

一种基于谱分析与改进方位非线性变标的大斜视聚束成像算法

邵鹏* 周松 徐刚 李亚超 邢孟道
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对大斜视聚束 SAR 成像中方位频谱混叠, 且距离向与方位向严重耦合的问题, 该文提出一种利用谱分析(SPECTral ANalysis, SPECAN)解方位频谱混叠、距离向采用调频变标(Chirp Scaling, CS)、方位向采用改进非线性变标(Extended Non-linear Chirp Scaling, ENCS)的大斜视聚束成像算法, 首先将回波信号走动校正, 然后利用 SPECAN 消除方位频谱混叠。进行距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)之后, 利用 CS 消除距离弯曲的空变性, 方位向采用 ENCS 补偿沿方位向变化的多普勒调频率, 从而有效地提高了方位向的聚焦深度。仿真结果和分析表明, 该方法能够在较大斜视角的聚束 SAR 模式下得到聚焦良好的高分辨率场景。

关键词: SAR; 大斜视聚束; 频谱分析; 改进非线性变标; 频谱混叠

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2445-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01685

A Highly Squinted-spotlight Imaging Algorithm Based on Spectral Analysis and Extended Non-linear Chirp Scaling

Shao Peng Zhou Song Xu Gang Li Ya-chao Xing Meng-dao
(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Due to the problem of azimuth spectral folding and large migration and strong range dependence on the second range compression for high-squinted spotlight. This paper proposes a method combining the advantages of SPECTral ANalysis (SPECAN) with Extended Non-linear Chirp Scaling (ENCS). First, after Range Cell Migration Correction (RCMC), azimuth spectral folding problem is removed by SPECAN. The variation of quadratic range cell migration correction is removed by chirp scaling. The chirp rates of scatterers in the same range gate are dependent on the azimuth position because of RCMC. So, the extended nonlinear chirp scaling is used to solve the problem of chirp rate dependent on azimuth position. Then focused scope of azimuth is extended. Simulation results verify that this method can get good quality image for high resolution in high squinted spotlight mode.

Key words: SAR; High-squinted spotlight; Spectral analysis; Extended Non-linear Chirp Scaling (ENCS); Spectral folding

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Rada, SAR)成像具有全天时、全天候的优势。与条带 SAR 相比, 聚束 SAR 在工作过程中不断调整天线角度使天线波束一直照射目标区域, 即通过增加方位积累时间提高多普勒带宽^[1], 从而获得了 2 维高分辨率的 SAR 图像, 因此在军事上具有重大的应用价值。

聚束 SAR 的积累时间越长, 多普勒带宽越大, 这也是聚束 SAR 的分辨率优于条带 SAR 的根本原因。斜视聚束多普勒带宽较大, 为了避免方位频谱

混叠, 一种方法是通过提高 PRF 使其大于全孔径的多普勒带宽, 但较高的 PRF 会造成距离模糊, 同时也会增加数据量。所以在全孔径多普勒带宽较大的情况下, 不能仅仅通过提高 PRF 的方法避免方位频谱混叠; 避免频谱混叠的另一种方法是文献[2]提出利用 SPECAN 算法获得去混叠的 2 维频谱, 并以去混叠后的 2 维频谱为基础进行距离徙动校正、距离压缩和方位聚焦, 从而使斜视聚束的问题得到简化。其中文献[3]提出方位谱分析与频率变标的两步聚焦算法, 该方法无法应用于大斜视聚束模式, 因此应用范围受到影响。文献[4]在文献[3]基础上提出方位谱分析与非线性频率变标的两部聚焦算法, 进一步增大了可处理的斜视角度, 但其聚焦场景有限。

斜视聚束 SAR 成像处理中存在另一个难点是距离向与方位向的严重耦合, 在斜视角较大的情况

2012-12-24 收到, 2013-04-27 改回

航空基金(20110181004)和中央高校基本科研业务费(K5051202016)

资助课题

*通信作者: 邵鹏 shaopeng987917@126.com

下, 常规小斜视成像算法无法对其进行精确聚焦^[5]。文献[6]提出将 SPECAN 与 Extended-Omega-K^[7]相结合的算法, 该算法能够进行精确的距离徙动校正, 但其存在 Stolt 插值, 操作比较复杂, 并且没有考虑徙动校正带来多普勒调频率空变性对方位聚焦的影响, 聚焦场景有限。为了避免距离向 Stolt 插值, 本文提出通过对斜视 SAR 回波信号进行徙动校正, 从而使得回波信号具有类似于正侧视模式下的信号特性, 并运用正侧视模式下的成像算法实现 2 维聚焦。然而这种方法会造成 SAR 回波信号多普勒调频率不变的假设不再成立。尤其在斜视角较大(例如 $60^\circ \sim 70^\circ$)的情况下, 在距离徙动校正和距离压缩后, 同一距离单元处的回波信号的多普勒调频率沿方位向变化较大^[8], 从而使图像的方位聚焦深度受到了较大限制, 不利于方位向的聚焦处理。

