

文章编号: 1001- 2486(2008) 05- 0062- 06

一种改进方位向非线性 CS 大斜视角 SAR 成像算法*

李悦丽, 梁旬农, 黎向阳

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 大斜视角 SAR 成像时存在严重的距离走动现象, 慢时域的距离走动校正正在解决这一问题同时导致了聚焦深度问题。分析了二维频域解耦后残余相位误差以及时域走动校正后的多普勒调频率误差, 提出一种改进的方位向非线性 CS 算法, 校正了三次以上距离迁徙带来的相位误差, 同时采用改进非线性 CS 扰动方程补偿了随方位偏移量线性变化的调频率误差。仿真结果表明, 改进算法的大斜视角大场景成像性能优于传统的高分辨大斜视角成像算法。

关键词: 大斜视 SAR 成像; 时域距离走动校正; 非线性 CS

中图分类号: TN957 文献标识码: A

A Refined Azimuth Nonlinear Chirp Scaling Algorithm for High Squint SAR Imaging

LI Yue-li, LIANG Dian-nong, LI Xiang-yang

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The range walk correction (RWC) in time domain can resolve range walk problem in high squint SAR imaging. However, the limit of focus depth exists. By analyzing the residual phase error after wave number decoupling and Doppler rate error caused by RWC, a refined azimuth non-linear chirp scaling (ANCS) algorithm is proposed. Phase error caused by the third order range migration is corrected and a nonlinear CS function is applied to equalize the targets Doppler rates before azimuth compression. Simulation results show that the refined ANCS algorithm has good performance.

Key words: high squint SAR imaging; range walk correction in time domain; non-linear chirp scaling

大斜视角 SAR (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像属于条带式成像的范畴, 影响其高分辨成像算法性能的关键是距离迁徙校正问题。常用的大斜视角 SAR 成像算法包括距离-多普勒 (Range Doppler, RD) 类算法, 调频变标 (chirp scaling, CS) 类算法和子孔径类算法。简单的 RD 算法最多只能处理 10° 左右的斜视角数据; CS 类算法常用于 L 波段、C 波段和 X 波段大斜视角 SAR 成像^[1-3], 因无法适应多普勒中心频率随距离向的变化, 成像场景范围有限; 子孔径算法所存在的旁瓣泄漏问题影响了成像效率^[4-5]。国内近年来主要从提高斜距模型近似精度^[6] 和距离徙动校正精度^[7] 两方面开展了大斜视角成像研究。黄源宝提出了一种二维可分离的大斜视角成像算法^[8], 在方位向通过引入非线性扰动方程补偿相位误差, 但需进行方位向几何校正。本文讨论了时域距离走动校正 (Range Walk Correction, RWC) 对二维频域解耦和多普勒调频率的影响, 在文献[8-9]的基础上改进了非线性扰动 CS 方程, 补偿了三次距离迁徙带来的相位误差, 得到一种新的方位向 NCS 大斜视角成像算法, 并通过仿真分析了改进算法的成像性能指标。

1 时域距离走动校正的影响分析

图 1 所示为条带式 SAR 斜视成像的几何关系模型, 载机沿航线以速度 v 匀速飞行, 斜视角 φ_0 , t_m 为慢时域时间, 天线波束照射区域的中心点 P 到雷达的距离为 R_0 , 到雷达航线的垂直距离为 R_B , 阴影

* 收稿日期: 2008- 02- 22

基金项目: 国家部委基金资助项目 (403030201)

作者简介: 李悦丽 (1973-), 女, 副教授, 在职博士生。

所示为成像平面,由 $|vt_m - X_0| \ll R_0$,将场景上任一点目标 $B(X_0, R_B)$ 在 t_m 时刻的瞬时斜距^[10]在 $vt_m = X_0$ 处作泰勒级数展开,并保留到三次项:

$$R(t_m; X_0, R_0) \approx \sqrt{R_0^2 + v^2 \cos^2 \varphi_0 (t_m - X_0/v)^2} - (t_m - X_0/v) v \sin \varphi_0 + \frac{\sin \varphi_0 \cos^2 \varphi_0}{2R_0^2} (vt_m - X_0)^3 \quad (1)$$

