

机载合成孔径雷达大斜视高分辨率重叠子孔径成像算法研究

李勇 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要 该文提出了一种结合图像二维几何失真校正和空变相位误差补偿的大斜视、高分辨率机载合成孔径雷达重叠子孔径成像处理方法。其运动补偿过程不需要实时调整雷达参数,易于工程实现。整个成像处理过程融合了基于频谱分析的分步变换技术,以线性距离多普勒算法生成子孔径图像为前提,根据转台成像的基本原理,通过固定参考系下地理坐标的变换和定位,实现了不同子孔径图像之间散射点的距离和多普勒对准,并有效地补偿了空变剩余相位误差。点目标仿真和实测数据成像结果证明了该处理方法的有效性。

关键词 合成孔径雷达,子孔径成像处理,几何失真,运动补偿

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1577-05

Study on High Resolution Overlapped Subaperture Imaging Algorithm for High Squint Airborne SAR Processing

Li Yong Zhu Dai-yin Zhu Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract A high-resolution subaperture imaging algorithm incorporated with the correction of 2-D image geometric distortion and the compensation of spatially-variant phase error for high squint airborne synthetic aperture radar is presented. Each subaperture processing is based on linear range-Doppler algorithm. According to the basic theory of rotating-object imaging, a methodology is developed to realize the range and Doppler alignment of the corresponding scatterers in successive subimages by the geographical coordinate transforming and positioning, while the step transform technique based on SPECAN is employed to obtain the high-resolution image. The point-target simulations and live data processing results show the validity of the proposed approach.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Subaperture imaging processing, Geometric distortion, Motion compensation

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是现代遥感领域的一项重要技术,能够全天时、全天候、远距离地获取地球表面信息,具有重要的军用和民用价值。机载 SAR 系统具有实时性强、成像分辨率高的特点。某些情况下它需要工作在大斜视模式下,大斜视角导致了严重的距离徙动现象,且距离徙动会随着对分辨率要求的提高而愈加严重。

SAR成像处理本质上可以视为一类对空变二维信号的匹配滤波问题。目前已经出现了众多的SAR成像算法^[1-5]。这些SAR成像算法多数在大斜视角时聚焦性能急剧下降,但也有部分算法的性能受斜视角影响小,如线性距离多普勒(RD)算法、极坐标格式算法(PFA)和子孔径算法比较适合用于大斜视角情况。

基本的子孔径成像算法将信号在时域分割为子孔径,先进行粗分辨率成像,再通过图像域的相参累加,突破分辨单元走动对雷达视线转角的限制,实现高分辨率成像。结合频谱分析(SPECAN)方法和分步变换(Step transform)技术^[6,7]的重叠子孔径成像算法^[8-10]的运动补偿在很大程度上依赖于对

信号及系统参数进行实时调整,根据运动传感器测得的运动轨迹和参数,逐个脉冲地调整雷达发射频率、初始相位、脉冲重复频率、A/D采样速率,对雷达系统要求很高。

本文研究基于子孔径成像算法,同时校正二维几何失真和补偿空变相位误差的机载SAR大斜视角、高分辨率成像处理方法,其运动补偿过程避免了对雷达参数的实时调整,更易于工程实现。提出了以线性RD成像算法生成粗分辨率子孔径图像为前提,根据转台成像原理^[11],通过固定参考系下地理坐标的变换和定位,逐点逐帧地校正子图像几何失真的方法;相位补偿过程分为两个阶段,即在每个子孔径内先进行一阶运动补偿,然后再对子孔径成像结果进行空变相位补偿,最终去除子孔径成像过程中剩余的相位误差。确定了该处理方法的信号处理流程图。点目标仿真和实测数据成像结果证明了该处理方法的有效性。

