

# 基于 ICPF 的步进频率雷达机动目标高分辨率成像处理

杨骏泽<sup>1</sup> 王 昕<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003; 2. 毫米波国家重点实验室, 南京, 210096)

**摘 要:** 针对机动目标步进频率回波信号一维距离像模糊的问题, 本文提出了基于求和立方相位函数(Integrated cubic phase function, ICPF)的运动参数估计和补偿方法。首先, 构建机动目标的步进频率回波三阶相位信号模型, 采用一阶差分处理实现相位降阶。其次, 计算降阶信号的 ICPF, 依次估计和补偿加速度以及速度引入的误差相位。然后, 对运动补偿后信号进行 IFFT 处理可以获得目标高分辨一维距离像。其中, 对加速度和速度的估计只需要进行一维搜索, 算法运算量很小。最后, 分别在无噪声和较低信噪比的情况下进行计算机仿真, 实验结果验证了本文所提方法的有效性。

**关键词:** 求和立方相位函数; 运动补偿; 一阶差分; 加速度; 高分辨一维距离像

**中图分类号:** TN95      **文献标志码:** A

## High Resolution Imaging of Stepped Frequency Radar of Maneuvering Target Based on ICPF

Yang Junze<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>1,2</sup>

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing, 210096, China)

**Abstract:** Distortion will exist in the range profile of the received radar stepped frequency signal of maneuvering target. To solve this problem, the integrated cubic phase function (ICPF) method is presented in this paper. First, the received signal is characterised as a three-order phase signal and performed with 1st-order differential operation. Next, ICPF of the processed back data is calculated to estimate and compensate the acceleration through dechirp operation. In addition, the estimation and compensation of the velocity of the residual signal are operated as well. Then the target's high resolution range profile can be obtained by IFFT. As the estimation of acceleration and velocity requires 1-D searching merely, the computational amount is quite small. Finally, the simulation is carried out in the situations of noiseless and low signal-to-noise ratio, and the test results prove the validity of this method in the paper.

**Key words:** integrated cubic phase function; motion compensation; 1st-order differential; acceleration; high resolution range profile

## 引言

步进频率脉冲信号是一种高分辨率雷达信号,其成像原理是连续发射一串频率跳变的脉冲信号,并且对每次回波作一次采样后,利用逆快速傅里叶变换(Inverse fast Fourier Transform, IFFT)获得目标一维距离像。由于其发射载频连续跳变,在成像时间内可获得足够的带宽,减小了雷达对瞬时带宽的要求,因此被广泛应用于高性能雷达系统中。然而,步进频率雷达发射信号照射运动目标时,接收端回波会存在距离-多普勒耦合现象<sup>[1-2]</sup>。脉冲相参合成处理时<sup>[3]</sup>,将会导致重建一维距离像产生距离徙动和波形失真,因此,对目标运动参数的精确估计成为步进频率雷达成像处理中必须解决的问题<sup>[4-5]</sup>。目前关于步进频率信号运动补偿的研究成果有时域相关法<sup>[6]</sup>、频域相关法<sup>[7]</sup>、最小熵法<sup>[8]</sup>、脉组相位差分法<sup>[9]</sup>以及最小脉组误差法<sup>[10]</sup>。然而,上述成果仅应用于径向匀速运动目标。

然而,实际数据采集环境中,被照射目标运动通常存在机动性强、加速度很大、速度随时间变换较快等特点<sup>[11]</sup>。现有步进频率雷达研究成果中,时域相关法的测速误差大,频域相关法的不模糊测速范围小,因此均不再适用。最小熵法,脉组相位差分法以及最小脉组误差法可以扩展实现机动运动目标成像,但是运算复杂,工程实践价值不高。目前,关于步进频率雷达目标加速度估计的研究比较少。文献[12]通过搜索最大图像对比度来估计运动参数的最优值,但是算法在获得更高估计精度的同时会增加计算量。文献[13]利用调频傅里叶变换对估计出的速度和加速度做补偿得到高分辨率的一维距离像,但是算法需要进行二维搜索,搜索量较高。文献[14]提出乘积型高阶相位函数(Product high-order phase function, PHPF)方法,运算量较小,通过对不同时延的相位函数进行尺度变换并对参数进行估计,但是由于高阶非线性变换使得信噪比门限较高,即在较低信噪比情况下,估计性能会急速下降。

