

基于时域去走动的 SAR 大斜视 CS 成像算法

吴勇^{①②} 宋红军^② 彭靳^③

^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)

^③(滁州学院电子信息工程系 滁州 239000)

摘要: 该文针对大斜视 SAR 回波信号的大距离走动、小距离弯曲的特点,提出了一种将时域去走动和 CS 算法相结合的成像算法。首先在时域校正距离走动,然后在频域校正距离弯曲,最后通过几何校正完成目标成像。经过时域去走动处理后,距离向和方位向的耦合大大降低,不仅可适应大斜视角的成像要求,而且测绘带宽度也会增大。仿真结果表明,改进后的算法可满足大斜视角和较大测绘带宽度的成像要求。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 去距离走动; 大斜视角; CS 成像算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0593-06

DOI:10.3724/SP.J.1146.2009.00472

Chirp Scaling Imaging Algorithm of SAR in High Squint Mode Based on Range Walk Removal

Wu Yong^{①②} Song Hong-jun^① Peng Jin^③

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

^②(Graduate school of Chinese Academy of sciences, Beijing 100039, China)

^③(Department of Electronic and Information Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: SAR echo signal in high squint mode features large range walk and small range curvature. An improved CS imaging algorithm based on range-walk removal is proposed. First, range-walk is removed in time domain. Second, range curvature is corrected in frequency domain. Finally, geometry correction is used to correct geometric distortion. The coupling between azimuth and range is greatly reduced after range-walk removal. Therefore, it satisfies the imaging quality of SAR in high squint mode and the width of the scene swath is broadened as well. Simulation results illustrate that it satisfies the imaging quality of SAR in high squint mode and large scene swath.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Range-walk removal; High squint; Chirp Scaling(CS) imaging algorithm

1 引言

斜视 SAR 通过灵活的改变波束指向,可以对前方目标预先成像、对其后方目标再次成像,重访热点地区,在军事上实现实时侦查与打击,具有重要的战略意义^[1]。

SAR 回波信号在大斜视时呈现出大距离走动、小距离弯曲的特点,并且随着斜视角的增大,距离向和方位向的耦合逐渐增强,各种成像算法都是研究采取何种近似去除 2 维耦合,从而使得 2 维分离成为可能,之后通过匹配滤波完成距离向和方位向的聚焦。常规的算法如 RD 算法和 CS 算法都只能满足一定斜视角下的成像要求。基于传递函数 EETF 算法^[2]可以满足参考距离处的任意斜视角的成像,但存在聚焦深度的问题,需要将数据分块处

理。非线性调频变标 NCS^[3]由于考虑了 2 次距离压缩 SRC 随距离向的变化率,可以处理较大的斜视角和场景,但当斜视角增大时或者场景增大时,成像质量变差。

本文针对大斜视 SAR 回波信号的特点,将传统的 CS 算法进行改进,将距离徙动的校正^[4,5]在时域和频域中分别进行,首先在时域校正距离走动,然后在频域校正距离弯曲。经过时域去走动处理后,距离向和方位向的耦合大大降低,不仅可适应大斜视角的成像要求,而且测绘带宽度也会增大。由于时域去走动处理会引起方位向存在聚焦深度,分析和仿真了影响聚焦深度的因素。仿真结果表明,该算法具有较高的精度,可满足大斜视角和较大测绘带宽度成像要求。

2 SAR 斜视回波模型

2.1 斜视 SAR 回波几何模型

SAR 回波模型是算法仿真的基础,在回波模型

基础上可通过计算机仿真构建成像场景的模型。回波数据的仿真可分为正向法和逆向法^[6,7]，正向法是逐个发射脉冲计算 SAR 回波，其优点是可以保证仿真逼真度，缺点是计算效率低。逆向法计算效率高，仅限于 RD 算法的逆过程，且逼真度不是最优的。

