

基于非均匀快速傅里叶变换的 SAR 方位向运动补偿算法

邢涛^① 李军^② 王冠勇^① 胡庆荣^①

^①(北京无线电测量研究所 北京 100854)

^②(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 沿航向的非匀速运动对 SAR 成像质量有很大影响, 而运动补偿后 SAR 图像存在几何形变, 影响子图像拼接和多波段 SAR 图像融合。当沿航向速度误差较大时, 实图像域插值校正后图像残留的几何形变不能忽略。基于上述问题, 该文提出一种基于非均匀傅里叶变换的 SAR 方位向运动补偿算法, 算法直接对方位向的非均匀数据进行非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)。该算法的定位误差和几何形变比实图像域插值校正几何形变算法小 1 到 2 个数量级, 对沿航向速度误差有很强的鲁棒性, 补偿后数据的幅度和相位信息都得以保留。SAR 仿真和实测数据验证了该算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 运动补偿; 几何形变校正; 非均匀快速傅里叶变换

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1023-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00969

An Along-track Motion Compensation Algorithm Based on Non-Uniform Fast Fourier Transform (NUFFT) for SAR

Xing Tao^① Li Jun^② Wang Guan-yong^① Hu Qing-rong^①

^①(Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

^②(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The non-equispaced along-track motion has serious impact on SAR imaging. The SAR images are geometric distorted after the along-track motion compensation, which may impair the quality of the sub-image connection and the multi-spectral SAR image fusion. When the along-track velocity error is large the remained geometric distortion after the interpolation geometric distortion correction can not be ignored. In this paper, a SAR motion compensation algorithm is presented based on Non-Uniform Fast Fourier Transform (NUFFT) directly to the azimuth non-equispaced data. The algorithm has 1 to 2 quantitative reduction in location error and geometric distortion than interpolation geometric distortion correction algorithm and has high robustness on along-track velocity error. At the same time, the amplitude and phase information can both be saved based on the proposed algorithm. The results of the NUFFT compensation for simulated data and the real SAR data verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: SAR; Motion compensation; Geometric distortion correction; Non-Uniform Fast Fourier Transform (NUFFT)

1 引言

SAR 成像要求雷达天线相位中心匀速直线运动。在实际应用中, 受载机本身误差和外界大气环境等多种因素制约, 天线相位中心沿航向的前进速度是时变的, 这种时变运动对成像质量的影响很大^[1,2], 因而沿航向运动补偿是十分必要。

沿航向速度的时变导致空间采样位置的不均匀, 解决办法是根据时变速度实时调节雷达重复频率使采样位置沿航向均匀分布, 或者把在非均匀位

置上采集到的数据插值到均匀位置上。实时调整雷达重复频率增加了设备的复杂度和成本; 对数据复数插值运算量大, 并且存在一定的插值误差。针对上面两种解决办法的不足, 文献[3]提出了一种沿航向运动误差补偿方法, 这种方法对沿航向运动误差的补偿非常有效, 但是成像后图像存在几何形变。文献[4]对此方法进行了改进, 通过对 SAR 图像插值校正几何形变。在沿航向速度误差较小时文献[4]方法可以有效地校正几何形变。而当沿航向速度误差较大时, 校正后图像残留的几何形变不能忽略, 这影响了大速度误差下该方法在 SAR 成像中的应用。另外, 该方法的插值是对图像数据的幅值进行的,

相位信息被舍弃。

非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)^[5-8]是一种计算非均匀数据傅里叶变换的高精度、快速算法,在图像处理^[9-13]、雷达成像^[14-16]等领域得到了广泛应用。本文首先介绍了NUFFT快速计算原理;其次推导出方位非均匀傅里叶变换到均匀傅里叶变换的等效公式,从理论上证明了方位非均匀傅里叶变换能完全补偿掉天线相位中心沿航向时变运动对成像质量的影响;给出了基于方位非均匀傅里叶变换的补偿算法流程;最后进行了方位向点目标仿真实验和实测速度误差成像实验。仿真和实测数据实验结果表明,该算法能够在沿航向存在较大速度误差下以很高的精度定位目标的真实位置,去除图像几何形变,对沿航向速度误差具有很强的鲁棒性,算法处理后图像数据的幅度和相位信息同时有效,从而验证了本文算法的有效性。