本文在分析机动运动对步进频率信号影响的基础上,提出基于求和立方相位函数(Integrated cubic phase function, ICPF)<sup>[15]</sup>的成像方法。首先,对机动目标回波相位进行一阶差分运算,使得回波信号呈现为线性调频(Linear frequency modulation, LFM)的形式,然后利用 ICPF 对该 LFM 信号做变换,搜索峰值位置得到与目标运动参数相关的系数估计值,进而估计出加速度和速度值。接着,对目标上所有散射点加速度和速度引入的相位误差进行补偿,通过逆快速傅里叶变换得到目标的高分辨率一维距离像。本文方法仅需要进行一维搜索,运算量大大降低,同时具有较低的信噪比门限。最后,计算机仿真验证了该方法的可行性。

## 1 机动运动对步进频率信号成像的影响

设步进频率信号的脉冲重复周期为  $T_r$ , 子脉冲宽度为  $T$ , 载频起始频率为  $f_0$ , 频率步进量为  $f_p$ , 脉冲组中子脉冲个数为  $N$ 。步进频率雷达在  $t$  时刻发射第  $k$  个子脉冲信号可以表示为

$$S(t, k) = \sum_{k=0}^{N-1} \text{rect} \left[ \frac{t - kT_r - \frac{T}{2}}{T} \right] \exp[-j2\pi(f_0 + kf_p)t] \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中

$$\text{rect}(t) = \begin{cases} 1 & -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

设目标与雷达的初始距离为  $R_0$ , 目标相对于雷达的径向速度为  $v$ , 径向加速度为  $a$ , 将回波信号与本振信号进行混频处理, 得到混频后的信号为

$$S_r(t, k) = \sum_{k=0}^{N-1} A \exp \left[ -j2\pi(f_0 + kf_p) \frac{2(R_0 + vt + \frac{1}{2}at^2)}{c} \right] \quad (3)$$

式中: $A$ 为幅度值, $c$ 为电磁波速度。

令采样时间满足

$$t = kT_r + \frac{T}{2} + \frac{2R_0}{c} \tag{4}$$

将式(4)代入式(3),化简后的第 $k$ 个子脉冲信号相位表示为

$$\Phi(k) = \frac{4\pi}{c}(b_0 + b_1k + b_2k^2 + b_3k^3) \tag{5}$$

式中,相位系数分别为

$$\begin{aligned} b_0 &= f_0R_0 + \left(\frac{T}{2}f_0 + \frac{2R_0}{c}f_0\right)v + \left(\frac{T^2}{8}f_0 + \frac{TR_0}{c}f_0 + \frac{2R_0^2}{c^2}f_0\right)a \\ b_1 &= f_pR_0 + \left(T_rf_0 + \frac{T}{2}f_p + \frac{2R_0}{c}f_p\right)v + \left(\frac{2R_0}{c}T_rf_0 + \frac{T}{2}T_rf_0 + \frac{T^2}{8}f_p + \frac{R_0}{c}Tf_p + \frac{2R_0^2}{c^2}f_p\right)a \\ b_2 &= f_pT_rv + \left(\frac{T_r^2}{2}f_0 + \frac{2R_0}{c}T_rf_p + \frac{T}{2}T_rf_p\right)a \\ b_3 &= \frac{1}{2}T_r^2f_pa \end{aligned} \tag{6}$$

化简后的相位表达式(5)中 $b_0$ 为固定项,对距离像中目标一维响应函数没有影响。一次项系数 $b_1$ 中存在速度和加速度对距离的耦合,经IFFT处理后产生的一维距离像会产生距离走动。其中,速度引起的走动距离为 $b_1$ 中第二项的 $\frac{2N}{c}$ 倍,加速度引起的走动距离为 $b_1$ 中第三项的 $\frac{2N}{c}$ 倍。二次项系数 $b_2$ 中的速度和加速度会引起距离像波形畸变,峰值降低,主瓣展宽,其中,速度导致的展宽量为 $\frac{4(N-1)N}{c}vf_pT_r$ ,加速度导致的展宽量为 $b_2$ 中第二项的 $\frac{4(N-1)N}{c}$ 倍。三次项系数 $b_3$ 中加速度引起的主瓣展宽量为 $\frac{3(N-1)^2N}{c}af_pT_r^2$ 。图1(a~c)分别显示了加速度引起的一次相位项、二次相位项和三次相位项对目标距离像的影响。由图1(a~c)可以看到,加速度引起的距离像走动较小,可忽略不计,而距离像展宽量较大,使得成像分辨率严重失真,需要对加速度进行精确补偿才能消除其影响。

