

一种结合时频分析与 Dechirp 技术提高 运动目标参数估计精度的多通道方法

邓云凯^① 刘亚东^{*①②} 行坤^① 祁海明^① 陈倩^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 传统相位中心偏置天线(DPCA)和沿迹干涉(ATI)方法无法解决动目标方位向速度引起的散焦对于动目标检测和参数估计带来的影响,而且无法对动目标方位向速度做出估计。为了解决这一问题,该文提出一种结合修正离散 Chirp-Fourier 变换(MDCFT)与去调频(Dechirp)技术的多通道动目标检测方法,通过对动目标多普勒参数的精确估计,完成对动目标的聚焦,从而提高动目标距离向速度和方位向位置的估计精度,同时还可以较精确地估计出动目标的方位向速度,弥补了 DPCA 和 ATI 方法的不足。理论分析和计算机仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 时频分析; 修正离散 Chirp-Fourier 变换; 去调频

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0014-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00153

A High Accurate Method of Estimating Moving Target's Parameters Using Time-frequency Analysis and Dechirp Technology with Multi-channel

Deng Yun-kai^① Liu Ya-dong^{①②} Xing Kun^① Qi Hai-ming^① Chen Qian^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Traditional approaches, such as the Displaced Phase Center Antenna (DPCA) and Along Track Interferometer (ATI), fail to mitigate the negative impact on the detection of a target and the estimation of the parameters due to the defocus problem associated with the target's azimuth velocity. In addition, these two approaches also fall short in estimating the target's azimuth velocity. To solve above problems, this paper proposes a multi-channel moving target detection method which combines the time-frequency analysis method of Modified Discrete Chirp-Fourier Transformation (MDCFT) and dechirp technology. Through accurately estimating a moving target's doppler parameters, the proposed method can realize the focusing of the moving target. As a result, the accuracy of estimation on the moving target's radical velocity, azimuth position, as well as azimuth velocity can be significantly improved. In all, the proposed method can overcome the disadvantages of the traditional DPCA and ATI approaches, and the effectiveness of the proposed method is proved through both theoretic analysis and compute simulation.

Key words: SAR; GMTI (Ground Moving Target Indication); Time-frequency analysis; MDCFT (Modified Discrete Chirp-Fourier Transformation); Dechirp

1 引言

基于合成孔径雷达(SAR)体制的动目标检测与定位是当前国内外研究的热点,随着研究的深入,多通道方法以其良好的杂波抑制能力和对慢速目标的检测能力被广泛应用,成为地面运动目标检测^[1](GMTI)领域的主要研究方向。多通道 GMTI 方法主要有:相位中心偏置天线(DPCA)方法^[2]、沿

迹干涉(ATI)方法^[3]和空时 2 维自适应处理(STAP)^[4]等。STAP 采用了空间与时间 2 维联合的自适应处理方式,对非理想因素的稳健性要好于 DPCA 和 ATI 方法,但同时存在计算量巨大、硬件结构复杂、研制成本高、实时实现困难等问题。DPCA 和 ATI 方法较为成熟,易于工程实现,已被分别应用于德国的 TerraSAR-X^[5]和加拿大的 RADARSAT-2^[6]。综合考虑计算量、实时性等因素,DPCA 和 ATI 方法在工程实践中有着更为广泛的应用。

三通道 DPCA 和 ATI 相结合的运动目标检测方法,既拥有 DPCA 良好的杂波抑制能力,又具备

2010-02-11 收到,2010-07-12 改回

国家部委基金和中国科学院优秀博士论文专项科研启动基金(0813260042)资助课题

*通信作者: 刘亚东 liuyadong_1983@126.com

ATI 对噪声不敏感的性能, 有较好的动目标检测效果与参数估计精度。但本质上都是两脉冲对消器, 由于动目标方位向速度对每一天线子孔径的影响都是相同的, 这两种方法对目标方位向速度的估计无能为力^[7]。而实际中动目标往往存在方位向速度, 方位向会发生散焦现象, 进行 ATI 处理干涉效果会比较差, 对动目标参数估计带来较大的影响。本文将时频分析与 Dechirp 技术应用到三通道 DPCA 和 ATI 方法中, 使动目标在进行相位干涉之前能够很好地聚焦, 提高了运动目标检测性能以及动目标距离向速度和方位向位置估计的精度, 并能够对动目标方位向速度进行较高精度的估计。