斜视 SAR 回波模型有别于正侧视时的情况，图 1 所示为斜视时，SAR 与点目标之间的几何关系^[8]。

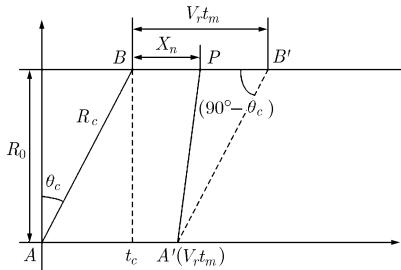


图 1 斜视 SAR 的几何模型

载机的速度为 V_r ，斜视角大小为 θ_c ，点目标 P 和 SAR 的最近距离设为 R_0 ，视线距离为 R_c ，设载机位于 A 点的时刻为慢时间起点，此时波束射线通过 P 点而与航线的平行线交于 B 点，将此点作为该平行线上的慢时间起点。

经过 t_m 后，载机飞行至 A' 点，其横坐标为 $V_r t_m$ ，设点目标 P 与 B 点之间的横向距离为 X_n ，在 $\triangle PA'B'$ 中由余弦定理，可得雷达与目标的瞬时斜距 $R(t_m; R_c)$ 为

$$R(t_m; R_c) = \sqrt{(V_r t_m - X_n)^2 + R_c^2 - 2R_c(V_r t_m - X_n)\sin(\theta_c)} \quad (1)$$

2.2 距离徙动分析

在式(1)中，令 $X = V_r t_m$ ，将 X 在 X_n 处按照泰勒展开并保留至 3 阶项，可得

$$R(X; R_c) = R_c - \sin(\theta_c) \cdot (X - X_n) + \cos^2(\theta_c) / 2R_c \cdot (X - X_n)^2 + \sin(\theta_c) \cos^2(\theta_c) / 2R_c^2 \cdot (X - X_n)^3 \quad (2)$$

式(2)中的线性项为距离走动，

$$R_w(X) = R_c - \sin(\theta_c) \cdot (X - X_n) \quad (3a)$$

高次项为距离弯曲，

$$R_c(X) = R(X; R_c) - R_w(X) \quad (3b)$$

同时定义距离走动总量^[5]为 R_w ，距离弯曲总量为 R_{cur} ，则有

$$R_w = \sum_{X_i} [R_w(X_i) - \min(R_w(X_i))] \quad (4a)$$

$$R_{cur} = \sum_i R_c(X_i) \quad (4b)$$

为了分析距离走动和距离弯曲随斜视角变化关系，选择天线长度为 2 m，载机速度为 250 m/s，视线距离为 41.67 km，带宽为 60 MHz，波长为 0.03 m 雷达系统参数进行仿真分析。

图 2(a)所示为距离弯曲随斜视角的变化关系曲线，可看出在正侧视时的距离弯曲最大，随着斜视角的增大距离弯曲逐渐减小。

图 2(b)所示为距离走动总量和距离弯曲总量的比值随斜视角的变化关系曲线，由图示可知随着斜视角的逐渐增大距离走动在距离徙动中占主要部分，同时由式(3a)可知距离走动的线性部分和目标所处的距离门无关。

当将距离走动校正后，剩下的距离弯曲，这样常规可处理正侧视的成像处理算法就可以满足成像要求，因此改进常规的 CS 算法，并结合时域的去走动即可满足大斜视成像要求。

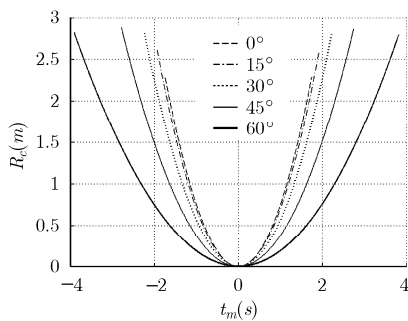
3 算法描述

3.1 回波信号时频表达式

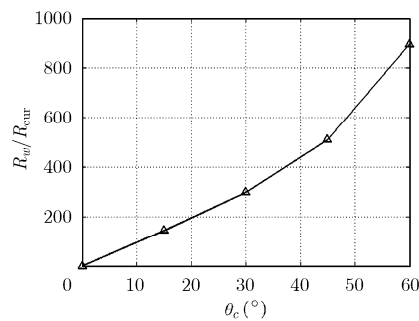
SAR 回波信号经过解调后的基带信号为

$$S_r(t_m; t_r) = A_0 \omega_r (t_r - 2R(t_m)/c) \omega_a (t_m - t_c) \cdot \exp\{-j4\pi R(t_m)/\lambda - j\pi K_r [t_r - 2R(t_m)/c]^2\} \quad (5)$$

