

文章编号: 1007-4619 (2002) 04-0259-07

星载 ScanSAR 成像研究

丁丁¹, 王贞松², 荆麟角¹, 徐永健¹, 谢列宾¹

(1. 中国科学院电子学研究所; 2. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100080)

摘要: 分析扫描模式合成孔径雷达不同于传统合成孔径雷达回波的时、频域特点。通过对不同成像方法及加拿大 RadarSAT 扫描模式雷达实际回波数据的理解, 根据扫描模式雷达回波的特点, 实现了全孔径 RD 算法, 快速 SPECAN 算法和 Chirp Scaling 算法几种适合于扫描模式雷达回波成像的算法, 并在算法实现过程中结合实际数据讨论了抑制点目标回波旁瓣、实现快速距离走动校正、减弱 Scalloping 效应、抑制方位向重影、准确估计多普勒中心频率等问题, 针对这些问题提出了一些新方法并通过模拟或实际数据成像进行了验证。

关键词: 星载 SAR; 扫描模式; 成像算法

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 合成孔径雷达扫描模式介绍

由于受距离模糊、天线波束宽度、数据率和回波窗口大小等的限制, 传统条带模式合成孔径雷达距离向测绘带的宽度有一个上限值。为了在一次扫描过程中得到更宽的距离向测绘带宽度, 很多合成孔径雷达系统都有扫描模式这样的工作模式 (ScanSAR)。ScanSAR 通过天线指向的变化实现不同子条带间的扫描, 图 1 为二条带 ScanSAR 的工作示意图。

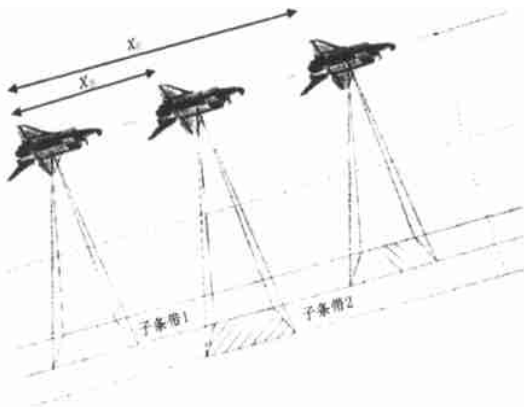


图 1 二条带 ScanSAR
Fig.1 Two stripe ScanSAR

其中, X_B 是一个子条带中雷达脉冲串 (Burst) 的

持续时间, 我们称之为驻留时间, X_P 是雷达 Burst 在同一子条带中一个 Burst 扫描开始到下一个 Burst 扫描开始的时间, 我们称之为回归时间, 若要得到一个连续的子条带图像, 则^[1]

$$X_S \geq X_P - X_B \quad (1)$$

若要得到一个连续且均匀的子条带图像, 则还需要

$$X_S \geq X_P + X_B \quad (2)$$

2 常用 ScanSAR 成像方法研究及实现

由于 ScanSAR 工作于 Burst 扫描模式, 其方位向回波信号是不连续的, 因此 ScanSAR 回波的方位向成像有一定的特殊性, 下面我们将介绍几种常用的 ScanSAR 成像方法并分别分析它们的特点, 我们还使用这些成像方法对 RadarSAT 的 ScanSAR 实际回波数据进行了处理, 给出了成像的结果。

2.1 全孔径 RD 算法

全孔径 RD 算法是我们在传统 SAR 图像处理中常用的一种成像算法, 它的特点是成像原理清晰, 成像效率高且图像信噪比也比较大。为了将全孔径 RD 算法应用于 ScanSAR 的数据处理, 我们需要将每个 Burst 之间缺少的数据补齐, 最常用的数据填补方法是添 0 扩展, 经过数据填补之后, 我们就可以对回波方位向数据进行全孔径匹配压缩了^[2], 这种算法的程序框图见图 2。

