

基于变标处理和分数阶傅里叶变换的运动目标检测算法

张 南,陶 然,王 越

(北京理工大学电子工程系,北京 100081)

摘 要: 针对线性调频脉冲压缩雷达检测高速和加速运动目标时受到距离徙动和多普勒频率徙动的影响,首先建立了回波信号模型,分析了回波信号徙动的特点,然后提出了一种基于变标处理和分数阶傅里叶变换的运动目标检测算法.该算法利用变标处理补偿距离徙动,利用分数阶傅里叶变换补偿多普勒频率徙动.仿真分析表明本文所提算法能够实现距离徙动和多普勒频率徙动的补偿,提高雷达对高速和加速运动目标的检测性能.

关键词: 距离徙动;多普勒频率徙动;变标处理;分数阶傅里叶变换

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0683-06

A Target Detection Algorithm Based on Scaling Processing and Fractional Fourier Transform

ZHANG Nan, TAO Ran, WANG Yue

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: It is known that detecting a high-speed and accelerating target is affected by range migration and Doppler frequency migration in the linear frequency modulation pulse compression radar. In order to solve this problem, the model of received signal is established and the characteristics of the received signal are analyzed firstly. Then a target detection algorithm based on the scaling processing and the fractional Fourier transform is proposed. With the proposed algorithm, the range migration is compensated via using the scaling processing, and the Doppler frequency migration is compensated by using the fractional Fourier transform. Therefore it is able to improve the detection performance of a high-speed and accelerating target.

Key words: range migration; Doppler frequency migration; scaling processing; fractional Fourier transform

1 引言

提高雷达作用距离、增加预警时间的方法包括增大发射功率、降低接收机噪声系数和提高天线增益等措施,但是上述方法受到实际实现水平的限制,且不利于雷达的隐蔽性.此外,这些方法对高速或加速运动的微弱目标探测收效不大.

长时间积累,以时间换能量的方式是提高微弱目标检测能力的方法之一^[1].但是积累时间受到目标运动的限制,在积累时间内,如果目标运动的距离超过半个距离单元,则会出现距离徙动.如果目标多普勒频率的变化超过一个多普勒频率单元,则会出现多普勒频率徙动.目标运动速度越快,加速度越大,徙动越明显.如果要采用长时间积累方法探测高速和加速运动的目标,在积累前必须进行距离徙动和多普勒频率徙动的补偿.现有的距离徙动补偿方法主要包括:包络相关法^[2,3],检测前跟踪方法^[4,5]和基于 keystone 变换的方法^[6]等.包络相关法需要较高的信噪比.检测前跟踪方法是一种非

相参积累方法,积累效率不如相参积累方法.Keystone 变换法虽然不依赖于回波信噪比,但是需要预先知道多普勒模糊数,否则需要进行搜索.现有的多普勒频率徙动补偿方法主要包括 Chirp-Fourier transform (CFT)^[7]法、分数阶傅里叶变换 (fractional Fourier transform, FRFT) 法^[8], Wigner-Hough transform (WHT) 方法^[9], 多项式相位补偿法^[10]等.多项式相位补偿法主要针对三次以上相位信号.对二次相位信号检测来说,与 WHT 相比, CFT 和 FRFT 均具有不受相位交叉项影响的优势,而二者对线性调频信号检测的性能相同^[8].

在现有徙动补偿算法研究基础上,本文提出了一种采用变标处理和 FRFT 的运动目标检测算法.针对线性调频脉冲压缩雷达,首先分析了高速、加速运动目标的回波信号模型;然后分析了距离徙动和多普勒频率徙动的特点;接着提出了一种徙动补偿方法,该方法通过变标处理补偿距离徙动,通过对变标处理结果进行 FRFT 补偿多普勒频率徙动;最后进行了仿真分析并给出了相关结论.