2 NUFFT 快速计算

与均匀数据离散傅里叶变换(DFT)类似,非均匀数据的离散傅里叶变换为

$$\hat{z}_k = \sum_{l=1}^M \exp(-i2\pi x_l k / N) z_l, \quad k = -N/2, -N/2 + 1, \dots, N/2 - 1 \quad (1)$$

其中 z_l 为输入数据, x_l 为与 z_l 对应的非均匀位置。

$$\hat{\phi}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sinh(\alpha\sqrt{K^2 - x^2})}{(\sqrt{K^2 - x^2})}, \quad -K \leq x \leq K,$$

$$\phi(\xi) = \begin{cases} I_0(K\sqrt{\alpha^2 - \xi^2}), & |\xi| \leq \alpha \\ 0, & |\xi| > \alpha \end{cases}, \quad K \text{ 为插补长度。}$$

文献[5,7]给出如式(2)的指数函数展开式:

$$\exp(-ix\xi) = \frac{(2\pi)^{-1/2}}{\phi(\xi)} \sum_{m \in \mathbb{Z}} \hat{\phi}(x - m) \exp(-im\xi), \quad |\xi| \leq \pi/c \quad (2)$$

其中 c 为过采样因子, 令 $x = cx_l, \xi = 2\pi k/cN, |k| \leq N/2, \alpha = \pi(2 - 1/c) - 0.01, \phi_k = \phi(2\pi k/cN), \mu_l = \text{round}(cx_l), \hat{\phi}_{lm} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \hat{\phi}(cx_l - (\mu_l + m))$, 把式(2)代入式(1)右边得

$$\hat{z}_k = \frac{1}{\phi_k} \sum_{j=-cN/2}^{cN/2-1} u_j \exp(-i2\pi kj/cN) \quad (3)$$

式(3)中 u_j 为

$$u_j = \sum_{l=1}^M \sum_{m \in \mathbb{Z}} z_l \hat{\phi}_{l, j+cmN-\mu_l}, \quad j = -cN/2, -cN/2 + 1, \dots, cN/2 - 1 \quad (4)$$

NUFFT 的计算过程如图 1 所示, 首先由输入



图1 NUFFT 计算示意图

数据 z_l 和非均匀位置 x_l 计算中间参数 $\mu_l, \phi_k, \hat{\phi}_{lm}$, 然后按式(4)计算中间变量 u_j , 最后由式(3)利用 FFT 快速计算输出值 \hat{z}_k 。

3 基于 NUFFT 的 SAR 方位向运动补偿算法

3.1 方位向非均匀傅里叶变换

假设雷达工作于正侧视情况, 雷达平台沿平行于 X 轴方向飞行, 理想情况下航迹如图 2 中箭头虚线所示, 理想航迹在地面投影为 X 轴, 平台高度为 H 。本文主要研究对沿航向非匀速运动的补偿, 故假设雷达平台不存在垂直航向的侧移, 目标为沿与 X 轴平行且与航线垂直距离为 R_s 的直线上分布的一系列点目标^[1,3,4] $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$, 点目标方位向的坐标为 X_1, X_2, \dots, X_N , 天线相位中心与目标的距离为 R , 如图 2 所示。

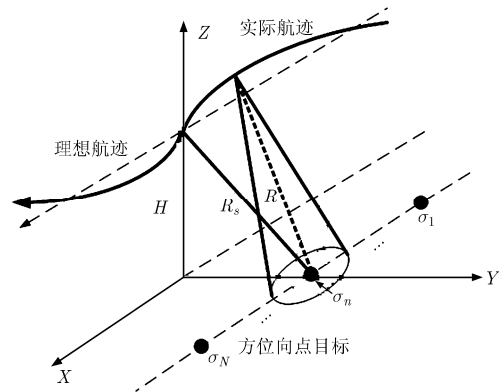


图2 SAR 方位成像目标模型

假设 t 时刻沿航向速度为 $V(t)$, 则 t_m 时刻收到的基频回波为

$$s(t_m) = \sum_n \sigma_n \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_s^2 + \left[X_n - \int_0^{t_m} V(t) dt\right]^2}\right) \quad (5)$$

设 $V_0 = V(t)|_{t=0}$, 作如下的替换:

$$T_m = \int_0^{t_m} \frac{V(t)}{V_0} dt \quad (6)$$

式(6)表明: T_m 为 t_m 的单调增函数, 把式(6)代入式(5)得

$$s(T_m) = \sum_n \sigma_n \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_s^2 + [X_n - V_0 T_m]^2}\right) \quad (7)$$

