

基于相邻互相关函数-参数化中心频率-调频率分布-Keystone变换的 无源雷达机动目标相参积累方法

赵勇胜 胡德秀* 刘智鑫 赵拥军 赵闯

(解放军战略支援部队信息工程大学数据与目标工程学院 郑州 450001)

摘要: 延长积累时间可以有效提高无源雷达的目标探测能力,但是对于高速机动目标,其速度、加速度、第二加速度等因素导致现有的检测算法在积累过程中发生距离徙动(RM)和多普勒频率徙动(DFM),使得目标检测性能恶化。该文针对无源雷达中变加速运动目标的长时间相参积累问题,提出一种基于相邻互相关函数(ACCF)-参数化中心频率-调频率分布(PCFCRD)-Keystone变换(KT)的相参积累算法(ACCF-PCFCRD-KT)。首先给出无源雷达中变加速运动目标的回波模型,分析了目标速度、加速度和第二加速度对相参积累的影响。针对目标第二加速度引起的多普勒频率弯曲,采用ACCF降低了距离和多普勒频率徙动的阶数,而后利用PCFCRD估计出目标加速度和第二加速度参数,在补偿了目标加速度和第二加速度引起的2次和3次徙动后,利用KT校正目标速度引起的线性徙动,并实现目标回波的积累。仿真结果表明,该算法可有效补偿无源雷达中目标运动导致的RM和DFM,对变加速机动目标的积累效果显著优于现有算法。

关键词: 无源雷达; 相参积累; 机动目标; 相邻互相关函数; 参数化中心频率调频斜率分布; Keystone变换

中图分类号: TN971

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)10-2358-08

DOI: 10.11999/JEIT180858

Coherent Integration Algorithm Based on Adjacent Cross Correlation Function-Parameterized Centroid Frequency-Chirp Rate Distribution-Keystone Transform for Maneuvering Target in Passive Radar

ZHAO Yongsheng HU Dexiu LIU Zhixin ZHAO Yongjun ZHAO Chuang

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

Abstract: Increasing the integration time can effectively improve the detection performance of passive radar. However, for maneuvering targets, the complex motions, such as high velocity, acceleration and jerk, cause existing detection methods to suffer the Range Migration (RM) and Doppler Frequency Migration (DFM) during the integration time, which deteriorates the detection performance. This paper addresses the long time coherent integration for a maneuvering target with high-order motion (e.g., jerk motion) in passive radar systems. A method based on Adjacent Cross Correlation Function (ACCF), Parameterized Centroid Frequency-Chirp Rate Distribution (PCFCRD) and Keystone Transform (KT)(ACCF-PCFCRD-KT), is proposed. Firstly, the signal model for the maneuvering targets is given, and the influence of the target velocity, acceleration and jerk on the coherent integration is analyzed. For the Doppler curvature induced by the jerk motion, the ACCF is firstly applied to reducing the order of RM and DFM. Then the PCFCRD operation is employed to estimate the acceleration and jerk parameters. After compensating the RM and DFM caused by the acceleration and jerk, the RM arising from the velocity is corrected via the KT operation and the target echo energy is coherently integrated. Simulation results demonstrate that the proposed method can effectively compensate the RM and DFM caused by the target motion parameters in passive radar, and for a maneuvering target with jerk motion, the proposed method achieves better integration performance over the existing methods.

收稿日期: 2018-09-03; 改回日期: 2019-08-01; 网络出版: 2019-08-21

*通信作者: 胡德秀 paper_hdx@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61703433)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61703433)

Key words: Passive radar; Coherent integration; Maneuvering target; Adjacent Cross Correlation Function (ACCF); Parameterized Centroid Frequency-Chirp Rate Distribution (PCFCRD); Keystone Transform (KT)

1 引言

无源雷达自身不辐射电磁波,而是利用环境中的广播、电视、通信等非合作民用辐射源作为外辐射源来探测目标^[1-3],这一特殊的工作原理使其相比于主动雷达系统,具有隐蔽性高、覆盖性好、操作和维护成本低、不占用频谱资源等优点,近年来在军用和民用领域均引起了学者的广泛兴趣^[4,5]。

无源雷达的显著特点是其配置了两条接收通道,分别用于接收来自外辐射源的直达波信号和经目标反射后的回波信号。由于外辐射源的非合作性,目标回波信号通常非常微弱。为此,在完成杂波抑制后^[6],无源雷达系统一般通过计算两路信号的互模糊函数(Cross Ambiguity Function, CAF),实现对目标信号的相参积累^[7]。为了探测远距离的微弱目标,无源雷达系统需要通过延长积累时间来增加信号能量,但对于高速机动目标,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,积累时间的延长将导致距离徙动(Range Migration, RM)和多普勒频率徙动(Doppler Frequency Migration, DFM),造成回波能量分散,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高速机动目标探测能力的关键所在。