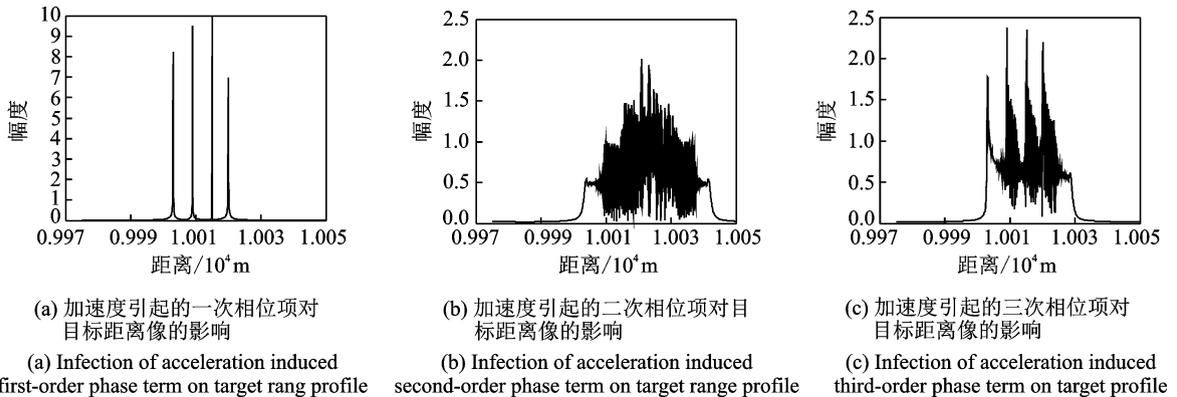


图1 加速度对目标距离像影响方法

Fig. 1 Analysis of the infection of acceleration on target range profile

## 2 ICPF 原理

三阶相位函数(Cubic phase function, CPF)在文献[16]中首次提出,用来估计二次调频信号相位的

调制参数。随后,文献[17]提出将 CPF 用来估计线性调频信号,并获得了较好的参数估计效果。根据文献[16],CPF 的定义如下

$$\text{CPF}(t, \Omega) = \int_0^{+\infty} s(t+\tau) s(t-\tau) e^{-j\Omega\tau} d\tau \quad (7)$$

假设信号为

$$s(t) = \delta e^{j\Psi(t)} = \delta e^{j(b_1 t + b_2 t^2)} \quad (8)$$

式中:  $b_1$  为信号中心频率,  $b_2$  为信号调频率。则其三阶相位函数表示为

$$\text{CPF}(t, \Omega) = \delta^2 e^{2j(b_1 t + b_2 t^2)} \int_0^{+\infty} e^{j(2b_2 - \Omega)\tau} d\tau \quad (9)$$

式中  $\Omega$  为瞬时频率变化率(Instantaneous frequency rate, IFR),定义为

$$\text{IFR}(t) = \frac{d^2 \Psi(t)}{dt^2} \quad (10)$$

在此式(10)等于信号调频率  $2b_2$ ,对式(9)取绝对值得计算结果为

$$|\text{CPF}(t, \Omega)| = \begin{cases} \infty & \Omega = 2b_2 \\ \frac{\delta^2}{2} \sqrt{\frac{\pi}{|\Omega - 2b_2|}} & \Omega \neq 2b_2 \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可见,当 CPF 的绝对值取得最大值时,瞬时频率变化率  $\Omega = 2b_2$ ,找到最大值的位置便可估计出系数  $b_2$ 。所以 CPF 算法实际上是对 IFR 进行搜索,根据 CPF 对应的峰值点位置可估计出 IFR,进而得到二次项系数  $b_2$  的估计值。

ICPF 算法是对 CPF 算法的扩展,在文献[15]中提出。信噪比较低时,用 ICPF 算法探测并估计信号相位参数相对于 CPF 算法有更好的效果,其定义如下所示

$$\text{ICPF}(\Omega) = \sum_n^{N-1} |\text{CPF}(n, \Omega)|^2 = \sum_n^{N-1} \left| \sum_{m=0}^{(N-1)/2 - |n|} s(n+m) s(n-m) \exp(-j\Omega m^2) \right|^2 \quad (12)$$