收稿日期: 2001-06-08; 修订日期: 2001-07-30

基金项目: 863-308-11-02(1) 项目资助

作者简介: 丁丁 (1974—), 现为中国科学院电子学研究所通信与信息系统专业博士生, IEEE 学生会员, 主要研究领域为合成孔径雷达成像, 遥感图像处理。

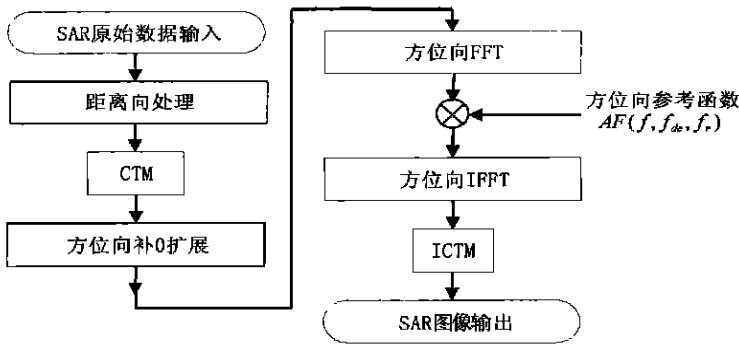


图 2 全孔径 RD 算法框图

Fig.2 Block diagram of full swath RD algorithm

下面我们对算法的一些步骤及算法实现过程中采用的一些特殊处理,如:抑制点目标回波旁瓣、实现快速距离走动校正、减弱 Scalloping 效应、抑制方位向重影、准确估计多普勒中心频率等问题做一详细介绍。

(1) 距离向处理

合成孔径雷达成像可分距离向和方位向由匹配滤波器对回波进行脉冲压缩处理完成,距离向匹配滤波器的形式为:

$$h_r(r) = \frac{2}{c} \exp\{j \pi k_r (2r/c)^2\} \cdot \text{rect}\left(\frac{2r/c}{\tau_0}\right) \quad (3)$$

由于地面每个目标点的距离向频率特性是一致的所以我们可以使用相同的距离向匹配滤波器对回波信号进行距离向处理,处理所需的信号与匹配滤波器的卷积可经由 FFT 在频域通过相乘实现。经过距离向压缩后,距离向线性调频信号被压缩成为 sinc 函数,由于 sinc 函数旁瓣响应的存在,它必然会对附近的其它点目标回波成像造成影响,严重时将会造成强反射点目标附近弱反射目标的丢失,对此我们可以在距离向处理中在距离频域通过使用抑制 sinc 函数旁瓣的滤波器来进行改善。旁瓣的抑制通常是以牺牲成像信噪比和增加点目标成像的主瓣宽度为代价的,在满足旁瓣最大值小于期望的条件下设计获得最小主瓣宽度的滤波器的解为道夫一切比雪夫加权,道夫一切比雪夫加权可近似为泰勒加权,当取泰勒加权的近似阶数为 6,期望旁瓣最大幅度为 -40dB 时,此加权函数就近似为常用的海明窗函数^[3]:

$$W_h(f) = 0.54 + 0.46 \cos[2\pi(f - f_c)/\Delta f] \quad (4)$$

在本文以后的成像处理中均采用了这种频域加权形式。

(2) 距离迁移校正

合成孔径雷达回波信号距离向与方位向的耦合产生的距离迁移造成了其方位向匹配滤波器是一个二维函数。要想用一维处理完成方位向脉冲压缩,我们就需要在方位处理前对回波信号进行距离迁移校正以补偿距离迁移造成的影响。距离迁移校正可分为距离走动校正和距离弯曲校正两步来完成。

距离走动效应是由回波信号的多普勒中心频率引起的,其值为 $\frac{M_{dcl}}{2}$,如图 3 所示,由于距离走动量与时间成线性关系,所以距离走动校正可以在时域通过对每条方位线进行搬移来完成。

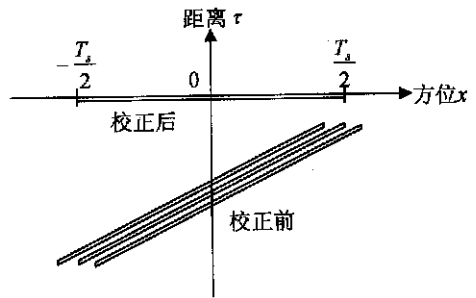


图 3 时域距离走动校正

Fig.3 Range walk correction in time domain

当距离走动值不是距离门的整数倍时,方位线的搬移需要通过插值来完成,这就使距离走动校正处理的运算量变得很大。为了减小距离走动校正的处理时间,我们使用了将距离压缩和距离走动校正相结合的处理方法,具体步骤如下:

i) 通过式(5)计算 8 组不同的距离向参考函数。

$$h_{rs}(j, I_R) = \sum_{n=-N_r/2+1}^{N_r/2} \text{sinc}\left(\frac{n}{I_R}\right) h_r(j+n) \quad (I_R = 1, 2, \dots, 8) \quad (5)$$