2 粗分辨率子孔径成像与一阶运动补偿

线性RD算法是一种原理上基于转台成像的聚束SAR成像算法,它不仅具有复杂度低、效率高、实时性好的优点,而且在大斜视角条件下仍然能够稳定聚焦。在给定雷达波长 λ 的情况下,其方位向分辨率 ρ 受到雷达合成孔径相对于成像区中心等效转角 $\Delta\theta$ 的约束,即

$$\rho = \lambda / (2\Delta\theta) \quad (1)$$

2004-12-27 收到, 2005-09-30 改回
国家自然科学基金(60502030)和航空科学基金项目(05D52027)资助课题

可见, 转角 $\Delta\theta$ 越大, 方位分辨率越高。但当 $\Delta\theta$ 过大, 以至于散射点的距离或多普勒频率变化量超过一个分辨单元时, 由该算法所得图像会发生散焦现象。因此, 在划分子孔径时, 应将成像区边缘散射点的走动量控制在一个分辨单元以内。

在粗分辨率子孔径成像中, 每个子孔径的成像过程都是独立进行的, 即按照各子孔径的具体几何关系来成像。其信号处理流程图如图 1 所示^[12]。整个信号处理流程由距离压缩、运动补偿和方位聚焦处理 3 个步骤构成。图 1 表示的信号处理流程中关键步骤是相对成像区中心参考点的运动补偿, 其实质是以成像区中心为参考, 对回波信号进行方位dechirp处理。图 2 为斜视模式下, 数据收集平面内的运动补偿示意图。运动平台沿 x 负轴方向以速度 v_a 匀速飞行, 雷达天线相位中心(APC)的起点为 A , 终点为 B , 斜视角 θ_s 定义为孔径中点 C 处的天线指向与航迹垂直方向的夹角, 合成孔径 AB 对成像区中心 O 点的张角为 $\Delta\theta_{sub}$ 。运动补偿后的等效轨迹为圆弧 $\bar{A}'B'$, 即通过运动补偿去除平动, 保留转动, 从而把载机与成像区之间的相对运动转化为相对于参考点 O 点的标准转台运动。

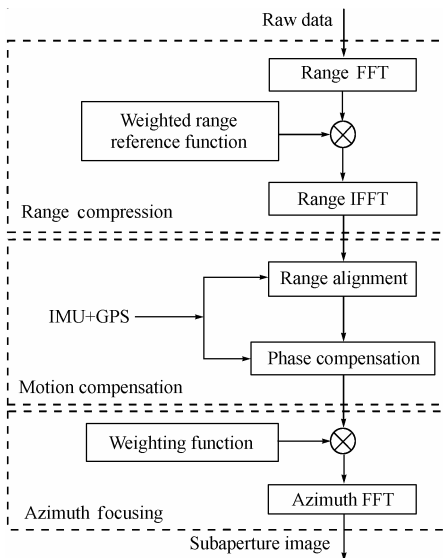


图 1 粗分辨率子孔径成像信号处理流程图
Fig.1 Block diagram of coarse-resolution subaperture imaging processing

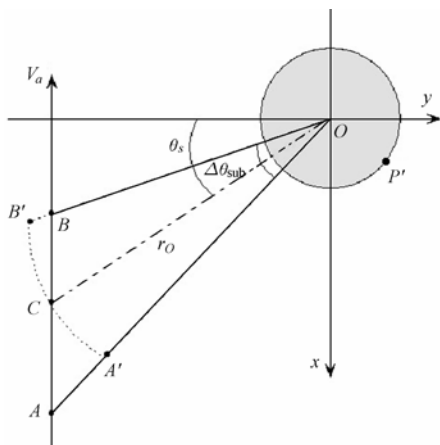


图 2 斜视模式下的运动补偿
Fig.2 Motion compensation in squinted mode

3 几何失真校正

单个子孔径成像结果具有一维高分辨率距离像和一维低分辨率方位像。在同一子孔径图像中, 不同散射点的相对位置关系与实际分布相比发生了畸变, 而且同一散射点在不同子孔径图像中的位置也存在变化, 这里通称为几何失真。几何失真的程度会随着远离参考点的距离和斜视角的增加而愈加严重。这给子孔径图像的相参累加造成了困难, 导致高分辨率成像质量恶化, 甚至无法成像。因此, 准确地校正它成为保证成像性能的关键^[13,14]。