2 回波信号模型

假设雷达与目标相对位置关系如图 1 所示,其中, R 为雷达, Tgt 为目标, R_0 和 $R(t)$ 分别表示初始时刻和 t 时刻目标到雷达的距离, $l(t)$ 为 t 时刻目标运动的距离, φ 为初始时刻目标运动方向与雷达视线的夹角. 假设 $t = 0$ 时刻, 目标位于 O 点, 并以初速度 v_0 , 加速度 a 沿着与雷达视线夹角 φ 匀加速直线运动. t 时刻目标运动到 O' 点. 由余弦定理可知:

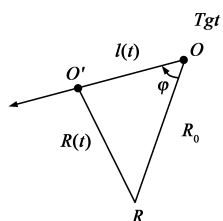


图1 雷达与目标相对位置示意图

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + \left(\int_0^t (v_0 + at) dt \right)^2 - 2R_0 \left(\int_0^t (v_0 + at) dt \right) \cos \varphi} \quad (1)$$

对上式泰勒展开并忽略二次以上项, 可得:

$$R(t) \approx R_0 - v_0 t \cos \varphi + \frac{1}{2} \left(\frac{v_0^2 \sin^2 \varphi}{R_0} - a \cos \varphi \right) t^2 \quad (2)$$

为了分析方便, 以下假设 $\varphi = 0$. 那么 t 时刻目标回波信号的时延为:

$$\tau(t) = \tau_0 - \beta_0 t - \frac{at^2}{c} \quad (3)$$

其中, $\tau_0 = \frac{2R_0}{c}$ 为目标初始时延, $\beta_0 = \frac{2v_0}{c}$ 为时延变化率, c 为光速. 假设雷达发射的第 n 个线性调频脉冲信号的基带形式如下:

$$r(t) = r(\hat{t}, n) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_0}\right) \exp(j\pi\mu\hat{t}^2) \quad (4)$$

其中, T_0 为发射信号脉冲宽度, μ 为发射信号调频斜率, $\hat{t} = t - nT$, T 为脉冲重复周期. 由相位驻留原理^[11] 可得发射信号 $r(\hat{t}, n)$ 的频谱 $A(\hat{f}, n)$ 为:

$$A(\hat{f}, n) = \text{rect}\left(\frac{\hat{f}}{\mu T_0}\right) \exp\left(-j\pi\frac{\hat{f}^2}{\mu}\right) \quad (5)$$

假设不考虑噪声并忽略目标幅度起伏, 由于脉冲持续时间较短, 通常情况下满足: (1) 一个脉冲持续时间内目标距离的变化远小于距离分辨率; (2) 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; (3) 一个脉冲持续时间内由加速度引起的多普勒频率的变化远小于多普勒分辨率. 因此根据式(3)和式(4), 第 n 个脉冲回波信号的基带形式可以近似为:

$$\begin{aligned} s(t) &= s(\hat{t}, n) \\ &= A_0 r(\hat{t} - \tau(t), n) \\ &\approx A_0 \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau_0 + \beta_0 nT}{T_0}\right) \exp(j\pi\mu(\hat{t} - \tau_0 + \beta_0 nT)^2) \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi f_d nT) \exp(j2\pi f_d \hat{t}) \exp(j\pi\alpha_d (nT)^2) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, A_0 为幅度常数, $f_d = -2v_0/\lambda$ 为多普勒频率, $\alpha_d =$

$-2a/\lambda$ 为多普勒调频率, λ 为信号波长.

3 回波信号徙动分析

根据式(6), 由相位驻留原理^[11] 可得第 n 个回波信号 $s(\hat{t}, n)$ 的频谱为:

$$\begin{aligned} S(\hat{f}, n) &= A_0 \text{rect}\left(\frac{\hat{f} - f_d}{\mu T_0}\right) \exp\left(-j\pi\frac{(\hat{f} - f_d)^2}{\mu}\right) \exp(j2\pi f_d nT) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi\alpha_d (nT)^2) \exp\left(-j2\pi(\hat{f} - f_d)(\tau_0 - \beta_0 nT)\right) \end{aligned} \quad (7)$$