目前,针对徙动补偿的研究主要针对脉冲体制的主动雷达系统^[8-11]。然而,与之相比,针对无源雷达系统中的高速机动目标徙动问题的研究则相对较少。但近年来,随着无源雷达目标徙动问题研究逐渐得到关注,针对无源雷达系统中的徙动补偿问题,陆续出现了一些算法。这些算法主要可以分为两种思路:一种思路是通过在无源雷达信号模型中加入速度、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^[12];另外一种思路是对信号分段处理,段内为快时间,段间为慢时间。文献^[13]将信号分段后,沿快时间匹配滤波及沿慢时间通过FFT获取多普勒信息,然后通Keystone变换(Keystone Transform, KT)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^[14]在信号模型中考虑了目标的加速度,并利用包络插值和时频变换分别校正了距离和多普勒频率徙动,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^[15]针对匀加速目标,提出一种基于KT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变换校正径向速度差的距离徙动,再对慢时间进行2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和多普勒频率徙动校正,使相参积累时间不再受目标速度和加速度的限制。然而,上述研究均未考虑目标做变加速运动时对徙动补偿的影响。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^[11]。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。

对于变加速运动目标,为了对其进行相参积累,不仅需校正补偿目标速度和加速度引起的距离徙动和多普勒频率徙动,还需校正补偿目标第二加速度引起的3阶距离徙动和多普勒频率徙动(又称为多普勒频率弯曲),这对信号处理提出了更高的要求。广义Radon傅里叶变换(Generalized Radon Fourier Transform, GRFT)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,但是其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^[16]。近年来,相邻互相关函数(Adjacent Cross Correlation Function, ACCF)被证明是降低徙动阶数的有效方法^[17,18],在消除包络徙动的同时使得多普勒频率徙动阶数降低;而参数化中心频率-调频率分布(Parameterized Centroid Frequency-Chirp Rate Distribution, PCFCRD)能够以高分辨率对线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)信号进行快速参数分析^[19]。

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,分析了目标速度、加速度、第二加速度对距离徙动和多普勒频率徙动的影响,提出了一种基于ACCF, PCFCRD和KT的无源雷达变加速运动目标长时间相参积累算法(ACCF-PCFCRD-KT)。算法首先通过ACCF降低了徙动的阶数,而后利用PCFCRD实现目标加速度和第二加速度的估计,最后,在补偿掉目标加速度和第二加速度引起的距离和多普勒频率徙动后,利用KT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^[12-15],本文算法充分考虑了第二加速度对距离徙动和多普勒频率徙动的影响,对变加速运动目标具有良好的积累效果,仿真实验验证了算法的有效性。

2 无源雷达回波信号模型分析

本文考虑的双基地无源雷达结构如图1所示。 T_0 和 R_0 分别为发射站和接收站,其基线距离为 l 。运动目标在0时刻的位置为 O ,由发射站 T_0 和接收站 R_0 到目标的向量分别为 $\mathbf{r}_1(0)$ 和 $\mathbf{r}_2(0)$; t 时刻运动至位置 O' ,由发射站 T_0 和接收站 R_0 到目标的向量分别为 $\mathbf{r}_1(t)$ 和 $\mathbf{r}_2(t)$ 。假设目标做变加速运动,初始速度为 \mathbf{v}_0 ,初始加速度为 \mathbf{a}_0 ,第二加速度为 \mathbf{k}_0 。那么, t 时刻目标到发射站 T_0 和接收站 R_0 的距离分别为

$$r_1(t) = \left| \mathbf{r}_1(0) + \int_0^t \left(\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_0 t + \frac{1}{2} \mathbf{k}_0 t^2 \right) dt \right| \quad (1)$$

$$r_2(t) = \left| \mathbf{r}_2(0) + \int_0^t \left(\mathbf{v}_0 + \mathbf{a}_0 t + \frac{1}{2} \mathbf{k}_0 t^2 \right) dt \right| \quad (2)$$

其中, $|\cdot|$ 表示2范数。则接收站接收到的目标回波信号与直达波信号的传播距离的差值为

$$r(t) = r_1(t) + r_2(t) - l \quad (3)$$

将 $r(t)$ 在 $t=0$ 处Taylor展开,并忽略3阶以上项,则回波信号模型可简化为

$$r(t) \simeq r_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 + \frac{1}{6}kt^3 \quad (4)$$

根据文献[12]可知,这里的 r_0 为双基地距离, v 为双基地速度, a 为双基地加速度, k 为双基地第二加速度。为方便阐述,下文所述的目标速度、加速度、第二加速度分别指这里的双基地速度 v 、双基地加速度 a 和双基地第二加速度 k 。

