

基于方位谱分析的斜视 TOPS SAR 子孔径成像方法

杨 军* 孙光才 吴玉峰 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: 斜视 TOPS SAR 成像处理需要解决 3 大问题: 方位频谱混叠, 距离和方位耦合严重, 方位输出时域混叠。针对上述问题, 该文提出一种基于谱分析的子孔径成像处理方法。首先对子孔径数据在时域适当进行扩展并获取无模糊的 2 维频谱, 然后采用修正的距离徙动算法进行距离徙动校正和距离脉冲压缩, 最后在方位频域对子孔径信号进行拼接处理, 获得全孔径信号无模糊的方位频谱并结合谱分析技术将信号聚焦在方位频域。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 斜视 TOPS SAR; 子孔径处理; 修正的距离徙动算法; 谱分析

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)04-0923-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00673

A Subaperture Imaging Algorithm for Squint TOPS SAR Based on SPECAN Technique

Yang Jun Sun Guang-cai Wu Yu-feng Xing Meng-dao

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Squint Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) SAR imaging mode is confronted with three issues: azimuth spectrum aliasing, severe range-azimuth coupling and azimuth time output aliasing. To solve these issues, a subaperture imaging algorithm is proposed based on the SPECtral ANALysis (SPECAN) technique. Firstly, the subaperture data is expanded in the azimuth time domain and the two-dimensional spectrum free from aliasing can be obtained. Then the modified Range Migration Algorithm (RMA) is used to complete Range Cell Migration Correction (RCMC) and range compression. After that, the full-aperture azimuth spectrum can be derived by subaperture recombination. Finally, the signal is focused in the Doppler domain by the SPECAN technique. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR; Squint Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS) SAR; Subaperture processing; Modified Range Migration Algorithm (RMA); Spectral analysis

1 引言

ScanSAR 和 TOPS SAR 是实现宽测绘带的两种常见 SAR 成像模式。ScanSAR 通过周期性地调整波束在俯仰维的指向来获得距离向宽测绘带, 但是由于波束在方位维的不连续性使得图像在方位向存在明显的扇贝效应^[1]。TOPS SAR 通过在方位维的波束扫描来获得方位向宽测绘带, 同时克服了 ScanSAR 模式存在的上述缺陷。由于 TOPS SAR 的这些优点, 该成像模式成为近几年的研究热点^[2-6]。2007 年, TerraSAR-X 系统进行了 TOPS SAR 模式的数据录取并成功处理得到了聚焦图像及干涉结果^[7-9], 该模式也将成为 Sentinel-1 卫星的基本模式之一^[10]。TOPS SAR 由于波束指向的变化, 导致扫描场景回波信号的方位带宽急剧增大, 通常

大于系统的脉冲重复频率, 因此全孔径回波信号在方位频域是混叠的; 另外在 TOPS SAR 模式下, 扫描周期内场景的方位测绘带要远大于平台运行距离, 因此距离徙动校正后的信号在方位时域是模糊的。上述问题都给 TOPS SAR 模式成像处理带来了困难。正侧视 TOPS SAR 模式只对雷达平台正侧方的区域进行扫描, 限制了其应用前景。若雷达能工作在斜视模式, 则可以实现更大范围的监视和快速重访, 也可以提前发现目标, 大大提高了雷达的灵活性和安全性, 扩大了应用范围。斜视 SAR 特殊的成像几何特性决定了回波信号存在严重的距离徙动, 这导致距离向和方位向的耦合严重。因此斜视 TOPS SAR 同时具有斜视模式距离向和方位向强耦合的特性及 TOPS SAR 方位模糊特性, 这都增加了成像处理的难度。

从现有文献看, 针对 TOPS SAR 成像方法的研究主要还集中于正侧视, 归纳起来可以分为两类:

2013-05-16 收到, 2013-08-30 改回

国家自然科学基金(61222108, 61301292)资助课题

*通信作者: 杨军 yangjun_kx@163.com

子孔径成像方法及全孔径成像方法。在子孔径成像方法中,方位信号被分成多个子孔径信号,保证每个子孔径方位信号的带宽都小于系统脉冲重复频率,然后进行距离徙动校正及距离脉冲压缩,最后在方位时域拼接并进行聚焦处理^[11]。全孔径算法首先进行方位向预处理,以获得无模糊的信号频谱,然后采用传统的 SAR 成像算法进行距离徙动校正及距离脉冲压缩^[12-14]。针对斜视 TOPS SAR 的成像算法研究较少,文献[15]中提出了一种全孔径的成像处理算法,通过方位预处理获得信号无模糊的 2 维频谱;然后采用修正的线性变标算法进行距离徙动校正;最后在频域采用非线性变标算法及谱分析技术将目标聚焦在方位频域并进行几何形变校正。