接下来分析时域距离走动校正对二维频域解耦合和多普勒调频率的影响。

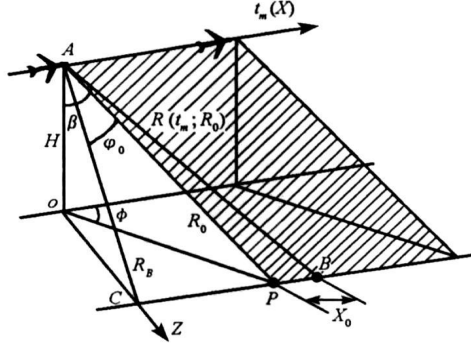


图1 大斜视角成像几何关系模型

Fig. 1 The geometry model of squinted SAR imaging

1.1 对二维频域耦合项的影响

假定雷达发射 LFM 信号, t 表示快时间, f_c 表示中心频率, T_p 表示信号脉宽, γ 表示调频率, σ_a 为点目标 RCS, 采用驻定相位原理 (Principle of Station Point, PSP) 得到 B 点回波基频信号的二维频域表达式^[10]:

$$S_2(f_r, f_a; R_B) = \sigma_a a_r(f_r) a_a(f_a) \exp(-j\pi\gamma t^2/\gamma) \exp[-j2\pi f_a (R_0 \sin \varphi_0 + X_0)/v] \cdot \exp\left[-j4\pi \frac{R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \left(\frac{f_a}{2v}\right)^2}\right] \quad (2)$$

最后一项为方位距离耦合项, 记为 $\Phi(f_r, f_a; R_B)$, 可展开为 (f_r/f_c) 的泰勒级数表达式^[11], 其二阶、三阶展开项是影响聚焦性能的主要误差来源:

$$\eta_2 = \frac{2\pi R_B \sin^2 \varphi}{\lambda \cos^3 \varphi} \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2; \quad \eta_3 = -\frac{2\pi R_B \sin^2 \varphi}{\lambda \cos^5 \varphi} \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 \quad (3)$$

令 f_{DC} 为多普勒中心频率, 二维频率与距离向分辨率 ρ_r 、方位向分辨率 ρ_a 的关系如下:

$$|f_r|_{\max} = c/4\rho_r; \quad |f_a|_{\max} = f_{DC} + v/2\rho_a = \frac{2v \sin \varphi_0}{\lambda} + v/2\rho_a \quad (4)$$

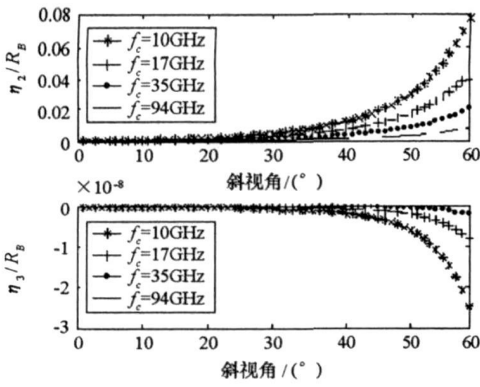
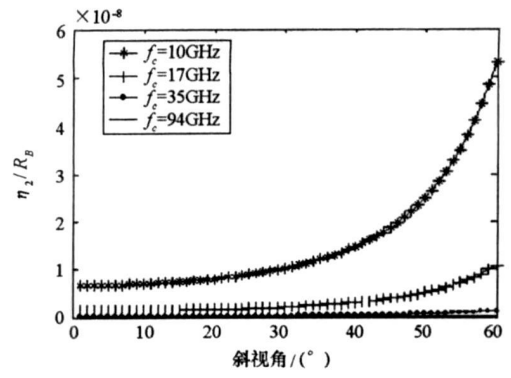
将 $|f_r|_{\max}$ 和 $|f_a|_{\max}$ 代入式(3), 采用表1中的参数, 仿真得到各阶耦合项随斜视角变化趋势如图2, 斜视角一定时, 波长越短, 耦合程度越小, 忽略耦合项对成像影响越小; 随着斜视角的增大, η_2/R_B 、 η_3/R_B 的值增大, 雷达作用距离越远, 成像测绘带越宽, 忽略耦合项引起的相位误差越大, 故大斜视角高分辨成像二维频域处理时, 不应忽略三阶耦合项。

