

## 双站 SAR NCS 成像算法

汪 枫<sup>①</sup> 汤子跃<sup>①</sup> 朱振波<sup>②</sup> 张亚标<sup>②</sup>  
<sup>①</sup>(空军雷达学院信息与指挥自动化系 武汉 430029)  
<sup>②</sup>(海军工程大学 武汉 430033)

**摘要:** 针对双站 SAR 的大斜视工作模式, 该文在双站 SAR 回波模型和 RD 域距离方程的基础上, 结合常规 SAR 的 NCS 算法, 提出了一种基于双站 SAR 大斜视模式下的 NCS 算法, 详细分析了算法中关于多普勒质心的方位模糊及距离向成像位置这两个关键问题。最后通过计算机仿真, 验证了该算法的有效性。

**关键词:** 双站 SAR; NCS 算法; 多普勒模糊; 斜视模式

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2098-03

## The Nonlinear Chirp Scaling Algorithm for Bistatic SAR Imaging

Wang Feng<sup>①</sup> Tang Zi-yue<sup>①</sup> Zhu Zhen-bo<sup>②</sup> Zhang Ya-biao<sup>②</sup>  
<sup>①</sup>(Department of Information & Command Automation, Air Force Radar Academy, Wuhan 430029, China)  
<sup>②</sup>(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** To the big squint mode of bistatic SAR system, based on the echo model of bistatic SAR and range equation in RD area, properly to with the NCS algorithm of conventional SAR, this paper proposes NCS algorithm for squint-looking bistatic SAR, and carefully analysis two key problems in this algorithm: azimuth ambiguity of Doppler center and imaging position in range direction. Finally, it is proved to be valid by the simulation results.

**Key words:** Bistatic Synthetic Aperture Radar(SAR); Nonlinear Chirp Scaling(NCS) algorithm; Doppler ambiguity; Squint-looking mode

### 1 引言

双站 SAR 是指发射系统和接收系统安装在不同载体上的 SAR 系统。它具有灵活的配置方式和成像模式, 如平飞正侧视、跟随模式等, 可以充分利用目标的散射特性(包括非后向散射信息)来进行成像, 获取的信息比常规 SAR 丰富, 还可以对关注的区域进行跟踪成像, 具有很大的军事应用潜力。由于收、发分离, 双站 SAR 在成像处理算法方面有其特殊性。目前, 常规 SAR 斜视成像算法的研究比较成熟, 有 ECS, NCS,  $\omega-k$  和 BP 算法等, 其中 NCS 算法较精确地反映了多普勒调频率的空变性<sup>[1-4]</sup>, 能适应大斜视角下 SAR 的成像要求。但是双站 SAR 的大斜视成像算法研究文献较少, 本文在常规 SAR 的 NCS 算法基础上, 提出了双站 SAR 的 NCS 算法。首先进行双站 SAR 大斜视成像回波模型的分析, 给出双站 SAR 的 NCS 算法流程及其关键步骤的补偿因子, 然后详细讨论了算法中关于多普勒质心的方位模糊及距离向成像位置这两个关键问题, 最后通过计算机仿真, 验证了该算法的有效性。

### 2 双站 SAR 斜视成像模型

机载双站 SAR 平飞斜视具体的孔径合成关系如图 1 所示。设发射载机和接收载机分别以速度  $v_{Ta}$  和  $v_{Ra}$  作匀速直线飞行; 收、发波束以斜视方式同步照射待成像区域。发射波束的斜视角为  $\alpha_T$ , 接收波束的斜视角为  $\alpha_R$ 。P 点(测绘带

中心线上)为  $t = 0$  时刻的场景中心, 发射天线和接收天线相位中心到 P 点的距离分别为  $R_{T0}$  和  $R_{R0}$ , 此时, 雷达收、发天线相位中心到 P 点的距离和为

$$R(t; R_{T0}, R_{R0}) = \sqrt{R_{T0}^2 + v_{Ta}^2 \cdot t^2 - 2R_{T0} \cdot (v_{Ta}t) \cdot \sin \alpha_T} + \sqrt{R_{R0}^2 + v_{Ra}^2 \cdot t^2 - 2R_{R0} \cdot (v_{Ra}t) \cdot \sin \alpha_R} \quad (1)$$

