

基于方位 deramp 和 NFS 大斜视聚束 SAR 成像算法

吴勇^{①②} 宋红军^① 彭靳^③ 刘寒艳^{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)

^③(滁州学院电子信息工程系 滁州 239000)

摘要: 该文针对聚束 SAR 回波信号方位向频谱混叠和大斜视时距离向和方位的严重耦合, 提出了一种结合方位向 deramp 和非线性频率变标(NFS)的斜视聚束 SAR 成像算法。首先在方位向进行 deramp 操作, 消除方位频谱混叠。然后通过非线性频率变标并考虑距离向时频变换的标度变化补偿方位相位, 实现场景成像。仿真结果表明, 该算法可有效消除方位频谱混叠, 具有较高的精度, 满足大斜视聚束 SAR 的成像要求和较大测绘带宽度要求。

关键词: 聚束合成孔径雷达; 方位 deramp; 非线性频率变标; 大斜视

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2184-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01274

Imaging Algorithm of High Squint Spotlight SAR Based on Azimuth Deramp and Nonlinear Frequency Scaling(NFS)

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

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

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

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

Abstract: To eliminate the azimuthal spectral folding of spotlight Synthetic Aperture Radar (SAR) and the serious coupling between range and azimuth in high squint mode, an algorithm based on azimuth deramp and Nonlinear Frequency Scaling (NFS) is proposed. First, azimuth deramp operation eliminates the azimuthal spectral folding. Then nonlinear frequency scaling compensating the azimuth phase with the range scale variation is adopted to fulfill the focusing of the swath. Simulation results illustrate that it can eliminate azimuthal spectral folding, possess high precision and satisfy the imaging quality of high squint spotlight SAR and large scene swath.

Key words: Spotlight SAR; Azimuth deramp; Nonlinear Frequency Scaling (NFS); High squint

1 引言

聚束 SAR 的斜视工作模式具有很高的机动性, 可以灵活调整波束指向获取感兴趣区域。

斜视聚束 SAR 的成像处理存在一些难点。首先, 回波信号在方位向频域是混叠的, 这给成像处理带来困难。当采用高的脉冲重复频率 PRF 来避免混叠, 会造成极高的数据量, 同时过高的 PRF 会造成严重的距离模糊, 导致系统实现复杂度的提升。Lanari 等人提出一种两步处理算法^[1], 较好地解决了方位频谱混迭的问题和成像的聚焦处理。算法第 1 步采用 SPECAN 算法的 deramp 处理, 消除了方位频谱混迭; 第 2 步采用条带式聚焦算法。其次, 当斜视角增大时, 回波信号在距离向和方位向耦合性

增强, 同时在频域中的信号具有空变性, 各种算法都是在一定近似条件下, 实现 2 维去耦。距离徙动算法(RMA)是 SAR 处理的精确算法, 但是当斜视角增大时, 会导致场景边缘的目标成像质量恶化^[2], 同时 Stolt 变换后会导致距离向频谱的扩展。常规的 CS 算法和 FS 算法不需要插值即可完成成像, 两者的区别在于是否对距离向信号进行了 dechirp, 但均忽略了 2 次距离压缩(SRC)空变性, 当斜视角增大时, 会导致参考距离外的目标成像质量变差。由于 NCS^[3]算法在进行成像处理时, 考虑了 SRC 的 1 阶变化量, 从而实现了提高成像质量和测绘宽度。结合 FS 和 NCS 算法处理的特点, 在 FS 处理中, 考虑 SRC 的 1 阶变化量, 从而亦可达到和 NCS 一样的处理效果。

本文结合方位 deramp 和非线性频率变标(NFS)算法, 提出了一种适合大斜视聚束 SAR 成像算法。

首先对回波信号在距离向 dechirp, 然后对方位向采用 deramp 操作消除方位频谱混叠。其次, 在距离频域消除 dechirp 过程中的剩余相位。最后通过非线性频率变标并考虑距离向时频变换的标度变化补偿方位相位, 实现场景成像。仿真结果表明, 该算法可有效消除方位频谱混叠, 具有较高的精度, 满足大斜视聚束 SAR 的成像要求。

2 Spotlight SAR 斜视回波模型

2.1 回波几何模型

图 1 所示为斜视时 Spotlight SAR 与目标之间的几何关系^[1,4]。定义图 1 中的 (X, r) 坐标系, 场景中心坐标为 (X_c, r_c) , 当载机位于原点 O 时, 视线 LOS 和场景中心的斜视角为 θ_c , 视线距离为 R_c , 聚束孔径长度为 L_{spot} , 场景方位向的宽度为 W_a , 设载机位于 O 点的时刻为慢时间原点。

