DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2013.01.008

一种径向匀加速目标包络徙动补偿新方法

蒋 千，孔令讲，杨建宇
（电子科技大学电子工程学院，四川成都 611731）

摘 要：雷达信号多脉冲长时间积累是提高雷达检测性能的重要手段。当雷达探测高速运动目标时，目标的径向加速度将引起二次距离走动，使雷达检测性能大大降低。针对此问题，提出一种消除距离走动二阶项的新方法。该方法首先对目标回波进行广义二阶 Keystone 变换，然后在慢时间域通过解线调的思路估计多普勒调频斜率，进而补偿多普勒高阶项，最后对补偿后信号再进行广义二阶 Keystone 变换，从而完全消除距离走动。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词：高速目标探测；长时间相参积累；跨距离单元走动；广义二阶 Keystone 变换

中图分类号：TN957　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-2337(2013)01-0045-06

A New Method for Envelope Migration Correction of Target with Radial Acceleration

JIANG Qian, KONG Ling-jiang, YANG Jian-yu
(*School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *China*)

Abstract: The improvement of radar detection performance is commonly realized by the way of multi-pulses long-term accumulation. However, when the radar detects high-speed targets, there will be a secondary range walk caused by radial acceleration, which makes the radar detection performance degrade greatly. To solve this problem, a novel method to eliminate the secondary range walk suggested. First, we employ generalized second order Keystone transform on the echo signal. Then the high order of Doppler frequency is compensated by dechirping. At last, the generalized second order Keystone transform is again used to eliminate the secondary range walk completely. Computer simulation results confirm the effectiveness of the proposed method.

Key words: high-speed target detection; long-time coherent integration; walk across range cells; generalized second order Keystone transform

1 引 言

隐身、高速目标的不断发展对现代雷达的检测跟踪提出了严峻挑战。为了提高现役雷达系统对远程、微弱和高速目标的检测性能，通常将增加目标照射时间作为一种重要手段。但是，随着积累时间的增加和目标的高速运动，目标回波会出现跨距离单元(ARU)走动、跨多普勒单元(ADU)走动、跨波束(ABU)走动的“三跨”现象。如果在相参积累时间内，目标的距离走动超过半个距离单元，回波能量就得不到有效的积累[1]。

传统脉冲多普勒(PD)雷达都采用长时间积累提高检测信噪比，即利用时间换能量。实现高速微弱目标长时间相参积累通常需要对回波进行运动补偿(包括包络对齐和多普勒走动补偿等)。常用的包络对齐方法[2](如互相关法、最小熵法、谱峰跟踪法等)仅适用于信噪比较高的场合，在低信噪比的情况下，由于相邻回波相关性较差，无法获得较好的包络对齐效果。采用时频分析或多项式相位信号模型的各种非平稳信号检测和估计方法(如自适应子波变换、Radon-Wigner 算法、高阶模糊函数法、多项式 Wigner-Ville 分布等)随着积累时间增加所需要的资源量(特别是存储量)也大大

收稿日期：2012-06-05；修回日期：2012-07-17
基金项目：国家自然科学基金(No.61178068)；四川省青年科学基金(No.2011JQ0024)

增加，很难应用于长时间相参积累系统中。基于 Hough 变换的长时间积累方法[2]利用目标回波在距离-多普勒-时间三维空间呈一条直线的性质，沿直线积累，但该方法无法利用回波相位关系，积累性能不如相参积累好。

采用 Keystone 变换校正回波包络走动适用于多目标、低信噪比的环境，但算法应用的前提是目标匀速运动的假设并依赖于目标回波的多普勒模糊度，忽略了目标的高次运动影响。事实上在长达秒级的脉冲积累时间内，高速运动目标或者机动性较强的目标会作加速运动，甚至旋转，其高次运动尤其是二次运动的影响不能忽略。现有的解决方法大都是先消除距离走动一阶项再校正距离走动二阶项[3]，难以有效地积累信号能量。

针对此问题，本文提出了先消除距离走动二阶项再消除一阶项的新思路。该方法首先对目标回波进行广义二阶 Keystone 变换，然后通过解线调补偿多普勒高阶项，最后再对补偿后信号进行一次广义二阶 Keystone 变换，从而完全消除距离走动。通过仿真验证了本方法是一种有效的长时间相参积累方法，具有一定的工程实用价值。