其中, $h_r(n)$ 为距离向参考函数, N_r 为距离向参考函数长度, $\text{sinc}(n, I_R)$ 为抽样函数,

$$\text{sinc}(n, I_R) = \frac{\sin(\pi(n + (I_R - 1)/8))}{\pi(n + (I_R - 1)/8)} \quad (6)$$

ii) 计算每条距离线上的距离走动校正量 $\Delta r = (n + s)d_r$, 其中 d_r 为一个距离门的长度, n 为 $\Delta r/d_r$ 的整数倍部分, s 为 $\Delta r/d_r$ 的小数倍部分。

iii) 对每一条距离线做距离为 n 的循环左移以补偿距离走动的整数倍距离门部分。

iv) 计算 $I_R = \text{int}(s \times 8)$, 其中 $\text{int}()$ 表示取整, 根据每条距离线不同的 I_R 值我们选取对应的距离向参考函数 $h_{rs}(n, I_R)$ 对这条距离线进行距离压缩处理以补偿距离走动的小数倍距离门部分。

经过这种处理后, 由距离走动引起的多普勒相位误差的最大值将小于 $\pi/4$ 。

距离弯曲效应是由回波信号的多普勒调频率引起的, 其值为 $\frac{\lambda f_t^2}{4}$, 对于同一点目标, 其距离弯曲的最大距离门数为:

$$n_{2\max} = \frac{f_r T_s^2 \cdot F_s}{8f_0} \quad (7)$$

其中, f_0 为发射电磁波的中心频率, T_s 为雷达合成孔径时间, F_s 为雷达距离向采样率, 对于我们所处理的 RadarSAT SNA 模式的数据, $f_0 = 5.304\text{GHz}$, $T_s \approx 0.6245\text{s}$, $F_s = 12.927\text{MHz}$, $f_r \approx 2129.6\text{Hz/s}$, 因此 $n_{2\max} \approx 0.253 \ll 1$, 所以我们只需要进行距离走动校正而不需要进行距离弯曲校正, 这样在整个距离迁移校正过程中我们都不需要计算量较大的逐方位线的插值处理。

(3) 方位向处理

理想的 ScanSAR 成像算法可由匹配滤波器对 Burst 中的每个点目标回波进行脉冲压缩处理完成, 这种方法虽然能得到理想的结果, 但是由于 Burst 中每个点的多普勒频率都不相同, 所以用以匹配每个点的方位向匹配滤波器也都不相同, 因此计算回波与方位向匹配滤波器的卷积是一个非常耗时的工作, 这就阻碍了这种算法的实际应用。

为了提高计算效率, 我们必须把方位向匹配滤波器的长度展宽以使其匹配一个 Burst 中的多个点目标, 使用全孔径长度的匹配滤波器就可以匹配一个 Burst 中所有点目标的回波, 此时匹配滤波器的形式为:

$$h_a(x) = \exp\{-j2\pi(f_{dc}x + \frac{1}{2}f_r x^2)\} \text{rect}(\frac{x}{V \cdot T_s}) \quad (8)$$

这种方法在提高计算效率的同时, 由于展宽了方位向匹配滤波器的长度, 使更多噪声进入系统, 因而降低了图像的信噪比, 另外这种算法的压缩结果的相位除了线性项外, 还多出一个很小的二次相位调制项, 它对成像的相位特性有很小的影响, 对幅度图像则没有影响。

经过距离向和方位向的二维处理后, 每个点目标的回波信号都得到了二维压缩成为一个二维 sinc 函数, 为了得到较适合人眼观看的图像效果, 我们还需对图像进行非均匀量化以使图像的灰度等级均匀拉开^[4]。