回波信号 2 维频域中的精确表达式为



(a) 距离弯曲随斜视角变化曲线



(b) R_w/R_{cur} 随斜视角变化曲线

图 2

$$S_{2df}(f_\tau, f_\eta) = A_0 A_1 A_2 \omega_r(f_\tau) \omega_a(f_\eta - f_{\eta c}) \cdot \exp\{j\theta_a(f_\tau, f_\eta)\} \quad (6)$$

$$\theta_a(f_\tau, f_\eta) = -\frac{4\pi R_0(f_\tau + f_0)}{c} \sqrt{1 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4V_r^2(f_\tau + f_0)^2}} + \pi \frac{f_\tau^2}{K_r} - \frac{2\pi R_c \sin(\theta_c) f_\eta}{V_r} - \frac{2\pi X_n f_\eta}{V_r} \quad (7)$$

其中 t_m 为方位向的慢时间, t_r 为距离向的快时间, t_c 为波数中心穿越时刻, K_r 为发射脉冲的调频率, $R(t_m)$ 为瞬时斜距, f_η 为方位向多普勒频率, f_τ 为距离向的频率, $\omega_r(t_r)$ 和 $\omega_a(t_m)$ 为距离向和方位向时域包络, $\omega_r(f_\tau)$ 和 $\omega_a(f_\eta)$ 为距离向和方位向频域包络。

3.2 时域去走动

由式(3a)中的距离走动表达式可知, 方位向的与位置无关的线性走动项为

$$\Delta R_w = -\sin(\theta_c) X = -\sin(\theta_c) V_r t_m \quad (8)$$

距离走动校正就是要校正该线性部分, 校正包括两部分, 分别为距离向和方位向的信号, 校正后的回波信号时域表达式为

$$S_r(t_m; t_r) = A_0 \omega_r \left(t_r - 2 \frac{R(t_m) - \Delta R_w}{c} \right) \omega_a(t_m - t_c) \cdot \exp \left\{ -j4\pi \frac{R(t_m) - \Delta R_w}{\lambda} - j\pi K_r \left(t_r - 2 \frac{R(t_m) - \Delta R_w}{c} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

经过校正后的回波信号, 只考虑其频域表达式中的相位部分, 则有

$$\theta_a(f_\tau, f_{\eta 1}) = -\frac{4\pi R_0(f_\tau + f_0)}{c} \sqrt{1 - \frac{c^2 f_{\eta 1}^2}{4V_r^2(f_\tau + f_0)^2}} + \pi \frac{f_\tau^2}{K_r} - \frac{2\pi (R_c \sin(\theta_c) + X_n) f_{\eta 1}}{V_r} \quad (10a)$$

$$f_{\eta 1} = f_\eta + f_{\eta c} + 2V_r \sin(\theta_c) f_\tau / c = f_{\eta 2} + 2V_r \sin(\theta_c) f_\tau / c \quad (10b)$$

实现上述去走动校正可以通过如下两个步骤:

(1) 需要将原始信号的方位向的相位的线性项补偿; 这可以通过在时域中乘以如下线性相位。

$$\phi_a(X) = \exp(j \cdot 4\pi / \lambda \cdot \Delta R_w) \quad (11)$$

(2) 需要补偿距离走动。将回波信号变换到距离频域中, 再乘以如下的线性相位, 之后再距离向 IFFT 操作即可完成去走动处理。

$$H_1(f_\tau) = \exp\{-j4\pi f_\tau \Delta R_w(X)/c\} \quad (12)$$

3.3 改进的 CS 算法

将式(10a)按照 $f_\tau = 0$ 处进行泰勒展开, 并保留到 2 阶, 可得

$$\theta_1(f_\tau, f_\eta) = \pi f_\tau^2 / K_m - 2\pi (R_c \sin(\theta_c) + X_n) f_{\eta 1} / V_r - 2\pi f_\tau \tau_R - 4\pi R_0 / \lambda \cdot \gamma_f \quad (13a)$$