2 问题描述

假设相参雷达发射信号为线性调频脉冲串，信号脉宽为 T_p，调频斜率为 γ，载频为 f_c，脉冲重复周期为 T。由于弹道导弹等目标的高速运动，因此，考虑回波信号的时间尺度因子，在 $|v|\ll c$（v 是目标径向速度，c 是光速）的条件下，假设以相参积累的第一个脉冲的发射时间为时间起点，则第 m 个脉冲的目标基带回波信号可以写为[4-5]

$$s_r(\hat{t},m)=A_r\mathrm{rect}(\frac{\hat{t}-\tau_m}{T_p})\cdot\exp[\mathrm{j}\pi\gamma(\hat{t}-\tau_m)^2]\cdot\exp(-\mathrm{j}2\pi f_c\tau_m) \tag{1}$$

式中，A_r 为目标散射点回波复幅度，设其在积累时间内固定不变，$m=0,1,\cdots,N_s-1$，N_s 为 CPI 内脉冲个数。设目标以初始径向速度 v_0、加速度 a 朝向雷达匀加（减）速运动，起始斜距为 R_0，则对于不同慢时间采样，第 m 个脉冲发射时目标与雷达的相对距离为

$$R(mT)=R_0-v_0mT-0.5a\cdot(mT)^2=R_0-R(t_m) \tag{2}$$

式中，$t_m=mT$ 为慢时间，第 m 个脉冲回波的延迟 $\tau_m=2R(mT)/c$。

由式（2）可知，目标径向匀加速运动时，$R(mT)$ 具有线性和二次运动分量。

将目标基带回波利用快速傅里叶变换进行脉冲压缩（匹配滤波），匹配滤波器为 $h(\hat{t},m)=\mathrm{rect}(\hat{t}/T_p)\exp(\mathrm{j}\pi\gamma\hat{t}^2)$，可得

$$x(\hat{t},m)=s_r(\hat{t},m)*h(\hat{t},m)=T_pB\,\mathrm{sinc}[\pi B(\hat{t}-\tau_m)]\exp(-\mathrm{j}2\pi f_c\tau_m) \tag{3}$$

对脉压后的信号进行傅里叶变换，从而得到快时间频域信号

$$\begin{aligned}X(f,m)=&P(f)\exp(-\mathrm{j}2\pi(f_c+f)\tau_m)=\\&\mathrm{rect}(\frac{f}{B})\exp[-\mathrm{j}2\pi(f_c+f)2R_0/c]\cdot\\&\exp[\mathrm{j}4\pi(f_c+f)vmT/c]\cdot\\&\exp[\mathrm{j}2\pi(f_c+f)a(mT)^2/c]\end{aligned} \tag{4}$$

由式（4）可见，频谱中的相位调制项为

$$\exp(-\mathrm{j}2\pi f\tau_m)=\exp(-\mathrm{j}4\pi f(R_0-R(t_m)/c) \tag{5}$$

即第 m 个脉冲的回波频谱附加了一个 f 与 $R(t_m)$ 耦合的相位项，这个相位就是造成距离走动的原因。其中 $\exp(\mathrm{j}4\pi fvmT/c)$ 即为一次项的包络走动在频域上的表示，$\exp[\mathrm{j}2\pi fa(mT)^2/c]$ 为二次项的包络走动在频域上的表示。

将 τ_m 代入式（3）并进行 Keystone 变换

$$m=n\cdot f_c/(f_c+f) \tag{6}$$

可得

$$\begin{aligned}O(f,n)=&X(f,nf_c/(f_c+f))=\\&\mathrm{rect}(f/B)\cdot\exp[\frac{-\mathrm{j}2\pi(f_c+f)2R_0}{c}]\cdot\\&\exp(\frac{\mathrm{j}4\pi f_cvnT}{c})\cdot\exp(\frac{\mathrm{j}2\pi an^2T^2f_c^2/(f_c+f)}{c})\end{aligned} \tag{7}$$

由式（7）可以发现，经过一阶 Keystone 变换后，虽然消除了线性距离走动时间一次项，但是由加速度引起的二次距离走动没有得到校正，且不再与时间二次项成正比关系，依然会对长时间相参积累产生影响。