2 合成孔径雷达 MDCFT 建模

修正离散 Chirp-Fourier 变换 (MDCFT)^[8-10] 是时频分析方法的一种, 具有聚焦性能好, 运算量小, 不产生交叉项等优点, 可以同时检测多个运动目标, 能在较短的时间内完成对动目标的参数估计, 非常适合做运动目标参数估计。MDCFT 模型如下:

$$\text{MDCFT}(f, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{(k/N)n^2 + fn},$$

$$0 \leq f, k \leq N - 1 \quad (1)$$

式中 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$, f 表示中心频率, k 表示调频率。

设线性调频信号的中心频率为 f_0 , 调频率为 k_0 , 则当 $f = f_0, k = k_0$ 时, LFM 信号的 MDCFT 是一个冲激函数, 利用这一特性, 可实现 LFM 信号的检测与参数估计。通过在 (f, k) 平面进行峰值点的 2 维搜索, 即可得到峰值点坐标的估计值 (f_0, k_0) 。

SAR 在方位向按照 prf 采样, 假设方位向总的采样时间为 T , 方位向总的采样点数为 $N_a = T \cdot \text{prf}$ 。采样时刻为 Tn/N_a , $n \in [-N_a/2, N_a/2 - 1]$ 。则可以得到 SAR 方位向回波信号的离散形式为

$$s(n) = \exp[j2\pi(f_r(T \cdot n/N_a)^2 + f_d \cdot T \cdot n/N_a + \varphi)]$$

$$= W_{N_a}^{-l_0 n^2 / N_a - k_0 n - N_a \varphi} \quad (2)$$

由式(1), 式(2)可以得到多普勒调频率和中心频率的估计值

$$\hat{f}_r = l_0 / T^2, \quad \hat{f}_d = k_0 / T \quad (3)$$

因此, 将 LFM 信号在时频域的峰值点的坐标代入到上式中即可以较高的精度估计出信号的多普勒参数, 从而有利于进行后续的运动目标聚焦与运动参数估计。

3 线性调频信号去调频(Dechirp)处理

SAR 系统中的去调频方法是针对 LFM 信号的

一种聚焦方法。它通过去除不同延迟时间 LFM 信号的调频率, 达到对 LFM 信号聚焦的效果, 运算简单, 可以简化设备, 已广泛应用于 SAR 和 ISAR 作脉冲压缩^[11]。

Dechirp 技术的基本原理如图 1 所示。采用一时间固定, 频率和调频率相同的 LFM 信号作为参考信号, 和回波信号作差频处理, 使回波信号变成单频脉冲信号, 且其频率与回波和参考信号的距离差成正比。然后, 对去调频后的信号作傅里叶变换, 便可在频域得到对应的各回波的 sinc 形状窄脉冲。研究表明, Dechirp 去调频方法适用于目标的回波长度相对于发射脉宽短很多的情况^[12,13], 而这一条件在 SAR 运动目标检测中一般是满足的。

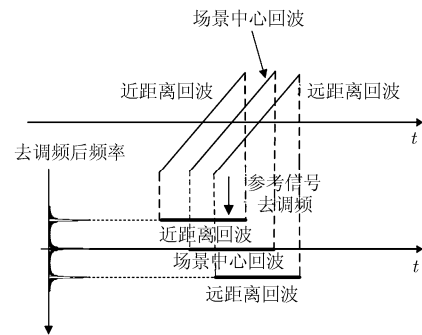


图 1 Dechirp 去调频处理原理图

4 一种结合 MDCFT 与 Dechirp 的三通道动目标检测方法

4.1 载机飞行模式

针对上文提到的动目标方位向散焦问题, 本文提出了一种提高动目标检测性能和参数估计精度的三通道方法, 图 2 给出了该方法的回波模型。假设天线沿航向放置, 子孔径间距为 d , 平台飞行高度为 h , 载机飞行速度为 V_a 。初始时刻 ($t = 0$) 天线子孔径 2 位于坐标原点, 以脉冲重复频率 prf 发射线性调频信号, 各天线子孔径同时接收回波信号。天线子孔径间距、载机速度和脉冲重复频率之间满足 $d = 2m \cdot v_a / \text{prf}$ 。地面上有运动目标 M , 目标初始位置为 (x_0, R_c) , 以恒定的速度运动, 沿载机飞行方向的速度为 V_x , 在斜距平面内沿距离方向的速度为 V_r 。