经过一阶运动补偿, 雷达 APC 相对于成像区之间的运动可以等效为成像区中散射点围绕其中心的转台运动, 如图 3 所示。

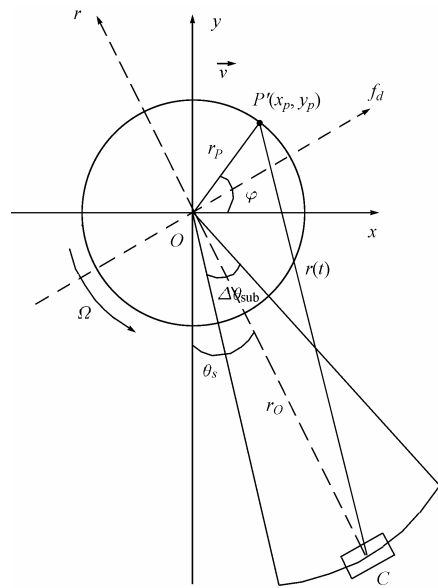


图 3 散射点 P' 的 x - y 坐标与 f_d - r 坐标
Fig.3 The x - y & f_d - r coordinates of scatterer P'

雷达 APC 与成像区内任意点目标 P' 的瞬时距离 $r(t)$ 为

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + r_p^2 - 2r_0r_p \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_s + \varphi + \Omega t\right)}, \quad -\frac{T_{sub}}{2} \leq t \leq \frac{T_{sub}}{2} \quad (2)$$

其中 r_0 为雷达 APC 至转动中心的距离, Ω 为等效转台的转动角速度, $\Omega = v_a \cos \theta_s / r_0$; T_{sub} 为单个子孔径时间, $T_{sub} = \Delta\theta_{sub} / \Omega$ 。 P' 点在 $t=0$ 时刻的 x - y 坐标为

$$x_p = r_p \cos \varphi, \quad y_p = r_p \sin \varphi \quad (3)$$

其中 r_p 为 P' 点的转动半径, φ 为初始角。通常 $r_0 \gg r_p$, 对式(2)进行 Taylor 展开, 略去 r_p/r_0 的高次项得到

$$\begin{aligned} r(t) &\approx r_0 - r_p \sin(\theta_s - \varphi - \Omega t) \\ &= r_0 - x_p \sin \theta_s \cos \Omega t + x_p \cos \theta_s \sin \Omega t \\ &\quad + y_p \cos \theta_s \cos \Omega t + y_p \sin \theta_s \sin \Omega t \end{aligned} \quad (4)$$

则 P' 点的多普勒频率 f_d 为

$$\begin{aligned} f_d &= -(2/\lambda) \cdot dr(t)/dt \\ &= -(2x_p\Omega/\lambda) \sin \theta_s \sin \Omega t - (2x_p\Omega/\lambda) \cos \theta_s \cos \Omega t \\ &\quad + (2y_p\Omega/\lambda) \cos \theta_s \sin \Omega t - (2y_p\Omega/\lambda) \sin \theta_s \cos \Omega t \end{aligned} \quad (5)$$

单个子孔径的转角 $\Delta\theta_{\text{sub}} = \Omega T_{\text{sub}}$ 很小, 在 $t=0$ 附近, 式(4), 式(5)可近似为

$$\left. \begin{aligned} r &\approx r_0 - x_p \sin\theta_s + y_p \cos\theta_s \\ f_d &\approx -\frac{2x_p\Omega}{\lambda} \cos\theta_s - \frac{2y_p\Omega}{\lambda} \sin\theta_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)以矩阵形式可表示如下:

$$\begin{bmatrix} r - r_0 \\ -\frac{\lambda f_d}{2\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_s & \cos\theta_s \\ \cos\theta_s & \sin\theta_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)表明, 在单个子孔径处理时间内, 散射点 P' 在 $x-y$ 坐标系下的坐标 (x_p, y_p) 与在子孔径成像结果中的距离-多普勒位置存在坐标旋转变换关系, 因此, 可将其视为另一组坐标系, 即 f_d-r 坐标。图3为成像平面内, 单个子孔径中散射点 P' 的 $x-y$ 坐标与 f_d-r 坐标几何关系示意图。图3中, r 轴为雷达视线 OC , C 点为子孔径中心; f_d 轴垂直于 OC , 坐标系原点为成像区中心 O 点。 f_d-r 坐标系随子孔径斜视角的不同而旋转, 直接决定散射点在子孔径图像中的位置。在 f_d-r 坐标系中, 散射点 P' 的横纵坐标 (N_{f_d}, N_r) 可由下式计算得出:

$$\left. \begin{aligned} N_{f_d} &= f_d / \Delta f_d \\ N_r &= (r - r_0) / p_r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $\Delta f_d = \text{PRF} / M_{\text{sub}}$ 为沿 f_d 轴的量化间隔, PRF 为脉冲重复频率, M_{sub} 为一个子孔径的脉冲个数; $p_r = c / (2f_s)$ 为沿 r 轴的量化间隔, c 为光速, f_s 为采样频率。

由式(7)和式(8), 可以根据散射点 P' 的 $x-y$ 坐标 (x_p, y_p) 得到其在各帧子孔径图像中的对应位置 $(N_{f_d_i}, N_{r_i})$, $i = 1, 2, \dots, N$ (N 为子孔径个数), 完成 P' 的距离和多普勒定位。此步骤须利用插值操作, 因而将不可避免地带来了误差, 而且插值运算的计算量比较大。

整个成像区域的几何失真校正以单个散射点校正为基础, 通过把成像区划分为散射点网格来逐点地完成。地平面散射点的网格分布如图4所示。网格点均匀分布在 $x-y$ 坐标系内, 相邻点横向间隔为 ρ_x , 纵向间隔为 ρ_y 。图中子孔径中心雷达视线 OC 与其垂线所构成的斜平面为成像平面, $x-y$ 平面为地平面。 ρ_x 和 ρ_y 的取值决定于成像平面和地平面的影射关系, 即

$$\rho_x = \frac{\rho_a}{\cos\theta_s}, \quad \rho_y = \rho_r \cdot \frac{\cos\theta_s}{\cos\theta_p} \quad (9)$$

式中 $\theta_p = \sin^{-1}(H/r_0)$ 为成像平面与地平面的二面角, ρ_a 和 ρ_r 分别为子孔径成像结果的方位和距离分辨率, $\rho_a = \lambda / (2\Delta\theta_{\text{sub}})$, $\rho_r = c / (2B)$, B 为发射信号带宽。

地平面网格点坐标确定后, 需经过投影变换转换到成像平面, 即

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x \cdot \cos\theta_s \\ y_p &= y \cdot \frac{\cos\theta_p}{\cos\theta_s} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 (x, y) 为地平面网格点 P 的坐标, P 点对应的成像平面内的映射点即为 P' 点。

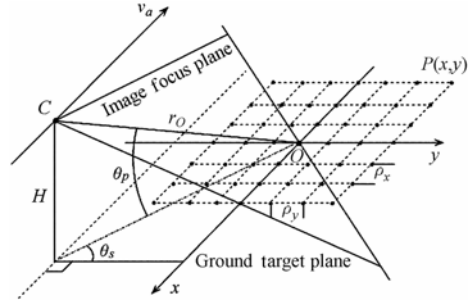


图4 成像区散射点网格分布示意图

Fig.4 Distribution of the correction grid in illuminated area

4 高分辨率成像与空变相位补偿

几何失真校正消除了子孔径图像二维形变对全孔径高分辨率成像造成的障碍。根据Step transform技术的思想, 将信号沿第三维(子孔径图像序列方向)进行FFT运算可直接获得方位高分辨率成像结果。但是, 这里必须考虑信号的混叠问题。为避免方位高分辨FFT频谱混叠, 要求提高信号的采样率, 而此时输入信号决定于子孔径的个数, 因此, 为在全孔径时间内划分出更多的子孔径数量, 相邻孔径需要相互部分重叠。已知全孔径时间内信号总脉冲数为 M , 定义相邻子孔径的重叠率 O_{VR} 为