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 ,则接收站接收到的直达波信号和回波信号可表示为

$$y_r(t) = A_r s \left(t - \frac{l}{c} \right) \quad (5)$$

$$y_s(t) = A_s s \left(t - \frac{r_1(t) + r_2(t)}{c} \right) \cdot \exp \left(-j2\pi f_c \frac{r_1(t) + r_2(t)}{c} \right) \quad (6)$$

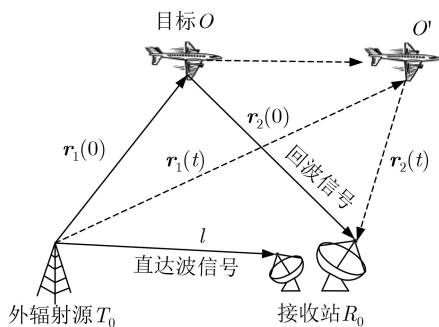


图1 双基地无源雷达目标运动示意图

对式(5)和式(6)进行2维分时处理,得到等效脉冲信号为

$$y_r(t_f, t_m) = A_r s \left(t_f - \frac{l}{c} \right) \quad (7)$$

$$y_s(t_f, t_m) = A_s s \left(t_f - \frac{r_1(t_m) + r_2(t_m)}{c} \right) \cdot \exp \left(-j2\pi f_c \frac{r_1(t_m) + r_2(t_m)}{c} \right) \quad (8)$$

其中, $t_f = nT_s$ 为快时间, $n = 0, 1, \dots, N-1$, T_s 为采样间隔; $t_m = mT_r$ 为慢时间, $m = 0, 1, \dots, M-1$, T_r 为等效脉冲重复时间。在划分等效脉冲时,需满足在每段信号的持续时间内,回波信号的距离徙动和多普勒频率徙动分别小于雷达的距离分辨率和多普勒频率分辨率^[20],即 $v_{\max}T_r < c/(2B)$, $a_{\max}T_r < \lambda/(2T_r)$,其中, v_{\max} 和 a_{\max} 分别表示目标可能的最大速度和最大加速度。在满足该条件下,每一段内目标的距离徙动和多普勒频率徙动可以基本忽略。

接下来,对分段后的信号进行匹配滤波。对式(7)和式(8)分别进行傅里叶变换(Fourier Transform, FT),得

$$Y_r(f_r, t_m) = A_r S(f_r) \exp \left(-j2\pi f_r \frac{l}{c} \right) \quad (9)$$

$$Y_s(f_r, t_m) = A_s S(f_r) \cdot \exp \left(-j2\pi (f_c + f_r) \frac{r_1(t_m) + r_2(t_m)}{c} \right) \quad (10)$$

其中, $S(f_r) = \text{FT} \{s(t_f)\}$ 。将式(9)和式(10)共轭相乘,得

$$P(f_r, t_m) = Y_s(f_r, t_m) Y_r^*(f_r, t_m) = A_1 |S(f_r)|^2 \exp \left(-j2\pi (f_c + f_r) \frac{r(t_m)}{c} \right) \quad (11)$$

其中,*表示取共轭, A_1 为信号幅度。将式(11)关于 f_r 进行逆傅里叶变换(Inverse Fourier Transform, IFT),得

$$p(t_f, t_m) = A_2 s' \left(t_f - \frac{r(t_m)}{c} \right) \exp \left(-j2\pi f_c \frac{r(t_m)}{c} \right) \quad (12)$$

其中, A_2 为信号幅度, $s'(t_f) = \text{IFT} \{ |S(f_r)|^2 \}$,其峰值位于 $t=0$ 处。从式(12)可以看出,脉冲压缩后的回波包络随着慢时间 t_m 而变化,当变化超过距离分辨率单元 $\Delta r = c/2B$ 时,即会出现距离徙动。此外,由于第二加速度的存在,式(12)的相位是关于

慢时间 t_m 的3阶函数, 其会导致多普勒频率徙动(包括多普勒频率弯曲), 造成回波能量分散。

3 基于ACCF-PCFCRD-KT的徙动补偿算法

本节给出基于ACCF-PCFCRD-KT的徙动补偿算法。算法的基本思路是首先通过ACCF降低徙动的阶数, 而后利用PCFCRD实现目标加速度和第二加速度的估计, 最后, 在补偿掉目标加速度和第二加速度引起的距离和多普勒频率徙动后, 利用KT校正目标速度引起的距离徙动, 实现目标回波的长时间相参积累。

3.1 基于ACCF的距离徙动校正

根据ACCF的定义, 式(12)的ACCF可以表示为

$$R_1(\tau_1, t_m) = \int_{t_f} p(t_f, t_m) p^*(t_f - \tau_1, t_{m+1}) dt_f \quad (13)$$

将式(13)关于 t_f 转化到频域进行计算, 得

$$R_1(\tau_1, t_m) = \text{IFT}_{f_r} \{P(f_r, t_m) P^*(f_r, t_{m+1})\} \quad (14)$$