4.2 应用 DPCA 技术消除杂波

设在 $t = nT$ 时刻 (T 是脉冲重复周期), 目标运动至 (x_t, R_t) , 此时目标到各天线子孔径相位中心的距离分别为 $R_1(n)$, $R_2(n)$, $R_3(n)$ 。根据几何关系可以得到

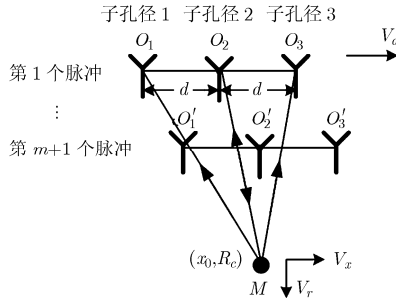


图2 三通道机载合成孔径雷达回波模型

$$\left. \begin{aligned} R_1(n) &= R_c + V_r \cdot nT \\ &+ \frac{(x_0 + d + nT(V_x - V_a))^2 + (V_r \cdot nT)^2}{2R_c} \\ R_2(n) &= R_c + V_r \cdot nT \\ &+ \frac{(x_0 + nT(V_x - V_a))^2 + (V_r \cdot nT)^2}{2R_c} \\ R_3(n) &= R_c + V_r \cdot nT \\ &+ \frac{(x_0 - d + nT(V_x - V_a))^2 + (V_r \cdot nT)^2}{2R_c} \end{aligned} \right\} (4)$$

在距离压缩之后对天线子孔径 1, 天线子孔径 2 的数据进行 DPCA 处理, 由于天线子孔径 2 接收的第 1 个脉冲回波与天线子孔径 1 接收的第 $m+1$ 个脉冲回波都包含相同的静止目标信息, 运动目标由于自身的运动而产生了额外的相位信息, 所以二者包含的动目标信息不同, 将两回波信号相减, 就能够消除静止目标信息, 保留运动目标信息^[14]。同样对天线子孔径 2 和天线子孔径 3 做 DPCA 处理滤除杂波。得到时域 DPCA 的输出为

$$S_{21}(n) = \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(2R_2(n) + R_1(n))\right] \cdot \left[1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}2V_r mT\right)\right] \quad (5)$$

$$S_{32}(n) = \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(R_2(n) + R_3(n))\right] \cdot \left[1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}2V_r mT\right)\right] \quad (6)$$

对于静止目标而言, 其距离向速度为零, $S_{21}(n)$ 和 $S_{32}(n)$ 都等于零, 因此 DPCA 处理后的剩余信号中仅有运动目标和噪声的信息, 杂波被有效的抑制。

4.3 运动目标多普勒参数估计与动目标聚焦

DPCA 处理能够有效地抑制杂波, 但是由于实际中动目标存在方位向速度, 将导致动目标发生散焦。如果直接对两路 DPCA 处理后的信号进行干涉, 在干涉图中对应运动目标的非零相位也必然会散布开来, 这对动目标的参数估计带来了困难和较大误

差。发生散焦现象的根本原因是在信号处理的过程中使用了静止目标的多普勒调频率来代替运动目标的调频率^[15-17]。因此, 如果能够在信号干涉之前准确地估计出动目标的多普勒参数, 使动目标能很好地聚焦, 就可以很好地解决以上问题。本文引入成像中常用到的 Dechirp 技术, 结合 MDCFT 估计出的运动目标的多普勒参数, 对杂波对消后的动目标信号进行去调频处理, 去除了由载机运动和运动目标方位向速度产生的多普勒调频项, 使运动目标在方位向多普勒域聚焦。

首先将 $R_1(n)$, $R_2(n)$, $R_3(n)$ 的表达式并将其代入到式(5)和式(6)中, 整理后得到

$$S_{21}(n) = \exp\{-j(4\pi/\lambda)[R_c + V_r \cdot nT + [x_0^2 + d^2/4 + (nT \cdot (V_a - V_x))^2 - 2x_0 nT \cdot (V_a - V_x) + (V_r \cdot nT)^2]/(2R_c)]\} \cdot (1 - \exp(-j(\frac{2\pi}{\lambda})2V_r mT)) \quad (7)$$

$$S_{32}(n) = \exp\{-j(4\pi/\lambda)[R_c + V_r \cdot nT + [x_0^2 - x_0 d + d^2/2 + (nT \cdot (V_a - V_x))^2 - 2x_0 nT \cdot (V_a - V_x) + (V_r \cdot nT)^2]/(2R_c)]\} \cdot \left[1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}2V_r mT\right)\right] \quad (8)$$