其中 K_m , τ_R 和 γ_f 的表达式如式(13b)所示, 其中 K_{src} 是 2 次距离压缩 SRC, τ_R 是距离徙动对应的时间延迟。

$$\left. \begin{aligned} K_m &= 1/(1/K - K_{src} R) \\ K_{src} &= \frac{2\lambda}{c^2 \gamma_f} \left(\cos^2(\theta_c) - \frac{1}{\gamma_f^2} + \frac{\lambda f_{\eta 2} \sin(\theta_c)}{\gamma_f^2 V_r} - \frac{f_{\eta 2}^2 \sin^2(\theta_c) \lambda^2}{4\gamma_f^2 V_r^2} \right) \\ \gamma_f &= \sqrt{1 - [\lambda f_{\eta 2} / (2V_r)]^2}, \tau_R = \frac{2RX}{c} \\ X(f_\eta) &= \left[1 - \frac{\lambda f_{\eta 2} \sin(\theta_c)}{2V_r} \right] \gamma_f - \sin(\theta_c) \tan(\theta_c) \end{aligned} \right\} \quad (13b)$$

改进后的 CS 算法步骤如下:

(1) 进行去走动处理, 将回波信号的线性走动去除。

(2) 将处理后的回波信号进行方位向 FFT 变换, 变换到距离多普勒域中, 采用驻定相位原理, 可得

$$\theta_2(\tau, f_\eta) = -\pi K_m (\tau - \tau_R)^2 - 2\pi [R_0 \tan(\theta_c) + X_n] f_{\eta 2} / V_r - 4\pi R_0 / \lambda \cdot \gamma_f \quad (14)$$

CS 算法校正距离徙动是通过选定参考距离, 然后将场景中的其余目标的距离徙动补偿成和参考距离处的相同, 之后再做统一处理从而完成整个场景的 RCMC, 另外在距离多普勒域中还需要选择一个参考频率, 通常选择多普勒中心频率, 即 $f_{\eta ref} = f_{\eta c}$ 。

$$\Delta\tau(f_\eta, R) = \tau(f_\eta, R) - \tau(f_\eta, R_{ref}) \quad (15a)$$

$$\Delta\tau(f_{\eta c}, R) = \tau(f_{\eta c}, R) - \tau(f_{\eta c}, R_{ref}) \quad (15b)$$

$$\begin{aligned} \tau_s(f_\eta, R) &= \tau(f_\eta, R_{ref}) + \Delta\tau(f_{\eta c}, R) \\ &= \tau(f_\eta, R_{ref}) + \Delta\tau(f_\eta, R) \cdot \alpha(f_\eta) \end{aligned} \quad (15c)$$

式(15c)中的 $\alpha(f_\eta)$ 就是需要用于校正的系数, 结合式(13b)可得

$$\alpha(f_\eta) = \Delta\tau(f_{\eta c}, R) / \Delta\tau(f_\eta, R) = X(f_{\eta c}) / X(f_\eta) \quad (15d)$$

令 $\tau_{ref} = \tau(f_\eta, R_{ref})$, $\tau_R = \tau(f_\eta, R)$, $\tau_s = \tau_s(f_\eta, R)$ 和 $\Delta\tau = \Delta\tau(f_\eta, R)$, 则有

$$\tau_{ref} = \tau_s - \alpha \Delta\tau \quad (16a)$$

$$\tau_R = \tau_s - (\alpha - 1) \Delta\tau \quad (16b)$$

由 CS 算法的原理可得 chirp scaling 函数为

$$H_{cs}(\tau, f_{\eta 2}) = \exp\{-j\pi K_{cs}(\tau - \tau_{ref})^2\} \quad (17a)$$

$$K_{cs} = K_{mref} (1 - 1/\alpha) \quad (17b)$$

将 $\exp\{j\theta_2(\tau, f_\eta)\}$ 和式(17a)相乘并进行距离向 FFT 变换, 考虑相位部分, 则有式(18), 其中由 $f_{\eta c} = 2V_r \sin(\theta_c) / \lambda$, 可化简得 $X(f_{\eta c}) = \cos(2\theta_c) / \cos(\theta_c)$ 。

$$\theta_3(f_\tau, f_\eta) = \pi\alpha f_\tau^2 / K_m - 2\pi f_\tau \tau_s - 4\pi R_0 \gamma_f / \lambda - 2\pi [R_0 \tan(\theta_c) + X_n] f_{\eta 2} / V_r \quad (18a)$$

$$\tau_s = 2 [R_{\text{ref}} X(f_\eta) + \Delta r X(f_{\eta c})] / c \quad (18b)$$

