

# 大斜视机载聚束 SAR 时域校正距离走动的频率尺度成像算法

左伟华<sup>1,2</sup>,皮亦鸣<sup>1</sup>,闵 锐<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院, 四川成都, 611731; 2. 怀化学院, 湖南怀化, 418000)

**摘 要:** 本文采用时域校正距离走动的方法, 对传统频率尺度算法距离压缩进行改进; 在方位压缩中, 采用非线性调频变标的方法, 解决距离走动校正带来的方位向调频率空变性问题. 数值仿真实验证明了本文提出算法处理大斜视聚束 SAR 回波的正确性及有效性.

**关键词:** 合成孔径雷达; 聚束模式; 频率尺度算法; 距离走动校正

**中图分类号:** TN959.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 09-1716-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.09.008

## Improved Frequency Scaling Algorithm Based on the Range Walk Correction in Time Domain for High Squint Spotlight Airborne SAR

ZUO Wei-hua<sup>1,2</sup>, PI Yi-ming<sup>1</sup>, MIN Rui<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, 611731, China;  
2. Huaihua University, Huaihua, Hunan, 418000, China)

**Abstract:** In this paper the range walk correction in time domain is introduced to revise the range compressing of the traditional frequency scaling algorithm. In the azimuth compressing, a method named azimuth nonlinear chirp scaling is involved to solve the azimuth position dependence of the azimuth modulation rate introduced by the range walk correction. The simulation experiments verify the correct and validity of the proposed algorithm in focusing the echo of high squint spotlight SAR.

**Key words:** synthetic aperture radar; spotlight mode; frequency scaling algorithm; range walk correction

### 1 引言

聚束模式合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是获得地面小范围高分辨率微波图像的重要手段. 其方位向成像精度取决于方位向相干积累角, 而非方位向天线尺寸<sup>[1,2]</sup>. 它是 SAR 研究领域的热点之一. 斜视工作模式能进一步扩大聚束 SAR 的应用范围. 大斜视下场景中点目标距离徙动量比正侧视要大得多. 它造成二维频域中距离向与方位向的严重耦合. 这使得对大斜视聚束 SAR 信号聚焦变得非常困难. 本文研究大斜视解斜接收聚束 SAR 信号聚焦问题.

聚束 SAR 的成像算法主要有极坐标算法 (Polar Format Algorithm, PFA)<sup>[1]</sup>, 距离徙动算法 (Range Migration Algorithm, RMA)<sup>[1]</sup>, 调频尺度变换算法 (Chirp Scaling Algorithm, CSA)<sup>[3]</sup>, 频率尺度变换算法 (Frequency Scaling Algorithm, FSA)<sup>[4]</sup> 等. PFA 对目标回波距离向和方位向进行二维解斜接收, 可处理的斜视角较大, 然而其平面波

假设使得可成像场景尺寸很小. RMA 算法通过对二维频谱的 Stolt 插值, 可实现对大斜视下回波的聚焦. 然而以上两种算法均需插值操作, 成像效率很低. 插值精度也会对成像结果造成影响. CSA 算法则要求回波信号是 Chirp 形式的. FSA 算法提出了 Frequency Scaling 基本原理, 可直接处理斜信号. 它只需复乘和 FFT 操作, 成像效率高. 然而 FSA 算法忽略了二次距离压缩项的空变性, 可处理的斜视角小 (X 波段斜视角小于 20°). 孙进平博士<sup>[5]</sup>对斜视下 FSA 方位向 Scaling 过程造成的数据扩展问题进行了研究. 王国栋博士<sup>[6]</sup>研究了方位尺度变换因子的影响. 金丽花博士<sup>[7]</sup>借鉴非线性调频信号尺度变换算法 (Nonlinear Chirp Scaling Algorithm, NCSA)<sup>[8]</sup>, 提出了非线性频率尺度变换算法 (Nonlinear Frequency Scaling Algorithm, NFSA), 提高了 FSA 的斜视处理能力, 但当斜视角较大时, 成像性能变差.

本文对大斜视聚束 SAR 距离徙动深入研究, 提出一种改进的 FSA 算法. 首先在时域对距离走动进行补

偿,较大程度去除距离向与方位向的严重耦合;然后基于 FS 原理对剩余距离弯曲进行一致校正,去除距离弯曲的距离向空变性;在方位压缩中采用方位向非线性调频变标(Azimuth Nonlinear Chirp Scaling, ANCS)方法<sup>[9]</sup>,解决距离走动校正带来的方位向调频率空变性问题。

## 2 几何模型及目标回波解斜接收

大斜视下聚束 SAR 几何关系如图 1 所示。在聚束 SAR 中成像场景固定。平台在飞行过程中,波束始终指向场景中心(图 1 中的  $C$  点)以获得足够长的合成孔径时间,从而实现方位向高分辨率成像。

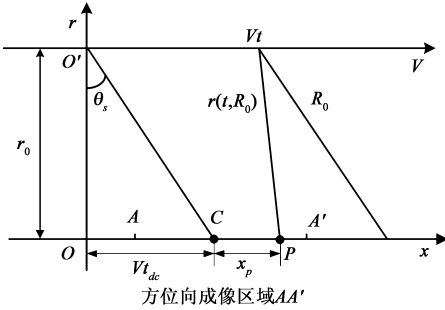


图1 斜视聚束SAR成像几何关系

平台在慢时间  $t=0$  时位于  $O'$ , 此时波束指向与平台轨迹法向的夹角定义为斜视角  $\theta_s$ 。点目标  $P$  距离  $C$  的  $x$  方向位置为  $x_p$ , 其与平台的最短距离为  $r_0$ ; 与平台间沿斜视角方向的距离为  $R_0 = r_0 / \cos\theta_s$ 。点目标  $P$  的瞬时斜距  $r(t, R_0)$  及其近似形式<sup>[9]</sup>如式(1)所示。

$$r(t, R_0) = \sqrt{R_0^2 + (Vt - x_p)^2 - 2R_0(Vt - x_p)\sin\theta_s} \\ \approx \sqrt{R_0^2 + V^2\cos^2\theta_s\left(t - \frac{x_p}{V}\right)^2} - V\sin\theta_s\left(t - \frac{x_p}{V}\right) \\ + \frac{V^3\cos^2\theta_s\sin\theta_s}{2R_0^2}\left(t - \frac{x_p}{V}\right)^3 \quad (1)$$