其中,

$$P(f_r, t_m) = A_1 |S(f_r)|^2 \exp\left(-j2\pi(f_c + f_r) \frac{r(t_m)}{c}\right) \quad (15)$$

$$P(f_r, t_{m+1}) = A_1 |S(f_r)|^2 \cdot \exp\left(-j2\pi(f_c + f_r) \frac{r(t_{m+1})}{c}\right) \quad (16)$$

把式(15)和式(16)代入式(14), 得

$$R_1(\tau_1, t_m) = A_3 s''\left(\tau_1 + \frac{N_0}{c}\right) \exp\left(j2\pi f_c \frac{N_1}{c}\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_c \frac{N_2}{c} t_m\right) \exp\left(j2\pi f_c \frac{N_3}{c} t_m^2\right) \quad (17)$$

其中, $s''(t_f) = \text{IFT} \{|S(f_r)|^4\}$, 其峰值位于 $t = 0$ 处, N_0, N_1, N_2, N_3 分别为

$$N_0 = N_1 + N_2 t_m + N_3 t_m^2 \quad (18)$$

$$N_1 = vT_r + \frac{1}{2} a T_r^2 + \frac{1}{6} k T_r^3 \quad (19)$$

$$N_2 = a T_r + \frac{1}{2} k T_r^2 \quad (20)$$

$$N_3 = \frac{1}{2} k T_r \quad (21)$$

从式(17)–式(21)可以看出, 通过ACCF, 距离和多普勒频率徙动的阶数被降低, 更具体地说, 式(17)相位中的3阶项已经消失, 即多普勒频率弯曲已经消除, 包络变为关于慢时间 t_m 的2次函数, 且包络峰值位于

$$\tau_1 = -\frac{N_1}{c} - \frac{N_2}{c} t_m - \frac{N_3}{c} t_m^2 \quad (22)$$

式(22)中含有3项, 其中第1项为与慢时间 t_m 无关的常数项, 第2项为慢时间 t_m 的线性项, 第3项为慢时间 t_m 的2次项。因此, 本文只需考虑第2项和第3项对包络徙动的影响。尽管 N_2/c 和 N_3/c 关于 t_m 的变化不同, 但是通常情况下, 第2项和第3项引起的距离徙动不会超过1个距离分辨单元^[18]。也就是说, 通过ACCF校正后, 目标的距离徙动已经被校正, 多普勒频率弯曲已经被消除。

3.2 基于PCFCRD的目标加速度和第二加速度估计

从式(17)可以看出, 经过ACCF校正以后, 得到的峰值包络不再随慢时间 t_m 变化, 即经过距离徙动校正以后, 目标回波能量被校正至同一个距离单元内。因此可以将该距离单元的回波信号进行分析, 并在该距离单元内将 $A_3 s''(\tau_1 + N_0/c)$ 的值作为常数, 即可以将式(17)简化为

$$R_1(t_m) = A_4 \exp\left(j2\pi f_c \frac{N_1}{c}\right) \exp\left(j2\pi f_c \frac{N_2}{c} t_m\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_c \frac{N_3}{c} t_m^2\right) \quad (23)$$

其中, A_4 为信号幅度。从式(23)可以看出, $R_1(t_m)$ 是一个LFM信号, 其中心频率为 $N_2 f_c/c$ 、调频斜率为 $2N_3 f_c/c$ 。而PCFCRD方法在处理LFM信号参数分析中具有显著优于传统算法的性能^[19]。因此, 接下来利用PCFCRD估计式(23)中LFM信号中心频率 $N_2 f_c/c$ 和调频斜率参数 $2N_3 f_c/c$, 进而估计出目标的运动参数 a 和 k 。

首先, 定义相关函数为

$$R_2(t_m, \tau_2) = R_1\left[t_m + \left(\tau_2 + \frac{h}{2}\right)\right] \cdot R_1\left[t_m - \left(\tau_2 + \frac{h}{2}\right)\right] \quad (24)$$

其中, h 为一固定时延。对 $R_2(t_m, \tau_2)$ 关于 τ_2 作积分

$$\text{NTC}(t_m, \gamma) = \int_{\tau_2} R_2(t_m, \tau_2) \exp\left[-j2\pi\gamma\left(\tau_2 + \frac{h}{2}\right)^2\right] d\tau_2 \quad (25)$$

将式(23)中 $R_1(t_m)$ 的表达式代入式(25)中, 得

$$\begin{aligned} \text{NTC}(t_m, \gamma) &= A_4^2 \exp\left[j2\pi\left(\frac{2N_1 f_c}{c} + \frac{2N_2 f_c}{c} t_m + \frac{2N_3 f_c}{c} t_m^2\right)\right] \\ &\int_{\tau_2} \exp\left[-j2\pi\left(\gamma - \frac{2N_3 f_c}{c}\right)\left(\tau_2 + \frac{h}{2}\right)^2\right] d\tau_2 \end{aligned} \quad (26)$$