式中:  $s(n) = s_o(n) + s_w(n)$ ,  $s_o(n)$  为  $s(t)$  的离散形式,  $s_w(n)$  为噪声的离散形式;  $\Omega$  为搜索斜率值。由式(11)可以看出,ICPF 算法旨在对 CPF 算法下的数据做能量求和运算,即:对应相同的  $\Omega$  时,沿时间轴  $n$  对所有数据求和,最后得到以  $\Omega$  为轴的一维数组。通过在  $\Omega$  轴进行一维搜索 ICPF 峰值位置便可确定 IFR,进而估计出二次项系数。

### 3 目标运动参数估计及运动补偿

根据式(5),目标回波信号表达式可以表示为

$$s_r(k) = \sum_{k=0}^{N-1} A \exp \left[ -\frac{4\pi}{c} (b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3) \right] \quad (13)$$

对式(13)进行一阶差分运算后得

$$\begin{aligned} \Delta s_r(k) &= s_r(k) s_r(k+1)^* = \sum_{k=0}^{N-2} A^2 \exp \left\{ j \frac{4\pi}{c} [(b_1 + b_2 + b_3) + (2b_2 + 3b_3)k + 3b_3 k^2] \right\} = \\ &= \sum_{k=0}^{N-2} A^2 \exp \left[ j \frac{4\pi}{c} (b_1 + b_2 + b_3) \right] \exp \left[ j \frac{4\pi}{c} (\alpha k + \beta k^2) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可见,信号相位从三阶降到了二阶,其中

$$\begin{aligned} \alpha &= 2b_2 + 3b_3 \\ \beta &= 3b_3 = \frac{3T_r^2 f_p a}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

利用 ICPF 对参数  $\beta$  进行估计,计算一阶差分处理后信号的 CPF 为

$$\text{CPF}_\beta(k, \Omega) = \sum_m \Delta s_r(k+m) \Delta s_r(k-m) \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} \Omega m^2 \right) =$$

$$\sum_m \sum_k B^2 \exp \left[ j \frac{4\pi}{c} (2\alpha k + 2\beta k^2) \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (\Omega - 2\beta) m^2 \right] \quad (16)$$

式中:  $B^2$  为幅度值,  $\text{IFRF}(k) = 2\beta$  为固定值, 不随  $k$  变化。当  $\Omega = 2\beta$  时, 对所有时间  $k$  下的  $|\text{CPF}_\beta(k, \Omega)|^2$  求和, 则表现为在  $\text{ICPF}(\Omega)$  中呈现峰值。根据峰值位置得出  $\beta$  的估计值  $\beta'$ , 再由  $\beta = 3b_3$  估计出  $b'_3$ , 进而得到加速度的估计值  $a'$ 。

估计出  $a'$  后, 通过解调频操作进行相位补偿, 得到

$$s'_r(k) = s_r(k) \exp \left[ j \frac{a'}{2} (f_0 + kf_p) \left( kT_r + \frac{T}{2} + \frac{2R_0}{c} \right)^2 \right] = \sum_{k=0}^{N-1} A \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} \gamma \right) \exp \left[ -j \frac{4\pi}{c} (\lambda k + \rho k^2) \right] \quad (17)$$

式中

$$\begin{aligned} \gamma &= f_0 R + \left( \frac{T}{2} f_0 + \frac{2R}{c} f_0 \right) v \\ \lambda &= f_p R + \left( T_r f_0 + \frac{T}{2} f_p + \frac{2R}{c} f_p \right) v \\ \rho &= f_p T_r v \end{aligned} \quad (18)$$

式(17)即为补偿掉加速度相位项的剩余信号。由式(17)可以看到, 剩余信号的相位也是二阶,  $\rho$  为调频率项且只跟速度有关, 因此只要估计出  $\rho$  便可估计出目标速度。所以再次采用 ICPF 方法对式(17)进行处理, 估计出  $\rho$  值后得到速度的估计值引入的相位项, 并运用解调频法进行速度补偿, 消除速度对距离像的影响。最后对回波信号进行 IFFT 操作即可得到运动目标高分辨率一维距离像。