以上分析了时域 RWC 前, 在二维频域解耦合残余的相位误差, 对式(1)中的线性距离走动项 $\Delta R(t_m) = -vt_m \sin \varphi_0$, 可沿慢时域校正, 方法是将回波数据通过距离向 FFT 变换到频率域, 乘以相反的线性距离走动项^[10], 补偿后, 目标距离与 t_m 的关系变为

$$\begin{aligned} R_l(t_m; X_0, R_0) &= R(t_m; X_0, R_0) - \Delta R(t_m) \\ &= \sqrt{R_0^2 + v^2 \cos^2 \varphi_0 (t_m - X_0/v)^2} + X_0 \sin \varphi_0 + \frac{\sin \varphi_0 \cos^2 \varphi_0}{2R_0^2} (vt_m - X_0)^3 \end{aligned} \quad (5)$$

回波的距离频率域表达式为

$$S_1(f_r, t_m; R_0) = \sigma_a a_r(f_r) a_a(t_m) \exp(-j\pi\gamma t^2/\gamma) \exp[-j4\pi R_l(t_m; R_0) (f_r + f_c)/c] \quad (6)$$

图2 $\eta_2/\eta_3 \sim \varphi_0$ 曲线(走动校正前, $\rho_a = 1\text{m}$)Fig.2 $\eta_2/\eta_3 \sim \varphi_0$ curve (Before RWC, $\rho_a = 1\text{m}$)图3 $\eta_2 \sim \varphi_0$ 曲线(走动校正后, $\rho_a = 1\text{m}$)Fig.3 $\eta_2 \sim \varphi_0$ curve (After RWC, $\rho_a = 1\text{m}$)

由式(5), 补偿后等效速度为 $v \cos \varphi_0$, 多普勒中心频率也从 $f_{DC} = \frac{2v \sin \varphi_0}{\lambda}$ 补偿为零, 根据式(3),

$|f_a|_{\max}$ 大大减小, 各阶耦合项的值也相应减小。图3为时域RWC后二阶耦合项随斜视角的变化曲线, η_2/R_B 仍随斜视角的增大而增大, 但是绝对值大大减小, 故时域RWC后可忽略三阶以上耦合项。

1.2 对多普勒调频率的影响

时域RWC后, 距离走动消除, 解耦合残余误差减小, 但带来聚焦深度问题^[5], 接下来分析这一问题的本质, 采用PSP法对式(6)沿方位向作FFT, 忽略三次项的影响, 得到^[7]:

$$S'_2(f_r, f_a; R_0) \approx \sigma_{na} a_r(f_r) a_a(f_a) \exp\left[-j4\pi \frac{X_n \sin \varphi_0}{c} (f_r + f_c)\right] \exp(-j\mathcal{Y} f_r^2 / v) \\ \cdot \exp(-j2\mathcal{Y} f_a X_0 / v) \exp\left[-j4\pi \frac{R_0}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \frac{f_a^2}{f_{aM}^2}}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{\sin \varphi_0 R_0 f_a^3}{\lambda \cos \varphi_0 (f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}}\right] \quad (7)$$

其中 $f_{aM} = 2v \cos \varphi_0 / \lambda$, $\sin \theta = f_a / f_{aM}$, $\cos \theta = \sqrt{1 - (f_a / f_{aM})^2}$, 倒数第二项为耦合项, 解耦合后采用 H_1 对回波进行距离压缩, 二次距离压缩和残余距离走动补偿:

$$H_1(f_r, f_a; R_{s0}) = \exp\left[-j\pi \frac{f_r^2}{v} - j2\pi \frac{R_{s0} \sin^2 \theta}{c^2 \cos^3 \theta} f_r^2\right] \exp\left[j2\pi \frac{R_{s0} \sin^2 \theta}{c} f_r\right] \quad (8)$$