对原始数据作方位 FFT 是在“沿航向匀速运

动”的假设下进行的，此时 $V(t) = V_0$ ，代入式(5)得

$$s(t_m) = \sum_n \sigma_n \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_s^2 + [X_n - V_0 t_m]^2}\right] \quad (8)$$

实际中沿航向速度是时变的，方位 FFT 处理存在一定误差。对比式(7)和式(8)，式(7)与式(8)的区别是自变量符号不同，式(8)求频谱以 t_m 为积分变量从 $-\infty \rightarrow +\infty$ 加权求积分^[1]，从微积分知识可知：式(7)若能以 T_m 为积分变量从 $-\infty \rightarrow +\infty$ 加权求积分，则可以得到与式(8)相同的频谱。式(7)以 T_m 为积分变量的傅里叶变换为

$$\begin{aligned} S(f) &= \int_{T_m=-\infty}^{+\infty} s(T_m) \exp(-j2\pi f T_m) dT_m \\ &= \int_{T_m=-\infty}^{+\infty} \sum_n \sigma_n \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{R_s^2 + [X_n - V_0 T_m]^2}\right] \exp(-j2\pi f T_m) dT_m \quad (9) \end{aligned}$$

设 T 为脉冲重复周期，对式(9)进行离散化：

$$f \rightarrow \frac{k}{MT}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (10)$$

$$\int_{T_m=-\infty}^{+\infty} \rightarrow \sum_{m=0}^{M-1} \quad (11)$$

$$T_m \rightarrow \left[\left(\sum_{p=0}^m \frac{V(pT)}{V_0} \right) - 1 \right] T, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (12)$$

令

$$x_m = \left(\sum_{p=0}^m \frac{V(pT)}{V_0} \right) - 1, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (13)$$

由式(12)，式(13)得

$$T_m \rightarrow x_m T, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (14)$$

由式(10)，式(14)得

$$\exp(-j2\pi f T_m) \rightarrow \exp\left[-j \frac{2\pi}{M} k x_m\right] \quad (15)$$

$$dT_m \rightarrow \frac{V(mT)}{V_0} T, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (16)$$

输入、输出分别对应如下：

$$s(T_m) \rightarrow s_m, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (17)$$

$$S(f) \rightarrow S(k), \quad k = 0, 1, \dots, M-1 \quad (18)$$

把式(10)~式(18)代入式(9)第 1 个等号两边，得

$$\begin{aligned} S(k) &= \sum_{m=0}^{M-1} s_m \exp\left[-j \frac{2\pi}{M} k x_m\right] \frac{V(mT)}{V_0} T \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \left(s_m \frac{V(mT)}{V_0} T \right) \exp\left[-j \frac{2\pi}{M} k x_m\right] \quad (19) \end{aligned}$$

在式(19)中， $s_m, m = 0, 1, \dots, M-1$ 为 M 个数据， $V(mT), m = 0, 1, \dots, M-1$ 为由机载设备获取的 M

个采样时刻的速度值，令

$$M = N \quad (20)$$

$$m = l - 1 \quad (21)$$

$$s_m \frac{V(mT)}{V_0} T = z_l \quad (22)$$

$$x_m = x_l \quad (23)$$

把式(20)~式(23)代入式(19)，得

$$S(k) = \sum_{l=1}^M z_l \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} k x_l\right] \quad (24)$$

式(24)等式右边和式(1)等式右边完全一样，因此，可以利用第 2 节 NUFFT 快速计算方法来计算式(19)，即得到了非均匀输入下离散化的频谱，这种频谱与沿航向匀速直线运动时的频谱(式(8)的傅里叶变换)一样。

3.2 基于 NUFFT 的 SAR 方位向运动补偿算法

基于 NUFFT 的 SAR 方位向运动补偿算法核心是用方位 NUFFT 替代方位 FFT。以 RD 成像算法^[1]为例，基于 NUFFT 的 SAR 方位向运动补偿算法流程如图 3 最下层的粗黑实线所示，简记为“NUFFT”；处于中间层的中号黑线流程表示文献[4]算法，简记为 CACGD；处于最上层的细实线流程表示“原始脉压”算法^[1-4]，简记为“原始脉压”；同时研究并仿真了先复数插值再 FFT 和脉压的成像算法，简记为“CIFFT”。