### 4 仿真实验

为了验证 ICPF 方法的有效性, 本节将进行计算机仿真实验。设置一个包含 4 个散射点的机动运动目标模型, 每个散射点与雷达的初始距离分别为 10 003, 10 009, 10 015, 10 020 m。目标的径向运动速度为 1 500 m/s, 加速度为 500 m/s<sup>2</sup>, 仿真实验的系统参数如表 1 所示, 仿真结果如图 2~10 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	值
载波频率/GHz	10
频率步进量/MHz	2
脉冲重复周期/ $\mu$ s	80
子脉冲宽度/ $\mu$ s	0.5
子脉冲数	1 402

首先考虑理想情况, 即系统不受噪声的影响。图 2 显示的是静止目标的步进频率雷达一维距离像, 成像过程中只需要对回波信号进行 IFFT 处理即可。当引入机动运动后, 即考虑速度和加速度的因素, 直接对回波信号进行 IFFT 变化得到的距离像如图 3 所示。显然, 此时散射点的回波成像变得完全失真, 已经不能分辨出目标散射点位置, 所以成像之前首先需要

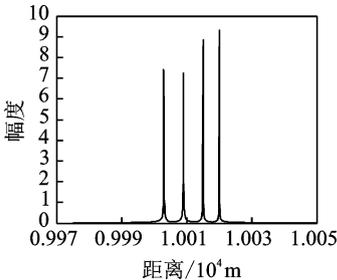


图 2 无噪声环境下静止目标一维距离像  
Fig. 2 Range profile of still target in a noise free environment

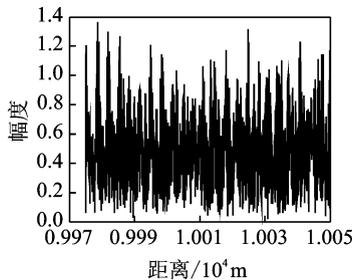


图 3 无噪声环境下直接 IFFT 后的机动运动目标一维距离像  
Fig. 3 Range profile of maneuvering target with direct IFFT in a noise free environment

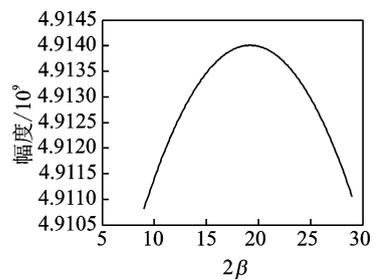


图 4 无噪声环境下降阶处理后信号的 ICPF 分布图  
Fig. 4 ICPF distribution graph of signal after reduced-order processing in a noise free environment

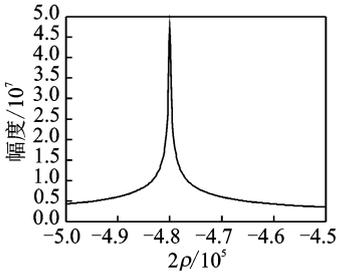


图5 无噪声环境下补偿完加速度后信号的ICPF分布图

Fig. 5 ICPF distribution graph of signal with compensated acceleration compensated in a noise free environment

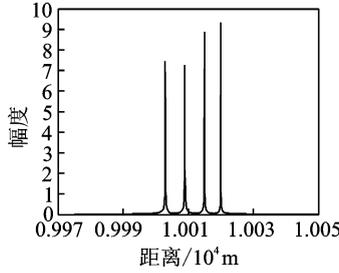


图6 无噪声环境下ICPF方法的机动目标一维距离像

Fig. 6 One-dimensional range profile of maneuvering target based on ICPF in a noise free environment

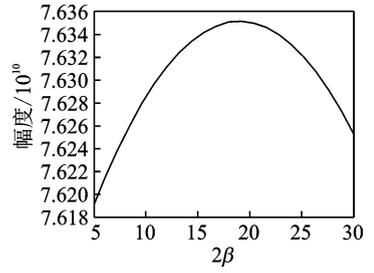


图7 SNR = -3 dB时降阶处理后信号的ICPF分布图

Fig. 7 ICPF distribution graph of signal after reduced-order processing at SNR = -3 dB