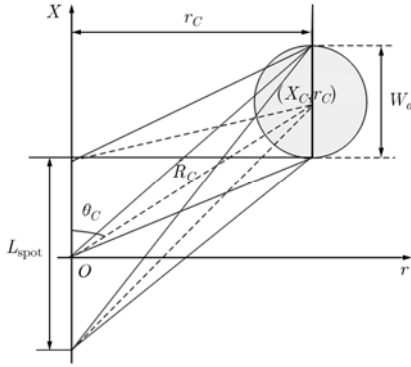


图 1 Spotlight SAR 斜视几何模型

雷达与目标 (X_n, r_n) 的瞬时斜距 $R(t_m; r_n)$ 为

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

2.2 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

$$S_r(t_m; t_r) = A_0 \text{rect} \left[\frac{t_r - 2R(t_m; r_n)/c}{T_r} \right] \cdot \text{rect} \left[\frac{t_m}{T_{\text{spot}}} \right] \exp \left\{ -j4\pi R(t_m; r_n)/\lambda - j\pi K_r [t_r - 2R(t_m; r_n)/c]^2 \right\} \quad (2)$$

回波信号 2 维频域中的表达式为

$$S_{2df}(f_r, f_\eta) = A_0 A_1 A_2 \omega_r(f_r) \omega_a(f_\eta - f_{\eta c}) \cdot \exp \{ j\theta_a(f_r, f_\eta) \} \quad (3a)$$

$$\theta_a(f_r, f_\eta) = -\frac{4\pi r_n (f_r + f_0)}{c} \cdot \sqrt{1 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4V_r^2 (f_r + f_0)^2}} + \pi \frac{f_r^2}{K_r} - \frac{2\pi X_n f_\eta}{V_r} \quad (3b)$$

其中 t_m 为方位向慢时间, t_r 为距离向快时间, K_r 为发射脉冲的调频率, $R(t_m; r_n)$ 为瞬时斜距, f_η 为方位向多普勒频率, $f_{\eta c}$ 合成孔径中点时参考距离处的多普勒中心频率, f_r 为距离向频率, $\omega_r(f_r)$ 和 $\omega_a(f_\eta)$ 为距离向和方位向频域包络。

3 算法描述

3.1 方位向 deramp

斜视时, 需要将方位向多普勒频率转换为绝对多普勒频率, 否则会导致多普勒模糊, 通过将原始信号与 $\phi_a(t_m)$ 相乘来完成转换操作^[5,6]。

$$\left. \begin{aligned} S_1(t_m; t_r) &= S_r(t_m; t_r) \cdot \phi_a(t_m) \\ \phi_a(t_m) &= \exp(-j \cdot 2\pi f_{\eta c} t_m), f_{\eta c} = 2V_r \sin(\theta_c)/\lambda \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

方位向 deramp 将信号与参考相位函数卷积, 从而实现了方位向变标, 等效地提高了方位采样率^[6,7]。相位参考函数为

$$S_{\text{ref}} = \exp \left[j \cdot \pi K a_{\text{ref}} t_m^2 \right], K a_{\text{ref}} = \frac{2V_r^2 \cos^2(\theta_c)}{\lambda R_{\text{ref}}} \quad (5)$$

其中 $K a_{\text{ref}}$ 为合成孔径中点时参考距离处的多普勒调频率, 将 $S_1(t_m; t_r)$ 和 S_{ref} 卷积后的结果如式(6)所示。

$$S_a(t'_m; t_r) = S_1(t_m; t_r) * S_{\text{ref}} = \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} t_m'^2 \right\} \cdot \int S_1(t; t_r) \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} t^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi K a_{\text{ref}} t'_m t \right\} dt \quad (6)$$

式(6)的离散实现方式^[8]为

$$S_a(m\Delta t'_m; t_r) = \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} (m\Delta t'_m)^2 \right\} \cdot \sum_{i=-A/2}^{A/2} S_1(i\Delta t_m; t_r) \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} (i\Delta t_m)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi K a_{\text{ref}} \Delta t_m \Delta t'_m i m \right\} \quad (7)$$

其中 $m = -B/2, \dots, B/2$, A 和 B 为 deramp 变换前和后的方位向采样数, Δt_m 为脉冲重复周期, $\Delta t'_m$ 为变换后的脉冲重复周期。

$$1/(K a_{\text{ref}} \Delta t_m) = M \Delta t'_m \quad (8)$$

如果变换满足式(8), 将方位信号补零, 使得输入输出采样数都为 M , 则式(8)可写为式(9), 其中 $m = -M/2, \dots, M/2$ 。

$$S_a(m\Delta t'_m; t_r) = \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} (m\Delta t'_m)^2 \right\} \cdot \sum_{i=-M/2}^{M/2} S_1(i\Delta t_m; t_r) \cdot \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} (i\Delta t_m)^2 \right\} \exp \left\{ -j2\pi i m / M \right\} = \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} (m\Delta t'_m)^2 \right\} \cdot \text{DFT} \left[S_1(i\Delta t_m; t_r) \exp \left\{ j\pi K a_{\text{ref}} (i\Delta t_m)^2 \right\} \right] \quad (9)$$