其中, R_{s0} 为测绘带中心参考斜距, 对式(8)距离向IFFT得到

$$S_a(\hat{t}, f_a; R_0) = \sigma_n \text{sinc}\left[B_r \left[\hat{t} - \frac{2(R_0 + X_n \sin \varphi_0)}{c}\right]\right] a_a(f_a) \exp(-j2\mathcal{Y} f_a X_0 / v) \\ \cdot \exp\left[j2\pi \frac{\sin \varphi_0 R_0 f_a^3}{\lambda \cos \varphi_0 (f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}}\right] \exp\left[-j2\pi \frac{R_0}{v \cos \varphi_0} \sqrt{f_{aM}^2 - f_a^2}\right] \exp\left[-j4\pi \frac{X_0 \sin \varphi_0}{\lambda}\right] \quad (9)$$

高波段大斜视角SAR满足 $(f_a / f_{aM}) \ll 1$, 式(9)的第三个指数项泰勒展开后可忽略四次以上项(没有三次项):

$$\Phi(f_a; R_0) \approx \exp\left\{-j4\pi \frac{R_0}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{f_a}{f_{aM}}\right)^2\right]\right\} = \exp\left[-j4\pi \left(\frac{R_0}{\lambda} + \frac{f_a^2}{4f_{DR}}\right)\right] \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 并忽略第二个指数项, 采用PSP进行方位向IFFT, 得到

$$s_o(\hat{t}, t_m) = \sigma_n \text{sinc}\left\{B_r \left[\hat{t} - \frac{2(R_0 + X_0 \sin \varphi_0)}{c}\right]\right\} \text{sinc}\left[B_a(t_m - X_0 / v)\right] \\ \cdot \exp[j\mathcal{Y} f_{DR}(t_m - X_0 / v)^2] \exp\left[-j4\pi \frac{(R_0 + X_0 \sin \varphi_0)}{\lambda}\right] \quad (11)$$

其中, B_r 为发射信号带宽, B_a 为成像多普勒带宽, $f_{DR} = -\frac{2v^2 \cos^2 \varphi_0}{\lambda R_0}$ 。由式(11), 原位于 $[R_0, X_0]$ 处的 B

点位置变为 $[R_0 + X_0 \sin \varphi_0, X_0]$, 令 $R_s = R_0 + X_0 \sin \varphi_0$, 假定 $t_0 = X_0/v$ 为 B 点相对方位参考中心的时间偏移, 则 B 点的原始多普勒调频率为

$$f_{DR} = -\frac{2v^2 \cos^2 \varphi_0}{\mathcal{R}_0} \approx -\frac{2v^2 \cos^2 \varphi_0}{\mathcal{R}_s} - \frac{2v^3 \cos^2 \varphi_0 \sin \varphi_0}{\mathcal{R}_s^2} t_0 = f_{DRref} + k_{SAC} t_0 \quad (12)$$

f_{DRref} 为参考多普勒调频率, 采用 f_{DRref} 对同一距离门不同横向偏移 X_0 的目标进行匹配滤波, 调频率误差会使边缘目标的方位向聚焦性能恶化, 这就是聚焦深度问题的本质, k_{SAC} 为二次方位压缩因子:

$$k_{SAC} = -\frac{2v^3 \cos^2 \varphi_0 \sin \varphi_0}{\mathcal{R}_s^2} \quad (13)$$