从图 3 可知，原始脉压，CACGD，CIFFT，NUFFT 成像流程中距离徙动校正、距离脉压、距离 IFFT、方位脉压、方位 IFFT 等处理是一样的。在表 1 中，对这 4 种成像流程公共处理部分没有进行仿真，仅统计了这 4 种成像算法流程中各自独有的操作部分的运行时间。

根据文献[5,6]，在 $c = 2, K = 7$ 时 NUFFT 快速计算值与式(1)直接计算值相对误差为 10^{-7} 量级，已满足仿真需要，本文中 NUFFT 的计算参数均取 $c = 2, K = 7$ 。仿真环境为：采用 Intel(R) Core(TM) i3 CPU 550 @ 3.20 GHz, 3.19 GHz, 2.99 GB 的内存，Microsoft Windows XP Professional Service Pack3 系统，仿真软件采用 MATLAB 7.5.0 (R2007b)。在运行中，FFT 操作直接调用内核函数 fft，插值操作调用内核函数 spline。运行时间为 200 次重复试验平均值，单位 ms。结果如表 1 所示。

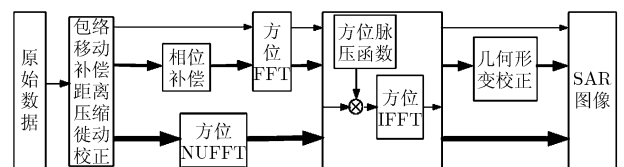


图 3 SAR 成像算法流程

表1 算法在不同点数时200次实验的平均运行时间(ms)

点数	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768	65536
FFT	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.13	0.32	0.62	1.20	2.46	5.54	11.57
CIFFT	0.70	0.75	0.84	1.16	1.44	2.28	4.55	8.41	16.31	27.86	58.30	132.35
CACGD	0.98	1.03	1.08	1.44	1.54	2.13	4.20	6.84	12.86	22.67	46.32	105.98
NUFFT	0.10	0.12	0.17	0.30	0.46	0.89	1.77	3.36	6.61	13.82	48.49	98.06

表1表明, CACGD及CIFFT运行时间为NUFFT运行时间的1~10倍量级, NUFFT运算时间为FFT运算时间的5~10倍。对完整算法流程操作次数推导表明, 在距离向和方位向点数相同情况下, $T_{\text{NUFFT}} < 3.25T_{\text{原始脉压}}$, 从这个意义上来说, 基于NUFFT的方位向运动补偿算法运行时间与原始脉压(脉冲压缩)成像算法运行时间为1个量级。

4 仿真和实测数据实验

4.1 仿真结果对比

点目标仿真参数: 10 GHz, 脉冲重复频率2000 Hz, 场景中心距离5 km, 相干积累角为 1° , 方位分辨率1 m。设置了3个点目标, 分别在-100 m, 0 m, 100 m处, 平台初始速度100 m/s, 沿航向速度误差为高斯分布的随机变量, 设置了两组速度误差:

小速度误差(均值为0, 标准差为3)和大速度误差(均值为20, 标准差为10)。

图4(a), 4(b)为两种速度误差下4种算法在3个方位点目标处的仿真图, 表2为与图4(a), 4(b)对应的数据记录。

图4(a), 4(b)和表2表明: 小速度误差时4种算法成像效果都比较好。大速度误差时, 原始脉压算法有 10^1 量级定位误差和 10^1 量级几何形变; CACGD算法有 10^0 量级的定位误差和 10^0 量级的几何形变; CIFFT算法有 10^{-2} 量级的定位误差和 10^{-3} 量级的几何形变; NUFFT算法有 10^{-3} 量级的定位误差和 10^{-3} 量级的几何形变。NUFFT算法和CIFFT算法定位误差和几何形变对速度误差鲁棒性比较强。

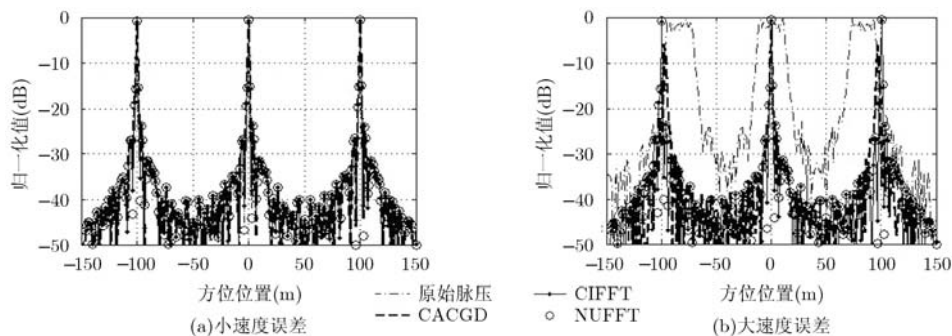


图4 点目标仿真图

表2 不同沿航向速度误差下方位点目标仿真结果(m)