根据式(5)和式(7)并变换到时域, 可得第 n 个经过脉压处理的回波信号的时域近似为:

$$\begin{aligned} z(\hat{t}, n) &= A_0 B \text{sinc}\left(\pi B\left(\hat{t} - \tau_0 + \beta_0 nT + \frac{f_d}{\mu}\right)\right) \exp\left(-j\pi\frac{f_d^2}{\mu}\right) \\ &\quad \cdot \exp(j\pi f_d(\hat{t} + \tau_0 - \beta_0 nT + \frac{f_d}{\mu})) \exp(j2\pi f_d nT) \exp(j\pi\alpha_d (nT)^2) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $B = \mu T_0$ 为发射信号带宽. 上式进行傅里叶变换处理并取模可得:

$$\begin{aligned} z(\hat{t}, f) &= \left| A_0 B \sum_{n=0}^{N-1} \text{sinc}\left(\pi B\left(\hat{t} - \tau_0 + \beta_0 nT + \frac{f_d}{\mu}\right)\right) \right. \\ &\quad \cdot \exp(j2\pi(f_d - f)nT) \exp(j\pi\alpha_d (nT)^2) \left. \right| \end{aligned} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可以看出: 第 n 个回波信号经过脉压处理后, 包络为 sinc 函数的形式, 峰值为 $A_0 B$, 对应于时延 $\tau_0 - \beta_0 nT - \frac{f_d}{\mu}$, 相位 $2\pi f_d T + \pi\alpha_d (nT)^2$. 其中 $\beta_0 nT$ 为距离徙动项, $\alpha_d nT$ 为多普勒频率徙动项. 不难看出, 峰值所对应的时延对于每一个脉冲回波信号来说均不相同, 脉冲与脉冲之间时延差为 $\beta_0 T$. 假设雷达和目标参数如表 1 所示. 根据式(9), 图 2 给出了经过脉压处理后第 n ($n = 1, 128, 256$) 个回波信号示意图. 图 3 给出了距离-多普勒频率示意图及其投影图. 可以看出目标的运动导致了脉压后的回波信号的中心分布在不同距离单元上, 产生了距离徙动. 目标的加速度导致了回波信号的中心分散在多个多普勒频率单元, 产生了多普勒频率徙动. 受到距离徙动和多普勒频率徙动的影响, 积累后的信号在距离维和多普勒频率维均展宽, 一方面导致回波信号能量未能有效的积累^[12], 另一方面导致距离和多普勒频率分辨率降低. 由于徙动的

表 1 雷达和目标参数

参数	数值	参数	数值
载频	3.5GHz	带宽	5MHz
脉冲宽度	0.1ms	脉冲重复周期	1ms
积累脉冲数	256	视频采样率	6MHz
初始距离	100km	径向初速度	1000m/s
径向加速度	10m/s ²		

存在将引起积累损失, 徙动越大, 积累损失越大. 因此

目标检测前必须进行徙动的补偿,将分散的能量聚集起来,提高积累增益,提高雷达作用距离。

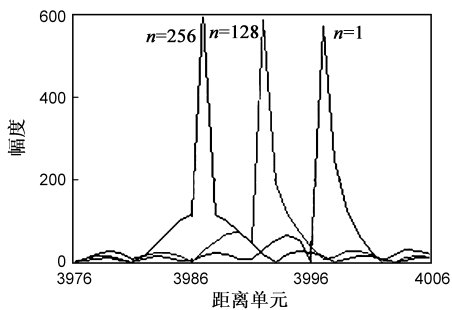


图2 脉压结果示意图

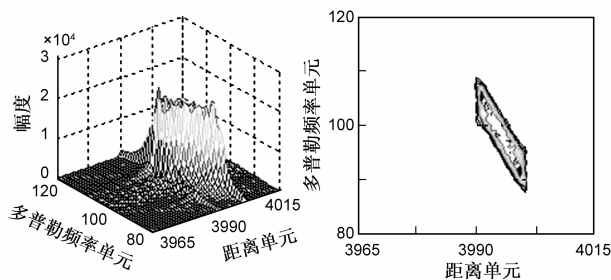


图3 距离-多普勒频率示意图及投影示意图

4 徙动补偿算法

定义用于第 n 个发射脉冲信号进行变标处理的变标方程^[11]为:

$$r_b(\hat{t}, \hat{v}, n) = \exp\left[j2\pi\mu\hat{t}\left(\frac{2\hat{v}nT}{c}\right)\right] \exp\left[j\pi\mu\left(\frac{2\hat{v}nT}{c}\right)^2\right] \quad (10)$$