之后在 2 维频域中乘以 $H_{\text{comp}}(f_\tau, f_\eta)$ 补偿因子,

$$H_{\text{comp}}(f_\tau, f_\eta) = \exp \left\{ -j\pi \frac{\alpha f_\tau^2}{K_{\text{mref}}} \right\} \cdot \exp \left\{ j4\pi \frac{R_{\text{ref}} (X(f_\eta) - X(f_{\eta c}))}{c} f_\tau \right\} \quad (19)$$

进行滤波处理后, 所得的结果为

$$\theta_4(f_\tau, f_\eta) = -\frac{4\pi f_\tau (R_{\text{ref}} + \Delta r)}{c} X(f_{\eta c}) - 2\pi \cdot [R_c \sin(\theta_c) + X_n] f_{\eta 2} / V_r - 4\pi R_0 \gamma_f / \lambda \quad (20)$$

在距离向进行 IFFT 变换即可将目标定位于 $(R_{\text{ref}} + \Delta r)X(f_{\eta c}) = R_c X(f_{\eta c})$, 这里还需要注意一点, 由于在进行线性距离校正的时候, 实际上校正后的目标的距离还和目标在方位向的位置有关, 由式(21)可知, 距离走动补偿后的轨迹应为

$$R_{wd} = R_w(X) + \Delta R_w(X) = R_c + \sin(\theta_c) X_n \quad (21)$$

故经过距离向 IFFT 后目标在距离向的位置应为 $(R_c + \sin(\theta_c) X_n)X(f_{\eta c})$, 之后再乘以方位向的匹配滤波函数 $H_a(\tau, f_\eta)$, 之后再方位向 IFFT 即可完成目标的聚焦。

$$H_a(\tau, f_\eta) = \exp \left\{ j2\pi R \sin(\theta_c) f_\eta / V_r + j4\pi R_0 \gamma_f / \lambda \right\} \quad (22)$$

3.4 几何校正

由于压缩后的目标的位置为 $(X_n, (R_c + \sin(\theta_c) \cdot X_n)X(f_{\eta c}))$, 在距离向和方位向均存在着错位, 所以要将图像进行几何校正, 可通过如下步骤实现:

(1) 将图像在距离向移动 $\Delta R_w(X)$, 该步骤可以通过将数据变换到距离频域, 乘以距离频率的线性相位实现, 该步骤相当于去时域去走动的逆变换, 可参考去走动中的处理。

(2) 将图像在方位向移动 ΔX_w , 该步骤可以通过将数据变换到方位向波数域, 乘以波数域的线性相位实现。

$$\Delta X_w = \sin(\theta_c)(R - R_{\text{ref}}) \quad (23)$$

(3) 经过上述几何校正后目标点的位置变为 $(X_n + \sin(\theta_c)(R_c - R_{\text{ref}}), R_c X(f_{\eta c}))$ 。在显示图像时, 在距离向进行 $X(f_{\eta c}) = \cos(2\theta_c) / \cos(\theta_c)$ 的尺度变换, 即可使最终的图像横纵标度一致, 目标最终恢复至 $(X_n + \sin(\theta_c)(R_c - R_{\text{ref}}), R_c)$, 这里在方位向存在平移, 这是为了校正当目标点不在距离向的参考距离处时, 导致的方位向错位。