针对大斜视聚束 SAR 中存在的方位频谱混叠和距离与方位严重耦合的两个问题, 本文提出了一种基于谱分析与改进的方位非线性变标的大斜视聚束 SAR 成像算法^[9]。该方法首先对斜视聚束 SAR 的回波信号进行走动校正, 然后利用 SPECAN 方法对回波信号进行处理, 从而获得信号无混叠的 2 维频谱, 并以此为基础进行距离 CS, 消除距离弯曲的空变性, 统一进行距离徙动校正和距离脉冲压缩。完成距离徙动校正和距离脉冲压缩后, 通过沿每个距离单元进行改进的非线性变标操作, 校正多普勒调频率沿方位向的变化, 从而使方位聚焦深度得到了较大改善。由于整个成像处理过程仅由复乘与 FFT 实现, 不包含插值操作, 因此该算法操作简便。在本文的最后, 通过对回波数据的仿真与分析, 证明了该方法能够较好地运用于高分辨率条件下的大斜视聚束 SAR 成像。

2 斜视聚束几何模型及其算法实现

斜视聚束几何模型如图 1 所示。

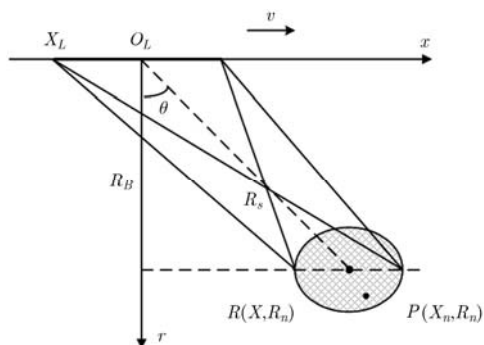


图 1 斜视聚束几何模型

雷达回波的基频信号可以表示为

$$s(\hat{t}, X) = a_r \left(\hat{t} - \frac{2R(X, R_n)}{c} \right) a_a(X) \cdot \exp \left\{ j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(X, R_n)}{c} \right)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(X, R_n) \right\} \quad (1)$$

其中 $R(X, R_n) = \sqrt{(X - X_n)^2 + R_n^2} - 2R_n(X - X_n) \sin \theta$ 为雷达与目标的瞬时斜距, $X = vt_m$ 为飞机瞬时位置, c 为光速, λ 为波长, v 为飞机速度, \hat{t} 为快时间, t_m 为慢时间, γ 为线性调频信号调频率, θ 为斜视角, $a_r(\cdot)$ 为线性调频信号窗函数, $a_a(\cdot)$ 为方位向窗函数, $R_n = R_B / \cos \theta$ 为任意目标斜距, θ 为孔径中心的斜视角, X_n 为任意点目标 P 在斜距平面中的横坐标, R_B 为最短斜距, X_L 为合成孔径长度, O_L 为合成孔径中心, R_s 为合成孔径中心与场景中心的距离。

将回波信号 $s(\hat{t}, X)$ 变换到距离频域, $s(K_r, X)$ 表达式为

$$s(K_r, X) = A_r(K_r) a_a(X) \cdot \exp \left\{ -jR(X, R_n)(K_r + K_{rc}) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{K_r^2 c^2}{16\pi\gamma} \right\} \quad (2)$$

其中 $K_r = 4\pi f_r / c$, f_r 为距离频率, $K_{rc} = 4\pi f_c / c$, f_c 为载频, $A_r(K_r)$ 为距离频域包络。由于距离向与方位向严重耦合, 因此需要对斜距进行泰勒级数展开。在大斜视情况下, 对斜距进行 Fresnel 近似^[10]精度不再满足成像要求, 为了实现精确聚焦, 需要将斜距近似到三阶形式。

为避免多普勒模糊, 在进行 SPECAN 之前, 需要将多普勒频率搬移到零多普勒处, 同时要将斜视的 2 维频谱校正, 因此构造补偿多普勒中心函数及走动校正函数 H_{RCM} 为

$$H_{RCM} = \exp \left\{ -j(K_r + K_{rc})X \sin \theta \right\} \exp(jK_{xc}X) \quad (3)$$

其中 $K_{xc} = 2\pi f_{dc} / v$, $f_{dc} = 2v \sin \theta / \lambda$ 。将式(2)与式(3)相乘, 在完成去多普勒中心和走动校正之后, 信号的方位频谱仍然存在混叠, 因此需要对频谱进行去混叠处理。

2.1 SPECAN 解方位频谱混叠

SPECAN^[11]是目前解方位频谱混叠的主要方法之一, SPECAN 本质是通过去斜操作完成时频变换, 将获取的多普勒带宽降为波束带宽。通过频域补零实现对信号的升采样, 以满足奈奎斯特采样定理的使用条件, 实现 $t_m \rightarrow t'_m$ 的变标, 等效提高了方

方位采样率 PRF。为了实现去斜操作，构造卷积参考函数 $s_{\text{ref}} = \exp(jk_{\text{ref}} t_m^2)$ ，其中 $k_{\text{ref}} = 2v^2 \cos^2 \theta / \lambda R_{\text{ref}}$ 。

$$\begin{aligned} ss(\hat{t}, t'_m) &= s(\hat{t}, t_m) \otimes s_{\text{ref}}(t_m) \\ &= \exp(j\pi k_{\text{ref}} t_m'^2) \int s(\hat{t}, \eta) \exp(j\pi k_{\text{ref}} \eta^2) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi k_{\text{ref}} t'_m \eta) d\eta \end{aligned} \quad (4)$$