其中:(1)  $\sqrt{R_0^2 + V^2\cos^2\theta_s\left(t - \frac{x_p}{V}\right)^2}$  为类似于正侧视下瞬时斜距表达式;(2)  $-V\sin\theta_s\left(t - \frac{x_p}{V}\right)$  为距离走动项;

(3)  $\frac{V^3\cos^2\theta_s\sin\theta_s}{2R_0^2}\left(t - \frac{x_p}{V}\right)^3$  为三阶斜距项;(4) 忽略五阶以上的奇数项。对点目标  $P$  瞬时斜距进行展开, 主要目的为将斜视下距离走动项分离出来, 以便在时域对其进行校正; 保留至三阶项则可以保证近似的精确性。点目标回波信号表达式为:

$$ss(\tau, t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp\left\{j2\pi f_c\left[\tau - \frac{2r(t, R_0)}{c}\right]\right\} \\ \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \frac{2r(t, R_0)}{c}}{T_p}\right] \exp\left\{j\pi K_s\left[\tau - \frac{2r(t, R_0)}{c}\right]^2\right\} \quad (2)$$

其中  $\tau$  为快时间;  $T_p$  为发射信号脉冲宽度;  $t$  为慢时

间;  $T_a$  为聚束时间;  $K_s$  为发射信号线性调频率;  $f_c$  为载波频率。对式(2)解斜接收使用的参考函数如式(3)所示, 其中  $R_c = r_c / \cos\theta_s$  为场景中心到孔径中心的距离,  $r_c$  为场景中心最短斜距。

$$H_{\text{dechirp}}(\tau, R_c) \\ = \exp\left[-j\pi K_s\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)^2\right] \exp\left[-j2\pi f_c\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] \quad (3)$$

解斜接收后的回波信号表达式为:

$$ss_1(\tau, t) = \text{rect}\left[\frac{\tau - \frac{2r(t, R_0)}{c}}{T_p}\right] \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \\ \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)[r(t, R_0) - R_c]\right\} \\ \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda}[r(t, R_0) - R_c]\right\} \\ \cdot \exp\left\{j\frac{4\pi K_s}{c^2}[r(t, R_0) - R_c]^2\right\} \quad (4)$$

其中  $\lambda = c/f_c$  为载波波长。称式(4)最后一个指数项为剩余视频相位项(Residual Video Phase, RVP), 需要去除。

## 3 时域校正距离走动的改进 FSA 成像算法

在本文方法中距离徙动校正分为距离走动校正和距离弯曲校正两步。经时域距离走动校正后, 回波信号表达式与 FSA 及 NFSA 区别明显, 所有后续操作均需重新推导。其流程如图 2 所示。

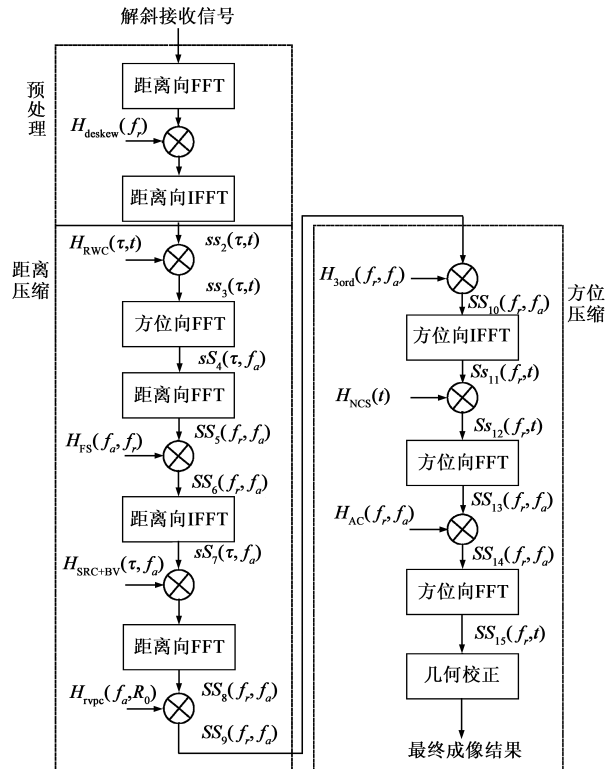


图2 本文提出算法的流程图

### 3.1 预处理:RVP 校正

RVP 相位校正 在预处理中完成,称为“去扭曲”操作.它在快时间频域完成.将式(4)转换到快时间频域,并与式(5)相乘,其中  $f_r$  为快时间频率.

$$H_{\text{deskew}}(f_r) = \exp\left(-j \frac{\pi}{K_s} f_r^2\right) \quad (5)$$

相乘后回波信号转换回二维时域可得:

$$\begin{aligned} \text{ss}_2(\tau, t) = & \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{2R_c}{c}}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] [r(t, R_0) - R_c]\right\} \end{aligned}$$

由上式可见,RVP 项已经被去除.