算法的流程图如图 3 所示。

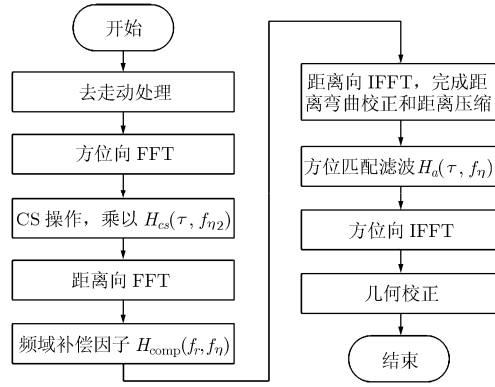


图 3 算法流程图

3.5 聚焦深度分析

由于时域去走动会将不同距离条带上的回波信号移动到同一单元, 移动前后的距离引起聚焦深度问题^[9], 距离走动校正范围需小于聚焦深度 δR_0 :

$$\delta R_0 \leq \frac{\lambda R_{\text{ref}}^2}{2(L \cos(\theta_c))^2} = \frac{D^2}{2\lambda} \quad (24)$$

δR_0 对应的横向聚焦深度 L_F 为

$$L_F = \delta R_0 / |\sin(\theta_c)| \quad (25)$$

由式(24)和式(25)所示, 横向聚焦深度和天线的孔径、波长和斜视角有关, 而与视线的距离无关。图 4 所示为横向聚焦深度随斜视角和波长的关系曲线仿真图。

在天线孔径 D 一定的条件下, 横向聚焦深度随着斜视角的增大而急剧减小, 随波长的增加而减小。因此对于高分辨率成像, 需要将方位向按照聚焦深度进行分块处理, 但在实时信号处理和中等分辨率的成像中可以考虑采用将整个场景进行去走动处理。

4 算法仿真

4.1 仿真参数

为了验证算法的有效性, 通过模拟场景回波信号, 来对改进后的算法进行仿真, 系统仿真参数如表 1 所示。同时为了演示几何校正的效果, 选取测绘带宽度为 250 m, 方位向宽度为 250 m 的场景, 假设场景中包含 9 个点目标, 这些点呈等间隔分布, 以场景中心为原点, 在距离向和方位向均相隔 100 m。

4.2 仿真结果及性能分析

成像时将参考距离选择为场景的中心, 图 5 和图 6 是几何校正前后的场景图像, 图 5 是未校正前的场景图像, 此时存在着几何形变, 经过几何校正后得到图 6 的图像, 可见此时场景中各目标恢复至正确位置。

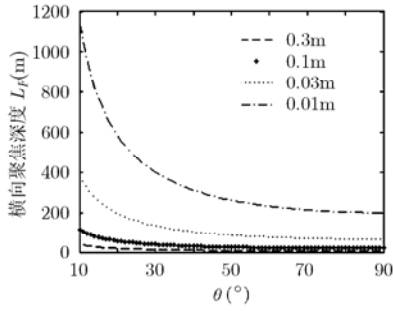


图 4 横向聚焦深度与斜视角和波长的关系曲线

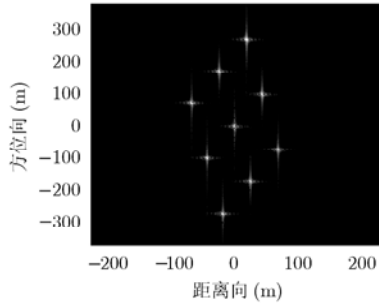


图 5 斜视角 60° 时, 参考距离附近场景几何校正前图像

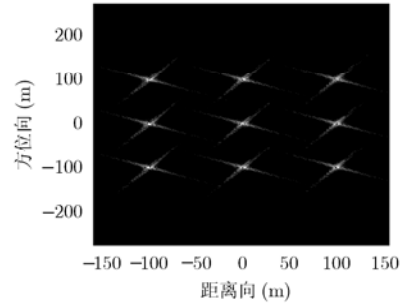


图 6 斜视角 60° 时, 参考距离附近场景几何校正后图像

表 1 SAR 系统仿真参数

飞行速度 V_r	250 m/s
天线长度 D	4 m
载波波长 λ	0.03 m
脉冲宽度 T_p	2 μ s
发射信号带宽 B_r	60 MHz
成像中心斜距 R_c	41.67 km
斜视角 θ_c	60°
距离向过采样率 fos_r	1.6
方位向过采样率 fos_a	1.4
横向聚焦深度 L_f	307.9 m