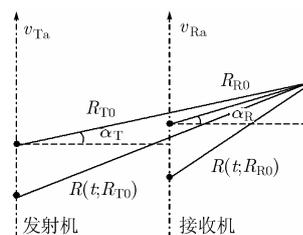


图 1 机载双站 SAR 平飞斜视模式的孔径合成关系  
将  $R(t; R_{T0}, R_{R0})$  按泰勒级数展开, 取前 4 项的结果如下:

$$R(t) = R_{T0} + R_{R0} - (v_{Ta} \cdot \sin \alpha_T + v_{Ra} \cdot \sin \alpha_R) \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_{Ta}^2 \cdot \cos^2 \alpha_T}{R_{T0}} + \frac{v_{Ra}^2 \cdot \cos^2 \alpha_R}{R_{R0}} \right) \cdot t^2 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_{Ta} \cdot \sin \alpha_T}{R_{T0}^2} + \frac{v_{Ra} \cdot \sin \alpha_R}{R_{R0}^2} \right) \cdot t^3 \quad (2)$$

由式(2)可以得到其相应的多普勒质心  $f_{dc}$ , 多普勒调频斜率  $f_{dr}$  分别为

$$f_{dc} = \frac{1}{\lambda} \cdot (v_{Ta} \cdot \sin \alpha_T + v_{Ra} \cdot \sin \alpha_R) \quad (3)$$

$$f_{dr} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left( \frac{v_{Ta}^2 \cdot \cos^2 \alpha_T}{R_{T0}} + \frac{v_{Ra}^2 \cdot \cos^2 \alpha_R}{R_{R0}} \right) \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为发射信号的波长,  $d_{Ra}$  为接收天线的方位向尺寸。

利用相位驻留原理, 还可以得到其在 RD 域内的距离方程为

$$R(f_t) = R_{T0} + R_{R0} + \frac{\lambda^2 f_t^2}{2} \left( \frac{v_{Ta}^2}{R_{T0}} + \frac{v_{Ra}^2}{R_{R0}} \right)^{-1} - \frac{(v_{Ta} \cdot \sin \alpha_T + v_{Ra} \cdot \sin \alpha_R)^2}{2} \left( \frac{v_{Ta}^2}{R_{T0}} + \frac{v_{Ra}^2}{R_{R0}} \right)^{-1} \quad (5)$$

其中  $f_t$  表示方位向频率。

### 3 双站 SAR 的 NCS 算法

NCS 算法, 既考虑了距离压缩的调频斜率随多普勒频率的变化, 也考虑了其随距离的线性变化, 其通过在 RD 域引入非线性调频参考信号, 将不同距离上的距离徙动轨迹校正成一致, 在二维频域同时完成距离徙动校正、距离压缩和二次距离压缩。在整个处理过程中, NCS 算法只用到了两种操作: 傅里叶变换和复数相乘, 这就避免了插值的运算, 提高了计算的效率。从而使 NCS 算法处理的斜视角数据的性能大大提高。根据双站 SAR 回波信号的特点, 结合常规 SAR 的 NCS 算法<sup>[3,4]</sup>, 推导出双站 SAR 的 NCS 成像算法, 图 2 给出了双站 SAR 的 NCS 算法流程图, 其关键步骤和补偿因子如下:

(1) 回波信号 假设雷达发射的是线性调频信号, 调频斜率为  $K$ , 其回波信号为

$$S_r(\tau, t; R_{T0}, R_{R0}) = A \cdot \exp \left\{ -j\pi K \left[ \tau - \frac{2R(t; R_{T0}, R_{R0})}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j\frac{2\pi}{\lambda} R(t; R_{T0}, R_{R0}) \right\} \quad (6)$$

式中  $c$  为光速。  $A$  为信号的包络。

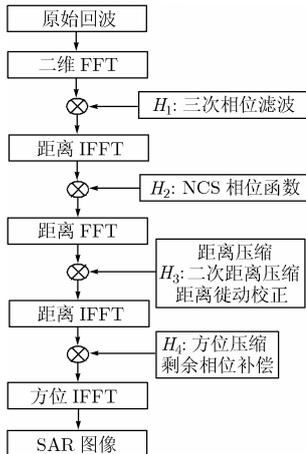


图 2 NCS 算法的流程图

(2)  $H_1(f_r, f_t; R_{ref})$  因子 对回波信号进行二维 FFT, 得二维频域的信号, 然后沿距离向与一调频斜率为  $Y(f_t)$  的非线性调频因子  $H_1(f_r, f_t; R_{ref})$  相乘, 用于三次相位滤波。

$$H_1(f_r, f_t; R_{ref}) = \exp \left\{ j\frac{2\pi}{3} \cdot Y(f_t) \cdot f_r^3 \right\} \quad (7)$$

$$Y(f_t) = Y_m(f_t) - \frac{3}{2\pi} \cdot \phi_s(f_t; R_{ref}) \quad (8)$$

$$\phi_s(f_t; R_{T0}, R_{R0}) = -\frac{\pi \cdot \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta (R_{T0} + R_{R0})}{c^3 \cdot \cos^5 \theta} \cdot \frac{1}{2v_s} \cdot \sqrt{4v_s^2 - (v_{Ta} \sin \alpha_T + v_{Ra} \sin \alpha_R)^2} \quad (9)$$