速度误差	算法	目标1位置	目标2位置	目标3位置	定位误差			几何形变	
					目标1	目标2	目标3	目标1和2	目标2和3
小	原始脉压	-99.977	-0.051	99.937	2.300E-02	5.100E-02	6.300E-02	7.400E-02	1.200E-02
	CACGD	-100.020	-0.026	99.977	2.000E-02	2.600E-02	2.300E-02	6.000E-03	3.000E-03
	CIFFT	-100.025	-0.024	99.975	2.500E-02	2.400E-02	2.500E-02	1.000E-03	1.000E-03
	NUFFT	-100.000	0.001	100.000	0.000E+00	1.000E-03	0.000E+00	1.000E-03	1.000E-03
大	原始脉压	-82.404	0.901	82.232	1.760E+01	9.010E-01	1.777E+01	1.670E+01	1.867E+01
	CACGD	-96.793	0.006	96.770	3.207E+00	6.000E-03	3.230E+00	3.201E+00	3.236E+00
	CIFFT	-100.025	-0.024	99.975	2.500E-02	2.400E-02	2.500E-02	1.000E-03	1.000E-03
	NUFFT	-100.000	0.001	100.000	0.000E+00	1.000E-03	0.000E+00	1.000E-03	1.000E-03

图 5(a), 5(b), 5(c) 3 幅图是把图 4(a), 4(b)中 -100 m, 0 m, 100 m 处 4 种算法成像仿真曲线的-3 dB 尖峰放大后的情形。表 3 为 0 m 处点目标在不同速度误差下的主瓣展宽系数 IRWR(实际主瓣宽度/理想主瓣宽度), 峰值旁瓣比 PSLR 和积分旁瓣比 ISLR 的数据记录, 仿真中没有加窗函数。

图 5(a), 5(b), 5(c)和表 3 表明: 随着速度误差的增大, 原始脉压算法主瓣急剧展宽, 分辨率降低; CACGD 算法在某些点目标处仿真曲线的峰值低于 -3 dB, 有可能漏检目标, 且波形发生畸变; CIFFT 算法和 NUFFT 算法主瓣展宽系数、峰值旁瓣比和积分旁瓣比基本不随速度误差变化而变化, 波形保形较好, 对沿航向速度误差具有较强的鲁棒性。

4.2 实测数据结果对比

实测速度误差验证: 速度由挂飞的 IMU 测得, 不考虑 IMU 测量误差。记实测速度相对其初始值的

变化量为实测速度误差, 变化规律如图 6 所示, 把图 6 的速度误差加到图 7 横轴所示的相应速度上作为时变的沿航向速度。图 7 为 4 种算法在 -100 m, 0 m, 100 m 这 3 个点目标处的定位误差随平台速度的变化关系。图 8 为沿航向速度误差按照图 6 变化时, 4 种算法几何形变随平台速度的变化关系。

图 7(a), 7(b), 7(c)表明: NUFFT 算法定位误差比原始脉压算法定位误差小 3 到 4 个数量级, NUFFT 算法定位误差比 CACGD 算法和 CIFFT 算法定位误差小 1 到 2 个数量级。曲线的起伏大小表明: CIFFT 算法和 NUFFT 算法对速度(即相对速度误差)的鲁棒性比较强。图 8(a), 8(b)表明: NUFFT 算法和 CIFFT 算法几何形变基本相同, 几何形变量比 CACGD 算法要低 1 到 2 个数量级。