为了与 CS 算法进行对比, 选取参考距离、近距离点和远距离点 3 处的目标进行分析。改进后的算法距离选择参考距离 5 km 处的近距离点和远距离点,

常规的 CS 算法选择距离参考距离为 500 m 处的近距离点和远距离点。图 7 是仿真结果, 可见常规的 CS 算法在上述给定的仿真参数下, 只有在参考距离处才聚焦良好, 而在距离参考距离为 500 m 处时存在着严重的展宽, 成像的质量下降。而改进后的算法在距离参考距离 5 km 的近距离和远距离点, 也能聚焦良好, 由此可见改进后的算法可以大幅提升测绘带的宽度

图 8 是距离参考距离处距离向和方位向剖面图, 可见聚焦良好, 旁瓣对称。

表 2 给出了当斜视角为 60° 时改进后的 CS 算法在近距离点、参考距离处和远距离点处的成像性能参数, 这里的扩展比是按照 -3 dB 的宽度来计算实际值和理论值的比例。ISLR 理论值在 -10 dB 左右, PSNR 为 -13 dB, 本文在成像过程中并没有进行加窗处理, 由表 2 可知, 成像结果表明算法满足大斜角情况下的 SAR 成像要求。

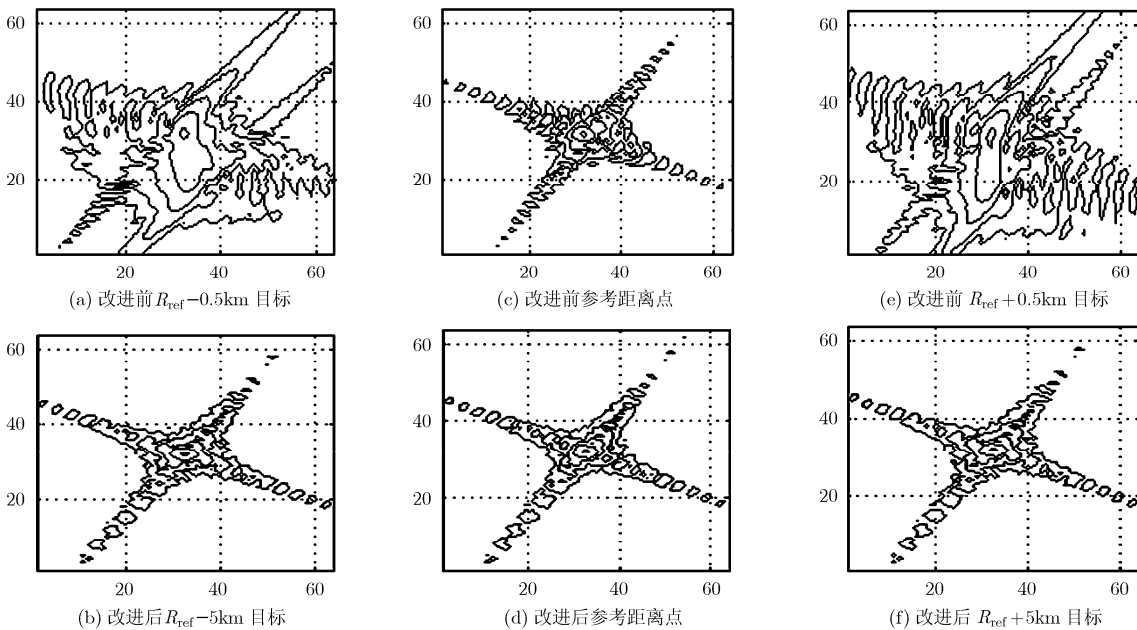


图 7 CS 算法改进前后的效果对比

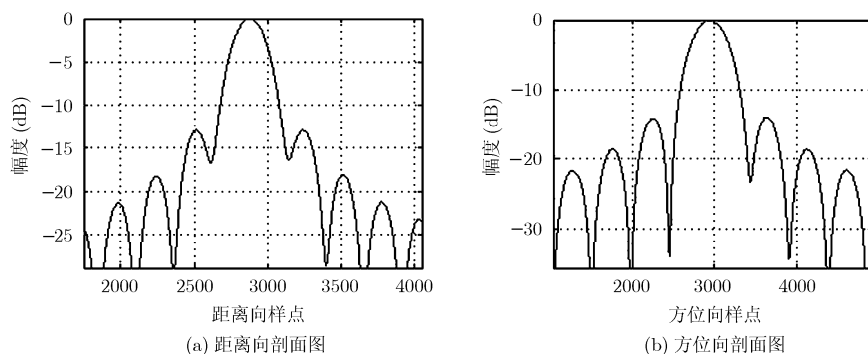


图 8 距离向和方位向的剖面图

表 2 点成像成像性能指标

	方位向			距离向		
	扩宽比	PSLR (dB)	ISLR (dB)	扩展比	PSLR (dB)	ISLR (dB)
近距点	1.037	-12.92	-9.839	1.033	-12.34	-10.09
参考距离处	1.023	-12.98	-9.914	1.015	-13.88	-11.75
远距点	1.037	-12.91	-9.849	1.033	-12.33	-10.09

由上述分析可知, 将时域去走动和 CS 算法相结合, 可以有效地减小距离向和方位向的耦合, 满足较大斜视角时的成像要求, 而且成像的测绘带宽度也大大增加。

5 结论

针对 SAR 回波信号在大斜视时大距离走动、小距离弯曲的特点, 本文采用时域去走动和 CS 算法相结合, 将常规的 CS 算法进行改进。首先通过校正距离走动减小 2 维耦合项, 然后通过 CS 操作校正距离弯曲, 最后再通过几何校正将场景中的目标恢复至正确位置。通过完成具体的仿真实例, 对改进后的算法的正确性进行了验证并对仿真性能进行了分析, 同时分析了影响横向聚焦深度的因素。仿真结果表明, 改进后的算法可以满足大斜视时的成像要求, 具有较高的精度, 同时可大大提升成像的测绘带宽度。

参考文献

- [1] 黄源宝, 保铮. 大斜视角 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.
Huang Yuan-bao and Bao Zheng. A new two-dimension-separated approach to high squint SAR processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(1): 1-5.
- [2] 孙进平, 白霞, 毛士艺. 双基地合成孔径雷达的扩展 ETF 成像算法[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2394-2398.
Sun Jin-ping, Bai Xia, and Mao Shi-yi. A new extended ETF imaging algorithm for bistatic SAR. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(12): 2394-2398.