本文提出一种斜视 TOPS SAR 子孔径成像方法。首先对子测绘带回波数据进行子孔径划分并在时域适当进行扩展,获取子孔径回波信号无模糊的 2 维频谱后,采用修正的距离徙动算法对每个子孔径的数据进行距离徙动校正和距离脉冲压缩,最后在方位频域对子孔径信号进行拼接处理,获得全孔径信号无模糊的方位频谱,结合谱分析技术将信号聚焦在方位频域。相比文献[15]中的全孔径成像算法,本文提出的子孔径算法不需要进行几何形变校正,另外该算法中是以航向为坐标轴建立的直角坐标系,便于子测绘带图像拼接形成大场景图像。

2 斜视 TOPS SAR 成像几何及信号模型

图 1 所示为斜视 TOPS SAR 成像几何示意图,图中只画出了其中一个子测绘带。平台以速度 v 作匀速直线运动。 O 点为全孔径中心时刻雷达平台所处的位置,雷达与场景中心的距离为 R_s ,扫描周期的中间时刻波束中心斜视角为 θ_0 。天线波束宽度为 θ_{bw} ,子测绘带回波数据录取过程中雷达从 M 点运动到 N 点,相应的波束指向从 θ_1 以旋转角速度 ω 匀速变化到 θ_2 。以 O 点为坐标原点,雷达航向为横轴,建立如图 1 所示的直角坐标系,那么雷达的位置可以表示为 $(vt_a, 0)$,其中 t_a 为方位慢时间。由图 1 的几何关系可知,对于不同方位位置的点目标,其经历的波束扫描角度是不一样的,因此其方位频谱支撑区也是不一样的。图 2 为斜视 TOPS SAR 子测绘带中点目标方位信号的时频关系图,其中两条斜虚线的中间区域表示场景的时频分布区,粗实线为场景点目标的时频线。用 B_i 表示瞬时带宽,脉冲重复频率 PRF 稍大于 B_i , T_a 为方位全孔径时间, B_a 为全孔径回波信号的方位带宽。从图 2 可以看出,点目标多普勒中心随方位位置变化,导致整个场景的方位带宽增加,因此子测绘带回波信号在方位频域是模糊的。对全孔径的数据进行适当分块,可以使子孔径数据在方位频域不模糊。

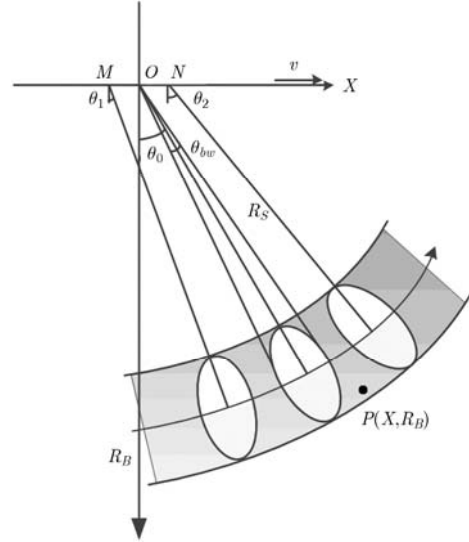


图 1 斜视 TOPS SAR 成像几何示意图(单子测绘带)

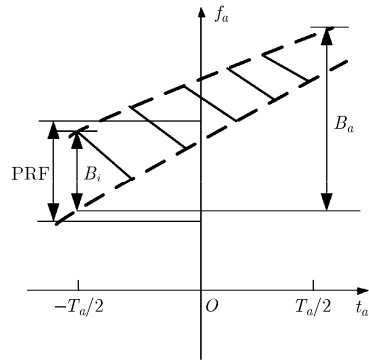


图 2 斜视 TOPS SAR 点目标方位信号时频关系图

以子孔径中心时刻为坐标原点,以航向为 X 轴建立坐标系。对于子测绘带中的点目标 $P(X, R_B)$,雷达发射线性调频信号,则其基带回波信号在距离频域可表示为

$$S_{\text{ech}}(f_r, t_a) = A_r(f_r) a_a(t_a - t_0) \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} R(t_a; R_B)(f_r + f_c)\right) \quad (1)$$

其中 f_r 为距离频率, c 为光速, γ 为发射信号调频率, f_c 为雷达载频, t_0 为波束中心指向 P 点时的方位时刻。 $A_r(\cdot)$ 和 $a_a(\cdot)$ 分别表示线性调频信号的距离频域窗函数和方位时域窗函数, $R(t_a; R_B)$ 为瞬时斜距,可表示为

$$R(t_a; R_B) = \sqrt{(X - vt_a)^2 + R_B^2} \quad (2)$$

回波信号距离脉冲压缩后在 2 维波数域可以表示为

$$S_1(K_r, K_x) = A_{K_r}(K_r) A_{K_x}(K_x - K_{x0}) \cdot \exp\left(-jR_B \sqrt{K_r^2 - K_x^2} - jXK_x\right) \quad (3)$$