### 3.2 时域距离走动校正

由  $r(t, R_0)$  近似形式得时域去除距离走动相

$$\text{位函数: } H_{\text{RWC}}(\tau, t) = \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] V \sin\theta_s t\right\}.$$

将之与  $\text{ss}_2(\tau, t)$  相乘,可得:

$$\begin{aligned} \text{ss}_3(\tau, t) \approx & \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{2R_c}{c}}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] (x_p \sin\theta_s - R_c)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] r_1(t, R_0)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] \cdot \frac{V^3 \cos^2\theta_s \sin\theta_s}{2R_0^2} \left(t - \frac{x_p}{V}\right)^3\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $r_1(t, R_0) = \sqrt{R_0^2 + V^2 \cos^2\theta_s \left(t - \frac{x_p}{V}\right)^2}$ . 由式(6)可见,去除距离走动后回波信号类似正侧视的回波信号.

后续处理需在距离多普勒域(Range Doppler domain, RD)进行,忽略三阶相位项对驻定相位点的影响,将式(6)转换到 RD 域,如式(7)所示.

$$\begin{aligned} \text{sS}_4(\tau, f_a) = & \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{2R_c}{c}}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{V}\right) \\ & \cdot \exp\left\{-j\left[\frac{4\pi}{\lambda} + \frac{4\pi K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] (x_p \sin\theta_s - R_c)\right\} \\ & \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi R_0}{\lambda} \sqrt{\left[\frac{\lambda K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right) + 1\right]^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V \cos\theta_s}\right)^2}\right\} \\ & \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi R_0 \tan\theta_s}{\lambda} \frac{\left[1 + \frac{\lambda K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] \left(\frac{\lambda f_a}{2V \cos\theta_s}\right)^3}{\left[\left[1 + \frac{\lambda K_s}{c}\left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right]^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V \cos\theta_s}\right)^2\right]^{3/2}}}\right\} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中相位形式复杂,不便于后续分析.将其展开成  $\tau = 2R_c/c$  处的泰勒级数并忽略三阶以上项,可得

其近似形式.展开式及各阶展开系数如下所示.

$$\begin{aligned} \phi_1(\tau, f_a; R_0) = & -2\pi f_a \frac{x_p}{V} + \phi_0(f_a, R_0) \\ & + \phi_1(f_a, R_0) \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right) + \phi_2(f_a, R_0) \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)^2 \\ & + \phi_3(f_a, R_0) \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)^3 \end{aligned}$$

常数项:

$$\begin{aligned} \phi_0(f_a, R_0) = & -\frac{4\pi R_0 D(f_a)}{\lambda} \\ & + \frac{2\pi R_0 \tan\theta_s [1 - D^2(f_a)]^{3/2}}{\lambda D^3(f_a)} \end{aligned}$$

一次项系数:

$$\begin{aligned} \phi_1(f_a, R_0) = & -\frac{4\pi K_s}{c} \left[\frac{R_0}{D(f_a)} - R_c + x_p \sin\theta_s\right] \\ & + \frac{4\pi K_s}{c} \cdot \frac{R_0 \tan\theta_s [1 - D^2(f_a)]^{3/2} [D^2(f_a) - 3]}{2D^5(f_a)} \\ & \triangleq 2\pi f_s \end{aligned}$$

二次项系数:

$$\begin{aligned} \phi_2(f_a, R_0) = & \frac{3\pi \lambda K_s^2 R_0 \tan\theta_s [1 - D^2(f_a)]^{3/2}}{D^7(f_a) c^2} \cdot [5 - 3D^2(f_a)] \\ & + \frac{2\pi \lambda R_0 K_s^2}{c^2} \frac{1 - D^2(f_a)}{D^3(f_a)} \\ & \triangleq \pi K_m \end{aligned}$$

三次项系数:

$$\begin{aligned} \phi_3(f_a, R_0) = & -\frac{2\pi \lambda^2 R_0 K_s^3 [1 - D^2(f_a)]}{c^3 D^5(f_a)} \\ & + \frac{\pi \lambda^2 R_0 K_s^3 \tan\theta_s [1 - D^2(f_a)]^{3/2}}{c^3} \\ & \cdot \frac{-3D^4(f_a) + 30D^2(f_a) - 35}{D^9(f_a)} \end{aligned}$$

其中  $D(f_a) = \sqrt{1 - [\lambda f_a / (2V \cos\theta_s)]^2}$ . 常数项表示方位向调制,此项是方位向处理的主要表达式;一阶项为距离徙动项,它主要为空变的距离弯曲;二次项为二次距离压缩项;三次项为三阶相位项.

### 3.3 FS 操作

由 3.2 分析可知距离弯曲为空变的.为了一次完成对所有点目标距离弯曲的校正,需要去除其空变性.这可以通过 FS 操作来完成.FS 操作将在二维频域进行.式(7)二维频域形式如式(8)所示,其中省略了信号包络.由于经过距离走动校正后,三阶相位项已经很小,在转换到二维频域时忽略其影响.

$$\begin{aligned} \text{SS}_5(f_r, f_a) = & \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{V}\right) \exp[j\phi_0(f_a, R_0)] \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{\pi}{K_m} (f_r - f_s)^2\right] \exp\left(-j\frac{4\pi R_c}{c} f_r\right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} K_m \triangleq \frac{2\lambda R_0 K_s^2}{c^2} \cdot \frac{1 - D^2(f_a)}{D^3(f_a)} \\ + \frac{3\lambda K_s^2 R_0 \tan\theta_s [1 - D^2(f_a)]^{3/2}}{c^2} \cdot \frac{5 - 3D^2(f_a)}{D^7(f_a)} \\ f_s \triangleq -\frac{2K_s}{c} [R_0 \alpha(f_a) + x_p \sin\theta_s - R_c] \end{cases}$$