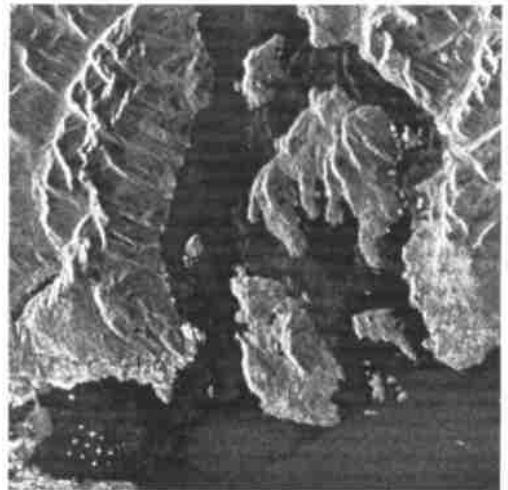


图4 全孔径 RD 算法成像结果
Fig.4 Result of full swath RD algorithm

可以看出, 将全孔径 RD 算法直接应用于 ScanSAR 成像会使图像受到周期性明暗条纹的调制 (Scalloping), 这是由于不同点目标响应在不同 Burst 中分布的位置不同且方位向不同点目标回波受天线方位向方向图调制不同造成的 (见图 5)。

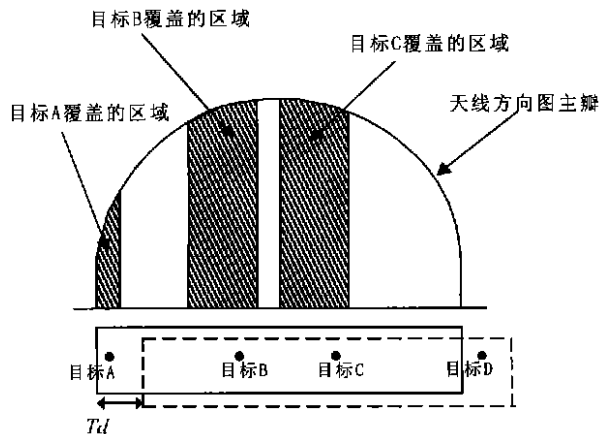


图5 不同方位向点目标天线波束加权不同
Fig.5 Different antenna weighting for different point target

经过对图像频谱的分析我们发现,Scalloping 在方位向频域其能量会集中在几条对称的谱线上,针对这些谱线我们设计一些窄带陷波器将其滤除就可以大大减弱它的影响,另外,由于点目标回波在不同谱段受图像方向图调制也不同,所以 Scalloping 效应也可以通过图像在不同谱段的多视叠加处理而减弱,在 ScanSAR 处理中,通常我们取多视数等于一个点目标被不同 Burst 照射的次数^[1]即:

$$N_L = \frac{X_S - X_B}{X_P} \quad (9)$$

其中 N_L 为多视数, X_S 为合成孔径时间, X_B 为 Burst 驻留时间 X_P 为 Burst 回归时间。经过频域滤波和多视处理后的雷达图像见图 6,可以看出,此时图像的调制效应有了明显的改善。

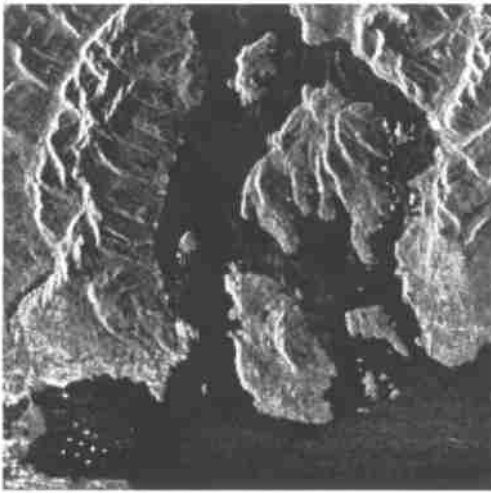


图 6 消除 Scalloping 后的图像
Fig.6 Image after the scalloping weaken

2.2 SPECAN 算法

SPECAN 算法是一种适合于生成 ScanSAR 幅度图像的一种快速算法,其距离向处理和距离迁移校正过程和 RD 算法是一致的,在方位向,SPECAN 算法只进行一次 FFT 就可以得到高信噪比的雷达幅度图像,大大提高了方位向处理的速度。

设经过距离向处理和距离迁移校正后,合成孔径雷达方位向点目标回波可表示为:

$$s_a(x) = \exp \left\{ j2\pi \left[f_{dc}(x - x_0) + \frac{1}{2} f_r (x - x_0)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