其中 $K_r = 4\pi(f_r + f_c)/c$, $K_x = 2\pi f_a/v$, f_a 表示方位频率, $A_{K_r}(\cdot)$ 和 $A_{K_x}(\cdot)$ 分别代表 K_r 和 K_x 域的窗函数, K_{x_0} 为点目标多普勒中心对应的沿航向波数。距离脉冲压缩函数为

$$H_1(f_r) = \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right) \quad (4)$$

3 子孔径成像处理方法

本文讨论的斜视 TOPS SAR 子孔径成像方法主要包括 3 个步骤: 第 1 步是通过修正的 RMA 算法来实现距离徙动校正和距离脉冲压缩; 第 2 步在方位频域实现子孔径数据的拼接获得全孔径信号无模糊的方位频谱; 第 3 步结合 SPECAN 技术将点目标聚焦在方位频域。

3.1 距离徙动校正和距离脉冲压缩

令 $K_y = \sqrt{K_r^2 - K_x^2}$, $K_{r_0} = 4\pi f_c/c$, 子孔径信号在斜视情况下在 $K_y - K_x$ 2 维平面下的波数谱如图 3 所示。本文采用一种修正的 RMA 算法, 对支撑区中的任一方位波数单元 K_x , 以 $K_{y_0} = \sqrt{K_{r_0}^2 - K_x^2}$ 为中心, 通过在 K_r 域进行 sinc 插值获取支撑区内 K_y 的值。具体实现步骤如下:

(1) 取全孔径信号 K_x 支撑区的边沿点 K_{x_0} , 计算得到 $K_{y_2} = \sqrt{K_{r_{\max}}^2 - K_x^2}$, $K_{y_1} = \sqrt{K_{r_{\min}}^2 - K_x^2}$, 其中 $K_{r_{\max}} = 4\pi(f_c + B/2)/c$, $K_{r_{\min}} = 4\pi(f_c - B/2)/c$, B 为发射信号带宽。

(2) 取 $\Delta K_y = \max(|K_{y_2} - K_{y_0}|, |K_{y_1} - K_{y_0}|)$, 其中 $|\cdot|$ 表示取模值, $\max(\cdot)$ 表示取最大值, 然后在区间 $[-\Delta K_y, \Delta K_y]$ 中均匀取值, 取值间隔用 ΔK 表示, 用 N 表示取值点数(偶数), 则对于支撑区内的每一方位波数单元 K_x , 需要插值得到的 K_y 值可以表示为

$$K_y = \sqrt{K_{r_0}^2 - K_x^2} + K_{yp} \quad (5)$$

其中 $K_{yp} \in \{n \times \Delta K | n \in [-N/2 : N/2 - 1]\}$ 。

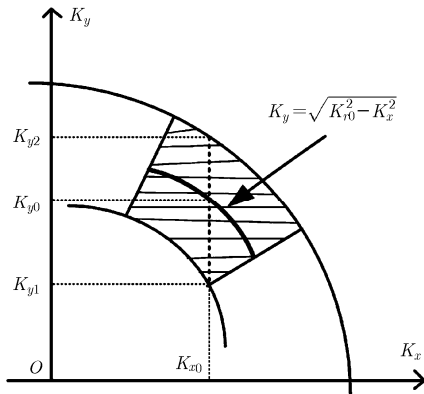


图3 斜视 SAR 的 $K_y - K_x$ 2 维波数谱

(3) 将 $K_y = \sqrt{K_r^2 - K_x^2}$ 代入式(5), 可以得到

$$K_r = \sqrt{\left(\sqrt{K_{r_0}^2 - K_x^2} + K_{yp}\right)^2 + K_x^2} \quad (6)$$

因此可以在 K_r 域进行插值来获得式(5)中各 K_y 点值。

在 K_r 域进行插值处理后, 式(3)可以表示为

$$\begin{aligned} S_1(K_{yp}, K_x) &= A_{yp}(K_{yp}) A_u(K_x) \\ &\cdot \exp\left(-jR_B \left(\sqrt{K_{r_0}^2 - K_x^2} + K_{yp}\right) - jXK_x\right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $A_{yp}(\cdot)$ 表示 K_{yp} 的窗函数。对 $S_1(K_{yp}, K_x)$ 做逆傅里叶变换, 信号就可以实现距离脉冲压缩。

$$\begin{aligned} S_2(R_B, K_x) &= \delta\left(t - \frac{2R_B}{c}\right) A_u(K_x) \\ &\cdot \exp\left(-jR_B \sqrt{K_{r_0}^2 - K_x^2} - jXK_x\right) \end{aligned} \quad (8)$$