3 距离徙动补偿算法

包络插值移位算法、一阶 Keystone 变换和快时间频域校正算法[4]都仅能补偿由目标初始速度引起的包络走动时间一次项。为了解决径向匀加速目标的长时间相参积累问题，除了补偿包络走动时间一次项，还必须补偿由目标加速度引起的包络走动时间二次项。

3.1　算法原理

广义二阶 Keystone 变换是在慢时间维进行尺度变换,其变换尺度为

$$m = n \cdot \sqrt{\frac{f_c}{f_c + f}} \tag{8}$$

数据重排后呈现的是右腰为 $y = x^{1/2}$ 的曲线,左腰为 $y = -x^{1/2}$ 的曲线,如图 1 所示。

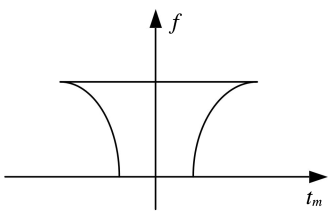


图 1　广义二阶 Keystone 变换后数据平面示意图

对式(3) 进行二阶 Keystone 变换,可得变换后的信号为

$$\begin{aligned} O(f,n) = X[f, n \cdot (f_c/f_c + f)^{1/2}] = \\ \text{rect}(f/B) \cdot \exp[-\text{j}4\pi R_0 (f_c + f)/c] \cdot \\ \exp[\text{j}4\pi(\sqrt{f_c}\ \sqrt{f_c + f}) v n T/c] \cdot \\ \exp(\text{j}2\pi f_c a n^2 T^2/c) \end{aligned} \tag{9}$$

可以看出,经过广义二阶 Keystone 变换,包络走动的二次项已经消除。

值得注意的是,虽然广义二阶 Keystone 变换可以消除目标加速度引起的二阶距离走动,但是从式(9) 等号右边第三项 $\exp[\frac{\text{j}4\pi(\sqrt{f_c}\ \sqrt{f_c + f}) v n T}{c}]$ 中可以看出,由速度引起的线性距离走动仍然没有得到补偿。由于一阶 Keystone 变换和广义二阶 Keystone 变换皆不能同时补偿所有阶次的距离走动,因此,在运动状态未知情况下,无法通过一次上述变换校正全部距离徙动。由式(9),经过广义二阶 Keystone 变换后的信号仍然是频域信号,可以采用快时间频域校正算法对剩下的走动进行补偿[4]。

本文首先采用广义二阶 Keystone 变换消除二阶项,再消除一阶项的方法。具体如下:进一步观察式(9),对式中 n 再进行一次广义二阶 Keystone 变换[6],如果对一次耦合项作两次广义二阶 Keystone 变换,等效于作一次 Keystone 变换,也就可以校正一次距离走动。如果在作第二次二阶 Keystone 变换之前将式(9) 中的 $\exp(\text{j}2\pi f_c a n^2 T^2/c)$ 项补偿掉,即构造相位补偿函数:

$$Y = \exp(-\text{j}2\pi f_c a n^2 T^2/c) \tag{10}$$

式(10) 与式(9) 相乘,得

$$\begin{aligned} O_{H0}(f,n) = \text{rect}(\frac{f}{B}) \cdot \exp[-\text{j}4\pi R_0 (f_c + f)/c] \cdot \\ \exp[\text{j}4\pi(\sqrt{f_c}\ \sqrt{f_c + f}) v n T/c] \end{aligned} \tag{11}$$

这时,对式(11) 继续应用广义二阶 Keystone 变换,得

$$\begin{aligned} O_H(f,n) = \text{rect}(\frac{f}{B}) \cdot \exp[-\text{j}4\pi R_0 (f_c + f)/c] \cdot \\ \exp[\text{j}4\pi f_c v n T/c] \end{aligned} \tag{12}$$

此时,f 与 $R(t_m)$ 之间的耦合已经消除,完成了距离走动补偿。此时利用 FFT 作相参积累会得到很好的积累效果。

3.2　调频斜率快速估计

构造相位补偿函数(式(10)) 需要估计加速度 a。在慢时间域中,相位补偿函数的慢时间序列是调频斜率为 $\gamma = 2a/\lambda = 2af_c/c$ 的线性调频信号,可以表示为 $Y(nT) = \exp(-\text{j}\pi\gamma n^2 T^2)$,故通过估计调频斜率 γ 进而可以得到加速度 a 的估计值,从而可以顺利构造出相位补偿函数。本文使用脉冲相关法快速估计调频斜率,该方法对调频斜率只进行一维搜索,并可利用 FFT 实现,运算量小[7]。