其中, $\hat{v}$ 为目标速度补偿值. 将式(4)与式(10)相乘, 可得:

$$r_1(\hat{t}, \hat{v}, n) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_0}\right) \exp\left[j\pi\mu\left(\hat{t} + \frac{2\hat{v}nT}{c}\right)^2\right] \quad (11)$$

利用式(11)与第 n 个脉冲回波信号进行脉压处理, 可得脉压后的第 n 个回波信号的时域近似为:

$$z_1(\hat{t}, \hat{v}, n) \approx A_0 B \text{sinc}\left(\pi B\left(\hat{t} - \tau_0 + \frac{f_d}{\mu} + \frac{2(v_0 - \hat{v})}{c}nT\right)\right) \cdot \exp\left(j\pi\left(\frac{2\mu\hat{v}nT}{c} + f_d\right)\left(\hat{t} - \tau_0 + \frac{f_d}{\mu}\right)\right) \cdot \exp(j2\pi f_d nT) \exp[j\pi\alpha_d (nT)^2] \quad (12)$$

与式(8)相比可以看出, 经过上述处理, 脉压后的第 n 个回波信号的中心从 $\tau_0 - 2v_0nT/c - f_d/\mu$ 搬到 $\tau_0 - f_d/\mu - 2(v_0 - \hat{v})nT/c$. 令 $\Delta v = v_0 - \hat{v}$, 则目标距离徙动项由 $2v_0nT/c$ 变化为 $2\Delta vnT/c$. 不难看出, 在理想情况下, 即 $\Delta v = 0$ 时, 距离徙动将得到完全补偿。

然而, 在通常情况下, 准确的目标速度无法预先知道, 但是假定当针对某一特定速度范围内的目标进行检测时, 例如探测径向速度为 3~4 马赫 (约 1000m/s ~ 1300m/s) 的目标时, 则可以选择目标速度补偿值 $\hat{v}$ 为

1150m/s, 此时对应最大的目标速度补偿误差为 $\Delta v = 150\text{m/s}$. 假设雷达参数如表 1 所示, 那么在积累时间内, 经过距离徙动补偿后目标距离变化约为 $2\Delta vnT = 76.8\text{m}$, 与未进行补偿时目标距离变化的最大值 $2v_0nT = 665.6\text{m}$ 相比, 距离徙动减少了约 89%. 由于雷达距离分辨单元约为 60m, 可见补偿后目标距离的变化稍大于 1 个距离单元, 此时距离徙动近似可以忽略. 由于距离徙动得到了补偿, 使得分散在多个距离单元的能量近似聚集在一个距离单元中, 从而能够提高了积累信噪比。

如果无法预知目标速度, 例如目标速度可能在 0 ~ 1500m/s 之间, 那么, 只需选择一组目标速度补偿值 $\hat{v}$, 使得补偿值覆盖目标可能的速度最大值, 例如 $\hat{v} = 200\text{m/s}, 500\text{m/s}, 800\text{m/s}, 1100\text{m/s}, 1400\text{m/s}$, 再分别进行补偿即可。

由于回波信号还包含多普勒频率徙动项 $\alpha_d nT$, 仍会引起积累损失^[12], 因此在目标检测前还需补偿多普勒频率徙动. 利用分数阶傅里叶变换能够对线性调频信号进行能量聚集的优势^[8], 对 $z_1(\hat{t}, \hat{v}, n)$ 的每个距离单元进行分数阶傅里叶变换并取模, 可得:

$$x(\hat{t}, \hat{v}, u, p) \approx \left| A_0 B \sum_{n=0}^{N-1} \text{sinc}\left(\pi B\left(\hat{t} - \tau_0 + \frac{f_d}{\mu} + \frac{2(v_0 - \hat{v})}{c}nT\right)\right) \cdot \exp[j2\pi(f_d - u \csc \alpha) nT] \exp[j\pi(\alpha_d + \cot \alpha)(nT)^2] \cdot \exp\left(j\pi\left(\frac{2\mu\hat{v}nT}{c} + f_d\right)\left(\hat{t} - \tau_0 + \frac{f_d}{\mu}\right)\right) \right| \quad (13)$$