为了便于对方位信号进行分析, 可以补偿式(8)中的双曲相位项, 补偿函数 $H_2(R_B, K_x)$ 及补偿后方位频域信号可以分别表示为

$$H_2(R_B, K_x) = \exp\left(jR_B \sqrt{K_{r_0}^2 - K_x^2}\right) \quad (9)$$

$$S_3(f_a) = A_u(f_a - f_p) \exp\left(-j2\pi \frac{X}{v} f_a\right) \quad (10)$$

其中 $A_u(\cdot)$ 为方位频域窗函数, f_p 为点目标的多普勒中心。通过扩展的 RMA 算法, 子孔径数据已经实现了距离徙动校正和距离脉冲压缩, 下面的主要目的是实现方位信号的聚焦。对于 TOPS SAR, 一次完整的扫描周期内, 扫描场景的方位幅宽要远大于雷达平台运行距离, 因此式(10)所示的子孔径方位信号在时域是混叠的。

若根据子测绘带的方位幅宽将原始子孔径信号在时域进行扩展, 可以使式(10)表示的方位信号在时域不混叠, 直接进行逆傅里叶变换就可以实现点目标的聚焦。由于扫描场景的方位幅宽要远大于雷达平台运行距离, 此时在时域扩展倍数太大, 导致数据量急剧增加, 增加了成像处理的时间。本文主要考虑如何在时域扩展倍数较小的情况下实现点目标方位聚焦。

3.2 子孔径数据拼接获取全孔径无模糊方位频谱

式(10)中表示的子孔径方位信号在时域是模糊的, 但在频域是不模糊的。一次完整扫描周期中, 波束中心斜视角逐渐增加, 其对应的多普勒中心也逐渐增加, 因此可以在方位频域进行子孔径数据拼接获取全孔径信号的方位频谱。

图 4 为点目标在不同坐标系中坐标转换示意图。 x_1, x_4 为一次子测绘带扫描周期中雷达所处的起始位置, O 为 $x_1 x_4$ 的中点, x_2, x_3 为子孔径期间雷达的起始位置, O' 为 $x_2 x_3$ 的中点。以 O 为坐标原

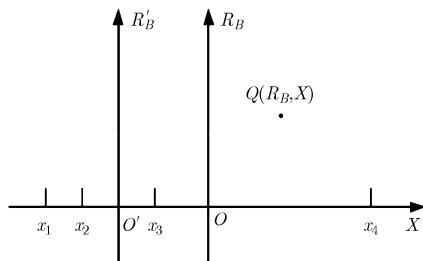


图 4 点目标在不同坐标系中坐标转换示意图

点, 以航向为 X 轴建立全孔径坐标系 $R_B O X$, 子孔径坐标系为 $R'_B O' X$, O' 在坐标系 $R_B O X$ 中的坐标为 $(x', 0)$, Q 为场景中一点, 其在全孔径坐标系 $R_B O X$ 中表示为 (R_B, X) , 在子孔径坐标系 $R'_B O' X$ 中表示为 $(R'_B, X - x')$, 将其代入式(10), 可以得到全孔径坐标系 $R_B O X$ 中的点 $Q(R_B, X)$ 的方位信号在子孔径坐标系中表示为

$$S_3(f_a) = A_a(f_a - f_p) \exp\left[-j2\pi \frac{(X - x')}{v} f_a\right] \quad (11)$$

用如式(12)所示的 $H_3(f_a)$ 补偿与子孔径坐标系相关项。

$$H_3(f_a) = \exp\left[-j2\pi \frac{x'}{v} f_a\right] \quad (12)$$

补偿后, 各点目标的方位信号在不同坐标系中可以统一用式(10)表示, 这样就可以在方位频域对各子孔径数据进行拼接, 获取全孔径信号无模糊的方位频谱。

3.3 方位聚焦

图 5 为子测绘带点目标的方位信号时频关系变换示意图, 粗实线表示的是各点目标的方位信号时频关系。图 5 中右边部分 3 个虚线框分别代表的是

近距离单元、远距离单元及中心距离单元中各点目标用式(10)所示的方位信号时频关系。从图中可以看到场景方位幅宽对应时间 $(t_2 - t_1)$ 远大于扫描周期 T_a , 因此式(10)表示的全孔径方位信号在时域是模糊的, 这增加了方位聚焦处理的难度。在获取全孔径信号的方位频谱后, 本文采用 SPECAN 技术来实现点目标方位聚焦。

进行 SPECAN 处理的核心是在时频平面内寻找合适的旋转曲线, 然后在频域构造二次相位函数, 对式(10)所示的方位信号在频域内进行调制, 使调制后整个场景的方位信号时宽最小, 且关于 $t_a = 0$ 对称分布。下面讨论旋转曲线的具体获取方法。