可以看出, 剩余动目标信号的多普勒中心频率和调频率为

$$f_{dc} = -2V_r/\lambda + 2(V_a - V_x) \cdot x_0/(\lambda R_c) \quad (9)$$

$$f_r = -[2(V_a - V_x)^2 + 2V_r^2]/(\lambda R_c) \quad (10)$$

获得了两路杂波对消了的信号 $S_{21}(n)$ 和 $S_{32}(n)$ 后, 将每一路信号分别与参考函数 $C(n)$ 相乘, 对 $S_{21}(n)$ 和 $S_{32}(n)$ 进行去调频, 即 Dechirp 处理, 去除由于载机运动产生的多普勒调频率。参考函数选取为

$$C(n) = \exp[j2\pi \cdot (nT \cdot V_a)^2/(\lambda R_c)] \quad (11)$$

相乘后的两路信号分别为

$$S'_{21}(n) = \exp\{-j(4\pi/\lambda)[R_c + V_r \cdot nT + [x_0^2 + d^2/4 - 2x_0 nT \cdot (V_a - V_x) + \varphi]/(2R_c)]\} \cdot \left[1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}2V_r mT\right)\right] \quad (12)$$

$$S'_{32}(n) = \exp\{-j(4\pi/\lambda)[R_c + V_r \cdot nT + [x_0^2 - x_0 d + d^2/2 - 2x_0 nT \cdot (V_a - V_x) + \varphi]/(2R_c)]\} \cdot \left[1 - \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}2V_r mT\right)\right] \quad (13)$$

从式(12)和式(13)可以看出, 剩余动目标的多普勒中心频率没有发生变化, 多普勒调频率变为

$$f_r' = -[2(V_a - V_x)^2 + 2V_r^2 - 2V_a^2]/(\lambda R_c) \quad (14)$$

此时对信号 $S_{21}'(n)$ 和 $S_{32}'(n)$ 分别进行 MDCFT, 将得到的峰值点坐标代入到式(3)中估计出信号的多普勒参数 \hat{f}_{dc} 和 \hat{f}_r' , 由于已经去除杂波载机运动引入的调频项, 此时估计出的多普勒参数 \hat{f}_{dc} 和 \hat{f}_r' 即为 $S_{21}'(n)$ 和 $S_{32}'(n)$ 中运动目标的多普勒中心频率和调频率。

由于信号 $S_{21}'(n)$ 和 $S_{32}'(n)$ 中仅有动目标信息, 因此利用估计出的动目标多普勒调频率 \hat{f}_r' 对 $S_{21}'(n)$ 和 $S_{32}'(n)$ 再作一次 Dechirp 处理, 就可以去除运动目标方位向速度产生的调频项, 从而实现对动目标的聚焦。Dechirp 参考函数为

$$C'(n) = \exp(-j\pi\hat{f}_r'(nT)^2) \quad (15)$$

将 $S_{21}'(n)$ 和 $S_{32}'(n)$ 分别与 $C'(n)$ 相乘, 去除由于动目标方位向速度带来的多普勒调频率, 方位向作傅里叶变换后, 可以发现动目标在频域聚焦在其多普勒中心位置。

4.4 运动目标参数估计

得到动目标去调频信号后, 对两路信号做 ATI 处理即可得到精度较高的干涉图像。在干涉处理之前, 需要在去调频后补偿位置偏差产生的相位差, 相位补偿函数为

$$C_1(n) = \exp(j2\pi \cdot d \cdot nT \cdot V_a / (\lambda R_c)) \quad (16)$$

将 $S_{32}'(n)$ 与相位补偿函数 $C_1(n)$ 相乘, 再经方位向傅里叶变换, 即可得到动目标在频域的聚焦图像 $I_{21}(f)$ 和 $I_{32}(f)$:

$$I_{21}(f) = |I_{21}(f)| \exp(-j2\pi / \lambda \cdot (2R_c + (x_0^2 + d^2 / 4) / R_c + \phi)) \quad (17)$$

$$I_{32}(f) = |I_{32}(f)| \exp(-j2\pi / \lambda \cdot (2R_c + (x_0^2 - x_0d + d^2 / 2) / R_c + \phi)) \quad (18)$$