我们取如下形式的方位向匹配滤波器:

$$h_a(x) = \exp \left\{ -j2\pi \left(f_{dc}x + \frac{1}{2} f_r x^2 \right) \right\} \text{rect} \left(\frac{x}{V \cdot T_a} \right) \quad (11)$$

其中 T_a 是所处理的一条方位线所对应的方位时间,SPECAN 算法要求 $T_a < T_s$,将方位向回波与匹配函数在时域相乘得:

$$s(x) = s_a(x) \cdot h_a(x) = \exp \left\{ -j2\pi \left(f_{dc}x_0 + f_r x_0 \cdot x - \frac{1}{2} f_r x_0^2 \right) \right\} \quad (12)$$

通过傅里叶变换我们将 $s(x)$ 变换到频域:

$$S(f) = \int_{-T/2}^{T/2} s(x) \exp \{ -j2\pi f x \} dx = \exp \left\{ -j2\pi \left(f_{dc}x_0 + \frac{1}{2} f_r x_0^2 \right) \right\} \cdot T \text{sinc} [-T(f - f_r x_0)] \quad (13)$$

令 $f = f_r \cdot x$, 则

$$s_{\text{specan}}(x) = \exp \left\{ -j2\pi \left(f_{dc}x_0 + \frac{1}{2} f_r x_0^2 \right) \right\} \cdot T \text{sinc} [-T f_r (x - x_0)] \quad (14)$$

此时方位向信号回波幅度被压缩为一 sinc 函数,函数的主瓣宽度与傅里叶变换的积分时间 T 及多普勒调频率 f_r 成正比。SPECAN 算法的程序框图见图 7,实际成像的结果如图 8,可以看出,SPECAN 算法在提高了处理速度的同时其图像也保持了较高的信噪比。

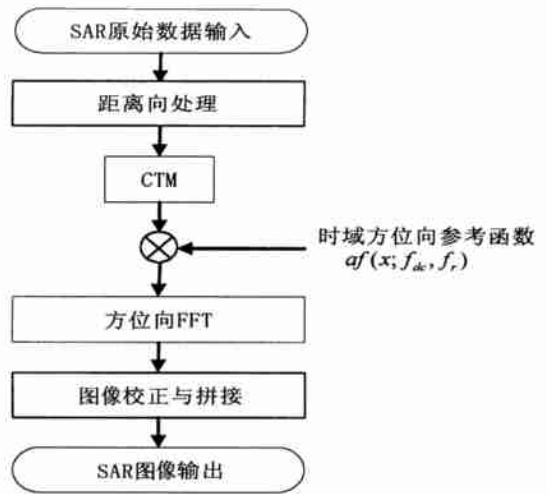


图 7 SPECAN 算法框图

Fig.7 Block diagram of SPECAN algorithm

2.3 Chirp Scaling 算法

为克服星载 SAR 大距离迁移带来的问题,Raney 提出了 Chirp Scaling 算法,与 RD 算法不同,Chirp Scaling 算法打破了原有成像算法首先通过脉冲压缩完成距离处理,单纯研究方位处理的框架,直接从回波开始,精确的推导回波信号在距离多普勒域的表达式。Chirp Scaling 算法使用 Chirp Scaling 原理,回波信号通过与 Chirp Scaling 因子相乘,将不同距离

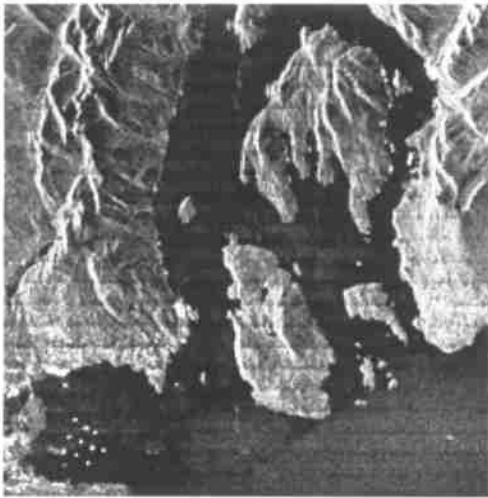


图 8 SPECAN 算法成像结果
Fig.8 Result of SPECAN algorithm

目标的距离迁移曲线补偿到相同形状, 然后分别在二维频域和距离多普勒域中完成距离处理和方位处理。Chirp Scaling 算法通过频域相位补偿完成成像处理, 推导过程中近似少, 不需进行插值处理, 仅通过复乘和 FFT 就可完成整个成像处理, 因此它是一种具有良好相位保持特性的成像处理方法。同全孔径 RD 算法类似, 要将 Chirp Scaling 算法应用与 ScanSAR 成像, 必须先将方位向缺失的数据填补为 0, 这样算法的程序流程如图 9。