由式(9)可知, 方位向的 deramp 实际上时将信号参考函数相乘, 然后再 FFT, 最后再补偿一个 2 次相位实现, 通过上述操作后将信号方位标度从 t_m 变换到 t'_m , 从而实现脉冲重复频率 PRF 的变换, 经过 2 维 FFT 变换到频域后将没有方位频谱混叠。由文献[5]可知, 将式(9)变换到 2 维频域可得式(11)。补偿 2 次相位 $\exp\{-j\pi f_r^2/Ka_{\text{ref}}\}$ 即可恢复信号 2 维频谱。

$$S_3(f_r, f_\eta) = S_{2df}(f_r, f_\eta) \cdot \phi_s(f_\eta) \quad (10a)$$

$$\phi_s(f_\eta) = \exp\left\{-j\pi f_\eta^2/Ka_{\text{ref}}\right\} \quad (10b)$$

3.2 距离向 dechirp

为了降低数据量, 可以对距离向信号进行 dechirp 操作, 将信号能量集中到单一频率上。dechirp 函数为

$$H_{\text{dechirp}} = \exp\{j \cdot \pi K_r [t_r - 2R_c/c]^2\} \quad (11)$$

将方位向 deramp 后的信号, 在距离向进行 dechirp 操作则有

$$\begin{aligned} S_2(t_m; t_r) = & A_0 \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R(t_m; r_n)/c}{T_r}\right] \text{rect}\left[\frac{t_m}{T_{\text{spot}}}\right] \\ & \cdot \exp\{-j4\pi R(t_m)/\lambda - j4\pi K_r/c\} \\ & \cdot [R(t_m; r_n) - R_c](t_r - 2R_c/c) \\ & \cdot \exp\{j4\pi K_r/c^2 \cdot [R(t_m; r_n) - R_c]^2\} \\ & * \exp[j \cdot \pi K a_{\text{ref}} t_m^2] \end{aligned} \quad (12)$$

其中 * 表示卷积操作, 是由方位向 deramp 时引入。令 $t_{rc} = 2R_c/c$, 则经过 dechirp 之后回波信号在距离向变为单频信号 $f_e = -K_r(t_r - t_{rc}) = -K_r \cdot 2(R - R_c)/c$, 由此可知频率即对应位置, 此即为时频变换关系。由文献[4,6]可知将 $S_2(t_m; t_r)$ 表示成卷积形式, 则有

$$\begin{aligned} S_2(t_m; t_r) = & A_0 \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R(t_m; r_n)/c}{T_r}\right] \text{rect}\left[\frac{t_m}{T_{\text{spot}}}\right] \\ & \cdot \exp\{-j4\pi R(t_m)/\lambda - j4\pi K_r/c \cdot \Delta R \cdot t_{r2}\} \\ & * \exp\{-j\pi K_r t_{r2}^2\} * \exp[j \cdot \pi K a_{\text{ref}} t_m^2] \end{aligned} \quad (13a)$$

$$t_{r2} = t_r - 2R_c/c, \Delta R = R(t_m; r_n) - R_c \quad (13b)$$

3.3 去除视频相位 RVP

将距离向 dechirp 的信号变换到距离频域, 令 $F = f_r + 2K_r/c \cdot \Delta R$, 则有

$$\begin{aligned} S_2(t_m; f_r) = & A_0 \text{rect}\left[\frac{t_m}{T_{\text{spot}}}\right] \cdot T_r \text{sinc}[\pi T_r F] \\ & \cdot \exp\{-j4\pi R(t_m; r_n)/c \cdot f_r\} \\ & \cdot \exp\{-j4\pi R(t_m; r_n)/\lambda\} \\ & \cdot \exp\{j\pi f_r^2/K_r\} * \exp[j \cdot \pi K a_{\text{ref}} t_m^2] \end{aligned} \quad (14)$$

经过距离 dechirp 的信号, 在距离频域已经完成了压缩, 由其包络 $\text{sinc}[\pi T_r F]$ 可知, 目标被压缩于 $-2K_r/c \cdot (R(t_m; r_n) - R_c)$, 由时频对应关系可知, 二者相差标度 $-2K_r/c$ 。

去除剩余视频相位 RVP, 可以通过将 $S_2(t_m; f_r)$ 在距离频域乘以 $H_{\text{RVP}}(f_r)$

$$H_{\text{RVP}}(f_r) = \exp\{-j\pi f_r^2/K_r\} \quad (15)$$

然后进行距离向 IFFT, 可得

$$\begin{aligned} S_3(t_m; t_r) = & A_0 \text{rect}\left[\frac{t_m}{T_{\text{spot}}}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R(t_m; r_n)/c}{T_r}\right] \\ & \cdot \exp\{-j \cdot 4\pi K_r/c \cdot [R(t_m; r_n) - R_c] \\ & \cdot (t_r - 2R_c/c)\} \exp\{-j \cdot 4\pi R(t_m; r_n)/\lambda\} \\ & * \exp[j \cdot \pi K a_{\text{ref}} t_m^2] \end{aligned} \quad (16)$$