其中, u 为分数阶傅里叶域值, p 为分数阶傅里叶变换的变换阶次, $\alpha = \pi p/2$ 为旋转角度. 可见经过分数阶傅里叶变换后, 多普勒频率徙动项变化为 $(\alpha + \cot^{-1} \alpha_d) nT$. 当该项相对于多普勒频率分辨率较小甚至可以忽略时, 即多普勒频率徙动得到了补偿. 由于距离徙动和多普勒频率徙动均得到了补偿, 使得分散在多个距离单元和多个多普勒频率单元的能量聚集在一个距离单元和多普勒频率单元中. 因此, 积累时间不再受徙动的制约, 可以通过增加积累脉冲数, 增加积累增益, 提高对高速加速运动微弱目标的检测能力。

需要注意的是, 目标速度补偿值的个数以及分数阶傅里叶变换变换阶次的个数决定了算法的运算量. 如果不考虑目标的多普勒频率徙动, 即仅需要进行距离徙动的补偿, 假设采用 6 个速度补偿值, 此时运算量相对于未进行补偿时将增加约 6 倍. 同样, 如果不考虑目标的距离徙动, 即仅进行多普勒频率徙动的补偿, 假设采用 5 个变换阶次, 此时运算量将增加约 5 倍. 如果需要同时考虑距离徙动和多普勒频率徙动的补偿, 在上述假设下, 算法的运算量将增加约 30 倍。

上述处理流程概括如图 4 所示.

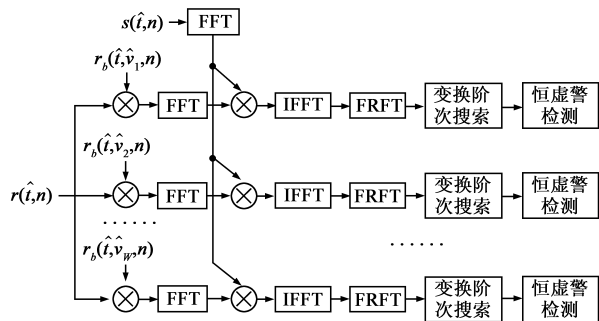


图4 算法流程示意图

5 仿真分析

假设仿真参数如表 1. 首先假设预知目标速度在 $800\text{ m/s} \sim 1000\text{ m/s}$ 之间, 图 5 给出了经过距离徙动补偿后的脉压结果示意图. 与图 2 相比, 不难看出, 对于 $\hat{v} = 1000\text{ m/s}$ 的理想情况来说, 由于在脉压前利用变标处理进行距离徙动的补偿, 使得每个脉冲回波信号的中心集中到同一个距离单元上, 实现了距离徙动的完全补偿. 对于 $\hat{v} = 900\text{ m/s}$ 的非理想情况来说, 虽然未能实现距离徙动的完全补偿, 将目标回波信号的中心聚集到同一个距离单元, 但是距离徙动的补偿误差很小, 完全可接受.