其中, Chirp Scaling 因子的作用是使不同距离门上的距离迁移曲线变为相同的形状, 基于前面介绍的星载雷达斜侧视距离模型, 我们有^[5]:

$$\Phi_1(\tau, f; R_{ref}) = \exp\{-j\pi b_r(f; R_{ref}) C_s(f) [\tau - \tau_{ref}(f)]^2\} \quad (15)$$

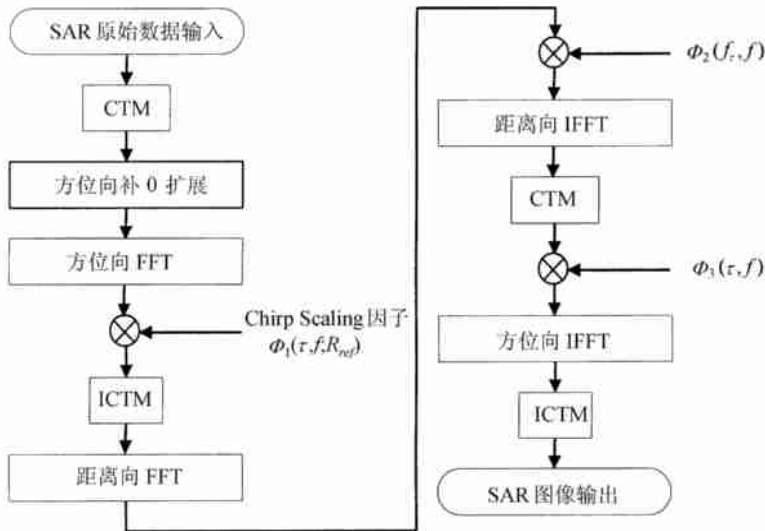


图 9 Chirp Scaling 算法框图
Fig.9 Block diagram of Chirp Scaling algorithm

其中, R_{ref} 为参考斜距, τ_{ref} 为参考时间,

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{\lambda R_{ref} f_r (R_{ref})}{2} + \left(\frac{\lambda f_d (R_{ref})}{2}\right)^2} \quad (16)$$

$$C_s(f) = \frac{\sin \phi_{ref}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}} - 1 \quad (17)$$

其中,

$$\phi_{ref} = \arccos\left[-\frac{\lambda f_d (R_{ref})}{2V}\right] \quad (18)$$

$$b_r(f; R_{ref}) = \frac{K_r}{1 + K_r R_{ref} \sin \phi_{ref} \frac{2\lambda}{c} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}} \quad (19)$$

$$\tau_{ref}(f) = \frac{2}{c} R_{ref} [1 + C_s(f)] \quad (20)$$

距离补偿因子的作用是进行距离向压缩处理并完成距离迁移校正,

$$\Phi_2(f, \tau, f) = \exp\left\{-j \frac{\pi f_r^2 \tau^2}{b_r(f; R_{ref}) [1 + C_s(f)]} + j \frac{4\pi}{c} f \tau R_{ref} C_s(f)\right\} \quad (21)$$

其中, 第一项完成距离向聚焦压缩, 第二项完成距离迁移校正。方位补偿因子的作用是完成方位向聚焦压缩处理和残留相位补偿,

$$\Phi_3(\tau, f) = \exp\left\{-j \frac{4\pi R}{\lambda} (1 - \sin \phi) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2} + j[\Theta_1(f) + \Theta_2(f; R)]\right\} \quad (22)$$