3.4 非线性频率变标算法

将式(16)变换到方位频域, 令 $f_{\eta 1} = f_\eta + f_{\eta c}$ 为绝对多普勒频率, 则有

$$\begin{aligned} S_4(f_{\eta 1}; t_r) = & A_0 \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R(t_m; r_n)/c}{T_r}\right] \\ & \cdot \exp\{-j \cdot 4\pi K_r/c \cdot R_c (t_r - 2R_c/c)\} \\ & \cdot \exp\{-j \cdot 4\pi r_n/\lambda \\ & \cdot \sqrt{[1 + \lambda K_r (t_r - 2R_c/c)/c]^2 - (\lambda f_{\eta 1}/2V_r)^2} \\ & - j\pi f_{\eta 1}^2/Ka_{\text{ref}}\} \end{aligned} \quad (17)$$

将 $S_4(f_{\eta 1}; t_r)$ 在 $t_r - 2R_c/c = 0$ 处进行泰勒展开, 保留至 3 次项。

$$\begin{aligned} S_4(f_{\eta 1}; t_r) = & A_0 \text{rect}[\cdot] \exp\{-j \cdot 4\pi r_n \beta/\lambda - j\pi f_{\eta 1}^2/Ka_{\text{ref}}\} \\ & \cdot \exp\{-j \cdot 4\pi K_r/c \cdot (r_n/\beta - 2R_c/c)\} \\ & \cdot \exp\{-j \cdot \pi/K_m \cdot (t_r - 2R_c/c)^2 \\ & + j \cdot \phi_3(f_{\eta 1}; r_n) \cdot (t_r - 2R_c/c)^3\} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $\text{rect}[\cdot]$ 表示距离向包络, β , K_m 和 ϕ_3 的表达式如式(19)所示。类比于 NCS 算法, 考虑 2 次距离压缩 SRC 随时间的 1 阶变化量, 考虑 K_m 随频率变化的 1 阶变化量 K_s , 对于 3 次相位 $\phi_3(f_{\eta 1}; r_n)$ 通常只考虑在参考距离 r_{ref} 处的值。

$$\beta = \sqrt{1 - (\lambda f_{\eta 1}/2V_r)^2} \quad (19a)$$

$$K_m = c^2 \beta^3 / [2\lambda K_r^2 (\beta^2 - 1) r_n] = K_{m\text{ref}} + K_s \Delta f \quad (19b)$$

$$K_{m\text{ref}} = c^2 \beta^3 / [2\lambda K_r^2 (\beta^2 - 1) r_{\text{ref}}] \quad (19c)$$

$$K_s = c^3 \beta^4 / [4\lambda K_r^3 (\beta^2 - 1) r_{\text{ref}}^2] \quad (19d)$$

$$\Delta f = -2K_r (r_n - r_{\text{ref}})/(c\beta) \quad (19e)$$

$$\phi_3(f_{\eta 1}; r_n) = 2\pi \lambda^2 K_r^3 r_n (\beta^2 - 1)/(\beta^5 c^3) \quad (19f)$$

非线性频率变标 NFS 算法步骤如下:

(1)首先在距离多普勒域将 $S_4(f_{\eta 1}; t_r)$ 乘以 3 次滤波函数 $H_1(f_{\eta 1}; t_r)$ 。

$$H_1(f_{\eta 1}; t_r) = \exp \left\{ -j \cdot 2\pi / 3 \cdot [Y_1 + \phi_3(f_{\eta 1}; r_{\text{ref}})] \cdot (t_r - 2R_c/c)^3 \right\} \quad (20)$$

同时补偿方位向 deramp 时的 2 次相位式(10b)中的 $\phi_s(f_\eta)$, 恢复方位向频谱。

$$\begin{aligned} S_5(f_{\eta 1}; t_r) &= S_4(f_{\eta 1}; t_r) \cdot H_1(f_{\eta 1}; t_r) \cdot \phi_s^*(f_\eta) \\ &= A_0 \text{rect}[\cdot] \exp \left\{ -j \cdot 4\pi r_n \beta / \lambda \right. \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \cdot 4\pi K_r / c \cdot (r_n / \beta - 2R_c/c) \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \cdot \pi / K_m \cdot (t_r - 2R_c/c)^2 \right. \\ &\quad \left. \left. + j \cdot Y_1 \cdot (t_r - 2R_c/c)^3 \right\} \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

然后距离向 FFT, 可得

$$\begin{aligned} S_6(f_{\eta 1}; f_r) &= A_0 \exp \left\{ -j \cdot 4\pi r_n \beta / \lambda \right\} \exp \left\{ -j \right. \\ &\quad \cdot 4\pi R_c / c \cdot f_r + j \cdot \pi K_m \cdot (f_r - f_d)^2 \left. \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \cdot 2\pi Y_1 K_m^3 / 3 \cdot (f_r - f_d)^3 \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