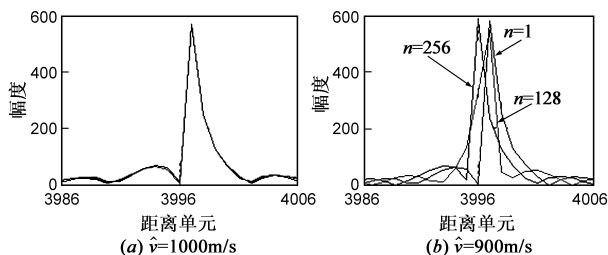
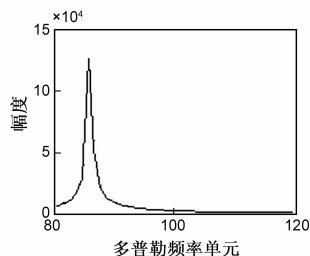
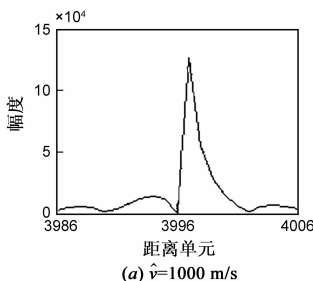
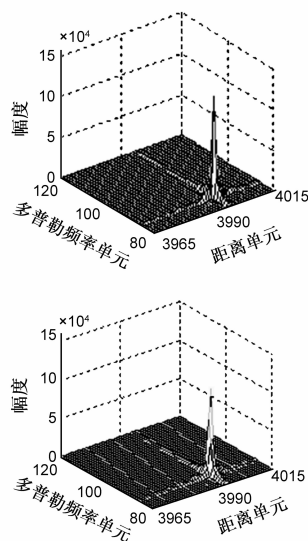
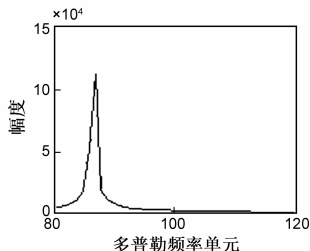
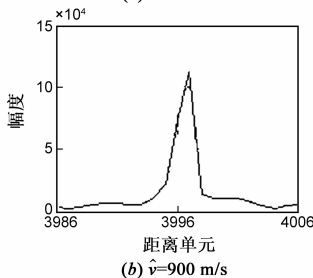


图5 脉压结果示意图



(a) $\hat{v} = 1000\text{ m/s}$



(b) $\hat{v} = 900\text{ m/s}$

图7 距离-多普勒频率示意图及投影示意图

图 6 给出了未经过多普勒频率徙动补偿的目标距离-多普勒频率示意图及其投影图. 与图 3 相比不难看出, 在理想情况下, 距离徙动得到了完全补偿; 在非理想情况下, 还存在距离徙动补偿误差, 但是与距离单元相比, 这种误差可以忽略. 同时, 由于多普勒频率徙动的存在导致多普勒频率维展宽, 能量积累仍受到了影响^[12], 因此还需要利用分数阶傅里叶变换进行多普勒频率徙动的补偿.

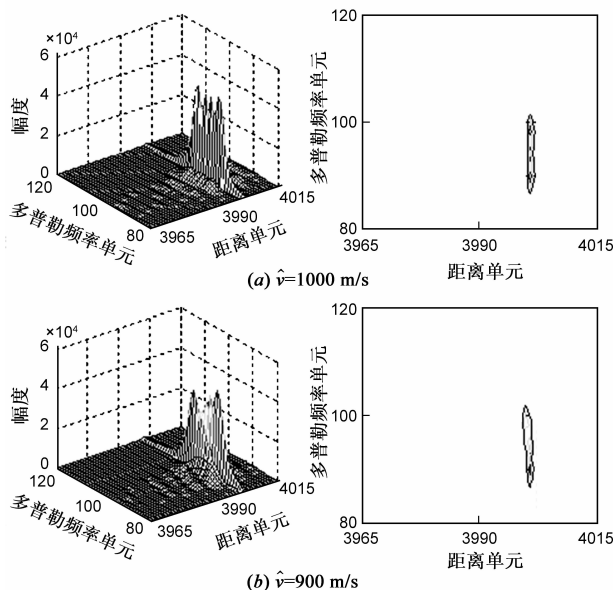


图6 目标距离-多普勒频率示意图及投影示意图

图 7 给出了经过多普勒频率徙动补偿后的目标距离-多普勒频率示意图及投影示意图. 与图 6 相比不难看出, 进一步通过分数阶傅里叶变换进行多普勒频率徙动的补偿后, 回波信号的能量得到了有效的积累. 虽然非理想情况下能量积累值稍低于理想情况下的能量积累值, 但这种损失完全是能够接受的.