由于进行了频域补零，因此时域的采样率已经得到提高，其中 $t'_m = \lambda R_s f_a / (2v^2)$ 。从式(4)可以看出将 SPECAN 分为两步：(1)将 $s(\hat{t}, t_m)$ 与参考函数相乘并补零进行快速傅里叶变换(FFT)，这一步操作目的是利用 deramp 操作去掉二次相位，使频谱不再混叠，经过补零操作后进行快速傅里叶变换，实现了对信号的时域升采样；(2)将傅里叶变换后的结果乘以二次相位函数，此处乘以二次相位函数是为了将第(1)步 deramp 之后的单频信号恢复为线性调频信号，从而恢复无混叠的 2 维频谱。经过上述两步操作之后，已完成方位向的聚焦，为了获得无模糊的 2 维频谱 $s(f_r, f'_a)$ ，需要将 $ss(\hat{t}, t'_m)$ 变换到多普勒域，并将 $s_{\text{ref}}(f_a)$ 补偿掉，便可得到 $s(f_r, f'_a)$ 无模糊的频谱。

图 2 给出了每一步的时频关系图，如图 2(a)所示，回波信号的多普勒带宽大于 PRF，方位频谱存在混叠，为了去除混叠，首先去除二次相位，方位信号变成单频信号，如图 2(b)所示，此时多普勒带宽已经变窄，方位频谱不存在混叠。接下来对信号的方位向进行补零操作，并对其进行快速傅里叶变换(FFT)。在频域补零，相当于提高了时域的采样率，从而使得方位采样率 PRF 增大，如图 2(c)所示，实现了时频轴的变换。此时信号在频域已经不存在混叠，下面对方位向的单频信号补偿二次相位，此时，方位频谱混叠问题已经得到解决，如图 2(d)所示，恢复了方位向线性调频信号的特性，从而得到了无混叠的 2 维频谱。

将 SPECAN 变换写成离散形式，如式(5)所示。

$$\begin{aligned} ss(m\Delta t'_m, r) &= \exp\left\{j2\pi \frac{(m\Delta t'_m)^2}{\lambda r_{\text{ref}}}\right\} \sum_{l=-N/2}^{N/2-1} s(l\Delta t_m, r) \\ &\quad \cdot \exp\left\{j2\pi \frac{(m\Delta t'_m)^2}{\lambda r_{\text{ref}}}\right\} \exp\left(-j2\pi \frac{ml}{N}\right) \\ &= \exp\left\{j2\pi \frac{(m\Delta t'_m)^2}{\lambda r_{\text{ref}}}\right\} \\ &\quad \cdot \text{DFT}\left[s(l\Delta t_m, r) \exp\left\{j2\pi \frac{(m\Delta t'_m)^2}{\lambda r_{\text{ref}}}\right\}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

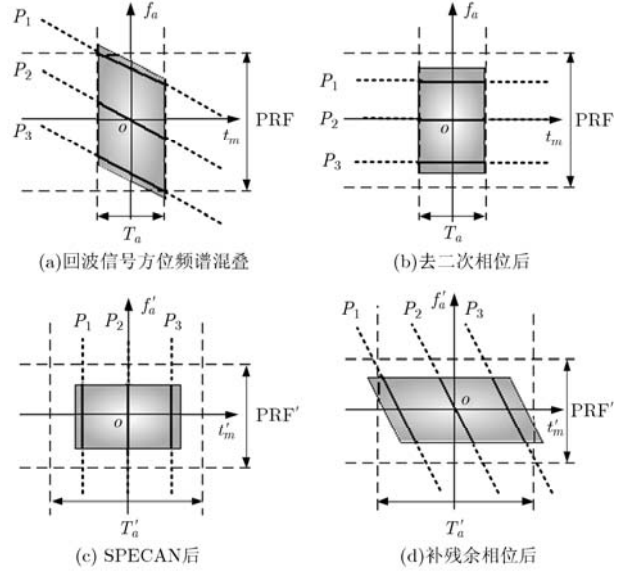


图 2 SPECAN 时频变换示意图

其中 DFT[] 为离散傅里叶变换， N 为补零之前的方位向点数， $m = -M/2, \dots, M/2 - 1$ ， M 为补零之后的方位向点数。SPECAN 之后的方位采样率为 $\text{PRF}' = 2v^2 N / (\lambda R_{\text{ref}} \text{PRF})$ [2]。

2.2 距离 CS 及方位 ENCS 处理

在完成 SPECAN 去方位频谱混叠之后，方位向与距离向仍然存在耦合，为了将距离向与方位向分离，通过级数反演方法将 $s(K_r, K'_x)$ 展开

$$\begin{aligned} s(K_r, K'_x) &= A_r(K_r) A_a(K'_x) \exp\{-j(K_r + K_{rc}) X'_n \sin \theta\} \\ &\quad \cdot \exp(-jX'_n K'_x) \exp\{j\phi_{\text{az}}(K'_x; R_n)\} \\ &\quad \cdot \exp\{j\phi_{\text{RCM}}(K'_x; R_n) K_r + j\phi_{\text{ry}}(K'_x; R_n) K_r^2 \\ &\quad + j\phi_{\text{cubic}}(K'_x; R_n) K_r^3 + o(K_r)\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $X'_n = MX_n / N$ 为经过升采样之后目标的方位向坐标， $K'_x = 2\pi f'_a / v \cos \theta$ ， f'_a 为升采样之后的多普勒频率， $\phi_{\text{RCM}}(K'_x; R_n)$ ， $\phi_{\text{ry}}(K'_x; R_n)$ ， $\phi_{\text{cubic}}(K'_x; R_n)$ ， $\phi_{\text{az}}(K'_x; R_n)$ 分别描述如下：