其中 $|I_{21}(f)|$ 和 $|I_{32}(f)|$ 为信号的模值, ϕ 为两路信号中所包含的相同相位。假设 $I_{21}(f)$ 中动目标所在单元的相位为 $\phi_1(f)$, $I_{32}(f)$ 中动目标所在单元的相位为 $\phi_2(f)$, 干涉后的相位差为 $\Delta\phi(f)$, 则

$$\Delta\phi(f) = \varphi_2(f) - \varphi_1(f) = -\pi(-2x_0d + d^2 / 2) / (\lambda R_c) \quad (19)$$

确定了相位差 $\Delta\phi(f)$ 后就可以得出动目标的真实方位位置的估计值。

$$\hat{x}_0 = \lambda R_c \Delta\phi(f) / (2\pi \cdot d) + d / 4 \quad (20)$$

最后, 将估计所得的 \hat{f}_r', \hat{f}_{dc} 和 \hat{x}_0 的值代入到式(9)与式(14)中, 解联立方程, 即可得出动目标的距离向速度和方位向速度。该目标检测与参数估计方法流程图如图 3 所示。

5 仿真实验

合成孔径雷达采用正侧视方式工作, 仿真参数如下: 波长 0.03 m, 载机速度 200 m/s, 高度 10000 m, 天线子孔径相位中心间距 1 m, 子孔径 2 发射线性调频信号, 三天线子孔径同时接收回波信号, 脉冲重复频率为 800 Hz, 脉冲宽度 32 μ s, 信号带宽 40 MHz, 距离向采样频率 50 MHz, 合成孔径时间为 3 s。在距离向坐标为 20 km 处存在一个运动目标, 运动目标参数如表 1 所示。假设噪声幅度服从

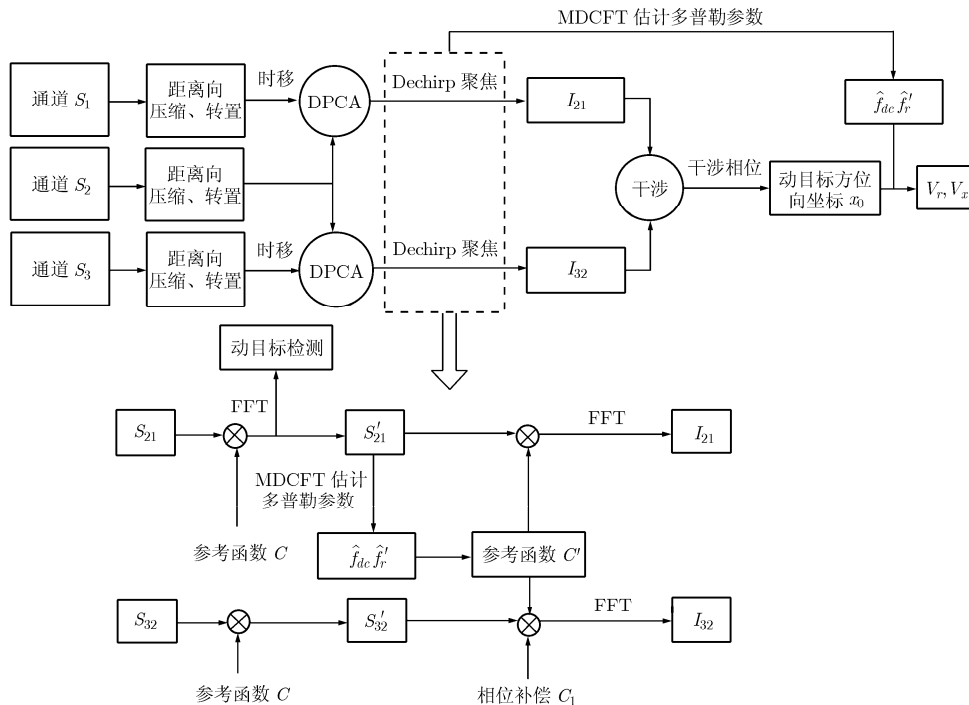


图 3 结合 MDCFT 与 dechirp 的三通道动目标检测方法流程图

表 1 运动目标参数

	距离向坐标(m)	方位向坐标(m)	距离向速度(m/s)	方位向速度(m/s)
动目标参数	20000	-100	-1.5	8
本文方法估计结果	20000	-99.3442	-1.4928	8.1725
非聚焦估计结果	20000	-111.3731~ -86.7125	-1.6649~ -1.3105	不能估计