对于离散信号, 式(26)可以通过非均匀快速傅里叶

变换(NonUniform FFT, NUFFT)进行快速计算。接下来,对式(26)关于 t_m 做傅里叶变换,最终得到 $R_1(t_m)$ 的PCFCRD为

$$\begin{aligned} & \text{PCFCRD}(f_m, \gamma) \\ &= \int_{t_m} \text{NTC}(t_m, \gamma) \exp(-j2\pi\gamma t_m^2) \\ & \quad \cdot \exp[-j2\pi f t_m] dt_m \\ &= A_5 \text{sinc} \left[\frac{T}{2} \left(f_m - \frac{2N_2 f_c}{c} \right) \right] \\ & \quad \cdot \int_{t_m} \exp \left[j2\pi \left(\gamma - \frac{2N_3 f_c}{c} \right) \left(\tau_2 + \frac{h}{2} \right)^2 \right] d\tau_2 \end{aligned} \quad (27)$$

由式(27)可以看出, PCFCRD(f_m, γ)的峰值出现在(f_m, γ) = ($2N_2 f_c/c, 2N_3 f_c/c$)。通过搜索PCFCRD(f_m, γ)峰值所在位置,即可估计出 N_2 和 N_3 ,从中可进一步估计出 a 和 k 。

需要说明的是,上述推导仅给出了经过ACCF处理后,同一距离单元上单个目标的加速度和第二加速度的估计。不能排除的是,同一距离单元上也可能存在多个目标的回波,即同一距离单元上可能存在多个线性调频信号。在利用PCFCRD算法处理同一距离单元上的多个线性调频信号时,会出现多个目标的耦合,但是多目标之间的耦合项不会被PCFCRD算法积累成峰值^[19]。因此对于同一距离单元上的多个目标,上述算法依然适用。

3.3 基于Keystone变换的目标双基地距离和速度估计

在估计出参数 a 和 k 后,构建参考信号为

$$P_{\text{ref}}(f_r, t_m) = \exp \left[j2\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} \left(\frac{1}{2} a t_m^2 + \frac{1}{6} k t_m^3 \right) \right] \quad (28)$$

将式(28)和式(11)相乘,得

$$R_3(f_r, t_m) = A_1 |S(f_r)|^2 \exp \left(-j2\pi (f_c + f_r) \frac{r_0 + v t_m}{c} \right) \quad (29)$$

注意到式(29)中目标加速度和第二加速度引起的距离徙动和多普勒频率徙动已经得到校正,但是目标频率与慢时间仍然存在耦合,即目标仍然存在距离徙动。在这种情况下,可以利用如下的Keystone变换式进行变量代换以消除目标的距离徙动

$$t'_m = \frac{f_c + f_r}{f_c} t_m \quad (30)$$

将式(30)代入式(29),得

$$\begin{aligned} R_3(f_r, t'_m) &= A_1 |S(f_r)|^2 \\ & \quad \cdot \exp \left(-j2\pi \frac{f_c r_0 + f_r r_0 + f_c v t'_m}{c} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

从式(31)可以看出,指数项中的目标频率与慢时间的耦合已经解除。为了将式(31)中各点目标的回波包络积累在一点,对式(31)关于 f_r 做逆傅里叶变换,关于 t'_m 做傅里叶变换,得

$$R_4(\tau, f) = A_6 s' \left(\tau - \frac{r_0}{c} \right) \text{sinc} \left[-j2\pi \left(f - \frac{f_c v}{c} \right) \right] \quad (32)$$

式(32)中可以看出,信号回波被积累至 $R_4(\tau, f)$ 的峰值(τ, f) = ($r_0/c, f_c v/c$)处。通过寻找 $R_4(\tau, f)$ 峰值,即可估计出目标双基地距离 r_0 和双基地速度 v 。对 $R_4(\tau, f)$ 进行恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测,即可检测出微弱的目标回波。

4 仿真实验

本节通过仿真实验验证本文相参积累算法的有效性。实验场景设计如下:在站心直角坐标系下,接收站位于原点,目标做变加速运动,其运动轨迹满足 $r(t) \approx 10000 + 200t + 50t^2 + 15t^3$ 。外辐射源发射BPSK信号,载波频率500 MHz,带宽8 MHz,采样率20 MHz,划分的等效脉冲重复时间1.3 ms,等效脉冲数1025。按照式(7)生成参考信号,按照式(8)生成回波信号并添加白噪声以仿真实际中接收到的低信噪比回波信号。