旋转曲线在时频平面内可以表示为

$$f_a = \gamma_a t_a + f_{ar} \quad (13)$$

或

$$t_a = (f_a - f_{ar})/\gamma_a \quad (14)$$

其中 γ_a 为旋转曲线对应的调频率, f_{ar} 为旋转曲线与 f_a 轴的交点的频率坐标。旋转曲线的获取问题转换为参数 f_{ar} 及 γ_a 的求解问题。时频平面内的点用 (t_a, f_a) 表示, 本文中称为时频坐标点。在已知雷达工作参数情况下, 可以计算得到各距离单元中点目标对应的时频坐标点, 这些时频坐标点的集合可以用 S_p 表示, 集合 S_p 中时频坐标点所描绘的图形的边沿点集合用 S_{edge} 表示, 此时参数 f_{ar} 及 γ_a 的求解问题可以表示为

$$\arg \min_{(f_{ar}, \gamma_a)} \left\{ \max_{(t_a, f_a) \in S_{edge}} \left(\left| (f_a - f_{ar})/\gamma_a - t_a \right| \right) \right\} \quad (15)$$

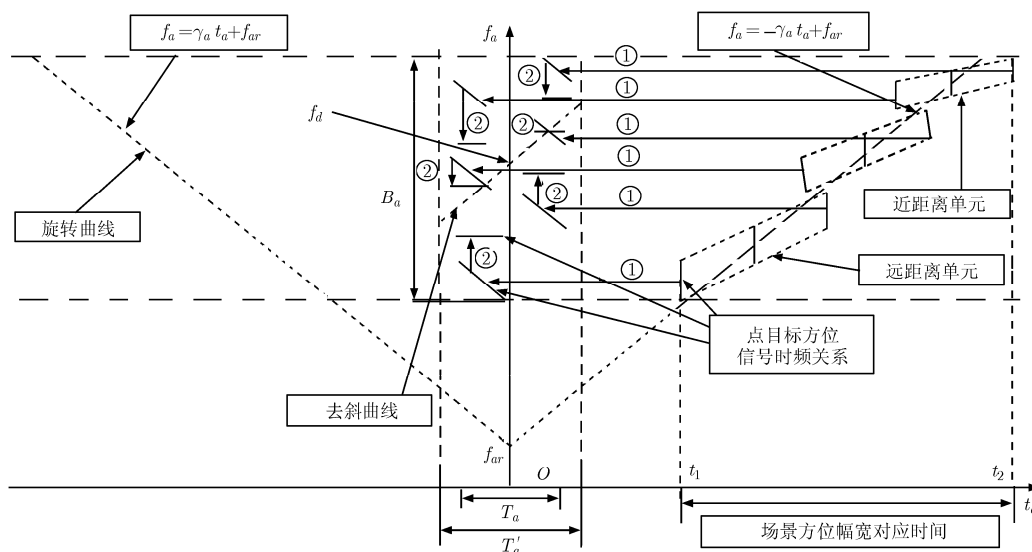


图 5 子测绘带各距离单元点目标的方位信号时频关系变换示意图

其中 $\min(\cdot)$, $\max(\cdot)$, $| \cdot |$ 分别代表求最大值、最小值、模值。从图 5 可以分析得到, 经过旋转曲线调制后的方位信号时宽由 γ_a 确定, 因此可以先对 γ_a 进行搜索, 使得方位信号的时宽最小, 然后再确定 f_{ar} 的值, 使调制后信号在方位时域关于 $t_a = 0$ 对称分布。用 T'_a 表示调制后方位信号的时域宽度, 若 T'_a 大于子孔径信号时宽, 则子孔径原始信号需要在时域进行扩展, 使其稍大于 T'_a 。求得 f_{ar} 和 γ_a 后, 可以在频域构造旋转函数:

$$H_4(f_a) = \exp(-j\pi/\gamma_a(f_a - f_{ar})^2) \quad (16)$$

式(10)所示方位信号与式(16)相乘, 得到

$$S_4(f_a) = A_a(f_a - f_p) \cdot \exp\left[-j2\pi\frac{X}{v}f_a - j\pi/\gamma_a(f_a - f_{ar})^2\right] \quad (17)$$

式(17)所示方位信号在时域不再混叠, 信号变换到方位时域可以写为

$$S_4(t_a) = a_a(t_a - t_1) \cdot \exp\left[j2\pi f_{ar}\left(t_a - \frac{X}{v}\right) + j\pi\gamma_a\left(t_a - \frac{X}{v}\right)^2\right] \quad (18)$$

此时各点目标的时频关系有所变化, 如图 5 中标①的箭头所示, 由竖直线变为斜线。然后利用方位去斜(Deramp)操作补偿式(18)中的二次项, 将点目标聚焦在方位频域。去斜曲线如图 5 所示, 其在时频平面内可以表示为

$$f_a = -\gamma_a t_a + f_d \quad (19)$$

其中 f_d 为全孔径信号方位频带中心, 则去斜函数可构造为

$$H_5(t_a) = \exp\left[-j\pi\gamma_a\left(t_a - f_d/\gamma_a\right)^2\right] \quad (20)$$