其中

$$f_d = -2K_r / c \cdot (r_n / \beta - R_c) = f_{\text{ref}} + \Delta f \quad (23a)$$

$$f_{\text{ref}} = 2K_r / c \cdot (R_c - r_c / \beta) \quad (23b)$$

定义参考距离 $R_{\text{ref}} = R_c$ 处的差频为参考 f_{ref} , f_d 对应距离向 r_n 相对于场景中心 R_c 差频, 由式(23a)可看出, f_d 具有空变性。定义 f_s 如式(24)所示,

$$\begin{aligned} f_s &= f_{\text{ref}} + \beta \cdot \Delta f = f_{\text{ref}} - \beta \cdot 2K_r \cdot (r_n - r_{\text{ref}}) / (c\beta) \\ &= f_{\text{ref}} - 2K_r \cdot (r_n - r_{\text{ref}}) / (c) \quad (24) \end{aligned}$$

NFS 调频变标实现 f_d 到 f_s 的变标, 由 f_s 表达式可知, 由差频 Δf 引起的空变性被消除, 从而可以进行统一校正。

(2)变标过程 文献[4]变标过程公式推导有误, 考虑了 f_r 的 1 次项从而导致后续推导过程错误。这里重新推导变标过程, 变标函数 H_{FS} 取 2 次和 3 次项。

$$H_{FS} = \exp \left\{ j\pi q_2 (f_r - f_{\text{ref}})^2 + j2\pi / 3 \cdot q_3 (f_r - f_{\text{ref}})^3 \right\} \quad (25)$$

将 $S_6(f_{\eta 1}; f_r)$ 和 H_{FS} 相乘, 分析时考虑其相位部分, 同时定义新的频率变量 $f_{r2} = f_r - f_s$, 则有 $f_r - f_d = f_{r2} + (\beta - 1)\Delta f$, $f_r - f_{\text{ref}} = f_{r2} + \beta\Delta f$, 从而有

$$\begin{aligned} \theta_1(f_{\eta 1}; f_{r2}) &= \pi K_m \cdot [f_{r2} + (\beta - 1)\Delta f]^2 - 2\pi Y_m K_m^3 / 3 \\ &\quad \cdot [f_{r2} + (\beta - 1)\Delta f]^3 + \pi q_2 [f_{r2} + \beta\Delta f]^2 + 2\pi / 3 \\ &\quad \cdot q_3 [f_{r2} + \beta\Delta f]^3 - 4\pi r_n \beta / \lambda - 4\pi R_c / c \cdot f_r \\ &= -4\pi r_n \beta / \lambda - 4\pi R_c / c \cdot f_r \\ &\quad + A(Y_1, q_2, q_3, f_{r2}, f_{r2}^2, f_{r2}^3) + B(Y_1, q_2, q_3) \\ &\quad \cdot f_{r2} \Delta f + C(Y_1, q_2, q_3) f_{r2} \Delta f^2 + D(Y_1, q_2, q_3) \\ &\quad \cdot f_{r2}^2 \Delta f^2 + \Delta\phi(Y_1, q_2, q_3, f_{r2}, f_{r2}^2, f_{r2}^3) \quad (26) \end{aligned}$$

由于存在 3 个未知数 Y_1, q_2, q_3 , 求解此方程时, 则令 $B(\cdot) = C(\cdot) = D(\cdot) = 0$, 其中 $B(\cdot), C(\cdot), D(\cdot)$ 的表达式如式(26)所示。

$$\left. \begin{aligned} B(\cdot) &= 2\pi q_2 \beta + 2\pi K_{m\text{ref}} (\beta - 1) \\ C(\cdot) &= 2\pi Y_1 K_{m\text{ref}}^3 (\beta - 1)^2 + 2\pi K_s (\beta - 1) + 2\pi q_3 \beta^2 \\ D(\cdot) &= 2\pi q_3 \beta + \pi K_s + 2\pi Y_1 K_{m\text{ref}}^3 (\beta - 1) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

联立求解得

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= K_s (\beta - 2) / [2K_{m\text{ref}}^3 (\beta - 1)] \\ q_2 &= K_{m\text{ref}} (1/\beta - 1) \\ q_3 &= K_s (1/\beta - 1) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式(26)中 $A(\cdot)$ 为与 Δf 变化无关的项目, $\Delta\phi(\cdot)$ 为 NFS 处理过程中的剩余相位。

$$A(\cdot) = \pi (q_2 + K_{m\text{ref}}) f_{r2}^2 + 2\pi / 3 \cdot (q_3 + Y_1 K_{m\text{ref}}^3) f_{r2}^3 \quad (29a)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi(\cdot) &= \pi [q_2 \beta^2 + K_m (\beta - 1)^2] \Delta f^2 \\ &\quad + 2\pi / 3 \cdot [Y_1 K_{m\text{ref}}^3 (\beta - 1)^3 + q_3 \beta^3] \Delta f^3 \quad (29b) \end{aligned}$$