2 改进的方位向非线性调频变标算法

根据上文分析结果, 不同横向偏移的目标, 其多普勒调频率随 t_0 近似线性变化, 所引起的频率变化是 t_0 的二次方, 相位误差是 t_0 的三次方。借鉴非线性 CS 操作补偿距离向调频率线性变化项的思想, 在方位向也可采用非线性 CS 因子补偿三次相位误差^[9], 文献[10]提出了一种二维可分离的成像方法, 通过在方位向进行非线性 CS 操作补偿了调频率随横向偏移的线性变化, 但同时引入的线性尺度变换因子使得成像流程和扰动方程的求解相当复杂。由式(12)、(13), 发现 k_{SAC} 的大小仅与距离有关, 可在距离-多普勒域进行补偿, 而不同横向偏移的目标其多普勒调频率与 f_r 无关, 无需改变方位向的尺度, 只要将不同方位点的多普勒调频率补偿到与参考中心一致即可。

首先, 为了补偿斜距模型三次近似引起的相位误差, 在距离-多普勒域引入补偿因子:

$$H_2(\hat{t}, f_a) = \exp\left[-j2\pi \frac{\sin \varphi_0 R_0 f_a^3}{\lambda \cos \varphi_0 (f_{DR}^2 - f_a^2)^{3/2}}\right] \quad (14)$$

利用 PSP 并忽略三次项的影响作方位向逆 FFT 得到时域表达式:

$$s_4(\hat{t}, t_m) = \sigma_n \text{sinc}\left\{B_r \left[\hat{t} - \frac{2(R_0 + X_0 \sin \varphi_0)}{c}\right]\right\} \text{sinc}\left[B_a(t_m - X_0/v)\right] \\ \cdot \exp\left[-j4\pi \frac{(R_0 + X_0 \sin \varphi_0)}{\lambda}\right] \exp\left[j\mathcal{Y}_{DR}(t_m - t_0)^2\right] \quad (15)$$

方位向以 $X_0 = 0$ 为参考中心, 确定扰动方程的非线性 CS 因子:

$$h_4(R_0, t_m) = \exp\left[j\frac{2\pi}{3} q_3 t_m^3\right] \quad (16)$$

对回波 CS 操作后忽略三次项的影响, 采用 PSP 进行方位向 FFT, 得到

$$S_a(\hat{t}, f_a; R_0) = \sigma_n \text{sinc}\left\{B_r \left[\hat{t} - \frac{2(R_0 + X_0 \sin \varphi_0)}{c}\right]\right\} a_a(f_a) \exp(-j2\mathcal{Y}_a X_0/v) \\ \cdot \exp\left[-j\pi \left[\frac{1}{f_{DR}} - \frac{2q_3 t_0}{f_{DR}^2}\right] f_a^2\right] \exp\left[j2\pi \left[\frac{q_3 f_a^3}{3f_{DR}^3} + \frac{q_3 t_0}{3}\right]\right] \exp\left[j2\pi \frac{q_3 t_0^2 f_a}{f_{DR}}\right] \quad (17)$$

t_0^3 项影响较小, 可忽略, 相位项 $\Phi(t_0^2, f_a)$ 代表由于目标位置偏移和引入线性补偿因子带来的方位向走动。由第二个指数项, 非线性 CS 操作后, 多普勒调频率应补偿为参考值:

$$\frac{1}{f_{DRref}} = \frac{1}{f_{DR}} - \frac{2q_3 t_0}{f_{DR}^2} \quad (18)$$

要将不同的多普勒调频率补偿为参考值, 需满足式(12), 则有

$$q_3 = -\frac{k_{SAC}}{2} \quad (19)$$

进行方位压缩, 二次方位压缩以及相位补偿的匹配滤波器为

$$H_5(f_a, R_{s0}) = \exp\left[j\pi \left[\frac{f_a^2}{f_{DRref}^2} + \frac{k_{SAC} f_a^3}{3f_{DRref}^3}\right]\right] \quad (20)$$

输出图像为

$$s_o(\hat{t}, t_m) = \sigma_n \text{sinc} \left[B_r \left[\hat{t} - \frac{2(R_0 + X_0 \sin \varphi_0)}{c} \right] \right] \text{sinc} [B_a (t_m - X_0/v)] \quad (21)$$