$K_m$  为经距离走动校正后的距离向调频率;  $f_s$  为点目标在距离频域中的位置. 称:

$$\alpha(f_a) = \frac{1}{D(f_a)} - \frac{\tan\theta_s [D^2(f_a) - 3] [1 - D^2(f_a)]^{3/2}}{2D^5(f_a)}$$

为点目标徙动因子.  $f_s$  与  $R_0$ 、 $\alpha(f_a)$ 、 $\theta_s$  有关, 为空变的. 选择场景中心为参考点进行 FS 操作, FS 函数为:

$$H_{\text{FS}}(f_a, f_r) = \exp\left[-j \frac{\pi}{K_{\text{mref}}} [\alpha(f_a) - 1] (f_r - f_{\text{ref}})^2\right] \quad (9)$$

其中  $f_{\text{ref}} = -\frac{2K_s}{c} [R_c \alpha(f_a) - R_c]$ . 这里使用参考距离处的线性调频率  $K_{\text{mref}} = K_m(f_a, R_c)$  对  $K_m = K_m(f_a, R_0)$  进行近似. 经过 FS 操作的二维频域回波信号为:

$$\begin{aligned} \text{SS}_6(f_r, f_a) &= \exp[j\phi_0(f_a, R_0)] \exp\left[-j \frac{4\pi R_c}{c} f_r\right] \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{\pi}{K_{\text{mref}}} \alpha(f_a) (f_r - f_{\text{fs}})^2\right] \exp[j\phi_{\text{res}}(f_a, R_0)] \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $f_{\text{fs}} = -\frac{2K_s}{c} \{R_0 - R_c + R_c [\alpha(f_a) - 1] + x_p \sin\theta_s\}$ , 由之可见距离弯曲仅与  $R_c$  及  $f_a$  有关, 即所有点目标具有相同的距离弯曲. 故可一次完成对所有点目标的距离弯曲校正. 同时 FS 操作还产生了下式所示剩余相位  $\phi_{\text{res}}(f_a, R_0)$ , 它将在距离压缩后被补偿.

$$\begin{aligned} \phi_{\text{res}}(f_a, R_0) &= \\ \exp\left\{-j \frac{\pi \alpha(f_a) [\alpha(f_a) - 1]}{K_{\text{mref}}} \cdot \left[ K_s \left( \frac{2R_0}{c} - \frac{2R_c}{c} \right) + \frac{x_p \sin\theta_s}{\alpha(f_a)} \right]^2\right\} \end{aligned}$$

### 3.4 二次距离压缩、块移及剩余相位补偿

二次距离压缩及块移操作将在 RD 域进行. 将式 (10) 转换到 RD 域可得:

$$\begin{aligned} \text{sS}_7(\tau, f_a) &= \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{V}\right) \exp[j\phi_0(f_a, R_0)] \\ &\cdot \exp\left[j \frac{\pi K_{\text{mref}}}{\alpha(f_a)} \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)^2\right] \exp\left[j2\pi f_{\text{fs}} \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] \\ &\cdot \exp[j\phi_{\text{res}}(f_a, R_0)] \end{aligned} \quad (11)$$

二次距离压缩和块移函数为:

$$\begin{aligned} H_{\text{SRC+BV}}(\tau, f_a) &= \exp\left[-j \frac{\pi K_{\text{mref}}}{\alpha(f_a)} \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)^2\right] \\ &\cdot \exp\left[j \frac{4\pi K_s}{c} R_c [\alpha(f_a) - 1] \left(\tau - \frac{2R_c}{c}\right)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

将式 (11) 乘以式 (12) 并转换到距离向频域:

$$\begin{aligned} \text{SS}_8(f_r, f_a) &= \text{sinc}\left\{B_r \left[ f_r + \frac{2K_r}{c} (R_0 + x_p \sin\theta_s - R_c) \right]\right\} \\ &\cdot \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{V}\right) \exp[j\phi_0(f_a, R_0)] \exp[j\phi_{\text{res}}(f_a, R_0)] \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $B_r$  为发射信号带宽. 剩余相位补偿表达式为:

$$H_{\text{rpc}}(f_a, R_0) = \exp\left[j \frac{\pi}{K_{\text{mref}}} \frac{\alpha(f_a) - 1}{\alpha(f_a)} (f_s - f_{\text{ref}})^2\right]$$

将  $H_{\text{rpc}}(f_a, R_0)$  乘入式 (13), 即可完成距离压缩:

$$\begin{aligned} \text{SS}_9(f_r, f_a) &= \text{sinc}\left\{B_r \left[ f_r + \frac{2K_s}{c} (R_0 + x_p \sin\theta_s - R_c) \right]\right\} \\ &\cdot \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{V}\right) \exp[j\phi_0(f_a, R_0)] \end{aligned} \quad (14)$$

由上式可见点目标位于斜距为  $R \triangleq R_0 + V t_d \sin\theta_s$  处.

### 3.5 方位压缩分析

距离压缩完成后, 将对回波信号进行方位向处理.