$\theta_1(f_{\eta 1}; f_{r2})$ 可简化为式(30), 注意 1 次项为 f_{r2} 并非 f_r 。

$$\begin{aligned} \theta_1(f_{\eta 1}; f_{r2}) &= \pi K_{m\text{ref}} / \beta \cdot f_{r2}^2 - \pi K_s / [3\beta(\beta - 1)] \cdot f_{r2}^3 \\ &\quad - 4\pi r_n \beta / \lambda - 4\pi R_c / c \cdot f_{r2} + \Delta\phi(\cdot) \quad (30) \end{aligned}$$

对式(30)采用驻定相位原理, 变换到距离多普勒域, 则有

$$\begin{aligned} \theta_2(f_{\eta 1}; t_r) &= -4\pi r_n \beta / \lambda + 2\pi f_s (t_r - 2R_c/c) \\ &\quad - \pi \beta / K_{m\text{ref}} \cdot (t_r - 2R_c/c)^2 \\ &\quad - \pi K_s \beta^2 / [3K_{m\text{ref}}^3 (\beta - 1)] \cdot (t_r - 2R_c/c)^3 \\ &\quad + \Delta\phi(\cdot) \quad (31) \end{aligned}$$

(3)相位补偿及距离徙动校正 由式(31)可知, 经过非线性 NFS 变标之后, 在距离多普勒域即可完成距离徙动校正 RCMC, 2 次和 3 次相位补偿, 补偿函数为

$$\begin{aligned} H_{\text{RF}} &= \exp \left\{ -j2\pi f_{\text{ref}} (t_r - 2R_c/c) \right. \\ &\quad \left. + \pi \beta / K_{m\text{ref}} \cdot (t_r - 2R_c/c)^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ \pi K_s \beta^2 / [3K_{m\text{ref}}^3 (\beta - 1)] \cdot (t_r - 2R_c/c)^3 \right\} \quad (32) \end{aligned}$$

经过补偿后的信号为

$$\begin{aligned} S_7(f_{\eta 1}; t_r) &= \exp \left\{ -j \cdot 4\pi r_n \beta / \lambda + j\Delta\phi(\cdot) \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j2\pi \cdot 2K_r / c \cdot (r_n - r_c) (t_r - 2R_c/c) \right\} \quad (33) \end{aligned}$$

将补偿后的信号 $S_7(f_{\eta 1}; t_r)$ 变换到距离频域, 即可完成距离向的聚焦,

$$\begin{aligned} S_8(f_{\eta 1}; f_r) &= T_r \text{sinc} \left[f_r + 2K_r / c \cdot (r_n - r_c) \right] \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j4\pi R_c / c \cdot f_r \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \cdot 4\pi r_n \beta / \lambda + j\Delta\phi(\cdot) \right\} \quad (34) \end{aligned}$$

(4)方位向相位补偿 最后通过方位向的相位补偿, 并做 FFT 即可完成目标的聚焦, 文献[4]中进行方位相位补偿时采用补偿函数 H_{AF0} , 这会引起误差。

$$H_{AF0} = \exp\{j4\pi R_c/c \cdot f_r + j4\pi r_n \beta/\lambda - j\Delta\phi(\cdot)\} \quad (35)$$

由于经过 NFS 操作后, 变换到距离频域完成距离压缩, 变换前后的标度发生了变化, 在距离向进行 $-2K_r/c$ 的尺度变换, 如果采用式(35)进行方位相位补偿会造成方位相位补偿误差, 同时还会造成方位图像的错位。

在此, 考虑变换前后的距离向标度变化采用式(36)补偿方位向相位。

$$H_{AF} = \exp\{j4\pi R_c/c \cdot f_r + j4\pi[r_c - f_r c/(2K_r)]\beta/\lambda - j\Delta\phi(\cdot)\} \quad (36)$$

直接进行方位向 IFFT 时, 最终图像会存在方位向的错位, 因此需要进行几何校正, 恢复目标在场景中的正确位置。

$$H_{c1} = \exp\{-j \cdot f_\eta \cdot f_{\eta c}/K_{a_{ref}}\} \quad (37a)$$

$$H_{c2} = \exp\{j \cdot f_\eta \cdot r_c \cdot \tan(\theta_c)/V_r\} \quad (37b)$$

根据时频变换关系, 进行方位向 deramp 后, 由频率对应方位向位置可知方位频率的中心为 $f_{\eta c}$ 会引起方位向的平移错位, 可乘以 H_{c1} 进行补偿。 H_{c2} 是由于斜视造成方位向错位。