针对实际情况下的多目标和噪声环境,图 8 给出了高斯噪声环境下同时存在两个目标时的仿真示意图.假设雷达参数如表 1 所示,目标 1 距离雷达 120km,以径向速度 550m/s 和径向加速度 10m/s^2 朝向雷达运动,其回波信号的信噪比为 -35dB .目标 2 距离雷达 80km,以径向速度 1000m/s 和径向加速度 10m/s^2 朝向雷达运动,其回波信号信噪比也为 -35dB .由于没有目标速度先验信息,因此,目标速度补偿值 $\hat{v}$ 采用多个值分别进行补偿.若积累时间内目标运动不超过半个距离单元,此时距离徙动可以忽略.根据雷达参数,可以计算出不进行距离徙动补偿的最大目标速度约为 111.7m/s .假设目标可能的最大速度为 1500m/s ,考虑运算量的大小,在本仿真中,选择目标速度补偿值为 $\hat{v} = [0, 150, 450, 750, 1050, 1350]$.其中, $\hat{v} = 0\text{m/s}$ 即为不进行距离徙动补偿.由图 8 可以看出:(1)当不进行距离徙动补偿时,如图 8(a)所示,由于此时受到目标距离和多普勒频率徙动的影响,能量无法有效的积累,因此无法检测到目标;(2)当目标速度补偿值为 150m/s 时,如图 8(b)所

示,由于距离徙动并未有效的补偿,能量没有有效的积累,仍无法检测出目标;(3)当目标速度补偿值为 450m/s 时,如图 8(c)所示,虽然速度补偿值与目标 1 的速度真实值 550m/s 有误差,但由于误差较小,能量较好的进行了积累,能够检测出目标 1.而对于目标 2 来说,距离徙动未有效补偿,仍无法检测出;(4)当目标速度补偿值为 750m/s 时,如图 8(d)所示,由于目标速度补偿值和两个目标的速度真实值均比较接近,目标 1 和目标 2 的能量均在一定程度得到了积累,目标能够检测到,但与图 8(c)相比,由于目标 1 的距离徙动补偿不匹配,因此目标 1 的能量积累值有一定程度的降低;(5)当目标速度补偿值为 1050m/s 时,如图 8(e)所示,目标 2 能够进行较好的补偿,能量积累值较高,能够有效的检测到.而目标 1 由于距离徙动补偿不匹配,导致无法检测出;(6)当目标徙动补偿值为 1350m/s 时,如图 8(f)所示,由于补偿速度远大于目标 1 和目标 2 的真实速度,距离徙动补偿过多,均无法检测出.