参数估计算法思路:

线性调频信号具有近似矩形的幅频特性,且其时宽带宽积 $D = BT_p$ 越大,幅频特性越接近于矩形,且幅频宽度近似等于信号带宽 B。

设 $x(t) = \exp[\text{j}2\pi(f_0 t + \gamma t^2/2)]$ 的频谱为 $X(\omega)$,则 $x(t)$ 的功率为

$$P = \int_0^{t_0} |x(t)|^2 \text{d}t = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} |X(\omega)|^2 \text{d}\omega \tag{13}$$

当 $D \gg 1$ 时,对式(13) 作如下处理:频域积分区间换成 $x(t)$ 的频率范围 $[0, B]$,$X(w)$ 用信号频谱幅度的中心处值 $\widetilde{A}$(定值) 代替。则

$$P \approx \frac{1}{2\pi}\int_0^B |\widetilde{A}|^2 \text{d}\omega = \frac{1}{2\pi}\widetilde{A}^2 B = \frac{1}{2\pi}\widetilde{A}^2 \gamma T_p \tag{14}$$

由式(14) 知,LFM 信号能量一定时,在相同脉宽范围内,其频谱幅度的平方与调频斜率成反比,调频斜率越小,对应频谱的峰值幅度越大。这就为参数估计提供了思路。

基于此,在慢时间域,调频斜率 γ 的估计可以按以下步骤进行:

(1) 对调频斜率的范围$[\gamma_{\min},\gamma_{\max}]$以$\delta_k$为步进划分为一系列离散值,记为$\gamma_i(i=1,2,\cdots,N)$,$N$为离散值的总数目;

(2) 分别用$\exp(\mathrm{j}2\pi\gamma_i(nT)^2/2)$和$Y(nT)$相乘,得到$N$组解线调后的信号:

$$A\exp\{\mathrm{j}2\pi[f_0t+(\gamma-\gamma_i)(nT)^2/2]\} \tag{15}$$

(3) 对式(15)的各组信号作FFT,得到N组频谱对应的N个最大幅度值,记为$A_{1m},A_{2m}\cdots A_{Nm}$。则估计值$\gamma_i$与$\gamma$越接近,$(\gamma-\gamma_i)$值越小,对应的$A_{im}$越大。所以比较$A_{im}$,选出其中的最大值$A_{\max}$;

(4) 得出原LFM信号$x(t)$调频斜率γ估计值$\hat{\gamma}=\gamma_i$。

3.3 算法步骤

如前所述,径向匀加速目标回波包络存在跨距离单元走动问题,需要对由此产生的时间二阶项进行补偿,以便更好地进行相参脉冲积累。算法流程如图2所示。

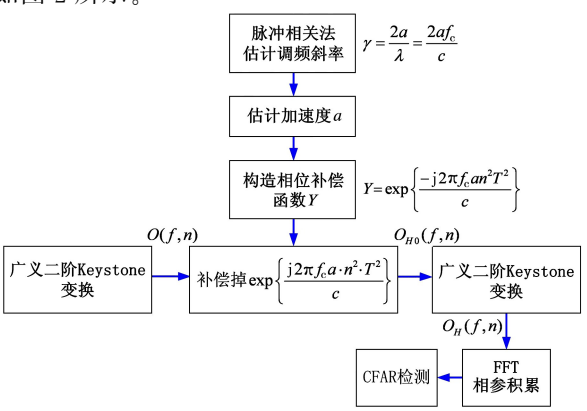


图2 本文算法流程图

具体步骤如下:

步骤1 将下变频后的回波信号采样值存储到二维矩阵中,矩阵列号表示快时间域采样顺序,行号表示慢时间域采样顺序。矩阵总行数为参与积累处理的脉冲重复周期数,总列数为每个脉冲重复周期内的采样点数,如图3所示。

步骤2 将脉冲回波信号快时间域通过FFT变换到快时间频域,即对矩阵的每行进行FFT运算,$X(m,f)=\mathrm{FFT}(x_m(t))$。

步骤3 对信号$X(m,f)$进行脉冲维尺度变换$m=n\cdot(f_c/f_c+f)^{1/2}$,消除包络走动的时间二次项,得$O(f,n)$,即式(9)。