仿真1 ACCF-PCFCRD-KT算法对目标回波信号的积累效果

将回波信号的信噪比设置为-30 dB,利用本文算法对回波信号进行积累,结果如图2所示。

图2(a)可以看出,由于目标运动的影响,分段信号的脉冲压缩结果出现了严重的距离徙动。图2(b)给出了ACCF校正的结果,距离徙动得到了校正,回波信号能量被集中到同一距离单元内,根据式(22)可知,该距离单元位置为 $-vT_r - 1/2aT_r^2 - 1/6kT_r^3$ 。图2(c)给出了PCFCRD的积累结果,可以看出信号在中心频率-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二加速度。利用估计出的目标加速度和第二加速度构造参考信号,从而补偿掉目标加速度和第二加速度引起的距离和多普勒频率徙动,图2(d)给出了补偿掉2次和3次的距离徙动后残留的徙动情况。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PCFCRD估计出的目标加速度和第二加速度这两个参数的准确度很高,距

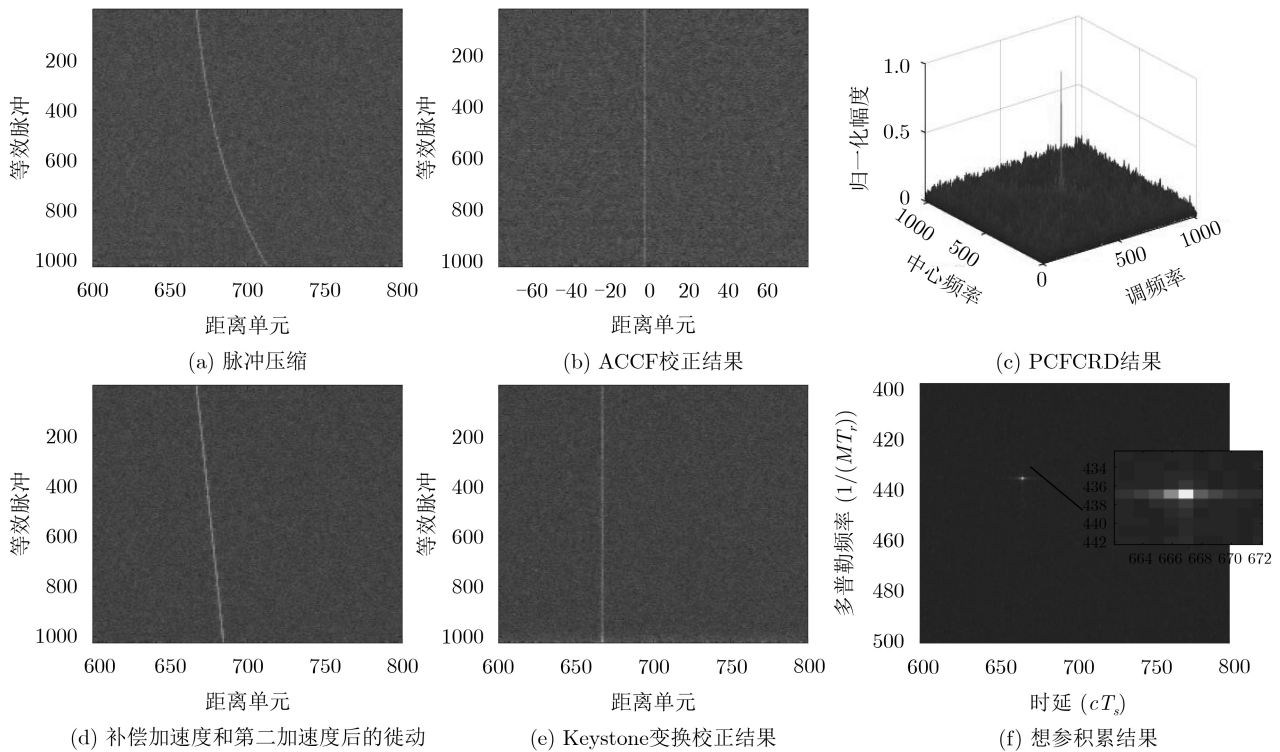


图2 本文算法对回波积累效果

离和多普勒频率弯曲被几乎完全消除。通过KT对补偿后的信号进行校正，图2(e)给出了KT校正的结果，与图2(d)比较可以看出，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至了同一距离和速度单元内。

仿真2 不同算法目标积累效果的比较

为了突出本文算法对回波信号积累效果的优越性，将本文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，包括互模糊函数(CAF)算法^[7]，Keystone变换(KT)算法^[13]，包络插值结合分数阶傅里叶变换(EI-FRFT)算法^[14]，Keystone变换结合傅里叶变换(KT-FT)算法^[15]。回波信号的信噪比设置为-30 dB。

从图3可以看出，仅有本文算法将回波信号的能量集中在了一点，积累后回波信号的能量最强。CAF算法由于并非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相比，伪主峰被消除，但是在目标主峰附近，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。KT-FT算法相比于EI-FRFT