其中,

$$\Theta_1(f) = \frac{4\pi}{c} b_r(f; R_{ref}) \cdot [C_s(f) + 1] \cdot C_s(f) \cdot \left(R \frac{\sin \phi}{\sin \phi_{ref}} - R_{ref}\right)^2 \quad (23)$$

$$\Theta_2(f; R) = \frac{2\pi R f}{V} \cos \phi \quad (24)$$

经过 Chirp Scaling 算法处理并进行了去明暗条纹抑制的 ScanSAR 图像如图 10。

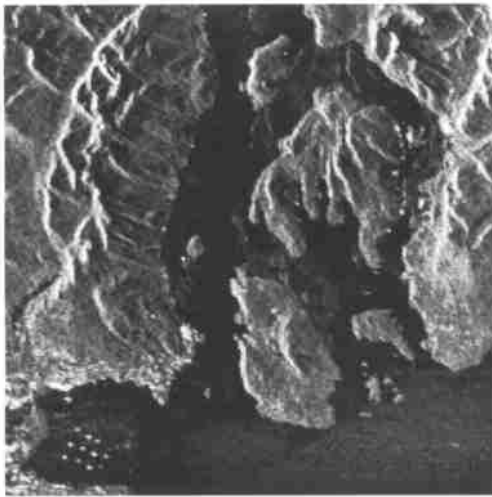


图 10 Chirp Scaling 算法成像结果

Fig.10 Result of Chirp Scaling algorithm

3 ScanSAR 成像产生方位向重影问题的研究

在使用 RadarSAT 的 ScanSAR 回波数据成像的过程中, 我们碰到了几次图像在方位向产生重影的问题, 造成这些图像方位向重影的原因如下:

由图 11 可以看出, 在成像过程中, 当多普勒中心频率 f_{dc} 估计不准时, 我们就不能把回波补偿到 0 中心频率, 这样在方位向频域回波信号与方位向参考函数相乘的频谱结果就被分开成了两部分, 经 IFFT 后, 一个点目标回波就被压缩成为不同方位距离上的两个 sinc 函数, 造成了方位向虚假目标(重影)的出现。 f_{dc} 估计的结果越不精确, 虚假目标的能量就越大, 当估计的 f_{dc} 值与真实值相差 $PRF/2$ 时, 虚假目标将和真实目标拥有相等的能量。要想消除

这种方位向重影现象, 我们就需要准确的估计回波的多普勒中心频率值, 多普勒中心频率的估计方法有多普勒频谱分析法, 时域相关法和子图像能量均衡法等, 在实际成像过程中, 我们先采用多普勒频谱分析法通过确定多普勒频谱峰值的位置来粗略确定 f_{dc} , 再用于子图像能量均衡法利用多普勒中心频率两侧的单视子图像能量相等的特性精确估计 f_{dc} , 取得了较好的效果。

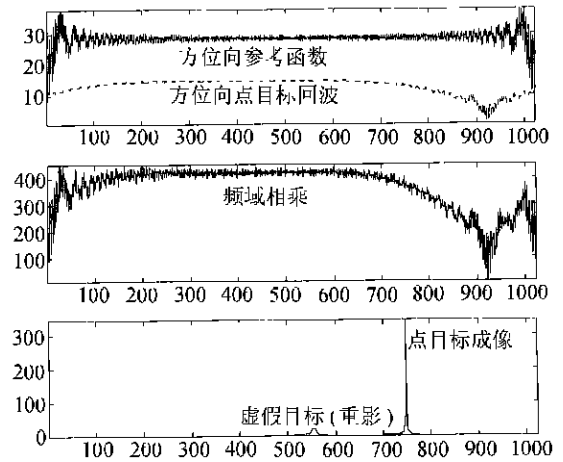


图 11 f_{dc} 估计不准造成方位向重影

Fig.11 Pseudo target generated by the inaccuracy of f_{dc}

在实际应用中, f_{dc} 的估计总会存在一定偏差, 尤其在对 ScanSAR 回波的 f_{dc} 的估计当中, 由于受方位向信号不连续的影响, 其方位向频谱也较杂乱, f_{dc} 估计的精度要远小于对常规 SAR 回波信号 f_{dc} 的估计。如图 12 所示, 为了消除 f_{dc} 估计偏差带来的方位向重影的影响, 我们可以适当减小方位向匹配滤波器的处理带宽, 这样做是以牺牲方位向分辨率为代价的。