(1) 距离徙动项： $\phi_{\text{RCM}}(K'_x; R_n) = -R_n \{1 + \delta(K'_x)\}$ 为距离徙动项，包括距离走动项与距离弯曲项，距离徙动项使得距离与方位耦合在一起，补偿距离徙动实质是将距离与方位解耦合，并将信号包络补偿成直线，从而使 2 维匹配滤波可以分别进行，去除距离徙动是进行方位匹配滤波的前提。其中 $\delta(K'_x) = 1 / \cos \alpha - \tan \theta \sin \alpha (\cos^2 \alpha - 3) / 2 \cos^5 \alpha - 1$ 为距离徙动因子， $\sin \alpha = K'_x / K_{rc}$ ， $\cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}$ ， α 为瞬时斜视角。

(2) 距离调制项： $\phi_{\text{ry}}(K'_x; R_n) = -c^2 / 16\pi\gamma(K'_x;$

$R_n)(1 + \delta(K'_x))$ 为距离调制项, $\phi_{rg}(K'_x; R_n)$ 包含了脉冲压缩及二次距离压缩项, 该项主要影响距离向的聚焦效果, 二次距离压缩项直接影响距离向的聚焦深度。其中 $1/\gamma_e = 1/\gamma - R_{\text{ref}}\beta(K'_x)$, $\beta(K'_x) = 2\lambda \sin^2 \alpha / c^2 \cos^3 \alpha \{1 + 3 \tan \theta \sin \alpha (2 + 3 \sin^2 \alpha) / 2 \cos^4 \alpha\}$ 。

(3) 距离高次项: $\phi_{\text{cubic}}(K'_x; R_n) = -R_n \lambda^2 \rho(K'_x) \sin^2 \alpha / 32\pi^2 \cos^5 \alpha$, 在大斜视情况下, 当 $|\phi_{\text{cubic}}(K'_x; R_n) K_r^3| > \pi/4$ 时, 如果忽略 $\phi_{\text{cubic}}(K'_x; R_n) K_r^3$ 会造成距离向散焦, 严重影响距离向的聚焦效果。其中 $\rho(K'_x) = 1 - \tan \theta \sin \alpha (30 \cos^2 \alpha - 3 \cos^4 \alpha - 35) / 2 \cos^4 \alpha$ 。

(4) 方位调制项: $\phi_{\text{az}}(K'_x; R_n) = -R_n \sqrt{K_{rc}^2 - K_x'^2}$ 为方位调制项, $\phi_{\text{az}}(K'_x; R_n)$ 的精度直接影响方位向的聚焦深度, 本文是通过级数反演的方法得到方位调制项, $\phi_{\text{az}}(K'_x; R_n)$ 与距离频率 K_r 无关。

在对距离向进行聚焦时, 由于距离弯曲空变性导致距离向不能精确聚焦, 因此本文采用调频变标 (Chirp Scaling, CS) 消除距离弯曲的空变性^[12]。首先构造调频变标函数, 将距离弯曲由随距离变化的 $R_n \delta(K'_x)$ 变成 $R_s \delta(K'_x)$, 将空变的距离弯曲变成非空变, 方便统一补偿, 分别给出调频变标函数、距离压缩及二次距离压缩函数、残余相位补偿函数, 分别对应式(7)~式(9)。

$$H_{\text{scale}}(\hat{t}; K'_x) = \exp \left\{ j\pi \gamma_e(K'_x; R_{\text{ref}}) \delta(K'_x) \left(\hat{t} - \frac{2R(K'_x; R_{\text{ref}})}{c} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$$H_{\text{cs}}(K_r; K'_x) = \exp \left\{ j \frac{c^2 K_r^2}{16\pi \gamma_e(K'_x; R_{\text{ref}}) (1 + \delta(K'_x))} \right\} \cdot \exp \left\{ j R_{\text{ref}} \delta(K'_x) K_r \right\} \quad (8)$$

$$H_{\text{cs_com}}(K'_x) = \exp \left\{ j \Theta_{\Delta}(K'_x; R_n) \right\} \quad (9)$$

其中 $\Theta_{\Delta}(f'_a; R_n) \approx 4\pi \gamma_e(K'_x; R_{\text{ref}}) \delta(K'_x) (1 + \delta(K'_x)) (R - R_{\text{ref}})^2 / c^2$ 。式(7)~式(9)中 $\gamma_e(K'_x; R_{\text{ref}})$ 都是对 $\gamma_e(K'_x; R_n)$ 的近似, 因此引入误差, 由于聚束场景较小, 调频率沿距离的空变性可以忽略不计。若对条带宽场景成像, 则需要考虑距离向调频率空变性的影响, 可以采用距离非线性变标解决。由于是聚束模式, 本文也忽略了走动校正导致弯曲沿方位向空变的问题, 在宽测绘带或是超高分辨率成像时, 走动校正对弯曲造成的影响需要进一步考虑。