算法，旁瓣干扰得到进一步地抑制，但由于其算法模型中仅考虑了目标加速度的影响，而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、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，因此其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。

仿真3 不同算法目标检测性能的比较

接下来比较几种算法的目标检测性能。采用CFAR检测，虚警率设置为 $P_f = 10^{-4}$ ，目标检测概率由1000次蒙特卡罗仿真统计得到。回波信噪比设置为-50~-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。

从图4可以看出，同等条件下，本文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，在信噪比-50~-10 dB范围内，检测概率接近于0。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算法和KT-FT算法与之相比，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。本文算法的目标检测性能显著优于包括CAF，KT，

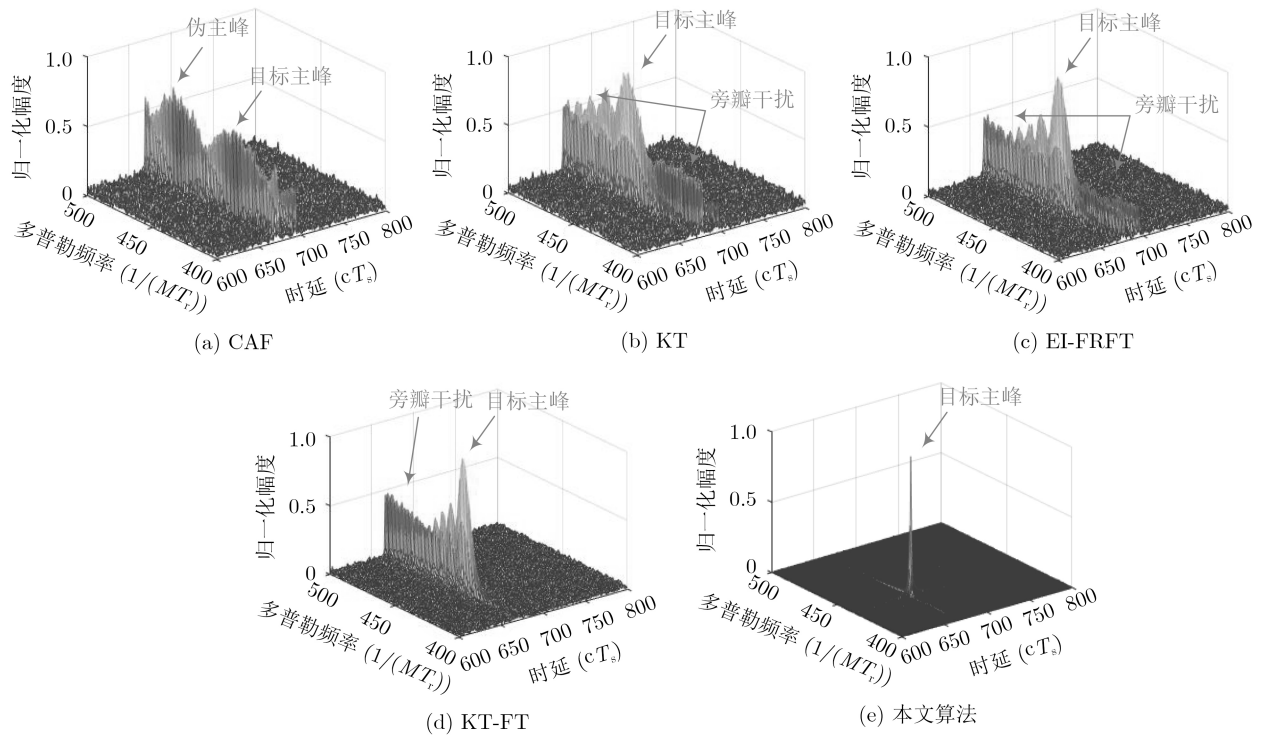
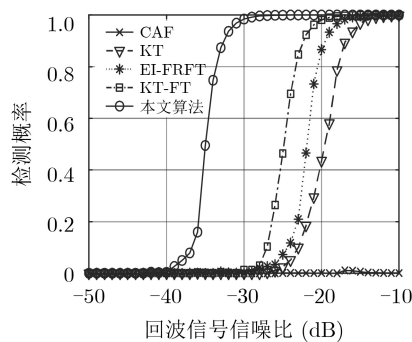


图3 不同算法回波积累效果比较

图4 不同算法的检测性能曲线($P_f = 10^{-4}$)

EI-FRFT, KT-FT在内的其余几种算法,这主要得益于本文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 结论

本文研究了无源雷达中高速机动目标回波信号的长时间积累问题。高速机动目标的速度、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频率徙动,如不能有效补偿,将导致回波积累的能量分散,检测性能的恶化。为此,本文提出了一种基于相邻互相关函数(ACCF)-参数化中心频率-调频率分布(PCFCRD)-Keystone变换(KT)的无源雷达目标回波长时间相参积累算法,算法的基本思想是:首先利用ACCF降低阶数,然后利用PCFCRD估计目标的加速度