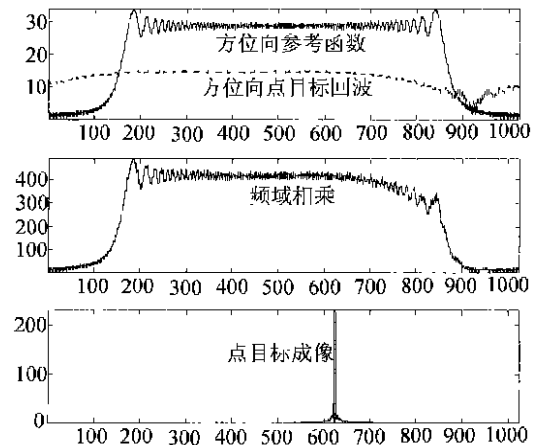


图 12 减小处理带宽消除方位向重影

Fig.12 Pseudo target elimination by the processing band reduction

4 结 论

通过对扫描模式雷达回波的特点及 RadarSAT 扫描模式数据的理解,本文使用全孔径 RD 算法,快速 SPECAN 算法和 Chirp Scaling 算法首次实现了星载 ScanSAR 实际回波数据的成像并达到了较理想的效果。这三种算法各有其特点,全孔径 RD 算法原理清晰、成像效率较高, SPECAN 算法成像速度快, Chirp Scaling 算法能进行精确的距离迁移校正并有很好的相位保持特性,它们可以应用于对成像有不同要求的不同领域——全孔径 RD 算法适用于常规高分辨率成像, SPECAN 算法适用于快速得到幅度图像,而 Chirp Scaling 算法适用于距离迁移量很大时的成像或对相位特性要求较高的干涉 SAR 成像等方面。在算法实现过程,论文对抑制点目标回波旁瓣、实现快速距离走动校正、减弱 Scalloping 效应、抑制方位向重影、准确估计多普勒中心频率等问题进行了有针对性的讨论并根据这些讨论设计了相应的

处理,改善了成像的质量。

参 考 文 献 (References)

- [1] Giorgio Franceschetti, Riccardo Lanari, Synthetic Aperture Radar Processing [C]. CRC Precc LLC, 1999, 225—258.
- [2] Qiao R R. Studies on Space-borne Multi-mode SAR System and Signal Processing [C]. Dissertation for the Degree of Ph.D. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2000, 7, 39—41, [乔蓉蓉, 星载合成孔径雷达多模式系统研究与信号处理 [D], 中科院电子所博士学位论文, 2000, 7, 39—41]
- [3] Wang Y T. Parallel Image Processing and Study on the Range Ambiguity of Synthetic Aperture Radar [D]. 1997, 29—32. [王岩亭, 合成孔径雷达图像并行处理与距离模糊研究 [D], 中科院电子所硕士学位论文, 1997, 29—32]
- [4] Li X L. Digital Image Processing [M]. University of Science and Technology of China [M]. 75—144, [李象霖, 数字图像处理 [M], 中国科技大学研究生院, 75—144]
- [5] Huang Y. High-Resolution Spaceborne SAR Imaging Processing Technique [D]. Dissertation for the Degree of Ph.D. Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 6, 27—31. [黄岩, 高分辨率星载合成孔径雷达成像处理技术研究 [D], 北京航空航天大学博士学位论文, 1999, 6, 27—31]

Study of Space-borne ScanSAR Image Processing

DING Ding¹, WANG Zhen-song², JING Lin-jiao, XU Yong-jian¹, XIE Lie-bin¹

(1. Institute of Electronic, CAS; 2. Institute of Computing Technology, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper is about the processing of the burst mode Space-borne ScanSAR data. There are many algorithms developed for processing the strip-mode space-borne SAR data, for example: the RD algorithm, the Specan algorithm, the Chirp Scaling algorithm, the Ω - k algorithm. However, due to the bursting characteristics of the ScanSAR data and the operation mode of the ScanSAR, none of the above algorithms can be used directly in the processing of the Space-borne ScanSAR data. In this paper, the time domain and the frequency domain characteristics of the ScanSAR echo were analyzed. Based on the understanding of RadarSAT ScanSAR data and the characteristics of the ScanSAR echo, the full swath RD algorithm, fast SPECAN algorithm and Chirp Scaling algorithm were developed. The RD algorithm for whole scanned swath is an effective algorithm, the SPECAN algorithm can provide a high resolution image quickly and the chirp scaling algorithm has an excellent phase preserving ability. In the real data processing, some methods like the side-lobe control of point target echo, the fast range walk correction, the scalloping weakening, the range ambiguity control, the azimuth false target elimination and the Doppler centroid frequency estimation were discussed and verified.

Key words: space-borne SAR, ScanSAR, image processing algorithm