方位向信号由  $-2\pi f_a \frac{x_p}{V} + \phi_0(f_a, R_0)$  决定, 将其展开成  $f_a$  的泰勒级数:

$$\begin{aligned} \phi_2(f_a, R_0) &\approx -\frac{4\pi R_0}{\lambda} - 2\pi f_a \frac{x_p}{V} + \frac{\pi \lambda R_0}{2V^2 \cos^2 \theta_s} f_a^2 \\ &+ \frac{\pi \lambda^2 R_0 \sin\theta_s}{4V^3 \cos^4 \theta_s} f_a^3 + \dots \end{aligned}$$

将其代入式 (14), 并定义如式 (15) 所示. 为简便起见忽略了距离向包络.

$$\text{SS}_9(f_r, f_a) = \exp\left(-j2\pi f_a \frac{x_p}{V} - j \frac{\pi}{K_a} f_a^2 + j\phi_{3f_a}\right) \quad (15)$$

根据 3.4 中  $R$  的定义, 方位向调频率及三阶相位项可表示为:

$$\begin{cases} K_a = K_a(R, t_d) = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda (R - V \sin\theta_s t_d)} \\ \phi_3 = \phi_3(R, t_d) = \frac{\pi \lambda^2 (R - V \sin\theta_s t_d) \sin\theta_s}{4V^3 \cos^4 \theta_s} \end{cases}$$

可见方位向调频率  $K_a = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda R_0}$  由  $R_0$  决定. 而

距离压缩完成后, 方位向调频率是按  $R$  计算的, 它在不同方位向取值不同, 即具有方位向空变性. 无法直接进行方位向压缩. 文献<sup>[10]</sup>引入方位向扰动项, 来均衡方位向调频率, 然而会引起方位向几何扭曲, 需通过插值来完成扭曲校正, 影响了成像效率. 文献<sup>[9]</sup>采用 ANCS 的方法进行方位向调频率的校正, 使用复乘及 FFT 操作即可完成, 成像效率高. 本文将采用后一方法.

### 3.6 方位向三阶相位滤波

首先对式 (15) 中三阶相位项进行滤波. 因为在大斜视下方位向三阶相位不可忽略, 必须滤除以去除其影响. 设三阶相位滤波器为:

$$H_{3\text{ord}}(f_r, f_a) = \exp\left[j \frac{2\pi}{3} Y(R) f_a^3\right] \quad (16)$$

其中  $Y(R)$  为待定参数. 将其与式(15)相乘可得:

$$\text{SS}_{10}(f_r, f_a) = \exp\left[-j2\pi f_a \frac{x_p}{V} - j \frac{\pi}{K_a} f_a^2 + j \frac{2\pi}{3} Y_m(R) f_a^3\right] \quad (17)$$

其中  $Y_m(R) = Y(R) + \frac{3}{2\pi} \phi_3(R, t_d)$ . 由于三阶相位项空变性很小, 故用  $\phi_3(R, 0)$  对  $\phi_3(R_0, t_d)$  进行近似. 将式(17)转换到方位向时域可得式(18)以进行 ANCS 操作.

$$\text{SS}_{11}(f_r, t) = \exp\left[j\pi K_a (t - t_d)^2 + j \frac{2\pi}{3} Y_m K_a^3 (t - t_d)^3\right] \quad (18)$$

### 3.7 ANCS 操作

设 ANCS 操作的相位函数为:

$$H_{\text{NCS}}(t) = \exp[j\pi q_2(R) t^2 + j\pi q_3(R) t^3] \quad (19)$$

其中  $q_2(R)$  和  $q_3(R)$  为待确定参数. 将式(18)与式(19)相乘可得:

$$\text{SS}_{12}(f_r, t) = \exp\left[j\pi K_a (t - t_d)^2 + j \frac{2\pi}{3} Y_m K_a^3 (t - t_d)^3\right] \cdot \exp[j\pi q_2(R) t^2 + j\pi q_3(R) t^3] \quad (20)$$

为确定  $Y(R)$ 、 $q_2(R)$  和  $q_3(R)$ , 需将式(20)转换到二维频域, 可得:

$$\begin{aligned} \text{SS}_{13}(f_r, f_a) &= \exp\left[-j \frac{2\pi}{K_a + q_2} f_a (f_a + K_a t_d)\right] \\ &\cdot \exp\left[j \frac{\pi K_a (f_a - q_2 t_d)^2}{(K_a + q_2)^2} + j \frac{\pi q_2 (f_a + K_a t_d)^2}{(K_a + q_2)^2}\right] \\ &\cdot \exp\left[j \frac{2\pi Y_m K_a^3 (f_a - q_2 t_d)^3}{(K_a + q_2)^3} + j \frac{\pi q_3 (f_a + K_a t_d)^3}{(K_a + q_2)^3}\right] \quad (21) \end{aligned}$$

其中  $K_a = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda(R - V \sin \theta_s t_d)}$ . 式(21)是  $t_d$  和  $f_a$  的函数.

为了研究方位向调频率, 需将其展开成  $t_d$  和  $f_a$  的二元麦克劳林级数. 在此前先对  $K_a$  展开为  $t_d$  的泰勒级数.

$$\begin{aligned} K_a &\triangleq K_{\text{aref}} + K_{as} t_d = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda(R - V \sin \theta_s t_d)} \\ &\approx -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda R} - \frac{2V^3 \cos^2 \theta_s \sin \theta_s}{\lambda R^2} t_d \end{aligned}$$

将之代入式(21), 并将其展开为  $t_d$  和  $f_a$  的二元麦克劳林级数如式(22)所示.