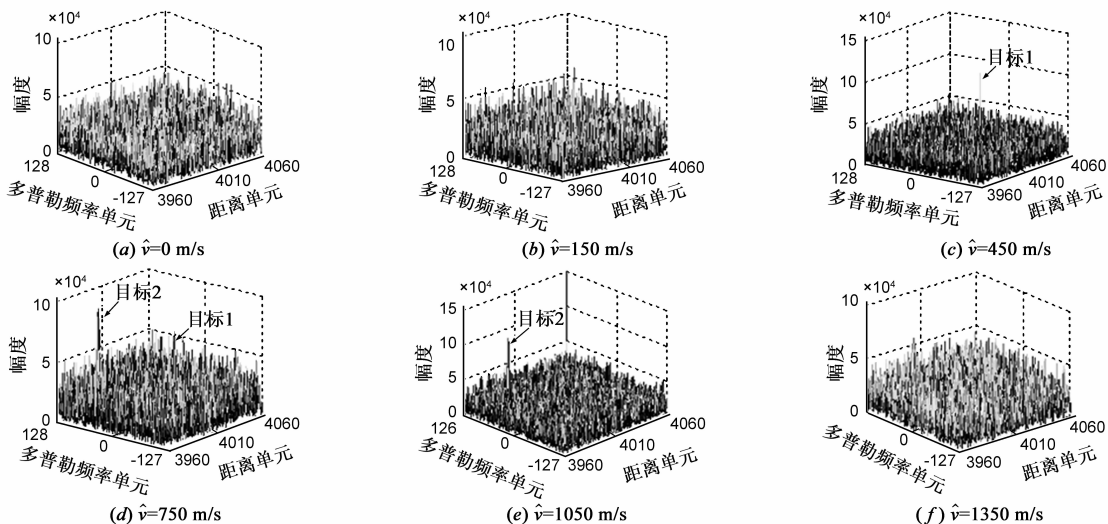


图8 目标距离-多普勒频率示意图

6 结论

高速、加速运动目标检测是雷达探测的难点之一,其关键技术之一是徙动补偿技术.本文提出的一种变标处理结合 FRFT 的方法进行距离和多普勒频率徙动的补偿,可以使回波信号的积累时间不再受到距离和多普勒频率徙动的制约,将积累时间提高一到两个数量级,并改善雷达对微弱目标的检测性能.本文提出的方法不仅可以为高速和加速运动目标的探测提供一种有效的方法,也可用于解决采用长时间积累技术探测微弱目标的徙动补偿问题.

参考文献:

- [1] 李海,吴嗣量,莫力.微弱信号长时间积累的检测方法[J].北京理工大学学报,2001,21(5):614-617.
Li Hai, Wu Si-liang, Mo Li. A method for long-term signal integral detection of weak targets[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(5): 614-617. (in Chinese)
- [2] C C Chen, Andrews H C. Target-motion-induced radar imaging[J]. IEEE Transaction on Aerospace Electronic Systems, 1980, 16(1): 2-14.
- [3] 王俊,张守宏.微弱目标积累检测的包络移动补偿方法[J].电子学报,2000,28(12):56-59.
Wang Jun, Zhang Shou-hong. Study on the motion compensa-

- tion of range migration for weak moving target detection[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(12): 56 – 59. (in Chinese)
- [4] B D Carlson, E D Evans, S L Wilson. Search radar detection and track with the Hough transform[J]. IEEE Trans On AES, 1994, 30(1): 102 – 125.
- [5] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detecting dim moving target[J]. IEEE Trans on AES, 1985, 21(1): 144 – 155.
- [6] 张顺生, 曾涛. 基于 keystone 变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1675 – 1678.
Zhang Shun-sheng, Zeng Tao. Weak target detection based on keystone transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1675 – 1678. (in Chinese)
- [7] Xiang-Gen Xia. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2000, 48(11): 3122 – 3133.
- [8] 陶然, 齐林, 王越. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Tao Ran, Qi Lin, Wang Yue. Theory and Applications of the Fractional Fourier Transform[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [9] 刘建成, 王雪松, 肖顺平, 王国玉. 基于 Wigner-Hough 变换的径向加速度估计[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2235 – 2238.
Liu Jian-cheng, Wang Xue-song, Xiao Shun-ping, et al. Radial acceleration estimation based on Wigner-Hough transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2235 – 2238. (in Chinese)
- [10] Stuart Golden, Benjamin Friedlander. A modification of the discrete polynomial transform[J]. IEEE Transactions on signal processing, 1998, 46(5): 1452 – 1455.
- [11] Ian G Cumming, Frank H Wong. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 洪文, 胡东辉, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [12] 张南, 陶然, 单涛, 等. 外辐射源雷达长时间积累目标探测性能分析[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1103 – 1107.
Zhang Nan, Tao Ran, Shan Tao, et al. Performance analysis of target detection with long-term signal integration in external illuminating radar [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1103 – 1107. (in Chinese)

作者简介:



张 南 男, 1980 年生于四川绵竹. 北京理工大学信息与通信工程专业博士研究生. 获部级科技进步一等奖 1 项, 在电子学报、中国科学上发表学术论文 3 篇, 主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理等. E-mail: matt@bit.edu.cn



陶 然 男, 1964 年生于安徽南陵, 1993 年毕业于哈尔滨工业大学获博士学位, 现任北京理工大学信息安全与对抗学科首席教授、博士生导师、国家杰出青年科学基金获得者. 获部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 2 项; 获授权专利 10 余项; 以第一作者出版信号处理领域著作、教材 2 部; 以第一、第二作者发表的论文被 SCI、EI 收录 110 余篇. 研究方向: 分数阶傅里叶变换理论及应用、雷达、通信、信息安全与对抗. E-mail: rantao@bit.edu.cn