步骤4 估计调频斜率。调频斜率γ的估计值为$\hat{\gamma}=\gamma_i$,再由$\hat{\gamma}=2\hat{a}f_c/c$,得到目标的加速度的估计值$\hat{a}$。按照式(10)构建相位补偿函数,补偿掉$\exp(\mathrm{j}2\pi f_c an^2T^2/c)$。

步骤5 对步骤4的结果再进行广义二阶Keystone变换得$O_H(f,n)$,即式(12)。

步骤6 式(12)的结果变换到快时间时域,并对同一个距离单元内的信号进行慢时间维的傅里叶变换,完成相参积累,得到距离-多普勒(R-D)域的信号。

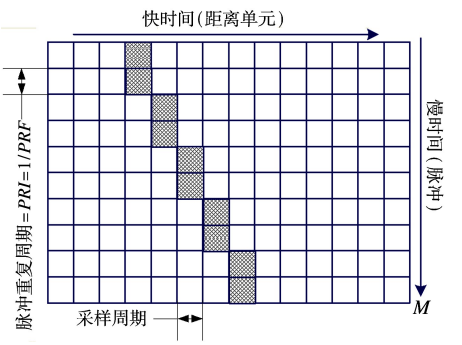


图3 多周期回波信号二维数据平面

4 仿真实验及结果分析

仿真实验一:

为了验证使用一阶Keystone变换和基于快时间频域补偿的包络补偿算法并不能有效地补偿径向匀加速目标回波的距离徙动,进行如下仿真实验,仿真参数如表1所示。

表1 实验一的仿真参数设置

仿真参数	参数符号	参数值
雷达工作频率	f_c	1 GHz
脉冲重复周期	T	0.01 s
信号带宽	B	1 MHz
脉冲宽度	T_p	0.2 ms
采样率	F_s	2 MHz
目标初始距离	R_0	57 km
径向初始速度	v	340 m/s
径向加速度	a	200 m/s^2
积累脉冲数	N_p	128

仿真结果如图4和图5所示。

图4为初始径向距离57 km、初始速度340 m/s、加速度200 m/s^{2}的目标的回波信号。图5为经过一阶Keystone变换后的回波信号。通过本实验可得,常规的包络对齐算法一阶Keystone变换和基于快时间频域补偿的包络补偿算法只能消除包络跨距离单元走动的时间一次项,不能消除包络走动的时间二次项。

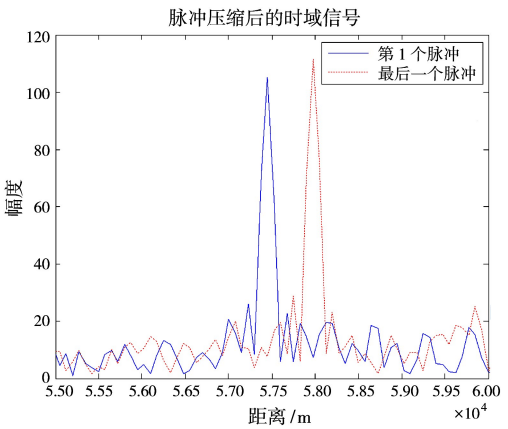


图 4　径向匀加速目标的雷达回波信号

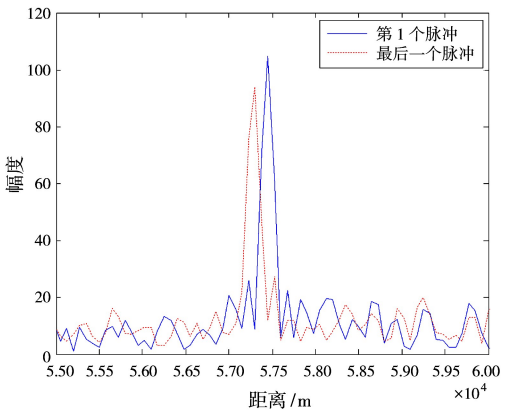


图 5　一阶 Keystone 变换后的信号

仿真实验二：

为了验证本文提出的算法对径向匀加速目标距离徙动补偿的有效性，进行如下仿真实验，仿真中雷达系统参数同表 1，目标参数如表 2 所示。

表 2　实验二的部分仿真参数设置

仿真参数	参数符号	参数值
目标初始距离	R_0	700.525 km
径向初始速度	v	3040 m/s
径向加速度	a	22 m/s^2
积累脉冲数	N_p	128
信噪比	SNR	−10 dB