$$O_{\text{VR}} = V / M_{\text{sub}} \quad (11)$$

式中 V 是重叠部分的脉冲个数, 则由 O_{VR} 决定的总的子孔径个数 N 为

$$N = \frac{M - M_{\text{sub}} \cdot O_{\text{VR}}}{M_{\text{sub}} (1 - O_{\text{VR}})} \quad (12)$$

子孔径的重叠会显著增加计算量, 降低了成像处理算法的效率, 而利用窗函数的加权处理, 通过抑制旁瓣可以在不产生主瓣混叠的同时适当减少子孔径数量, 降低计算负荷。此外, 方位高分辨率FFT的输出结果还必须经过筛选处理, 目的是保证频谱的连续性, 去除相邻散射点的混叠成份。经过方位高分辨率FFT运算, 输出数据占据频谱宽度为 $\frac{\text{PRF}}{M_{\text{sub}}(1 - O_{\text{VR}})}$, 而理论带宽为 $\frac{\text{PRF}}{M_{\text{sub}}}$, 由此, 方位高分辨率FFT输出信号中未混叠频谱的百分比 S 为

$$S = \frac{\text{PRF} / M_{\text{sub}}}{\text{PRF} / [M_{\text{sub}} (1 - O_{\text{VR}})]} \times 100\% = (1 - O_{\text{VR}}) \times 100\% \quad (13)$$

即输出信号中的 S 点将保留, 其他的去除。

由于在进行粗分辨率子孔径成像时是以成像区中心 O 点为参考进行空不变运动补偿, 除 O 点外其余各点均有相对于 O 点的剩余相位误差。剩余相位误差具有空变特性, 必须在方位高分辨率FFT之前加以补偿。空变相位误差补偿可以与几何失真的校正相结合, 即在得到 P 点在某一子图像的对信号后, 复乘以相位 $\exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(r - r_0)\right]$, 其中, r_0 和 r 的定义如图3所示。