$$\begin{aligned} \varphi_3(f_a, t_d) &= \frac{1}{3!} \frac{\pi(4Y_m K_{\text{aref}}^3 + 6q_3)}{(K_{\text{aref}} + q_2)^3} f_a^3 \\ &+ \frac{1}{3!} \left[ \frac{6\pi q_2^2 K_s}{(K_{\text{aref}} + q_2)^2} + \frac{\pi K_{\text{aref}}^3 (-4q_2^3 Y_m + 6q_3)}{(K_{\text{aref}} + q_2)^3} \right] t_d^3 \\ &+ \frac{3}{3!} \left[ \frac{4\pi K_s K_{\text{aref}}}{(K_{\text{aref}} + q_2)^2} - \frac{4\pi K_s}{K_{\text{aref}} + q_2} \right] t_d^2 f_a \\ &+ \frac{3}{3!} \left[ \frac{2\pi(2q_2^2 Y_m K_{\text{aref}}^3 + 3q_3 K_{\text{aref}}^2)}{(K_{\text{aref}} + q_2)^3} \right] t_d^2 f_a^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{3}{3!} \left[ \frac{2\pi K_s}{(K_{\text{aref}} + q_2)^2} + \frac{2\pi(-2q_2 Y_m K_{\text{aref}}^3 + 3q_3 K_{\text{aref}})}{(K_{\text{aref}} + q_2)^3} \right] t_d f_a^2 \\ &+ \frac{1}{2!} \left( -\frac{2\pi}{K_{\text{aref}} + q_2} f_a^2 + \frac{2\pi q_2 K_{\text{aref}}}{K_{\text{aref}} + q_2} t_d^2 - 2 \cdot \frac{2\pi K_{\text{aref}}}{K_{\text{aref}} + q_2} t_d f_a \right) \end{aligned} \quad (22)$$

其中只保留了用于确定待定参数  $Y(R)$ 、 $q_2(R)$  和  $q_3(R)$  的各项. 为去除方位向线性调频率的空变性, 上式中  $t_d f_a^2$  的系数应为零; 同时点目标在方位向不发生随  $t_d^2$  变化的距离弯曲, 则  $t_d^2 f_a$  前的系数应为零; 由于方位向位置位于  $t_d$ , 故  $t_d f_a$  前的系数应该为  $-2\pi$ , 为与 NCSA 一致, 可设其值为  $-\frac{2\pi}{\alpha}$ , 其中  $\alpha$  为一个常数, 其值的选择可参考文献[9]. 联立以上三式:

$$\begin{cases} \frac{K_{\text{aref}}}{K_{\text{aref}} + q_2} = \frac{1}{\alpha} \\ \frac{2K_{as} K_{\text{aref}}}{(K_{\text{aref}} + q_2)^2} + \frac{(2q_2^2 Y_m K_{\text{aref}}^3 + 3q_3 K_{\text{aref}}^2)}{(K_{\text{aref}} + q_2)^3} = \frac{2K_{as}}{K_{\text{aref}} + q_2} \\ \frac{K_{as}}{(K_{\text{aref}} + q_2)^2} + \frac{(-2q_2 Y_m K_{\text{aref}}^3 + 3q_3 K_{\text{aref}})}{(K_{\text{aref}} + q_2)^3} = 0 \end{cases}$$

求解即可确定  $Y(R)$ 、 $q_2(R)$  和  $q_3(R)$ :

$$\begin{cases} q_2 = (\alpha - 1) K_{\text{aref}} \\ Y_m = \frac{(\alpha - 0.5) K_{as}}{(\alpha - 1) K_{\text{aref}}^3} \\ q_3 = K_{as} (\alpha - 1) / 3 \end{cases}$$

将所求的待定系数代入式(21)可得:

$$\begin{aligned} \text{SS}_{13}(f_r, f_a) &= \exp\left(-j2\pi \frac{t_d}{\alpha} f_a\right) \exp\left(-j \frac{\pi}{\alpha K_{\text{aref}}} f_a^2\right) \\ &\cdot \exp\left[j \frac{1}{3} \frac{\pi K_{as}}{\alpha (\alpha - 1) K_{\text{aref}}^3} f_a^3\right] \exp\left[j \frac{\pi (\alpha - 1) K_{\text{aref}} t_d^2}{\alpha}\right] \\ &\cdot \exp\left[j \frac{\pi (\alpha - 1) K_{as} t_d^3}{3\alpha}\right] \quad (23) \end{aligned}$$

第一个指数项表明点目标方位向位于  $\frac{t_d}{\alpha}$ ; 第二个指数项表明方位向调频率与  $K_{\text{aref}} = -\frac{2V^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda R}$  及  $\alpha$  有关, 与点目标方位位置无关, 已去除空变性; 第三个指数项为三阶相位项, 需要补偿; 第四及第五个指数项为剩余相位项, 可以忽略.

### 3.8 方位压缩

方位向压缩函数为:

$$H_{\text{AC}}(f_r, f_a) = \exp\left(j \frac{\pi}{\alpha K_{\text{aref}}} f_a^2\right) \exp\left[-j \frac{1}{3} \frac{\pi K_{as}}{\alpha (\alpha - 1) K_{\text{aref}}^3} f_a^3\right] \quad (24)$$

将式(23)乘以式(24)完成方位压缩:

$$\text{SS}_{14}(f_r, f_a) = W_a(f_a) \exp\left(-j2\pi \frac{t_d}{\alpha} f_a\right) \quad (25)$$

将式(25)转换到方位向时域, 可获得最终的成像结

果如式(26)所示,其中  $B_a$  为多普勒带宽.

$$SS_{15}(f_r, t) = \text{sinc}\left\{B_r\left[f_r + \frac{2K_r}{c}(R_0 + x_p \sin\theta_s - R_c)\right]\right\} \cdot \text{sinc}\left[B_a\left(t - \frac{t_d}{\alpha}\right)\right] \quad (26)$$

### 3.9 几何校正

由式(26)可见点目标位于  $(R_0 + x_p \sin\theta_s, \frac{x_p}{\alpha})$  处,无论是距离向还是方位向均存在几何形变,需进行几何校正<sup>[11]</sup>.