其中，信噪比是指在原始回波信号中加入高斯白噪声，使其信噪比为−10 dB。仿真结果如图 6 所示。

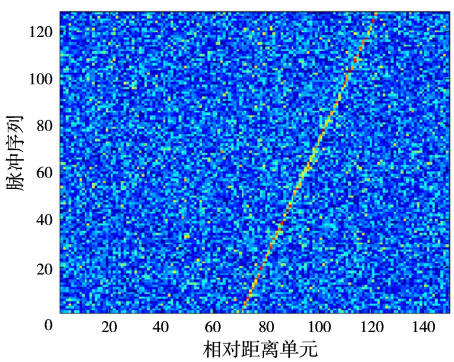
如图 6(a)所示，由于积累时间较长，最后一个脉冲回波的包络中心位置相对于第一个脉冲回波包络中心发生了严重的走动。

由图 6(b)可见，对各个回波脉冲信号进行二阶 Keystone 变换后回波信号的包络走动得到了一定程度的校正(包络走动的时间二次项得到完全校正，一次项减少)。但是，此时如果作 MTD，积累效果会很差，如图 6(c)所示。

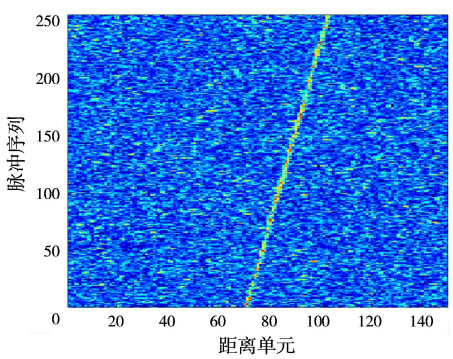
图 6(d)是利用脉冲相关法估计调频斜率，进而估计的加速度值函数分布，可以得到加速度的估计值为 22.1 m/s^2，估计相对误差是 0.455%，加速度估计的值是很准确的。

由图 6(e)可见，经过第二次二阶 Keystone 变换，剩下的回波包络走动一次项被补偿掉，各个脉冲的回波包络的中心位置得到了对齐。

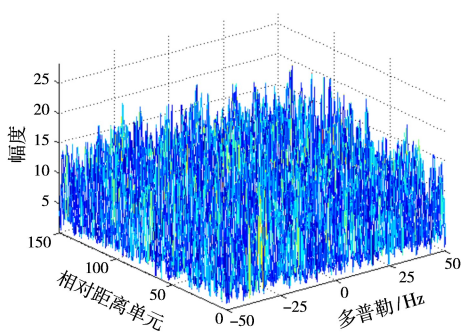
利用估计的加速度值，补偿相应距离单元慢时间序列中的多普勒高阶项，然后对每个距离单元进行 FFT，结果如图 6(f)所示。可见，目标能量集中到了一个距离-多普勒单元内，取得了较好的积累效果，有力地证明了本文所提方法的有效性。