将式(18)与式(20)相乘, 并将结果变换到方位频域, 可以得到

$$S_5(t_a) = \text{sinc}\left\{\frac{B_p}{\gamma_a}\left(f_a - f_{ar} - f_d + \frac{X}{v}\gamma_a\right)\right\} \cdot \exp\left[-j2\pi f_{ar}\frac{X}{v} + j\pi\gamma_a\left(\left(\frac{X}{v}\right)^2 - \left(\frac{f_d}{\gamma_a}\right)^2\right)\right] \quad (21)$$

其中 B_p 为点目标的方位信号带宽, 此时信号聚焦在方位频域, 点目标的时频关系变换图如图 5 中标②的箭头所示, 由斜线变换到水平线。为了使算法具

有保相性, 利用 $f_a = f_{ar} + f_d - \frac{X}{v}\gamma_a$ 构造相位补偿函数

$$H_6(f_a) = \exp\left\{j2\pi f_{ar}\frac{f_{ar} + f_d - f_a}{\gamma_a} - j\pi\gamma_a\left[\left(\frac{f_{ar} + f_d - f_a}{\gamma_a}\right)^2 - \left(\frac{f_d}{\gamma_a}\right)^2\right]\right\} \quad (22)$$

可以得到最终成像结果。若方位分辨率和距离分辨率相差较大时, 可以做多视处理。

4 成像算法流程

斜视 TOPS SAR 子孔径成像算法流程如图 6 所示。算法主要由 4 部分组成: 首先由雷达工作参数计算 γ_a , f_{ar} , f_d , T'_a 等相关参数, 并对子测绘带回波数据进行分块, 若 T'_a 大于子孔径时宽, 需要将子孔径数据在方位时域进行适当扩展; 对传统 RMA 算法进行修正, 在距离波数域进行 sinc 插值完成距离徙动校正, 并补偿与距离相关的双曲相位项, 简化方位信号处理难度; 对子孔径数据进行线性相位补偿, 在方位频域进行子孔径拼接获取全孔径无模糊的方位频域信号; 然后在方位频域采用谱分析技术和方位去斜技术将点目标聚焦在方位频域; 若方位分辨率和距离分辨率相差较大时, 需要进行多视处理。

5 仿真实验

为了验证本文提出的斜视 TOPS SAR 子孔径成像方法, 本节给出了仿真试验结果。仿真参数见表 1, 仿真场景为 9×11 的矩形点阵, 均匀分布在 $[12 \text{ km} \sim 20 \text{ km}] \times [8 \text{ km} \sim 15 \text{ km}]$ (沿航向 \times 垂直航向) 的范围内, 在图 1 建立的直角坐标系中的点目标位置如图 7 所示。对于斜视 TOPS 模式, 只有部分点目标在子测绘带内, 图中实线框大致标示了成像子测绘带。

通过对表 1 参数的计算可知, 方位带宽为 6012 Hz, 远大于 PRF, 子测绘带全孔径方位信号在频域是模糊的。通过在方位维将原始数据适当分块, 使得子孔径数据在方位频域不模糊。子孔径数据通过修正的 RMA 算法进行距离徙动校正和距离脉冲压缩后, 在方位频域进行拼接, 拼接结果如图 8 所

表 1 仿真参数

载频	4.8 GHz	速度	800 m/s	波束宽度	3°
带宽	24 MHz	采样率	30 MHz	扫描角度	43° ~ 47°
PRF	3000 Hz	中心斜距	20 km	扫描速度	7.5° / s