瑞利分布, 信噪比 $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$, 信杂比 $\text{SCR} = 0 \text{ dB}$ 。

图 4 是 DPCA 杂波对消后动目标所在距离门的距离多普勒域检测图。可以看出杂波已被抑制到噪声水平, 但是由于动目标存在方位向速度, 在方位向发生散焦, 因此对下一步的干涉处理带来不便, 如果不对动目标聚焦而对其直接进行 ATI 处理, 动目标的相位在干涉图中会出现散布, 这给精确估计动目标参数带来困难。

图 5 为散焦情况下的干涉相位图, 图 6 为在散焦情况下求出的各散焦点对应的距离向速度的估计值, 估计值分布在 -1.5 m/s 周围, 从 -1.66 m/s 到 -1.31 m/s 不等, 由于在频率域发生散焦, 因此很难确定用哪一个速度来作为真实速度的估计值。即使是用估计出的多普勒中心频率对应的速度作为动目标的距离向速度的估计值, 也与真实值之间存在较大误差。而且由图 6 可以看到, 由于速度存在波动, 多普勒中心频率估计过程中存在的误差也会影响动目标距离向速度的估计值。

下面应用本文方法进行动目标检测及参数估计, 首先对 DPCA 处理后的数据进行第 1 次 Dechirp 去调频处理, 去除载机运动产生的调频率, 然后进行 MDCFT 时频分析, 估计动目标的多普勒参数, 结果如图 7 所示。可以看出, LFM 信号在时频域聚焦性能非常好, 图 7 中的两维坐标分别对应动目标多普勒中心频率和多普勒调频率信息。将时频空间得到的峰值点所对应的 f_0 和 k_0 的值代入到式(3)中, 可得多普勒参数的估计值: $\hat{f}_{dc} = 36 \text{ Hz}$, $\hat{f}_r = 10.6667 \text{ Hz/s}$; 由式(9)和式(14)求出的多普勒参数

理论值为: $f_{dc} = 36 \text{ Hz}$, $f_r = 10.4458 \text{ Hz/s}$ 。二者非常接近, 可见, 时频分析对于估计 LFM 信号的多普勒参数有很高的精度。

估计出动目标的多普勒参数后, 代入到式(15)中, 得到动目标的 Dechirp 参考函数, 将两路 DPCA 处理后的信号分别与参考函数相乘, 并在方位向做傅里叶变换, 得到动目标聚焦后的频域 SAR 图像, 图 8 给出了聚焦结果。

从图 8 可以看出, 经过 Dechirp 处理, 动目标被聚焦在其多普勒中心频率 36 Hz 处。再对两幅动目标聚焦后的频域图像作 ATI 处理即可根据所得干涉相位求出动目标所在方位向的初始位置 x_0 。干涉结果如图 9 所示。

从图 9 中可以看到, 在动目标聚焦后所在多普勒中心频率处可以得到非零干涉相位 $\Delta\varphi = 59.7565^\circ$ 。由于在 ATI 处理过程中相当于对动目标信号进行了平方, 增加了信噪比, 所以在干涉图中噪声部分显得很小。将所得相位 $\Delta\varphi$ 代入到式(20)中, 可以得到动目标方位向初始位置 $\hat{x}_0 = -99.3442 \text{ m}$ 。综合估计出的 $\hat{f}_r, \hat{f}_{dc}, \hat{x}_0$ 代入到式(9)和式(14)中, 联立方程即可估计得出动目标距离向和方位向速度 $\hat{V}_r = -1.4928 \text{ m/s}$, $\hat{V}_x = 8.1725 \text{ m/s}$ 。