在显示图像时, 在距离向进行 $-2K_r/c$ 的尺度变换, 即可将目标恢复至正确的位置。

3.5 算法流程图

由 3.1 节-3.4 节的论述和推导, 可得算法流程图如图 2 所示。

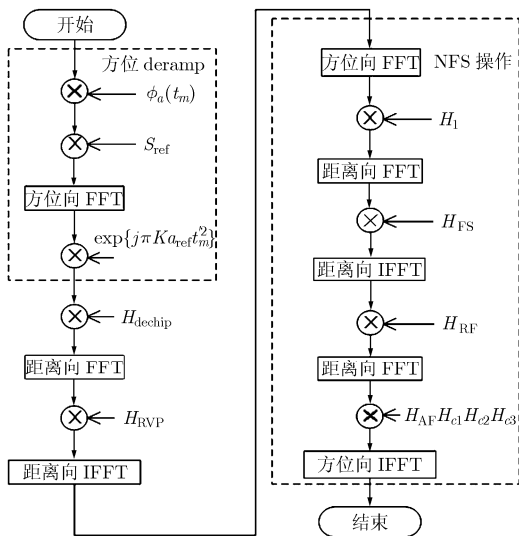


图 2 算法流程图

4 算法仿真

4.1 仿真参数

为了验证 NFS 算法的有效性, 对其进行仿真, 设系统仿真参数为: 载机速度为 100 m/s, 天线长度为 6 m, 波长选择典型 X 波段(0.03 m), 脉冲持续时间为 2 μ s, 发射信号带宽为 60 MHz, 成像中心斜距 41.67 km, 测绘带距离向宽度 600 m, 测绘带方位向宽度 300 m, 聚束合成孔径长度 L_{spot} 为 500 m, PRF 为 73.16 Hz, 斜视角为 50°。假设场景中包含 9 个点目标, 这些点以场景中心为原点, 在距离向间隔 240 m, 在方位向间隔 120 m。

4.2 仿真结果及性能分析

图 3 所示为场景成像结果, 可看出利用 NFS 算法成像, 场景各处聚焦良好, 图像清晰。

图 4 所示为方位向 deramp 前后的 2 维频谱, 由图 4(a)可看出, 在频域方位向存在着混叠, 经过方位向 deramp 后, 由图 4(b)可知, 可恢复 2 维频谱支撑区, 消除方位向混叠。

这里对比 FS 算法和 NFS 算法, 选取近距离点(-240, 120), 参考距离点(0,0)和远距离点(240, -120)的目标进行成像结果分析, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 常规 FS 算法只在参考距离点聚焦良好, 而在远距离点和近距离点都存在了一定的展宽, 采用 NFS 算法后, 3 处目标都聚焦良好, 图像清晰。表 1 列出了 FS 算法和 NFS 算法在 3 处的距离向和方位向扩展比, 可见 FS 算法在近距离点和远距离点在距离向和方位向扩展比都达到了 10%左右, 聚焦性能差, 图像恶化, 而 NFS 算法则聚焦良好。

图 6 所示为 NFS 算法在参考距离处距离和方位向剖面图, 聚焦良好, 旁瓣清晰对称。

表 1 FS 算法和 NFS 算法距离和方位向扩展比分析

	FS 算法		NFS 改进	
	距离向	方位向	距离向	方位向
近距	1.147	1.110	1.002	1.002
参考	1.001	1.002	1.001	1.001
远距	1.222	1.085	1.002	1.003

由上述分析可知, 将方位 deramp 和 NFS 算法相结合, 可有效消除方位向频谱混叠, 同时提高大斜视时聚束 SAR 成像质量, 满足成像要求同时测绘带宽度也大大增加。