其中  $\phi_s(f_t; R_{T0}, R_{R0})$  为对二维频域信号进行泰勒展开时的三次项;  $R_{ref}$  为参考距离, 选为航线到条带场景中心线的最短距离;  $v_s$  为等效速度;  $\beta$  为校正系数;  $K_r(f_t; R_{ref})$  为参考距离处的等效调频斜率;  $K_s(f_t)$  为等效调频斜率在参考距离处随距离的变化率。

$$v_s = \frac{1}{2} \left( \frac{R_{T0}^2 \cdot v_{Ra}^2 + R_{R0}^2 \cdot v_{Ta}^2}{R_{R0} \cdot R_{T0}} + v_{Ta}^2 + v_{Ra}^2 - \frac{[R_{T0} v_{Ra} \sin \alpha_R + R_{R0} v_{Ta} \sin \alpha_T]^2}{R_{R0} \cdot R_{T0}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_{ref}}{2v_s} \right)^2} / \cos \theta \quad (11)$$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_t}{2v_s} \right)^2} \quad (12)$$

其中  $f_{ref}$  为参考频率。

$$Y_m(f_t) = \frac{K_s(f_t)(\beta - 0.5)}{K_r^3(f_t; R_{ref}) \cdot (\beta - 1)} \quad (13)$$

$$K_r(f_t; R_{ref}) = \frac{K}{1 + \frac{2\lambda K \cdot R_{ref}}{c^2} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\cos^3 \theta}} \quad (14)$$

$$K_s(f_t) = \frac{K_r^2(f_t; R_{ref}) \cdot \sin^2 \theta}{f_c \cdot \cos^2 \theta} \quad (15)$$

(3)  $H_2(\tau, f_t; R_{ref})$  因子 对于进行三次相位滤波后的信号, 沿距离向 IFFT 变换到 RD 域, 乘以 NCS 因子  $H_2(\tau, f_t; R_{ref})$ , 进行 NCS 处理, 将不同距离徙动的信号校正成一致, 便于距离向处理。

$$H_2(\tau, f_t; R_{ref}) = \exp \left\{ -j\pi q_2(f_t) \cdot [\tau - \tau_d(f_t; R_{ref})]^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j\frac{2}{3} \pi \cdot q_3(f_t) \cdot [\tau - \tau_d(f_t; R_{ref})]^3 \right\} \quad (16)$$

$$q_2(f_t) = K_r(f_t; R_{ref}) \cdot (\beta - 1) \quad (17)$$

$$q_3(f_t) = \frac{K_s(f_t) \cdot (\beta - 1)}{2} \quad (18)$$

$$\tau_d(f_t; R_{ref}) = \frac{2}{c} \cdot \frac{R_{ref}}{\cos \theta} \quad (19)$$

(4)  $H_3(f_r; f_t; R_{ref})$  因子 将完成 NCS 处理的信号, 乘以  $H_3(f_r; f_t; R_{ref})$  因子进行距离徙动校正, 距离压缩和二次距离压缩。

$$H_3(f_r; f_t; R_{ref}) = \exp \left\{ j2\pi [\tau_d(f_t; R_{ref}) - \tau_d(f_{ref}; R_{ref})] \cdot f_r \right\} \cdot \exp \left\{ -j\frac{\pi \cdot f_r^2}{\beta \cdot K_r(f_t; R_{ref})} \right\} \quad (20)$$

(5)  $H_4(\tau; f_i; R)$  因子对完成距离向处理后的信号,沿距离向 IFFT 变换到方位频域,乘以  $H_4(\tau; f_i; R)$  因子进行方位向处理,即完成方位压缩和剩余相位的补偿。

$$H_4(\tau; f_i; R) = \exp \left\{ j\pi f_i \cdot \frac{(R_{T0} + R_{R0}) \cdot (v_{Ta} \cdot \sin \alpha_T + v_{Ra} \cdot \sin \alpha_R)}{2v_s} \right\} \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_i}{2v_s} \right)^2} - 1 \right] \right\} \cdot \exp \{-j\Delta\phi(f_i; R)\} \quad (21)$$

其中剩余相位  $\Delta\phi(f_i; R)$  为

$$\Delta\phi(f_i; R_c) = -\pi K_r(f_i; R_c) \cdot \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) \cdot \Delta\tau^2(f_i; R_c) - \frac{\pi}{3} K_s(f_i) \cdot \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) \cdot \Delta\tau^3(f_i; R_c) \quad (22)$$

$$\Delta\tau(f_i; R_c) = \tau_d(f_i; R_c) - \tau_d(f_i; R_{ref}) = \frac{2}{c} \cdot \frac{R_c}{\cos \theta} - \frac{2}{c} \cdot \frac{R_{ref}}{\cos \theta} \quad (23)$$