在斜视角较大时, 斜距的三次项不能忽略^[13], 因此在经过变标、脉冲压缩之后, 距离逆傅里叶变

换(IFFT), 距离向完成聚焦, 信号形式为

$$s_{\alpha}(\hat{t}, K'_x) = \text{sinc} \left\{ \frac{c \Delta K_r}{4\pi} \left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c} \right) \right\} A_{\alpha}(K'_x) \cdot \exp \left\{ j \left[-K'_x X'_n - \frac{1}{2b_m} K_x'^2 + \frac{d_m}{b_m^3} K_x'^3 \right] \right\} \quad (10)$$

其中 $\Delta K_r = 4\pi B/c$, B 为发射信号带宽, $b_m = -4\pi \cos^2 \theta / \lambda R_n$, $d_m = -4\pi \sin \theta \cos^2 \theta / \lambda R_n^2$ 。

在正侧视或小斜视情况下, 式(10)中的三次项可以忽略, 可以直接进行匹配滤波, 从而实现方位向聚焦。但在大斜视情况下, 走动校正导致了多普勒调频率沿方位向变化^[14]。若直接进行方位匹配滤波, 则方位聚焦深度非常有限。走动校正导致同一距离门的目标多普勒调频率沿方位向发生变化, 下面以 $X_{\text{ref}} = 0$ 为参考点分析任意点目标的方位位置与多普勒调频率的关系。设任意目标的方位位置为 X'_n , 则该点对应的斜距 $R_n = R_d - X'_n \sin \theta$, 其中 R_d 为参考点 $X_{\text{ref}} = 0$ 对应的斜距, 下面将 b_m 在 $X'_n = 0$ 进行泰勒级数展开, 得到式(11)。

$$\begin{aligned} b_m &= -\frac{4\pi \cos^2 \theta}{\lambda R_n} \\ &= -\frac{4\pi \cos^2 \theta}{\lambda (R_d - X'_n \sin \theta)} \\ &= -\frac{4\pi \cos^2 \theta}{\lambda R_d} - \frac{4\pi \cos^2 \theta \sin \theta}{\lambda R_d^2} X'_n \\ &= b_{\text{ref}} + b_{\text{var}} X'_n \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $b_{\text{ref}} = -4\pi \cos^2 \theta / \lambda R_d$, $b_{\text{var}} = -4\pi \cos^2 \theta \sin \theta / \lambda R_d^2$ 。考虑到多普勒调频率变化与方位位置 X'_n 有关, 则可以对多普勒调频率变化量进行泰勒级数展开, 如式(12)所示

$$\Delta k_a = k_a - k_{\text{aref}} = \sum_{m=1}^M q_m X'^m \quad (12)$$

其中 Δk_a 为多普勒调频率变化量, k_a 为方位任意位置的调频率, k_{aref} 为参考中心 $X_{\text{ref}} = 0$ 的调频率, q_m 为调频率变化第 m 阶的系数, m 为展开阶数。由式(12)可知, 进行两次积分得到相位为

$$\Delta \varphi = \sum_{m=1}^M \frac{2\pi q_m}{(m+1)(m+2)} X'^m \quad (13)$$

将式(13)中的 π 移到 q_m 中, 式(13)变为

$$\Delta \varphi = \sum_{m=1}^M \frac{2q_m}{(m+1)(m+2)} X'^m \quad (14)$$

从式(14)可以看出, 多普勒调频率的误差直接影响相位三阶以上(包含三阶)的高阶相位误差, 在大斜视成像时, 需要对其进行适当的近似。针对本文的聚束场景, 只考虑到多普勒调频率的一阶变化, 因

此多普勒调频率变化引起的相位可以表示为

$$\Delta\varphi = \frac{q}{3} X^3 \quad (15)$$

将式(10)变换到方位位置域, 得到

$$\begin{aligned} s_\alpha(\hat{t}, X) = & \operatorname{sinc}\left\{\frac{c\Delta K_r}{4\pi}\left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c}\right)\right\} a_a(X) \\ & \cdot \exp\left\{j\frac{b_m}{2}(X - X'_n)^2\right\} \\ & \cdot \exp\left\{jd_m(X - X'_n)^3\right\} \end{aligned} \quad (16)$$

为了消除多普勒调频率一阶变化对相位的影响, 构造扰动函数

$$H_{3\text{order}} = \exp\left(-j\frac{q}{3} X^3\right) \quad (17)$$

将式(16)与式(17)进行相乘并变换到多普勒域得到

$$\begin{aligned} s_\alpha(\hat{t}, K'_x) = & \operatorname{sinc}\left\{\frac{c\Delta K_r}{4\pi}\left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c}\right)\right\} A_a(K'_x) \\ & \cdot \exp\left\{-j\left(\frac{1}{2b_m} + \frac{qX_n}{b_m^2}\right)K_x'^2\right\} \\ & \cdot \exp\left\{j\left(\frac{d_m}{b_m^3} - \frac{q}{3b_m^3}\right)K_x'^3\right\} \\ & \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{qX_n^2}{b_m} - X_n\right)K_x'\right\} \\ & \cdot \exp\left(-j\frac{qX_n^3}{3}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