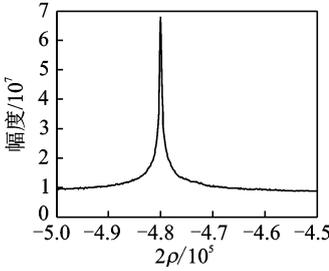


图8 SNR = -3 dB时补偿完加速度后信号的ICPF分布图

Fig. 8 ICPF distribution graph of signal with compensated acceleration at SNR = -3 dB

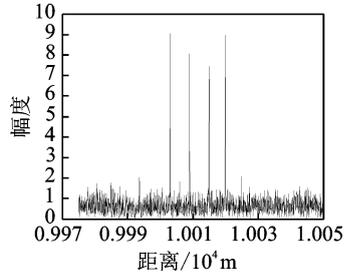


图9 SNR = -3 dB时ICPF方法的机动目标一维距离像

Fig. 9 One-dimensional range profile of maneuvering target based on ICPF at SNR = -3 dB

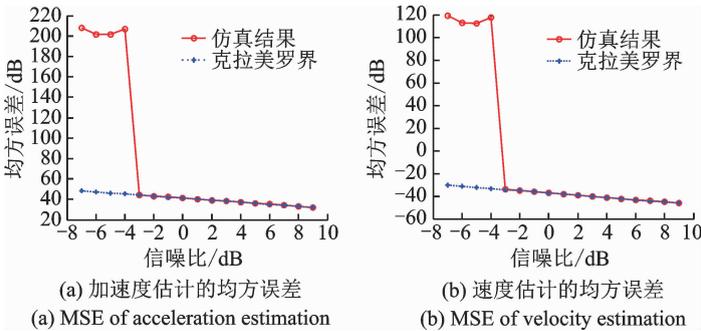


图10 加速度和速度估计的均方误差

Fig. 10 MSE of the acceleration and velocity estimation

运动进行补偿。通过本文所提的算法可对目标运动的速度和加速度进行精确估计。图4为降阶处理后的二阶相位信号的ICPF分布图像,根据图4可得估计值  $2\beta = 19.2$ ,即可得加速度  $a$  的估计值  $a' = \frac{2\beta}{3T_r^2 f_p} = 500$ ,可见加速度估计值与其真实值相等,随后对加速度进行精确补偿,回波信号变为只与速

度有关的二阶相位函数。图5为该二阶相位函数的ICPF图像,从图5中可估计出 $2\rho = -4.8 \times 10^5$ ,进而估计出速度 $v$ 的估计值 $v' = -\frac{2\rho}{2f_p T_r} = 1500$ ,同样得到速度的估计值与其真实值相等。图6为利用本文所提算法补偿速度和加速度后的一维距离像图像,由图可以很明显地观察到目标散射点的分布位置,成像的分辨率得到很大的提高。

为了进一步验证本文算法的适用性,考虑噪声的影响,图7和图8给出了在信噪比为 $-3$  dB时的加速度和速度的估计情况。由图7,8可知,搜索ICPF的峰值位置可精确估计出 $2\beta$ ,  $2\rho$ ,进而得到加速度和速度的估计值。最后,补偿掉加速度和速度引入的相位项并IFFT成像得到一维距离像,结果如图9所示。图10(a,b)分别为加速度和速度估计均方误差的100次蒙特卡罗实验仿真结果图,从图10中可观察到,在信噪比高于 $-3$  dB时,加速度和速度的估计与克拉美罗界<sup>[18]</sup>几乎完全重合。因此,在低信噪比下,本文所提方法能够实现机动目标的高分辨率一维距离向成像。

## 5 结束语

针对机动目标步进频率回波的一维距离像同时受到速度和加速度的影响,而现有步进频率信号的运动补偿方法大多数都只适合匀速运动目标,所以本文提出了一种新的基于ICPF的方法对运动速度和加速度进行精确估计,并通过IFFT成像得到目标的高分辨率一维距离像,为步进频率雷达的运动补偿提供了一种新的可行方案。其中对加速度和速度的估计只需要进行一维搜索ICPF峰值位置,算法运算量大大降低,通过计算机仿真得出本文算法在较低信噪比下仍具有较好的估计效果。