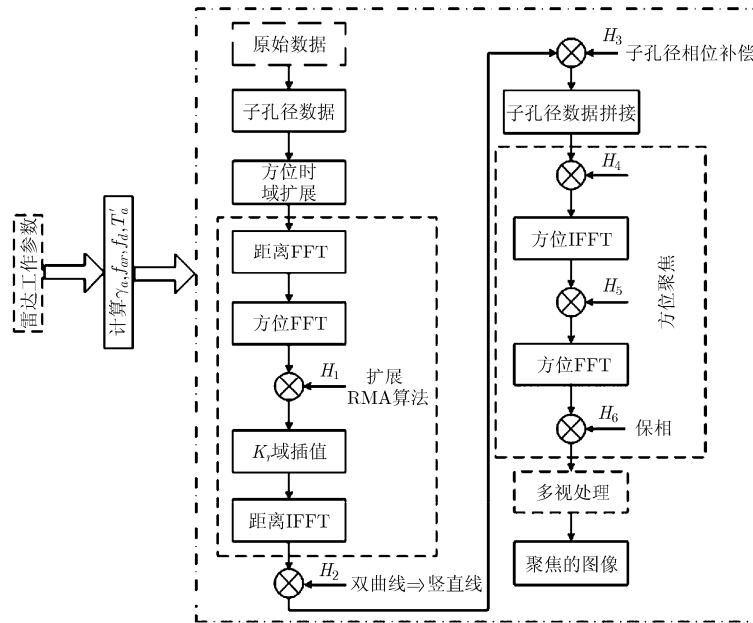


图 6 斜视 TOPS SAR 子孔径成像算法流程

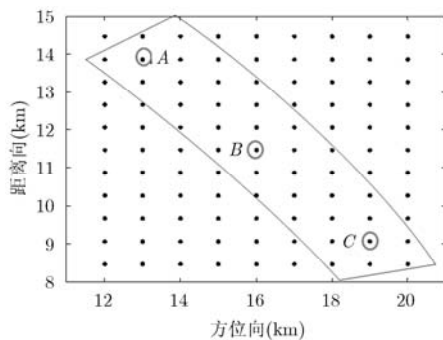


图 7 仿真场景点目标分布

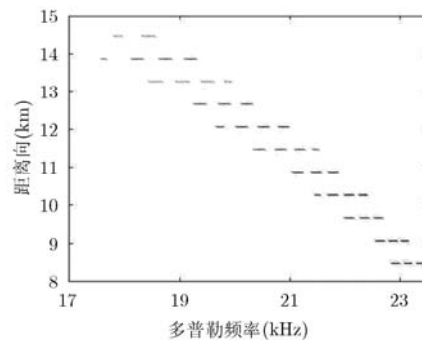


图 8 距离脉冲压缩后全孔径方位频域信号

示，从图中可以看到，各点目标的距离徙动得到良好校正。由雷达的工作参数，可以计算得到 $\gamma_a = -658.86 \text{ Hz/s}$, $f_{ar} = 7403 \text{ Hz}$, $f_d = 20500 \text{ Hz}$, $T'_a = 3.65 \text{ s}$ 。实际操作时，将子孔径数据扩展到了 4 s。采用本文方法的成像结果如图 9 所示。图中水平方向为方位向，垂直方向为距离向，图像上端表示场景近端。图 9(a)为成像结果，图 9(b), 9(c), 9(d)

分别对应子测绘带中 A, B, C 3 点的等高线图。表 2 给出了上述 3 点的成像性能分析结果，其中 PSLR 为峰值旁瓣比，ISLR 为积分旁瓣比，可见点目标均得到了良好的聚焦，成像效果较为理想。从成像结果可以看出，A, B, C 3 点的方位分辨率依次降低，这是由于随着扫描角度的增大，3 点对应的方位带宽依次减小所致。

表 2 成像性能分析

点目标	距离向			方位向		
	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)
A	-13.48	-10.60	6.2490	-13.13	-10.49	4.9485
B	-13.26	-10.32	6.2467	-13.25	-10.30	5.3933
C	-13.25	-10.22	6.2452	-13.25	-10.42	6.3158