表 1 给出了本文方法的动目标参数估计结果和非聚焦情况下的参数估计结果。通过比较可以看出, 本文方法在动目标参数估计的精度上有所提高, 并且较精确地估计出动目标的方位向速。表 2 是系统信噪比分别为 5 dB , 10 dB , 20 dB , 30 dB 情况下参数估计的偏差。从表中可以看出, 这 3 种情况下,

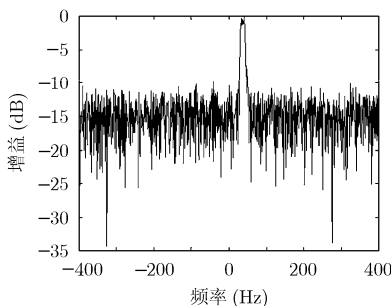


图 4 DPCA 处理后距离多普勒域检测图

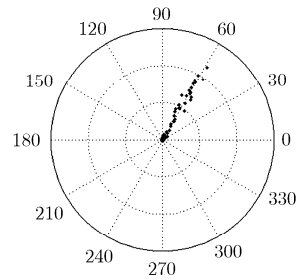


图 5 散焦情况下干涉相位图

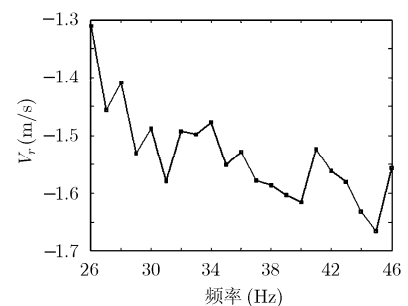


图 6 散焦频点与对应的距离向速度

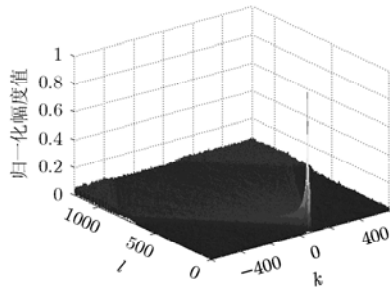


图7 距离多普勒域时频分析(MDCFT)图

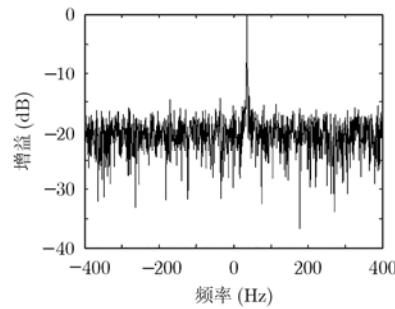


图8 运动目标进行聚焦后得到的频域 SAR 图像

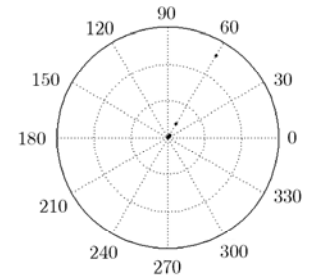


图9 两幅动目标聚焦后频域图像的干涉相位图

地面距离向位置估计偏差相同，均小于一个地面距离分辨单元。方位向位置的估计偏差随着信噪比的降低略有增大，仅在 5 dB 的情况下误差接近 10%。地面距离向速度的估计偏差始终不超过 5%，方位向速度的估计偏差在各情况下差别不大，均在 2% 左右。总的来说，在这 3 种信噪比情况下，算法都取得了令人满意的参数估计结果。可见，利用该算法估计动目标运动参数具有良好的鲁棒性。

表2 不同信噪比下的参数估计值

SNR	距离向坐标(m)	方位向坐标(m)	距离向速度(m/s)	方位向速度(m/s)
5 dB	20000	-91.9618	-1.4220	8.1720
10 dB	20000	-102.4477	-1.5226	8.1728
20 dB	20000	-99.3442	-1.4928	8.1725
30 dB	20000	-99.7218	-1.4964	8.1726

6 结束语

本文在 DPCA 和 ATI 方法联合处理方法的基础上，结合时频分析和 Dechirp 技术，通过精确估计运动目标的多普勒参数，不但实现对动目标聚焦，提高了动目标方位向位置和距离向速度的估计精度，而且能够对动目标方位向速度进行较高精度的估计，弥补了 DPCA 和 ATI 方法的不足，在工程上较大的应用价值。但是由于引入了 MDCFT 和 Dechirp 等步骤，系统的实时性较差，且动目标方位向速度的估计精度较距离向速度的估计精度还有一定差距，因此如何进一步提高动目标参数估计性能和减少运算量是后续研究的方向。