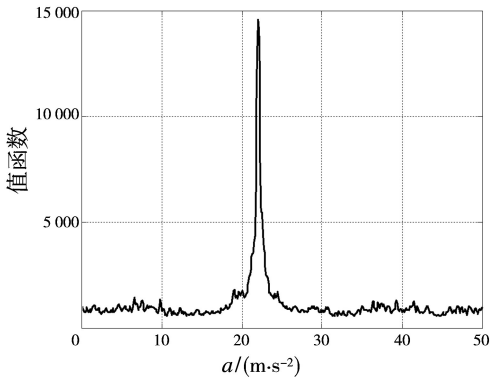
(a)　匹配滤波后目标回波包络



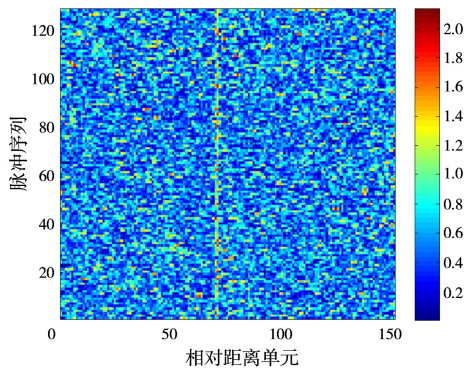
(b)　第一次二阶 Keystone 变换后的信号包络



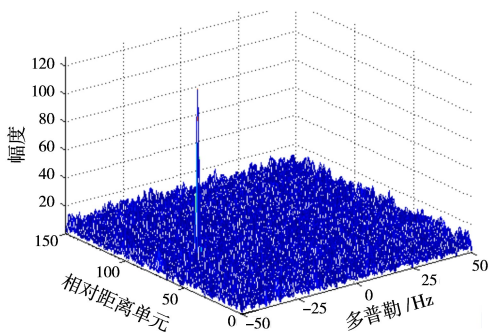
(c)　未补偿多普勒高阶项的 MTD 结果



(d) 用脉冲相关算法对加速度的估计结果



(e) 第二次二阶 Keystone 变换后信号的包络



(f) 多普勒高阶项补偿后的 MTD 结果

图 6 算法仿真结果

5 结束语

本文针对径向匀加速高速目标长时间相参积累时回波跨距离单元走动问题，主要研究了利用广义二阶 Keystone 变换补偿目标回波二次距离走动的方法，并仿真验证了该方法的有效性。仿真结果表明，该算法能实现各个回波脉冲包络的对齐，很好地改善相参积累性能。由于本文的方法需对回波脉冲作两次广义二阶 Keystone 变换，所以 Keystone 变换本身的运算效率也将成为影响此方法在工程应用中是否有效的重要因素。

参考文献：

[1] 保铮. 雷达信号的长时间积累[C]//第 7 届雷达学术年会，南京：[s. n.]，1999：9-15.

[2] Carlson B，Evans E，Wilson S. Search Radar Detection and Track with the Hough Transform：System Concept [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems，1994，30(1)：102-108.

[3] 吴兆平，何学辉，苏涛. 带有距离走动和多普勒扩散的高速运动目标检测[J]. 哈尔滨工程大学学报，2010，31(4)：476-480.

[4] 夏卓卿，陆军，陈伟建. 一种 Chirp 雷达包络对齐新方法[J]. 雷达科学与技术，2010，8(1)：44-48.
XIA Zhuo-qing，LU Jun，CHEN Wei-jian. A New Method to Correct Envelope Migration in Chirp Radar[J]. Radar Science and Technology，2010，8(1)：44-48.(in Chinese)

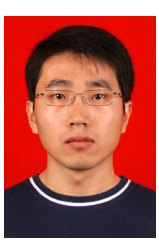
[5] Xing Mengdao，Su Junhai，Wang Genyuan，et al. New Parameter Estimation and Detection Algorithm for High Speed Small Target [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems，2011，47(1)：214-224.

[6] 苏军海，刑孟道，保铮. 宽带机动目标检测[J]. 电子与信息学报，2009，31(6)：1283-1287.

[7] 韩孟飞，王永庆，吴嗣亮，等. 一种低信噪比下 LFM 信号参数快速估计算法[J]. 北京理工大学学报，2009，29(2)：147-151.

[8] 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 Trans on Aerospace and Electronic Systems，2011，47(2)：1186-1202.

作者简介：



蒋 千 男，1983 年 9 月生于山东聊城，现为电子科技大学硕士研究生，主要研究方向为雷达系统总体与信号处理、微弱目标检测与跟踪。
E-mail：jiangqian. uestc@gmail. com

孔令讲 男，1974 年生，教授、博士生导师，主要研究方向为超宽带雷达系统、微弱目标检测跟踪技术、相控阵激光雷达波控技术，在 IET、IEICE、SP、COL、PIER、《电子学报》、《光学学报》、《中国激光》等国内外学术刊物上发表学术论文 100 多篇，其中 80 余篇被 SCI、EI 收录检索，申请专利多项。

杨建宇 男，1963 年生，教授、博士生导师，2005 年美国麻省理工学院访问学者，IEEE 会员、中国电子学会高级会员、中国电子学会无线电定位技术分会信号与信息处理专委会主任委员，主要研究方向为信号检测与估计、数字信号处理、毫米波雷达成像。