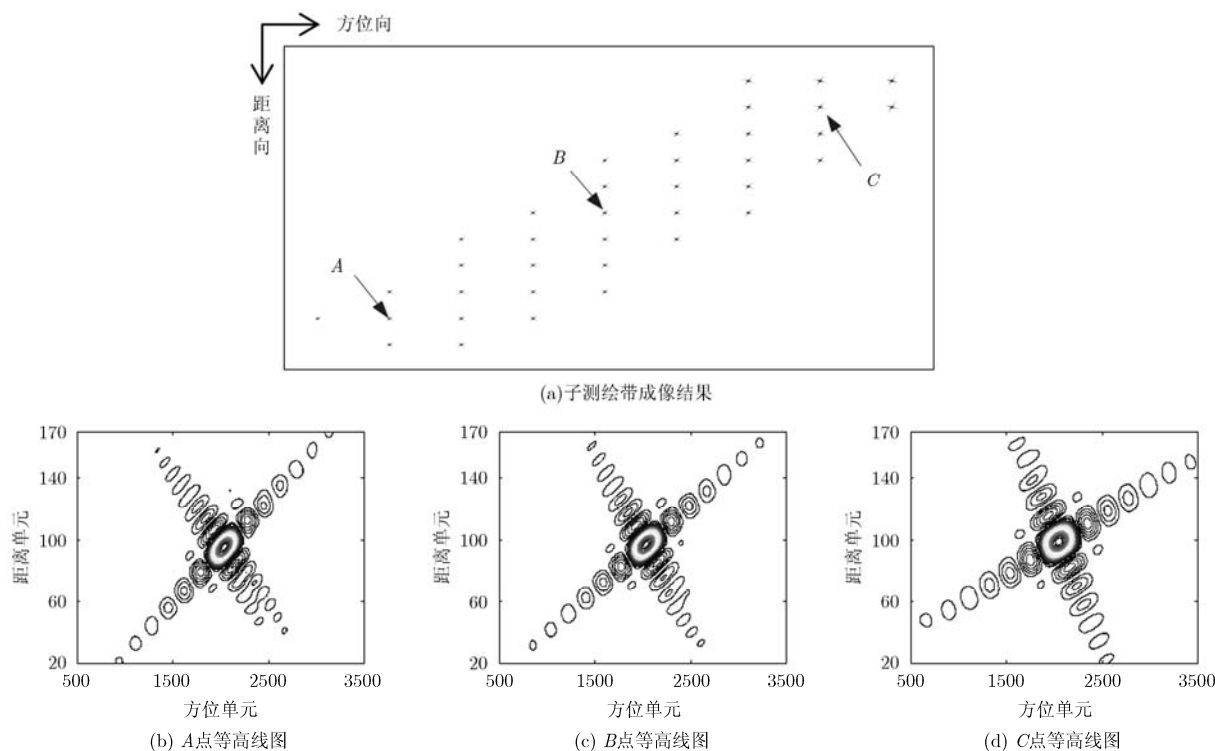


图9 仿真实验成像结果

6 结论

斜视 TOPS SAR 由于同时存在距离向与方位向的强耦合性及方位频谱模糊问题, 给成像带来了困难。本文提出了一种子孔径斜视 TOPS SAR 成像处理算法。对全孔径数据进行适当分块并在时域进行适当扩展, 获得子孔径信号无模糊的 2 维频谱; 然后在 2 维波数域采用修正的 RMA 算法完成距离徙动校正和距离脉冲压缩, 并在方位频域进行子孔径拼接获取全孔径信号无模糊的方位频谱; 此时全孔径信号在方位时域是模糊的, 通过采用谱分析技术将点目标聚焦在方位频域。本文方法聚焦得到的图像不存在方位形变, 不需要进行几何形变校正, 另外本文中是以航向为坐标轴建立直角坐标系, 利于大场景图像的拼接。仿真实验结果验证了本文方法的可行性。

参考文献

- [1] 徐伟, 邓云凯. 基于二维 Chirp-Z 变换的星载 TOPSAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2679-2685.
Xu Wei and Deng Yun-kai. Imaging algorithm of spaceborne TOPSAR data based on two-dimension Chirp-Z transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2679-2685.
- [2] Francesco D and Andrea M. TOPSAR: terrain observation by

- progressive scans[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2352-2360.
- [3] Wollstadt S, Prats P, Bachmann M, et al. Scalping correction in TOPS imaging mode SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 614-618.
- [4] Xu Wei, Deng Yun-kai, Feng Fan, et al. TOPS mode raw data generation from wide-beam SAR imaging modes[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 720-724.
- [5] Prats P, Scheiber R, Marotti L, et al. TOPS interferometry with TerraSAR-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3179-3188.
- [6] Rodon J R, Broquetas A, Arbesú J M G, et al. Signal-to-noise ratio equalization for TOPSAR mode using a nonuniform steering rate[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 199-203.
- [7] Meta A, Prats P, Steinbrecher U, et al. First TOPSAR image and interferometry results with TerraSAR-X[C]. Proceedings of Fringe Workshop, Frascati, Italy, 2007: 1-8.
- [8] Meta A, Mittermayer J, Prats P, et al. TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 759-769.
- [9] Marotti L, Prats P, Scheiber R, et al. Differential SAR interferometry with TerraSAR-X TOPS data: Mexico City subsidence results[C]. EUSAR 2012, Nuremberg, Germany,

- 2012: 677-680.
- [10] Evert A, Malcolm D, Nicolas F, *et al.* Sentinel-1 ESA's new European radar observatory[C]. EUSAR 2008, Friedrichshafen, Germany, 2008: 179-182.
- [11] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, *et al.* Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [12] Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, Wang Yong, *et al.* Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1036-1040.
- [13] Engen G and Larsen Y. Efficient full aperture processing of TOPS mode data using the moving band chirp z-transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3688-3693.
- [14] Xu Wei, Huang Ping-ping, Deng Yun-kai, *et al.* An efficient approach with scaling factors for TOPS-mode SAR data focusing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 929-933.
- [15] 杨军, 吴玉峰, 孙光才, 等. 基于方位 FNCS 的斜视 TOPS SAR 成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 86-92.
- Yang Jun, Wu Yu-feng, Sun Guang-cai, *et al.* Squint TOPS SAR imaging method based on azimuth FNCS[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(11): 86-92.
- 杨军: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、电子侦察.
- 孙光才: 男, 1984年生, 讲师, 研究方向为SAR成像及动目标检测.
- 吴玉峰: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、运动补偿.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别.