上述四项因子处理完后,再进行方位向 IFFT 就可得到 SAR 图像。

#### 4 双站 SAR 的 NCS 算法中的关键点

(1) 多普勒质心的方位模糊问题 参考式(3),可知当斜视角增大时,方位向频率将超出 PRF 所能表示的范围,产生了多普勒质心的方位模糊,方位频率  $[-PRF/2, PRF/2]$  不能表示其真实的频率范围,还有可能产生频谱分裂的问题。这对算法中在方位频域处理带来麻烦,甚至使方位向处理失效,不能得到聚焦的图像。解决的方法可以用解多普勒模糊<sup>[5]</sup>和解频谱分裂的方法。本文利用一种简单而有效的方法,其步骤如下:从回波中利用参数估计的方法,估计出多普勒质心;将回波信号的方位谱搬移到多普勒质心处,即将回波方位向信号在时域上乘一固定频率的信号,这样方位向上频率的范围就表征了真实的频率值为  $[f_{dc} - PRF/2, f_{dc} + PRF/2]$ 。

(2) NCS 算法中点目标的距离向成像位置 NCS 算法中点目标的距离向成像位置和其它算法不同,有其自身的特点。距离向成像的位置:

$$R = \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda f_{ref}}{2v_s} \right)^2} \cdot \frac{(R_{T0} + R_{R0})}{4v_s} \cdot \sqrt{4v_s^2 - (v_{Ta} \sin \alpha_T + v_{Ra} \sin \alpha_R)^2} \quad (24)$$

因此在方位向压缩处理时,目标距离向位置应由式(24)得到,而且不同的参考频率会引起目标距离位置的变化,参考频率的选择<sup>[3]</sup>和常规 SAR 的 NCS 算法选择准则一致,这里不再重复。

#### 5 双站 SAR 的 NCS 算法仿真

前面推导了斜视模式双站 SAR 系统下的 NCS 成像算法,下面给出的是采用 NCS 算法进行的双站 SAR 成像仿真结果。

仿真中系统参数:信号带宽, 67.7MHz; 脉冲重复频率, 200Hz; 脉冲宽度, 20  $\mu$ s; 载机速度, 55.8m/s; 发射载机高度, 6km; 接收载机高度, 3km。接收机的斜视角分别为 10°, 20°和 30°的情况下, NCS 算法对点目标的成像结果如图 3, 其成像性能指标<sup>[5]</sup>的比较见表 1。

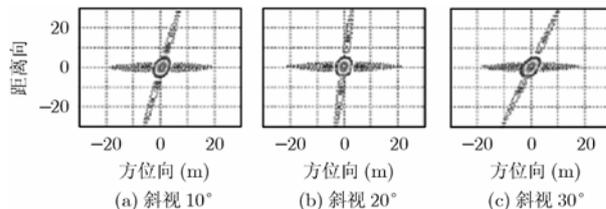


图3 点目标成像结果

表1 理想点目标的脉冲响应指标

斜视 角度 (°)	ISLR (dB)	PSLR (dB)	SSLR (dB)	分辨率(m)	
				距离 向	方位 向
10	-13.59	-42.95	-44.38	2.35	1.6
20	-13.57	-42.53	-44.09	2.48	1.65
30	-11.94	-42.01	-43.97	2.83	1.69

#### 6 结束语

本文双站 SAR NCS 成像算法,对点目标进行了成像仿真,理论分析和仿真结果证明在大斜视角的情况下,双站 SAR NCS 成像算法的有效性。因此,解决了双站 SAR 在大斜视模式下的成像问题,对双站 SAR 的工程实现有一定的意义。双站 SAR 各种系统误差对该算法的影响是下一步研究的方向。

#### 参考文献

- [1] 程玉平. 一种改进的非线性 CS 成像算法. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2000, 27(3): 273-277.
- [2] 刘光炎, 黄顺吉. 非线性 CS 算法的前斜视 SAR 成像. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1308-1315.
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005: 157-165.
- [4] Davidson G W, Cumming I G, and Tito M. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [5] 刘永坦. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 76-80, 166-171.

汪 枫: 女, 1974 年生, 硕士, 讲师, 研究方向为合成孔径雷达系统及成像算法。

汤子跃: 男, 1966 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统、雷达信号处理、SAR 成像及信息处理等领域的研究。

朱振波: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为双站合成孔径雷达系统及成像技术。

张亚标: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达和逆合成孔径雷达系统及成像技术。