从式(18)中可以看出, 方位调制项 $(1/2b_m + qX_n/b_m^2)$ 沿方位向具有空变性, 为了消除多普勒调频率的空变性, 需令

$$1/(2b_m) + qX_n/b_m^2 = 1/(2b_{\text{ref}}) \quad (19)$$

可以解得

$$q = b_{\text{var}}/2 \quad (20)$$

将 $q = b_{\text{var}}/2$ 代入式(18)得到

$$\begin{aligned} s_\alpha(\hat{t}, K'_x) = & \operatorname{sinc}\left\{\frac{c\Delta K_r}{4\pi}\left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c}\right)\right\} A_a(K'_x) \\ & \cdot \exp\left\{-j\frac{1}{2b_{\text{ref}}}K_x'^2\right\} \\ & \cdot \exp\left\{j\left(\frac{d_m}{b_m^3} - \frac{b_{\text{var}}}{6b_m^3}\right)K_x'^3\right\} \\ & \cdot \exp\left\{j\left(-\frac{b_{\text{var}}X_n^2}{2b_m} - X_n\right)K_x'\right\} \\ & \cdot \exp\left(-j\frac{b_{\text{var}}}{3}X_n^3\right) \end{aligned} \quad (21)$$

构造方位匹配滤波函数 H_{az}

$$H_{az} = \exp\left\{j\frac{1}{2b_{\text{ref}}}K_x'^2\right\} \exp\left\{-j\left(\frac{d_m}{b_m^3} - \frac{b_{\text{var}}}{6b_m^3}\right)K_x'^3\right\} \quad (22)$$

由于高次项系数中 b_m 沿方位向的空变性对相位影响较小, 这里忽略不计, 同时忽略常数项的影响, 将 H_{az} 与式(21)进行相乘并进行方位 IFFT, 得到

$$\begin{aligned} s_\alpha(\hat{t}, X) = & \operatorname{sinc}\left\{\frac{c\Delta K_r}{4\pi}\left(\hat{t} - \frac{2R_n}{c}\right)\right\} \\ & \cdot \operatorname{sinc}\left(X - \frac{b_{\text{var}}X_n^2}{2b_m} - X_n\right) \end{aligned} \quad (23)$$

从而完成二维聚焦成像, 算法流程如图 3 所示。

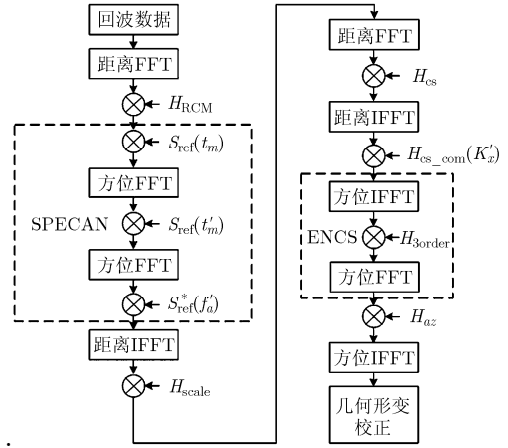


图 3 算法流程图

3 仿真与分析

3.1 仿真参数

为验证该算法的有效性, 进行了实验仿真。载机速度 $v = 130$ m/s, 信号带宽 $B = 600$ MHz, 采样频率 $F_s = 800$ MHz, 载频 $f_c = 10$ GHz (X 波段), PRF = 200, 脉宽 $T_p = 10$ μ s, 天线孔径 $Da = 1$ m, 合成孔径中心斜视角 $\theta = 65^\circ$, 场景中心距离 $R_s = 5000$ m, 距离分辨率 $\rho_r = 0.25$ m, 场景是以一中心点为圆心, $D = 200$ m 为直径的圆形场景。

3.2 场景聚焦范围及相位误差分析

影响方位聚焦主要有两个因素: (1)RCMC引入相位误差, (2)对多普勒调频率近似引入相位误差, 因此这两个因素对方位聚焦场景大小产生限制。

(1)RCMC引入相位误差: 方位能够良好聚焦的前提条件是RCMC误差小于0.5个距离分辨单元, 当 $|f_{\text{RCMC_err}}| > 0.5 \times \frac{c}{2F_s}$ 时, 会造成方位向散焦, 从而限制了成像场景大小。

(2)多普勒调频率空变性引入相位误差: 由于本文只考虑到多普勒调频率的一阶近似, 对于二阶以及高阶的忽略会导致计算的多普勒调频率存在误

差,从而使方位散焦,限制了场景大小。

基于以上两点,需要同时满足以下两个条件成立(式(24)和式(25)),方位向才能良好聚焦。

$$f_{\text{RCM_err}} = (R(X_{\text{max}}; R_{\text{ref}}) - R(X_{\text{ref}}; R_{\text{ref}}))\delta$$

$$|f_{\text{RCM_err}}| \leq 0.5 \times \frac{c}{2F_s} \quad (24)$$

$$k_{a_err} = k_{a_ideal} - k_{a_cal},$$

$$X \int_0^{X_{\text{max}}} k_{a_err} dX \leq \frac{\pi}{4} \quad (25)$$

其中 δ 为变标因子, k_{a_ideal} 为理想多普勒调频率, k_{a_cal} 为一阶近似得到的多普勒调频率,由于 k_{a_ideal} 无法精确获得,本文只考虑 k_{a_ideal} 的二阶项对相位误差的影响(三次以及高阶项与二阶项相比忽略不计)。将 k_a 泰勒级数展开并近似到二阶,得到

$$k_{a_err} = -\frac{4\pi \cos^2 \theta \sin^2 \theta}{\lambda R_d^3} X_n^2 \quad (26)$$