## 4 数据仿真及分析

本节将对相同场景回波采用 FSA, NFTA 及本文算法分别进行成像仿真,并对它们的成像结果进行比较.仿真所使用的雷达平台及场景参数如表 1 所示.斜视角  $\theta_s = 50^\circ$ .分辨率为 1m,而不是更高的 0.5m 或 0.1m,是为了避免仿真数据量过大的问题.考虑斜视角方位分辨率为 1.6523m.

表 1 机载大斜视聚束 SAR 仿真参数

参数	值	参数	值
飞行高度	5000m	天线尺寸	4m
飞行速度	100m/s	聚束孔径	929m
载波频率	2.7GHz	PRF	110Hz
距离分辨率	1m	方位分辨率	1m
斜视角 $\theta_s$	$50^\circ$		

场景中点目标位置如图 3 所示.其中点目标 5 为场景中心.点目标 1~3 具有相同的斜距  $R_n = 12200\text{m}$ ;点目标 4~6 具有相同的斜距  $R_c = 12400\text{m}$ ;点目标 7~9 具有相同的斜距  $R_f = 12600\text{m}$ .点目标 1,4,7 方位向坐标为  $x_p = -100\text{m}$ ;点目标 2,5,8 方位向坐标为  $x_p = 0\text{m}$ ;点目标 3,6,9 方位向坐标为  $x_p = 100\text{m}$ .

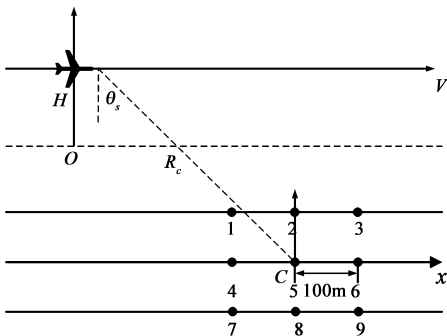


图 3 大斜视聚束 SAR 成像几何场景

对目标场景回波分别采用 FSA, NFTA 及本文提出算法进行成像.并将点目标成像结果取出来,进行 4 倍的升采样,以获得各点目标成像细节图,如图 4、5 所示.

图 4 给出了三种成像算法下相同斜距不同方位向

点目标 4、5、6 的成像结果.图 5 给出了同方位不同斜距处点目标 2、5、8 的成像结果.根据它们可以计算出各成像算法下点目标成像的性能参数,如表 2 所示.下面对各成像算法的性能进行分析和比较.

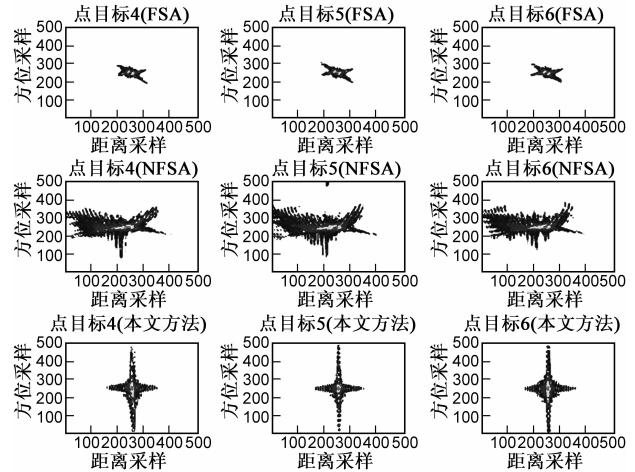


图 4 同斜距不同方位位置点目标成像结果细节

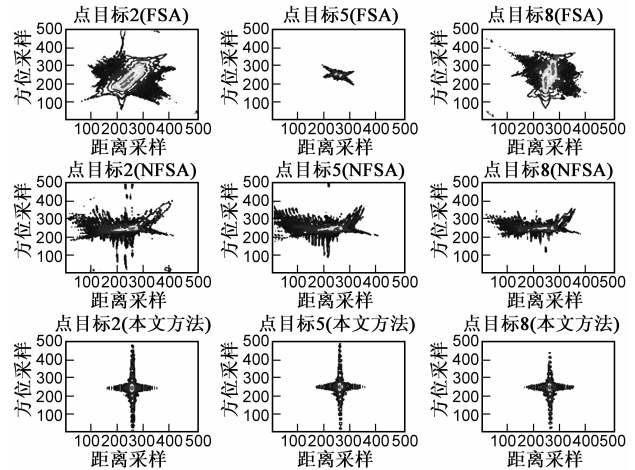


图 5 同方位不同斜距处点目标成像结果细节

FSA 算法的成像结果如图 4、图 5 的第一行所示.从图及性能参数可见,FSA 算法只有和场景中心具有相同斜距的各点(点 4、6)成像分辨率达到或接近理想分辨率;而其它点(点 2、8),无论是距离向还是方位向,均出现了非常明显的散焦现象.这是因为 FSA 算法未考虑二次距离压缩项的空变性.大斜视下忽略二次距离压缩的空变性,导致远离参考点的目标距离向成像结果散焦;距离向散焦进一步造成方位向成像结果散焦.可见,大斜视下 FSA 的成像性能急剧下降.

NFTA 算法成像结果如图 4、图 5 的第二行所示.各点的分辨率较 FSA 有较明显改善,无非常明显散焦现象.NFTA 成像算法在距离压缩中,只考虑了距离向线性调频率一阶近似;且只考虑了三阶相位误差项.然而大斜视下未经过距离走动校正,需考虑更高阶相位项;且

需考虑距离向线性调频率更为精确的近似. 这导致了 NFSA 算法大斜视下成像性能下降.