参考文献

- [1] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(3): 499-505.
- [2] Lightstone L, Faubert D, and Rempel G. Multiple phase center DPCA for airborne radar. Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference, US, 1991: 36-40.
- [3] Kohlleppe R and Gierull Christoph H. Enhancement of along-track interferometry for ground moving target indication. IGARSS, 2008, Boston, USA, July 7-11, 2008: II-229-II-232.
- [4] Brennan L E and Reed I S. Theory of adaptive radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1973, 9(2): 237-252.
- [5] Suchandt S and Runge H, et al. First results of ground moving target analysis in TerraSAR-X data. Proceedings of EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, June 2008: 55-58.
- [6] Livingstone C E, Sikaneta I, Gierull C H, and Chiu S, et al. An airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 Ground Moving Target Indication (GMTI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002, 28(6): 794-813.
- [7] 郑明洁, 杨汝良. 基于DPCA和干涉技术的SAR动目标检测. *电子与信息学报*, 2003, 25(11): 1525-1530.
Zheng Ming-jie and Yang Ru-liang. SAR moving targets detection based on DPCA and interferometric processing. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(11): 1525-1530.
- [8] Ding Y, Xue N, and Munson D C Jr. An analysis of time-frequency methods in SAR imaging of moving targets. Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. Proceedings of the 2000 IEEE, March 16-17, 2000: 221-225.
- [9] 孙泓波, 郭欣, 顾红, 等. 修正离散Chirp-Fourier变换及其在SAR动目标检测中的应用. *电子学报*, 2003, 31(1): 25-28.
Sun Hong-bo, Guo Xin, and Gu Hong, et al. Modified discrete Chirp-Fourier transform and its application to SAR moving target detection. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(1): 25-28.
- [10] Xia Xiang-gen. Discrete Chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2000, 48, SP-48(11): 3122-3133.
- [11] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 电子工业出版社, 2005: 31-37.

- Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technology. Electronics Industry Press, 2005: 31–37.
- [12] 李亚超, 周峰, 邢孟道, 保铮. 一种直升机的舰船Dechirp实测数据SAR成像方法. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1794–1798.
- Li Ya-chao, Zhou Feng, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. An effective method for ship Dechirp data imaging in helicopter SAR System. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(8): 1794–1798.
- [13] Liu Ai-fang, Zhu Xiao-hua, Lu Jin-hui, and Liu Zhong. The ISAR range profile compensation of fast-moving target using the Dechirp method. IEEE Int. Conf. Neural Networks & Signal Processing, Nanjing, China, 2003 Vol, 2: 1619–1623.
- [14] 杨垒, 王彤, 邢孟道, 保铮. 机载多通道SAR-GMTI的杂波抑制方法. 电子与信息学报, 2008, 30(12): 2831–2834.
- Yang Lei, Wang Tong, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. The clutter suppression method of airborne multi-channel SAR-GMTI system. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(12): 2831–2834.
- [15] Shufen M A. Doppler frequency extraction and estimation of range and speed of moving target. 9th International Conference on Signal Processing, Germany, Oct. 26–29, 2008: 2636–2639.
- [16] 史洪印, 周荫清, 陈杰. 同步轨道星机双基地三通道SAR地面运动目标指示算法. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 1881–1885.
- Shi Hong-yin, Zhou Yin-qing, and Chen Jie. An algorithm of GEO spaceborne-airborne bistatic three-channel SAR ground moving target indication. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(8): 1881–1885.
- [17] 邓海涛, 张长耀. 一种机载三通道GMTI实时信号处理方法. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 370–373.
- Deng Hai-tao and Zhang Chang-yao. A real-time signal processing method for air-born three-channels GMTI. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(2): 370–373.
- 邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载SAR系统总体设计.
- 刘亚东: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达运动目标检测与成像.
- 行坤: 男, 1980年生, 助理研究员, 研究方向为星载和机载合成孔径雷达运动目标检测.
- 祁海明: 男, 1980年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为合成孔径雷达原始数据压缩、新体制SAR系统设计及信号处理技术.
- 陈倩: 女, 1986年生, 博士生, 研究方向为多发多收运动目标检测及子带合成技术.