在图 6 所示速度误差下, 取平台速度为 50 m/s, 用来做 SAR 图像数据相位标准的参考算法方位时

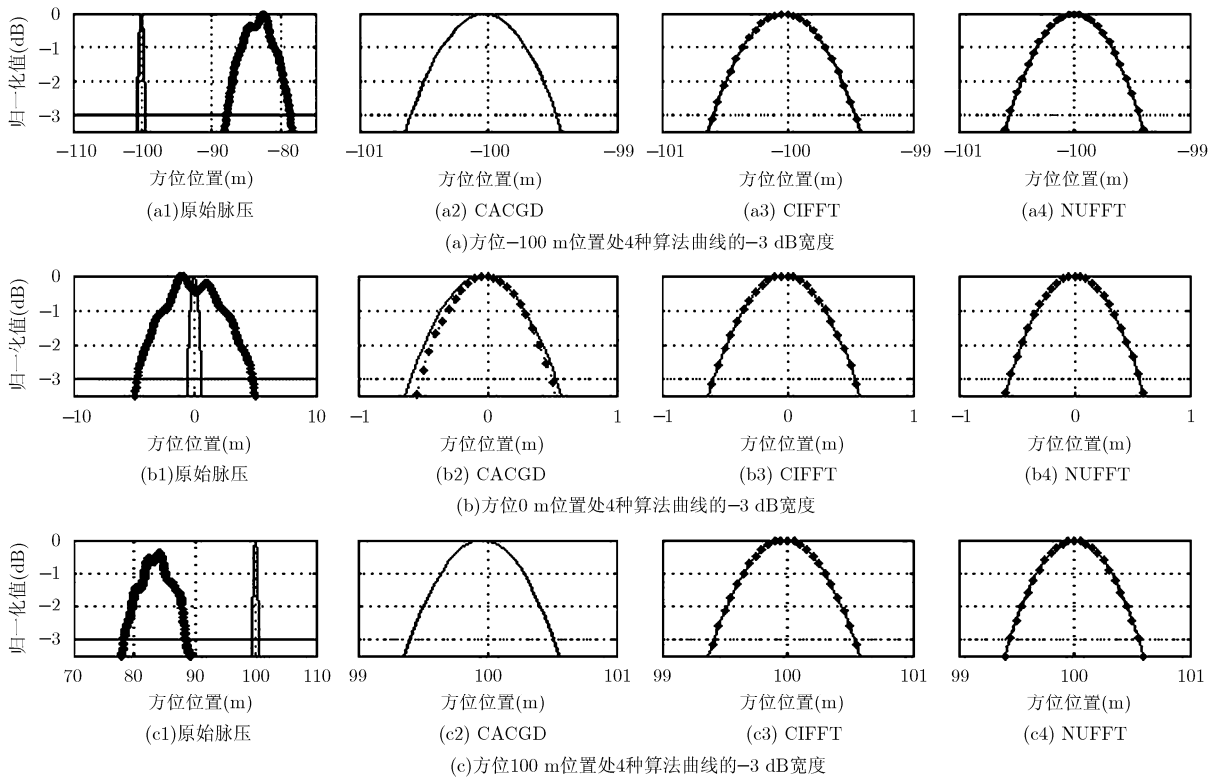


图 5 点目标仿真曲线的-3 dB 宽度(粗点线: 大速度误差; 细实线: 小速度误差)

表 3 不同速度误差下 4 种算法点目标的特性比较

指标	原始脉压		CACGD		CIFFT		NUFFT	
	小速度误差	大速度误差	小速度误差	大速度误差	小速度误差	大速度误差	小速度误差	大速度误差
IRWR	1.00	30.81	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00
PSLR(dB)	-13.29	-8.09	-12.96	-11.62	-13.39	-13.38	-13.38	-13.38
ISLR(dB)	-9.84	-9.97	-9.83	-8.74	-9.77	-9.77	-9.77	-9.77

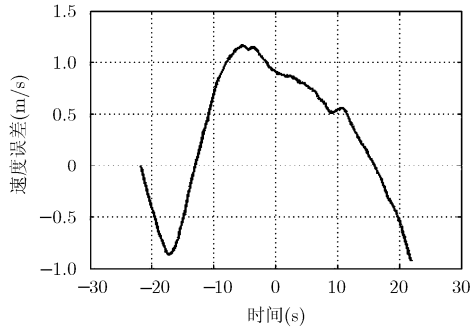


图6 实测速度误差随时间的变化关系

频变换部分按照式(1)直接计算, 其余操作与原始脉压算法相同。4种算法处理后图像数据相位的相对误差如图9所示。

图9表明: 在存在沿航向速度误差, 尤其是较大相对误差下, 原始脉压算法对非均匀数据直接进行方位FFT导致SAR图像数据相位存在较大相对误差, CACGD算法只对成像数据幅值进行插值校正, 相位的相对误差依然较大, CIFFT算法对原始非均匀数据进行了复数插值, 图像数据某些点上相