目标位置为 $[R_0 + X_0 \sin \varphi_0, X_0]$, 距离上发生了变动, 需进行距离向几何校正。改进方位向非线性 CS 算法成像流程如图 4 所示。以上推导的改进方位向 NCS 算法所采用的非线性 CS 因子未引入对方位方向的尺度变换, 如果需要对方位向进行尺度变换, 可参考文献[8] 所给出的非线性 CS 方程, 输出图像上目标的位置变为 $[R_0 + X_0 \sin \varphi_0, X_0/\beta]$ (其中 β 为方位向线性尺度因子), 还需进行方位向几何校正。

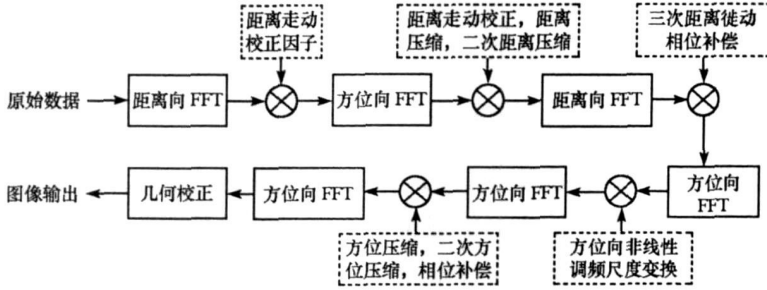


图 4 改进方位向非线性 CS 算法成像流程

Fig. 4 Imaging procedure of refined azimuth non-linear CS algorithm

3 计算机仿真验证

按照表 1 给出的参数选择 35GHz 毫米波 SAR 大斜视角成像效果进行了计算机仿真, 分别采用了改进 RD 算法^[6]、二维可分离算法以及改进 ANCS 算法。

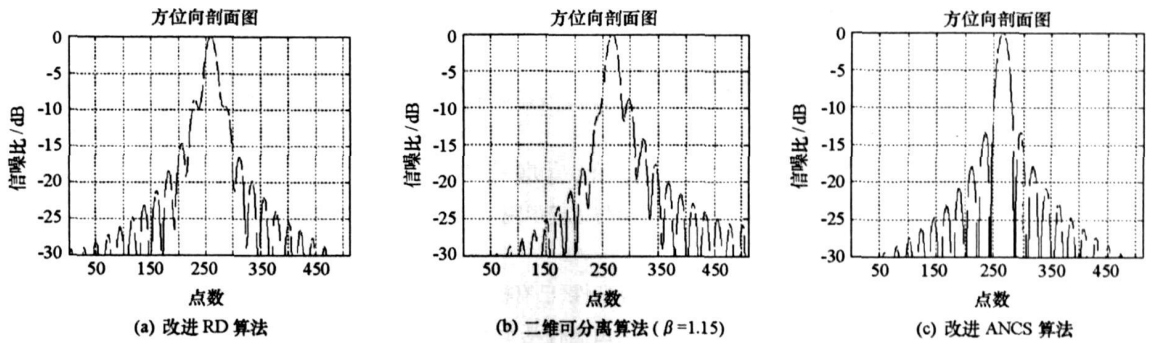
表 1 高波段合成孔径雷达系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of high band SAR system

参数	数值	参数	数值
航线至参考目标最近距离	20km	斜视角	$\theta \sim 6\theta$
载频	10, 17, 35, 94(单位: GHz)	飞行速度	200m/s
雷达方位波束角宽度	0.5°	分辨率	1m × 1m
信号带宽	150MHz	发射信号脉宽	5μs

图 5 给出了三种算法对偏离参考中心点目标成像的方位向剖面图, 改进 RD 算法距离压缩的效果未下降, 但方位压缩的效果明显恶化, 主要表现为对称的旁瓣抬高, 影响聚焦性能的主因是多普勒调频率失配造成的二次相位误差; 二维可分离算法补偿了多普勒调频率, 但是未补偿三次距离偏移引起的相位误差, 当斜视角增大且分辨率要求高时, 方位向聚焦效果不理想, 主要表现为一侧旁瓣的抬高, 说明主要误差来源是三次相位误差, 此外算法引入的方位向尺度变换使得目标方位向位置变化, 需要对图像进行方位向几何校正; 改进 ANCS 算法对测绘带边缘的点目标聚焦效果良好, 但点目标的位置也出现了微小的偏移。