本文研究的机载SAR大斜视角、高分辨率子孔径成像算法的信号处理流程图如图5所示。

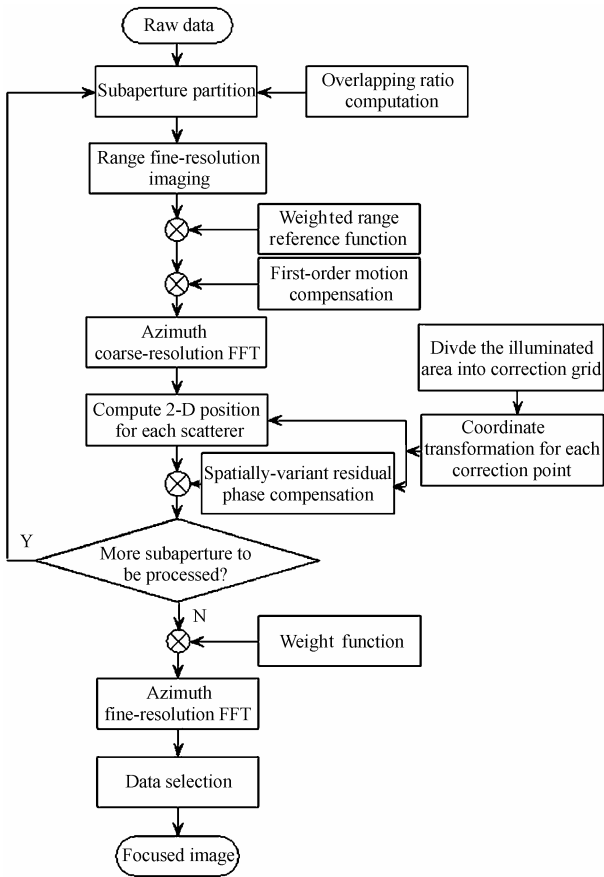


图5 本文研究的重叠子孔径成像算法流程图

Fig.5 Block diagram of the analyzed overlapped subaperture algorithm

5 点目标仿真与实测数据成像

图6为仿真中假设的点目标在地面x-y坐标系下的排列情况,总体呈米字形分布。黑色实心点代表点目标的位置,相邻点x向间距为 $\Delta x = 50\text{ m}$,y向间距为 $\Delta y = 50\text{ m}$,成像区直径为500m,总仿真点数为41点。SAR系统仿真参数如表1所示。

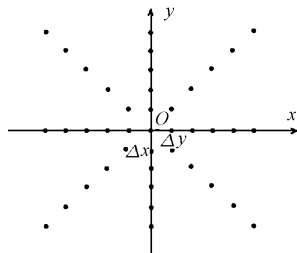


图6 仿真点在地面上的排列示意图

Fig.6 Placement of simulated point targets

表1 仿真系统参数

Tab.1 Parameters of the simulated system

工作频率	X 波段
斜视角 θ_s	60°
作用距离 R	20 km
LFM 信号带宽 B	400 MHz
信号采样率 f_s	480 MHz
载机速度 v_a	200 m/s
飞行高度 H	10 km
分辨率 $\rho_r \times \rho_a$	$0.38\text{ m} \times 0.38\text{ m}$

考虑做基2的FFT的要求,将回波信号划分为64个子孔径,每个子孔径包括64个采样点,相邻子孔径之间重叠率 $O_{VR} = 50\%$ 。图7为第1帧、第32帧和第64帧子孔径成像结果直接进行叠加显示的效果。图中,点目标的方位向分辨率远远低于距离向,散射点位置明显地存在二维几何形变,且随着越远离成像区中心距离的增大愈加严重,同时3帧之间的失真程度也不同。这是几何失真必须得到准确校正的一个证明。图8是64帧子孔径图像采用文中算法校正几何失真和补偿空变相位误差后进行高分辨率成像的结果。此时图像的横纵坐标已经转换为地面x-y坐标,与图6所示的仿真点排列情况完全一致。点目标仿真成像结果的性能分析见表2。考虑到海明权对主瓣的展宽效应,中心点和边缘点的聚焦性能均满足设计要求,旁瓣被抑制到-40dB以下。

图9是某机载SAR实测数据成像的结果。该雷达工作在前斜视模式下,具有 10° 左右的斜视角。图9(a)是采用本

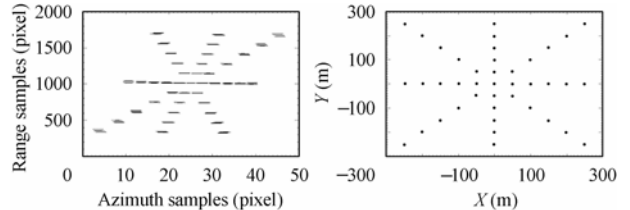


图7 3帧子孔径图像叠加显示的效果图

图8 本文研究的重叠子孔径成像算法点目标仿真结果

Fig.7 Overplot of 3 coarse-resolution subimages

Fig.8 Simulation results of the proposed overlapped subaperture algorithm

表2 点目标仿真成像结果性能分析(海明加权)

Tab.2 Performance analyses of the simulation results

(Hamming weighted)

	成像区中心点		成像区边缘点	
	距离向	方位向	距离向	方位向
分辨率(m)	0.48	0.46	0.51	0.52
峰值旁瓣比(dB)	-40.2	-41.5	-40.1	-41.1
积分旁瓣比(dB)	-30.7	-37.9	-37.6	-34.8