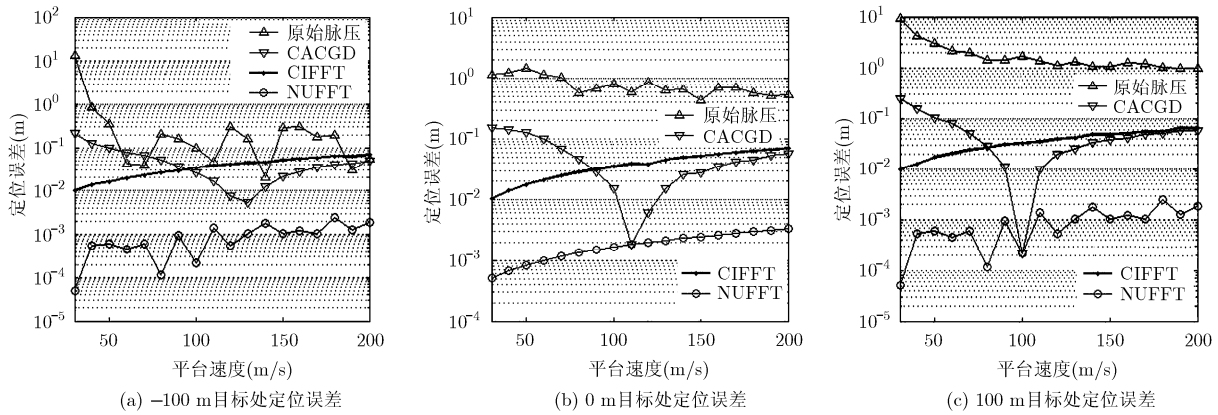


图7 定位误差与平台速度关系

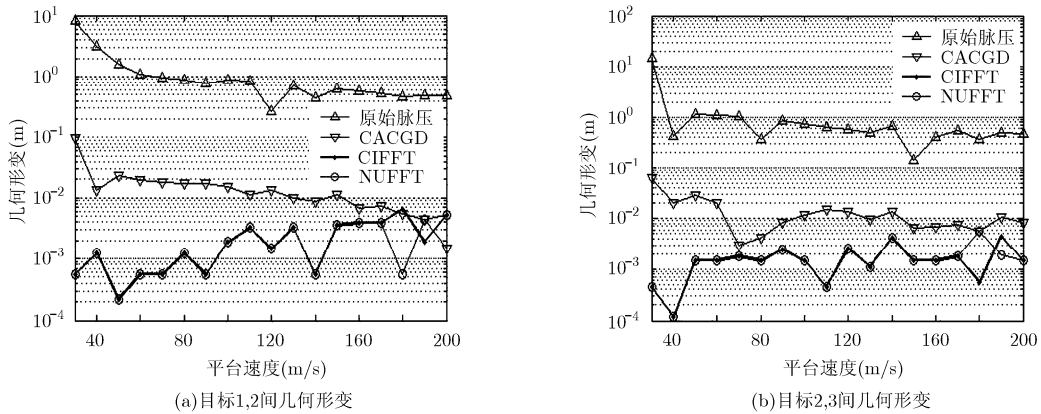


图8 目标几何形变与平台速度关系

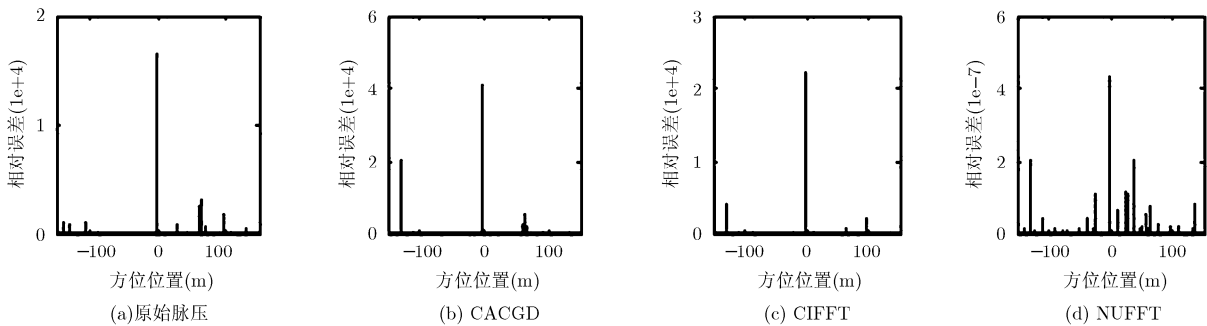


图9 4种算法相位的相对误差(平台速度 50 m/s)