表 2 对比分析了三种算法成像性能指标, 成像过程中未进行距离和方位向加权处理, 其中 2D-ISLR 为二维积分旁瓣比。由于场景较小, 分辨率没有明显变化, 但 PSLR 和 ISLR 存在较大差异, 改进 RD 算法的 ISLR 指标最差, 二维可分离算法的方位向 PSLR 也有所下降; 改进 ANCS 测绘带边缘与参考中心目标的成像指标差别很小, 说明该算法用于大斜视角大场景高分辨成像性能优于其他两种算法, 仿真结果与上文的理论分析是一致的。

图5 三种算法点目标成像的方位向剖面图(斜视角 50° , $X_0=300\text{m}$)Fig. 5 Azimuth amplitude cross section obtained by three algorithms ($\varphi_0=50^\circ$, $X_0=300\text{m}$)表2 斜视成像算法的性能比较($\varphi_0=50^\circ$)

Tab. 2 Performance comparison of squint SAR imaging algorithms

项目	目标位置		测试指标				
	X_0	Z_0	距离向 分辨率(m)	方位向 分辨率(m)	距离向 PSLR(dB)	方位向 PSLR(dB)	2D- ISLR(dB)
改进 RD	0	0	0.94	0.64	-13.26	-12.75	-7.17
	0	300	0.94	0.64	-13.23	-7.61	-4.96
二维可分离	0	0	0.94	0.64	-13.25	-10.90	-7.02
	0	300	0.94	0.71	-13.25	-8.47	-6.09
改进 ANCS	0	0	0.94	0.64	-13.26	-13.25	-7.22
	0	300	0.94	0.71	-13.25	-13.25	-7.48

4 结论

本文研究了大斜视角 SAR 模式下的高分辨成像算法,针对大斜视角成像的距离迁徙特点,提出了一种改进的方位向非线性 CS 成像算法,补偿了三次以上距离偏移所引起的相位误差,分析了时域 RWC 后,多普勒调频率随横向偏移线性变化的特点,引入改进的方位向非线性 CS 操作,补偿了多普勒调频率的误差,算法解决了时域线性距离走动校正带来的聚焦深度问题,仿真结果验证了算法用于大斜视角成像的大场景聚焦效果。

参考文献:

- [1] Moreira A, Huang Y Y. Chirp Scaling Algorithm for Processing SAR Data with High Squint Angle and Motion Error [C]//SPIE: SAR Data Processing for Remote Sensing, 1994, 2316: 268-277.
- [2] Moreira A, Huang Y Y. Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Approach with Integrated Motion Compensation [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(9): 1029-1040.
- [3] Davidson G W, Cumming I G, Ito M R. A Chirp Scaling Approach for Processing Squint Mode SAR Data [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1): 121-133.
- [4] Sun X B, Yeo T S, Zhang C B, et al. Time-varying Step-transform Algorithm for High Squint SAR Imaging [J]. IEEE Tran. on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 2668-2677.
- [5] Yeo T S, Tan N L, Zhang C B, et al. A New Subaperture Approach to High Squint SAR Processing [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2001, (39): 954-968.
- [6] 张欢,邢孟道. 实测数据的机载斜视 SAR 成像算法[C]//2005年中国合成孔径雷达会议,南京,2005.
- [7] 刘光炎,黄顺吉. 非线性 CS 算法的前斜视 SAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1308-1315.
- [8] 黄源宝,保铮. 大斜视 SAR 成像的一种新的二维可分离处理方法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(1): 1-5.
- [9] Yeo T S, Wong F H, Tan N L. New Applications of Non-linear Chirp Scaling in SAR Data Processing [C]//The IEEE 2000 International Conference on Geoscience and Remote Sensing, 2000(1): 96-98.
- [10] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [11] 王亮,练有品,黄晓涛,等. 大斜视角与大波束角 SAR 成像比较[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1672-1675.