## 参考文献:

- [1] Wehner D R. High resolution radar[M]. London: Artech House, 1987.
- [2] Levanon N. Stepped-frequency pulse-train radar signal[J]. IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2002, 149(6): 297-309.
- [3] 胡嫵,刘渝. 相参脉冲信号识别方法和性能分析[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(3):314-319.  
Hu Yan, Liu Yu. Coherent pulse train identification algorithm and its performance analysis[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012, 27(3):314-319.
- [4] 黄文涛,周建江,路冉. 基于多核DSP的高分辨距离像运动补偿算法实现[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4):570-577.  
Huang Wentao, Zhou Jianjiang, Lu Ran. Implementation of motion compensation algorithm of HRRP based on TMS320C6678[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2014, 29(4): 570-577.
- [5] 王晓东. 基于步进频率的目标成像与速度精确测量方法[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(5):115-118.  
Wang Xiaodong. Target imaging and velocity measurement simultaneously algorithm based on step frequency waveforms[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(5):115-118.
- [6] 胡秀娟,邓甲昊,周志峰,等. 提高步进频率雷达速度补偿性能的方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(3):199-202.  
Hu Xiujian, Deng Jiahao, Zhou Zhifeng, et al. Study on advancing the performance of velocity compensation for stepped frequency radar[J]. Journal of Missile and Guidance, 2009, 29(3):199-202.
- [7] 蒋楠稚,王毛路,李少洪,等. 频率步进脉冲距离高分辨一维成像速度补偿分析[J]. 电子科学学报, 1999, 21(5):665-670.  
Jiang Nanzhi, Wang Maolu, Li Shaohong, et al. Compensation methods for stepped frequency radar HRR imaging[J]. Journal of Electronics, 1999, 21(5):665-670.
- [8] Temple M A, Sitler K L. High range resolution (HRR) improvement using synthetic HRR processing and stepped-frequency polyphase coding[J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2004, 151(1):41-47.
- [9] Niu Tao, Chen Weidong. Radial motion estimation for pulse stepped-frequency radar[J]. Signal Processing, 2004, 3: 1961-1964.
- [10] 刘铮,张守宏. 步进频率雷达目标的运动参数估计[J]. 电子学报, 2000, 28(3):43-45.  
Liu Zheng, Zhang Shouhong. Estimation of target motion parameters in a stepped frequency pulses radar[J]. Electronic Journal, 2000, 28(3):43-45.
- [11] 胡铃心,昂海松,肖天航. 鸭式布局战斗机非常规机动的流场机理数值分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(6): 874-881.

Hu Lingxin, Ang Haisong, Xiao Tianhang. Numerical analysis on flow-field around unconventionally maneuvering canard fighter[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(6):874-881.

- [12] Berizzi F, Martorella M, Cacciavano A, et al. A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10):3053-3062.
- [13] 崔应留, 罗文茂, 王德纯. 匀加速运动对频率步进雷达目标一维距离像的影响及其运动补偿方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(6):135-144.
- Cui Yingliu, Luo Wenmao, Wang Dechun. Influence of target's uniformly accelerated motion on high resolution range profile for stepped frequency radar and it's motion compensation method[J]. *Journal of Missile and Guidance*, 2014, 34(6): 135-144.
- [14] 包敏, 周鹏, 李亚超, 等. 基于乘积型高阶相位函数的复杂运动目标 ISAR 成像[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(5): 1018-1022.
- Bao Min, Zhou Peng, Li Yachao, et al. ISAR imaging of complexly moving targets based on product high-order phase function[J]. *System Engineering and Electronic Technology*, 2011, 33(5):1018-1022.
- [15] Wang P, Li H, Himed B. Parameter estimation of linear frequency-modulated signals using integrated cubic phase function [C]// *Proceeding of the ACSSC*. Pacific Grove, CA, United States: IEEE, 2008:487-491.
- [16] O'Shea P. A new technique for instantaneous frequency rate estimation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(8): 251-252.
- [17] Wang Yong, Jiang Yicheng. ISAR imaging of maneuvering targets based on the cubic phase function[C]// *Proceeding of the CP*. Guilin, China: IEEE, 2009:1-4.
- [18] Peng Zhenni, Ben De, Zhang Gong, et al. CRB for 2-D DOA estimation in MIMO radar with UCA[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 32(1):115-120.

#### 作者简介:



杨骏泽(1991-),男,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理, E-mail: muiyiz @ 163.com。



王昕(1985-),女,副教授,研究方向:雷达信号处理, E-mail: wangx @ njupt.edu.cn。

(编辑:夏道家)