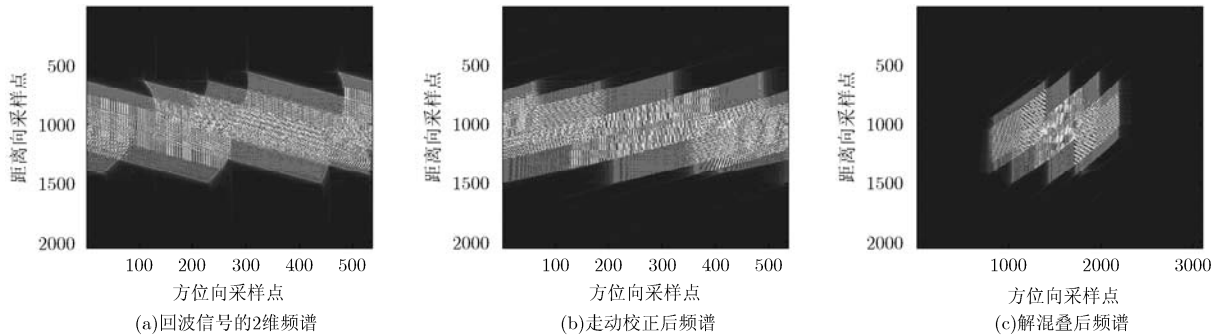


图 4 SPECAN 前后的信号 2 维频谱

针对本文仿真参数,根据式(24)与式(27)可得到该算法方位向良好聚焦范围 $2X_{\text{max}} < 240 \text{ m}$ 。图 5 给出了目标仿真结果, $\rho_r = 0.25 \text{ m}$, 场景大小为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 时,该算法能够精确成像。

图 6 和图 7 给出了 SPECAN-ENCS 算法与 SPECAN-NCS 算法成像结果的等高线图,可以明

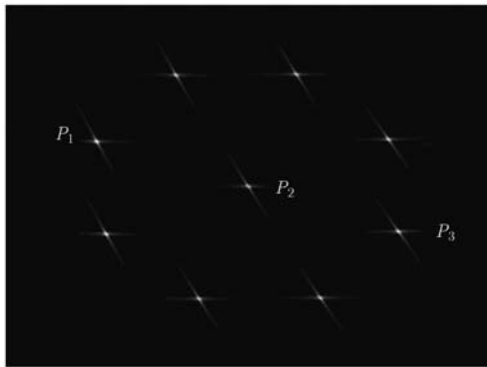


图 5 $\theta = 65^\circ, \rho_r = 0.25 \text{ m}$ 仿真结果

方位向能够良好聚焦需要满足

$$\left| X_{\text{max}} \int_0^{X_{\text{max}}} k_{a_err} dX \right| < \frac{\pi}{4} \quad (27)$$

3.3 仿真分析

根据实验给出的仿真参数,可以计算出多普勒带宽 $Bd = \lambda / (2\Delta\theta) = 260 \text{ Hz}$, $\text{PRF} = 200$, 由于 PRF 小于多普勒带宽,且模糊数为 1,如图 4(a)所示,所以回波信号频谱在方位向存在混叠,且由于走动存在,频谱发生倾斜。经过去除多普勒中心与走动校正之后,可将 2 维频谱搬移到零多普勒频率处,并且已经将频谱拉正,但此时频谱仍然存在混叠,如图 4(b)所示,采用 SPECAN 对方位进行粗聚焦,相当于将方位向采样率 PRF 提高到 $\text{PRF}' = 2v^2 N / (\lambda R_{\text{ref}} \text{PRF})$ 。如图 4(c)所示,从图中可以看出, SPECAN 方法可有效解决方位频谱混叠。

显看出本文方法的点目标聚焦效果较好。

表 1 给出了 SPECAN-ENCS 算法与 SPECAN-NCS 算法性能对比分析,可以说明该算法在斜视聚束模式下的优越性。

4 结论

雷达工作于大斜视聚束模式下,可以获得 2 维高分辨图像,得到更精确的目标信息。通过 SPECAN 消除方位频谱混叠,进行走动校正后,距离向进行 CS 处理,消除了距离弯曲的空变性,进行统一补偿,实现了距离上的聚焦,CS 在操作上比文献[15]提出的 Stolt 插值简便、易行。然而走动校正导致同一距离门的调频率沿方位向存在空变性,所以方位向需要采用 ENCS 方法,考虑了多普勒调频率的空变性,近似认为多普勒调频率沿方位向线性变化,使得该算法能够对斜视聚束进行高分辨成像,满足了高分辨场景的大斜视聚束成像要求。