5 结论

聚束 SAR 回波信号在方位向通常存在着频谱混叠, 同时在大斜视下距离向和方位向存在着严重的

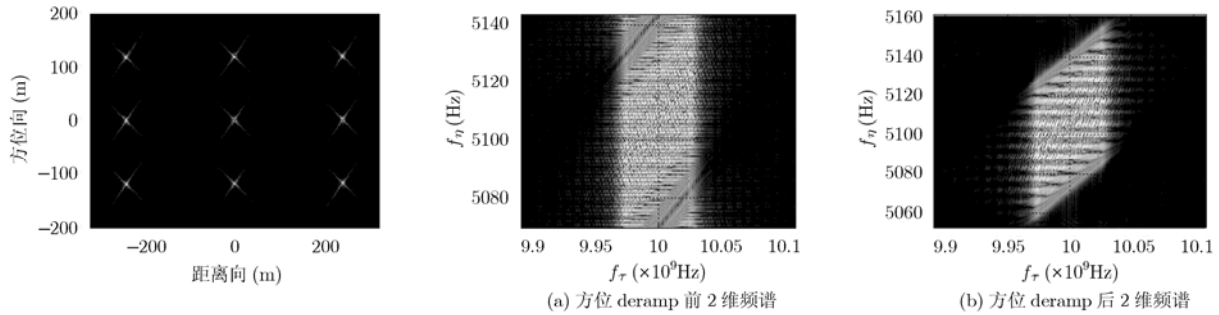


图 3 50° 时场景成像结果

图 4 方位 deramp 前后频谱变化

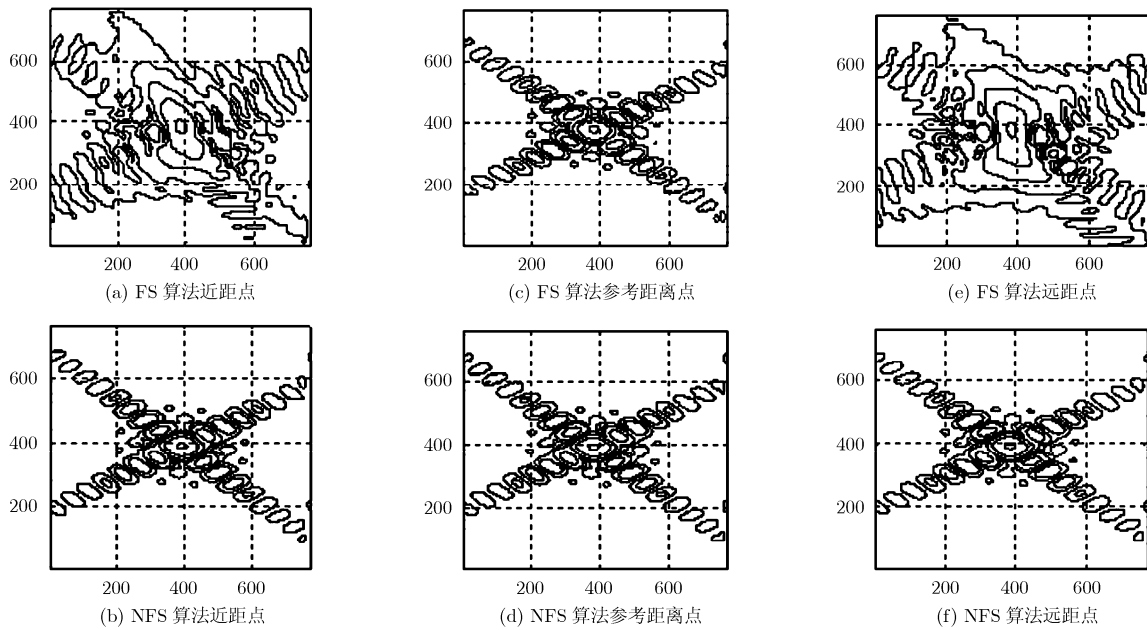


图 5 FS 算法和 NFS 算法成像结果对比

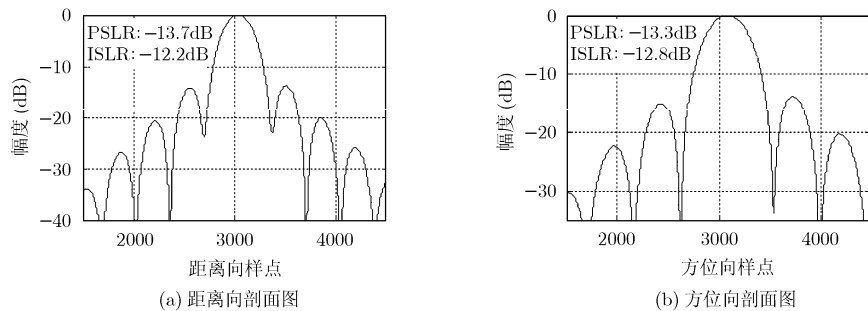


图 6 NFS 算法在距离向和方位向剖面图

耦合, 本文提出了一种结合方位向 deramp 和非线性频率变标(NFS)的斜视聚束 SAR 成像算法。首先对距离向 dechirp 操作, 然后在方位向进行 deramp 操作, 消除方位频谱混叠。最后通过非线性频率变标并考虑距离向时频变换的标度变化补偿方位相位, 实现场景成像。仿真结果表明, 该算法可有效消除方位频谱混叠, 提高场景成像的精度, 满足大斜视聚束 SAR 的成像要求。

参 考 文 献

- [1] Lanari R, Tesauro M, and Sansosti E, *et al.* Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1993-2004.
- [2] Reigber A, Alivizators E, and Potsis A, *et al.* Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. *IEE Proceedings: Radar*,

- Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 301-310.
- [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] Jin Li-hua and Liu Xing-zhao. Nonlinear frequency scaling algorithm for high squint spotlight SAR data processing[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2008, Article ID 657081: 1-8.
- [5] Guo Liang, Xing Mengdao, and Tang Yu, *et al.* A novel modified omega-k algorithm for synthetic aperture imaging lidar through the atmosphere[J]. *Sensors*, 2008, 8: 3056-3066.
- [6] 井伟, 张磊, 邢孟道, 等. 聚束 SAR 的宽场景成像算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(3): 470-475.
- Jing Wei, Zhang Lei, and Xing Meng-dao, *et al.* Algorithm for the wide-swath spotlight SAR data processing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 470-475.
- [7] Mittermayer J and Moreira A. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [8] 梁毅, 王虹现, 邢孟道, 等. 调频连续波 SAR 信号分析与成像分析[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(5): 1017-1021.
- Liang Yi, Wang Hong-xian, and Xing Meng-dao, *et al.* The analysis of FMCW SAR signal and image study[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1017-1021.
- 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.