- [3] Davidson G W, Cumming I G, and Ito M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [4] Wang Kai-zhi and Liu Xing-zhao. Squint mode SAR imaging with range-walk removal[C]. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2005(ICASSP'05), Philadelphia, 2005, 4: 1113-1116.
- [5] 王开志. 斜视条件下高分辨率合成孔径雷达成像[D]. [博士学位论文], 上海交通大学, 2007: 65-77.
Wang Kai-zhi. High Resolution SAR Imaging Techniques Under Squint Mode[D]. [Ph.D. dissertation], Shanghai Jiao Tong University, 2007: 65-77.
- [6] 于明成, 许稼, 彭应宁, 等. SAR 原始信号快速仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 122-125.
Yu Ming-cheng, Xu Jia, and Peng Ying-ning, et al. Fast simulation of SAR raw signal[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(2): 122-125.
- [7] 黄立胜, 王贞松, 郑天垚. 基于 FFT 的快速 SAR 分布目标回波模拟算法[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 128-136.
Huang Li-sheng, Wang Zhen-song, and Zheng Tian-yao. Fast SAR distributed targets echo simulation algorithm based on FFT. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(2): 128-136.
- [8] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 123-164.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Image Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 123-164.
- [9] 李悦丽, 梁佃农. 机载高波段 SAR 大斜视角大场景成像算法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2046-2050.
Li Yue-li and Liang Dian-nong. Algorithm for the application of high squint large region image formation to hi-band airborne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(9): 2046-2050.

- 吴勇: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像算法、立体像对技术。
宋红军: 男, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载合成孔径系统仿真及设计。
彭靳: 男, 1981 年生, 讲师, 硕士, 研究方向为信号系统、数字信号处理。