和第二加速度参数,在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2次和3次徙动后,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。最后通过仿真实验,证明了本文算法的回波积累效果要显著优于现有算法。

参考文献

- [1] ZAIMBASHI A. Target detection in analog terrestrial TV-based passive radar sensor: joint delay-Doppler estimation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(17): 5569–5580. doi: 10.1109/JSEN.2017.2725822.
- [2] ZHAO Yongsheng, ZHAO Yongjun, and ZHAO Chuang. A novel algebraic solution for moving target localization in multi-transmitter multi-receiver passive radar[J]. *Signal Processing*, 2018, 143: 303–310. doi: 10.1016/j.sigpro.2017.09.014.
- [3] WANG Yasen, BAO Qinglong, WANG Dinghe, et al. An experimental study of passive bistatic radar using uncooperative radar as a transmitter[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(9): 1868–1872. doi: 10.1109/LGRS.2015.2432574.
- [4] OLSEN K E and ASEN W. Bridging the gap between civilian and military passive radar[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2017, 32(2): 4–12. doi: 10.1109/MAES.2017.160030.
- [5] GASSIER G, CHABRIEL G, BARRÈRE J, et al. A unifying approach for disturbance cancellation and target

- detection in passive radar using OFDM[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(22): 5959–5971. doi: [10.1109/TSP.2016.2600511](https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2600511).
- [6] COLONE F, O'HAGAN D W, LOMBARDO P, *et al.* A multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 698–722. doi: [10.1109/TAES.2009.5089551](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5089551).
- [7] HIGGINS T, WEBSTER T, and MOKOLE E L. Passive multistatic radar experiment using WiMAX signals of opportunity. Part 1: Signal processing[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 238–247. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0020](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0020).
- [8] ZHU Daiyin, LI Yong, and ZHU Zhaoda. A Keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 18–22. doi: [10.1109/LGRS.2006.882147](https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.882147).
- [9] 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. doi: [10.1109/TAES.2012.6178044](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6178044).
- [10] RAO Xuan, TAO Haihong, SU Jia, *et al.* Detection of constant radial acceleration weak target via IAR-FRFT[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 3242–3253. doi: [10.1109/TAES.2015.140739](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140739).
- [11] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, *et al.* Radar maneuvering target detection and motion parameter estimation based on TRT-SGRFT[J]. *Signal Processing*, 2017, 133: 107–116. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.10.014](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.10.014).
- [12] MALANOWSKI M. Detection and parameter estimation of manoeuvring targets with passive bistatic radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(8): 739–745. doi: [10.1049/iet-rsn.2012.0072](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2012.0072).
- [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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00903](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00903).
- GUAN Xin, HU Donghui, ZHONG Lihua, *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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00903](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00903).
- [14] 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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00414](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00414).
- YANG Jinlu, SHAN Tao, and TAO Ran. Method of migration compensation in coherent integration for digital TV based passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2): 407–411. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00414](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.00414).
- [15] 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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01984](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01984).
- YANG Yuxiang, TONG Wuqin, and XIONG Jinyu. A novel algorithm for detection of a maneuvering target in passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 3008–3013. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01984](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01984).
- [16] XU Jia, ZHOU Xu, QIAN Lichang, *et al.* Hybrid integration for highly maneuvering radar target detection based on generalized radon-fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(5): 2554–2561. doi: [10.1109/TAES.2016.150076](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.150076).
- [17] LI Yachao, XING Mengdao, SU Junhai, *et al.* A new algorithm of ISAR imaging for maneuvering targets with low SNR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 543–557. doi: [10.1109/TAES.2013.6404119](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6404119).
- [18] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, *et al.* A fast maneuvering target motion parameters estimation algorithm based on ACCF[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(3): 270–274. doi: [10.1109/LSP.2014.2358230](https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2358230).
- [19] ZHENG Jibin, LIU Hongwei, and LIU Qinghuo. Parameterized centroid frequency-chirp rate distribution for LFM signal analysis and mechanisms of constant delay introduction[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(24): 6435–6446. doi: [10.1109/TSP.2017.2755604](https://doi.org/10.1109/TSP.2017.2755604).
- [20] MALANOWSKI M, KULPA K, KULPA J, *et al.* Analysis of detection range of FM-based passive radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(2): 153–159. doi: [10.1049/iet-rsn.2013.0185](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0185).
- 赵勇胜: 男, 1990年生, 博士生, 研究方向为无源雷达信号处理。
 胡德秀: 男, 1983年生, 讲师, 研究方向为无源定位、信号分析与处理。
 刘智鑫: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为辐射源定位、电子侦察等。
 赵拥军: 男, 1964年生, 教授、博士生导师, 研究方向为雷达信号处理。
 赵 闯: 男, 1978年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理。