI-FRFT 算法和 KT-FT 算法, 这主要得益于本文所提算法充分考虑了目标第二加速度的影响, 回波积累的能量更加集中于主瓣内, 避免了旁瓣干扰引起的能量损失, 因此检测概率更高。

## 5 结束语

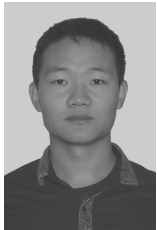
本文研究了无源雷达中复杂运动目标回波信号的长时间积累问题。复杂运动目标的速度、加速度、第二加速度等参数, 在回波积累过程中将产生严重的距离徙动和多普勒徙动, 如不能有效补偿, 将导致回波积累的能量分散和检测性能的恶化。为此, 本文提出了一种基于频域序列反转变换 (FRT) 和改进吕分布 (MLVD) 的无源雷达目标回波长时间相参积累算法。本文所提算法的基本思想是, 首先利用 FRT 去除距离徙动, 将回波能量积累至同一距离单元内, 然后利用 MLVD 对该距离单元内的回波信号进行处理, 估计出目标的加速度和第二加速度参数, 再利用估计出的加速度和第二加速度参数构造参考信号, 从而补偿目标加速度和第二加速度引起的二次和三次徙动, 最后利用 KT 校正了目标速度引起的线性徙动, 并将目标回波积累至一点。仿真实验证明了本文所提算法的回波积累效果要显著优于现有算法。

## 参考文献:

- [1] EDRICH M, SCHROEDER A, MEYER F. Design and performance evaluation of a mature FM/DAB/DVB-T multi-illuminator passive radar system[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2014, 8(2): 114-122.
- [2] 王鹏, 邱天爽, 李景春, 等. 无源雷达目标信号时延与多普勒频率联合估计[J]. 通信学报, 2015, 36(5): 47-55.  
WANG P, QIU T S, LI J C, et al. Joint estimation of target time delay and Doppler frequency in passive radar system[J]. Journal on Communications, 2015, 36(5): 47-55.
- [3] EVERS A, JACKSON J A. Cross-ambiguity characterization of communication waveform features for passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(4): 3440-3455.
- [4] 李小龙. 高速机动目标长时间相参积累算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.  
LI X L. Research on long time coherent integration algorithm for high speed maneuvering target[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [5] SUN G, XING M, XIA X G, et al. Robust ground moving-target imaging using deramp-Keystone processing[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(2): 966-982.
- [6] LI Y, XING M, SU J, et al. A new algorithm of ISAR imaging for maneuvering targets with low SNR[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2013, 49(1): 543-557.
- [7] LI X, KONG L, CUI G, et al. ISAR imaging of maneuvering target with complex motions based on ACCF-LVD[J]. Digital Signal Processing, 2015, 46(C): 191-200.
- [8] HUANG P, LIAO G, YANG Z, et al. A fast SAR imaging method for ground moving target using a second-order WVD transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(4): 1940-1956.
- [9] HUANG P, LIAO G, YANG Z, et al. Ground maneuvering target imaging and high-order motion parameter estimation based on second-order Keystone and generalized Hough-HAF transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 55(1): 320-335.
- [10] KULPA K S, MISIUREWICZ J. Stretch processing for long integration time passive covert radar[C]// CIE International Conference on Radar. 2007: 1-4.
- [11] MALANOWSKI M, KULPA K, OLSEN K E. Extending the integration time in DVB-T-based passive radar[C]// IEEE Radar Conference. IEEE, 2011: 190-193.
- [12] MALANOWSKI M. Detection and parameter estimation of manoeuvring targets with passive bistatic radar[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2012, 6(8): 739-745.
- [13] 关欣, 胡东辉, 仲利华, 等. 一种高效的外辐射源雷达高径向速度目标实时检测方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 581-588.  
GUAN X, HU D H, ZHONG L H, et al. An effective real-time target detection algorithm for high radial speed targets in passive radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(3): 581-588.
- [14] PIGNOL F, COLONE F, MARTELLI T. Lagrange polynomial interpolation based Keystone transform for passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2018, 54(3): 1151-1167.
- [15] 杨金禄, 单涛, 陶然. 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 407-411.  
YANG J L, SHAN T, TAO R. Method of migration compensation in coherent integration for digital TV based passive radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2011, 33(2): 407-411.
- [16] 杨宇翔, 同武勤, 熊瑾煜. 一种无源雷达高速机动目标检测新方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 3008-3013.  
YANG Y X, TONG W Q, XIONG J Y. A novel algorithm for detection of a maneuvering target in passive radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(12): 3008-3013.
- [17] KONG L, LI X, CUI G, 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.
- [18] XU J, XIA X G, PENG S B, et al. Radar maneuvering target motion estimation based on generalized Radon-Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(12): 6190-6201.
- [19] O'SHEA P. A new technique for instantaneous frequency rate estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(8): 251-252.
- [20] ZHENG J, SU T, ZHANG L, et al. ISAR imaging of targets with complex motion based on the chirp rate-quadratic chirp rate distribu-

- tion[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(11): 7276-7289.
- [21] WU L, WEI X, YANG D, et al. ISAR imaging of targets with complex motion based on discrete chirp Fourier transform for cubic chirps[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(10): 4201-4212.
- [22] LI Y, SU T, ZHENG J, et al. ISAR imaging of targets with complex motions based on modified Lv's distribution for cubic phase signal[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, 8(10): 4775-4784.
- [23] O'SHEA P. A fast algorithm for estimating the parameters of a quadratic FM signal[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 385-393.
- [24] WANG P, DJUROVIC I, YANG J. Generalized high-order phase function for parameter estimation of polynomial phase signal[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(7): 3023-3028.
- [25] DJUROVIC 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.
- [26] LV X, BI G, WAN C, et al. Lv's distribution: principle, implementation, properties, and performance[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3576-3591.

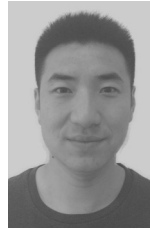
## [作者简介]



**赵勇胜**（1990-），男，江苏连云港人，战略支援部队信息工程大学博士生，主要研究方向为无源雷达信号处理。



**胡德秀**（1983-），男，甘肃武威人，博士，战略支援部队信息工程大学讲师，主要研究方向为无源定位、信号分析与处理。



**靳科**（1992-），男，山东济南人，战略支援部队信息工程大学博士生，主要研究方向为合成孔径雷达成像、动目标相参检测。



**刘智鑫**（1991-），男，新疆乌鲁木齐人，战略支援部队信息工程大学博士生，主要研究方向为辐射源定位、电子侦察等。



**赵拥军**（1964-），男，河南新乡人，战略支援部队信息工程大学教授、博士生导师，主要研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理。