位相对误差较大, NUFFT 成像算法由于其中的方位 NUFFT 部分以很高的精度接近式(1)直接计算值, 而具有很好的保相性。

5 结束语

本文提出的基于 NUFFT 的 SAR 方位向运动补偿算法充分利用算法内核中 FFT 的快速计算特性, 在运算时间上与原始脉压算法处于一个量级, 成像后数据的幅度信息和相位信息同时有效。仿真和实测速度数据实验结果表明: NUFFT 算法几何形变与 CIFFT 算法几何形变一致, NUFFT 算法定位误差小于其它 3 种算法定位误差, NUFFT 算法性能对沿航向速度误差具有很强的鲁棒性。综上, 本文算法为工程化实现和实际数据处理提供了一种新的解决途径。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 61-69, 141-149.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 61-69, 141-149.
 - [2] 严少石, 李悦丽, 周智敏. 机载 UWB SAR 实时图像帧几何形变分析与校正[J]. 信号处理, 2011, 27(12): 1817-1823.
Yan Shao-shi, Li Yue-li, and Zhou Zhi-min. Analysis and correction of geometric distortion of airborne UWB SAR real-time image frame[J]. *Signal Processing*, 2011, 27(12): 1817-1823.
 - [3] 黄源宝, 保铮, 周峰. 一种新的机载条带式 SAR 沿航向运动补偿方法[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 458-462.
Huang Yuan-bao, Bao Zheng, and Zhou Feng. A novel method for along-track motion compensation of the airborne strip-map SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 458-462.
 - [4] 李燕平, 邢孟道, 保铮. 沿航向运动补偿的几何形变校正[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(6): 881-886.
Li Yan-ping, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. The correction of geometric distortion for along-track motion compensation[J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(6): 881-886.
 - [5] Fourmont K. Non-equispaced fast Fourier transforms with applications to tomography[J]. *The Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2003, 9(5): 431-441.
 - [6] Capozzoli A, Curcio C, Indice I, et al. Fast imaging of vegetation on GPUs based on Non-Uniform FFTs[C]. Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino, 2011: 1205-1208.
 - [7] He Xue-zhi, Xu Hao, Liu Chang-chang, et al. A new approach to distributed passive radar imaging by 2-D NUFFT[C]. Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Signal Processing, Beijing, 2010: 2067-2070.
 - [8] He Xin-yi, Zhou Xiao-yang, and Cui Tie-jun. Fast 3D-ISAR image simulation of targets at arbitrary aspect angles through non-uniform Fast Fourier Transform (NUFFT)[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(5): 2597-2601.
 - [9] Szuster M L. A high bandwidth non-destructive method for characterizing simple media[R]. Air Force Institute of Technology Air University, 2012.
 - [10] Zhang Kang and Kang J U. Graphics processing unit-based ultrahigh speed real-time fourier domain optical coherence tomography[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2012, 18(4): 1270-1278.
 - [11] Kruizinga P, Mastik F, De Jong N, et al. Plane-wave ultrasound beamforming using a nonuniform fast fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(12): 2684-2691.
 - [12] Klein T, Wieser W, Eigenwillig C M, et al. Megahertz OCT for ultrawide-field retinal imaging with 1050 nm Fourier domain mode-locked laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3044-3062.
 - [13] Wen Bin and Zabaras N. An image-based method for modeling the elasto-plastic behavior of polycrystalline microstructures based on the fast Fourier transform[R]. Cornell University, 2013.
 - [14] Clemente C and Soraghan J J. Vibrating target micro-Doppler signature in bistatic SAR with a fixed receiver[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3219-3227.
 - [15] Ban Yi-fang and Yousif O A. Multitemporal spaceborne SAR data for urban change detection in China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012: 5(4): 1087-1094.
 - [16] Dai C Y and Zhang X L. Bistatic polar format algorithm based on NUFFT method[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2011: 25(4): 2328-2340.
- 邢涛: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为雷达总体技术与雷达成像。
李军: 男, 1982年生, 博士, 工程师, 研究方向为雷达总体技术与雷达成像。
王冠勇: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为雷达总体技术与雷达成像。
胡庆荣: 男, 1974年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达总体技术与雷达成像。