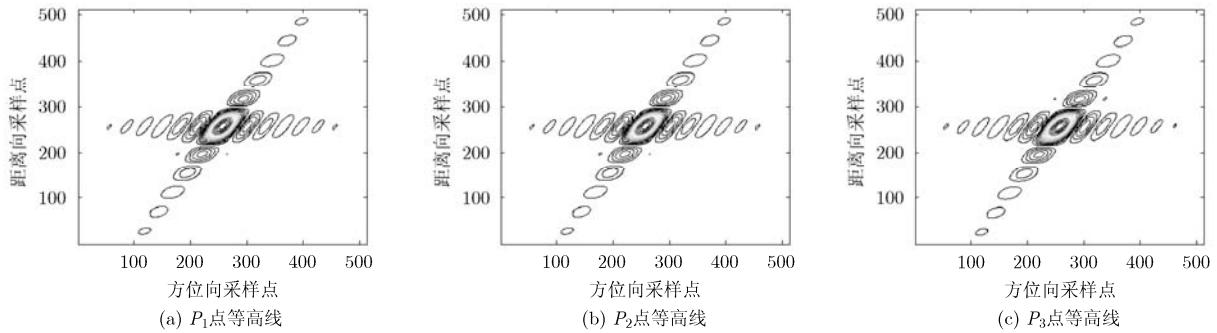


图 6 SPECAN-ENCS 方法

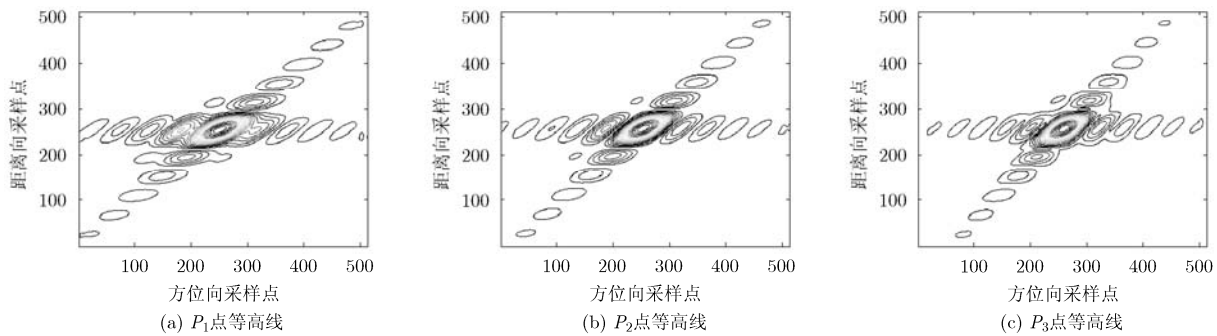


图 7 SPECAN-NCS 方法

表 1 SPECAN-ENCS 与 SPECAN-NCS 性能对比

| 成像算法 | 场景大小 (m ²) | 方位分辨 率(m) | 距离分辨 率(m) | 边缘点 1 (PSLR) (dB) | 中心点 (PSLR) (dB) | 边缘 2 (PSLR) (dB) |
|-------------|---------------------------|--------------|--------------|----------------------|--------------------|---------------------|
| SPECAN-NCS | 200 × 200 | 0.3 | 0.25 | -11.88 | -13.29 | -11.70 |
| SPECAN-ENCS | 200 × 200 | 0.3 | 0.25 | -13.20 | -13.30 | -13.16 |

参 考 文 献

[1] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotating objects[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 23-51.

[2] Lanari R, Tesauro M, 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.

[3] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.

[4] 吴勇, 宋红军, 彭靳, 等. 基于方位 deramp 和 NFS 大斜视聚束 SAR 成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2184-2190.

Wu Yong, Song Hong-jun, Peng Jin, et al.. Imaging algorithm of high squint spotlight SAR based on azimuth deramp and nonlinear frequency scaling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(9): 2184-2190.

[5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 130-183.

Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 130-183.

[6] An Dao-xiang, Huang-Xiao tao, Jin Tian, et al.. Extended two-step focusing approach for squinted spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2889-2900.

[7] Reigber A, Alivizatos E, 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.

[8] Sun G C, Jiang X W, and Xing M. Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2308-2322.

[9] Wong H and Yeo Tat-soon. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing[J]. *IEEE Transactions*

- on *Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 946-953.
- [10] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air and spaceborne SAR data processing in stripmap and ScanSAR imaging modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123-1135.
- [11] Caputi W J. Stretch: a time-transformation technique[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(2): 269-278.
- [12] 杨威, 李春升, 陈杰, 等. 星载SAR滑动聚束模式三步扩展算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 297-302.
Yang Wei, Li Chun-sheng, Chen Jie, *et al.* Extended three-step focusing algorithm for spaceborne sliding spotlight SAR image formation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2012, 38(3): 297-302.
- [13] Yang Lei, Xing Meng-dao, Wang Yong, *et al.* Compensation for the NsRCM and phase error after polar format resampling for airborne spotlight SAR raw data of high resolution[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2013, 10(1): 165-169.
- [14] Horvath Matthew S. Extensions of polar format scene size limits to squinted geometries[D]. [Master dissertation], The Ohio State University, 2012.
- [15] 安道祥, 李欣, 黄晓涛, 等. 基于去调频技术的斜视聚束SAR成像方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(2): 218-234.
An Dao-xiang, Li Xin, Huang Xiao-tao, *et al.* A novel approach based on deramping technique for the squint spotlight SAR imaging[J]. *SCIENCE CHINA Information Science*, 2012, 42(2): 218-234.
- 邵 鹏: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、运动补偿.
- 周 松: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为弹载 SAR 成像.
- 徐 刚: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像超分辨率及大斜视 SAR 成像.
- 李亚超: 男, 1981 年生, 副教授, 主要从事弹载 SAR 及 ISAR 方面的研究工作.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 长期从事雷达信号处理等方面的研究工作.