本文提出算法的成像结果如图 4、图 5 最后一行所示. 可见, 所有点目标的距离向和方位向分辨率均达到或接近了理想分辨率. 这是因为在进行距离向压缩前, 首先对距离走动进行了校正, 较大程度上对距离向与方位向的耦合进行了解耦. 在后续的处理中, 如 FS 操作, 二次距离压缩等均未考虑空变性, 即便如此仍能获得目标的精确成像. 在距离和方位峰值旁瓣比方面, 未加窗的情况下, 本文提出的算法, 各点目标也均达到或接近理想值.

综合上述分析可见, 本文提出的方法更适合于大斜视聚束 SAR 的精确聚焦.

表 2 点目标成像性能分析

参数	目标	FSA	NFSA	本文方法
距离分辨率(m)	T2	4.0	3.2	1.1
	T4	1.2	2.5	1.0
	T5	1.2	2.4	1.0
	T6	1.2	2.4	1.0
	T8	4.3	2.1	1.0
方位分辨率(m)	T2	10.2	2.1	1.6
	T4	1.6	1.7	1.8
	T5	1.9	1.7	1.5
	T6	1.6	1.4	1.7
	T8	18.2	1.3	1.5
距离峰值旁瓣比(dB)	T2	-2.2	-7.3	-13.6
	T4	-31.5	-8.7	-12.6
	T5	-30.5	-6.6	-13.0
	T6	-31.7	-5.2	-12.6
	T8	-7.0	-8.7	-13.2
方位峰值旁瓣比(dB)	T2	-1.4	-21.1	-10.1
	T4	-24.2	-22.3	-8.5
	T5	-20.9	-25.5	-10.8
	T6	-21.7	-8.7	-13.5
	T8	-10.6	-12.7	-10.2

## 5 总结

本文对大斜视下解斜接收聚束 SAR 的成像提出了一种新方法. 首先对大斜视下目标回波进行去除距离走动的处理, 较大程度上去除距离向与方位向耦合; 通过 FS 操作进行距离弯曲的一致校正; 并进行二次距离压缩、块移及相位补偿完成距离压缩. 在方位压缩方面, 由于进行了距离走动校正, 采用 ANCS 方法来调整

方位向线性调频率空变性, 并最终完成方位向压缩. 数据仿真表明, 本文所提出的方法比传统 FSA 算法及 NFSA 算法, 更适合于大斜视下解斜接收聚束 SAR 的成像处理.

## 参考文献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Norwood: Artech House, 1995. 15 - 16.
- [2] 皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生, 杨晓波. 合成孔径雷达成像原理 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007. 47 - 48.  
Pi Y M, Yang J Y, Fu Y S, Yang X B. Imaging Theory of Synthetic Aperture Radar [M]. Chengdu: UESTCP, 2007. 47 - 48. (in Chinese)
- [3] Alberto Moreira, Josef Mittermayer, Rolf Scheiber. Extended chirp scaling SAR data processing in stripmap, scanSAR and spotlight imaging modes [A]. Proc EUSAR2000 [C]. Munich Germany: VDE, 2000. 23 - 25
- [4] Josef Mittermayer, Alberto Moreira, et al. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2198 - 2213.
- [5] 孙进平, 袁运能, 柳重堪. 斜视聚束模式合成孔径雷达的频率 Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1593 - 1596.  
Sun J P, Yuan Y N, Liu Z K. High squint spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1593 - 1596. (in Chinese)
- [6] 王国栋, 周萌清, 李春升. 星载聚束式 SAR 改进的 Frequency Scaling 成像算法 [J]. 电子学报, 2003, 31(3): 381 - 385.  
Wang G D, Zhou M Q, Li C S. Refined frequency scaling algorithm for spaceborne spotlight SAR imaging [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(3): 381 - 385. (in Chinese)
- [7] Lihua Jin, XingZhao Liu. Nonlinear frequency scaling algorithm for high squint spotlight SAR data processing [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2008, 2008: 1 - 8.
- [8] G W Davidson, I G Cumming, M R Ito. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1): 121 - 133.
- [9] D X An, XT Huang, T Jin, Z M Zhou. Extended nonlinear chirp scaling algorithm for high - resolution highly squint SAR data focusing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(9): 3595 - 3609.
- [10] Frank H Wong, Tat Soon Yeo. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(5): 946 - 953.

- [11] Zongjie Cao, Lijia Chen. Security in application layer of radar sensor networks: detect friends or foe[J]. Security and Communication Networks, 2012, 6(5): 35 - 40.

### 作者简介



**左伟华** 男, 1980 年 10 月生于湖南衡阳. 2002 年毕业于湖南大学, 获工学学士学位. 2007 年毕业于桂林电子科技大学, 获工学硕士学位. 2007 年至今工作于湖南怀化学院物理与信息工程系. 2010 年至今为电子科技大学电子工程学院博士研究生. 主要研究方向为高分辨率宽测绘带合成孔径雷达成像模式及算法研究.

E-mail: kingso801021@163.com



**皮亦鸣** 男, 1968 年 10 月生于贵州. 电子科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员. 2005 年入选教育部新世纪优秀人才支持计划. 研究领域包括雷达信号处理、图像传输与处理、导航定位技术等.

E-mail: ympi@uestc.edu.cn



**闵锐** 男, 1978 年生于四川成都. 2012 年获电子科技大学工学博士学位. 主要研究领域包括合成孔径雷达成像算法, 压缩感知理论等.

E-mail: minrui@uestc.edu.cn