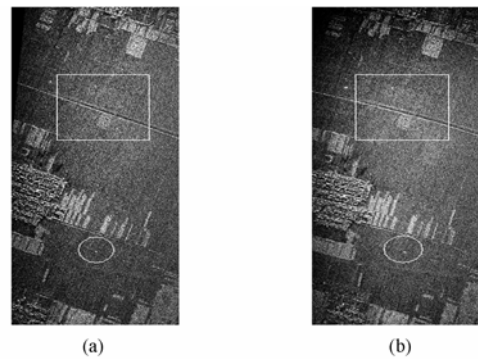


图9 实测数据成像结果
(a)本文研究的重叠子孔径算法 (b)极坐标格式算法

Fig.9 Live SAR data processed with
(a) The proposed overlapped subaperture algorithm
(b) Polar format algorithm

文研究的重叠子孔径算法处理的结果。图中宽度方向为方位向, 图像像素间隔为 $0.75\text{m} \times 0.75\text{m}$ 。图 9(b) 是同一场景采用 PFA 处理的结果。分别比较图 9(a) 与 9(b) 中不同类型目标区域的成像结果, 孤立的强散射点聚焦情况以及笔直的道路、方形的农田轮廓表明, 本文研究的成像算法不仅能实现对斜视区域的高分辨率成像, 同时还有效地解决了 PFA 中存在的几何失真问题。

6 结束语

与一般的成像算法相比较, 子孔径成像方法具有并行性好、适应性强的优点。通过对信号的时域划分、分别成像和相参积累, 它可以突破分辨单元走动对雷达视线转角的限制, 实现对地面区域的高分辨率成像。本文对机载大斜视 SAR 的高分辨率子孔径成像处理算法进行了完整的分析, 着重强调了校正子图像几何失真和实现空变运动补偿对实现高分辨率成像的重要性, 提出了一种基于地平面散射点网格划分和地理坐标转换与定位的几何失真校正方法, 实现了空变的相位误差补偿。该校正方法以载机和照射区的成像几何关系为基础, 不需要预先设置任何校正参考物。点目标仿真和实测数据成像结果证明该处理方法是有效的。

此外, 该成像处理方法不过分依赖雷达系统对信号处理和运动补偿的作用, 单个子孔径成像算法简单可靠, 为在一定条件下实现机载 SAR 系统的大斜视、高分辨实时成像和流处理提供了一种可行的方法。由该算法获得的经几何失真校正的成像结果为 SAR 图像的后期应用, 如地图匹配、导航、目标定位等方面提供了可靠的依据, 具有一定的现实意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, *et al.*. Developments in Radar Imaging. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, 20(4): 363-400.
- [2] Munson D C, O'Brien J D, Jenkins W K. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar. *Proc. IEEE*, 1983, 72(8): 917-925.
- [3] Raney R K, Runge H, Bamler R, *et al.*. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [4] Cafforio C, Prati C, Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(2): 194-207.
- [5] Mittermayer J, Moreira A, Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2213.
- [6] Sack M, Ito M R, Cumming I. Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to synthetic aperture radar processing. *IEE Proc.-F*, 1985, 132(1): 45-57.
- [7] Wu K H, Vant M R. Extensions to the step transform SAR processing technique. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1985, 21(3): 338-344.
- [8] Burns B L, Cordaro J T. A SAR image-formation algorithm that compensates for the spatially-variant effects of antenna motion. SPIE Conference Proceedings, Orlando, April 1994, 2230: 14-24.
- [9] Tsunoda S I, Pace F, Stence J, *et al.*. Lynx: a high-resolution synthetic aperture radar. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2000, 5: 1-8.
- [10] Walker B, Sander G, Thompson M, *et al.*. A high-resolution, four-band SAR testbed with real-time image formation. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996, 3: 27-31.
- [11] Walk J L. Range-Doppler imaging of rotating objects. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, 16(1): 23-52.
- [12] 朱岱寅, 朱兆达, 叶少华, 等. 机载 SAR 斜视区域成像研究, 电子学报, 2002, 30(9): 1387-1389.
- [13] Li Yong, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Geometric distortion correction in the subaperture processing for high squint airborne SAR imaging. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, 6: 3919-3922.
- [14] 李勇, 朱岱寅, 朱兆达. 机载合成孔径雷达的高分辨率子孔径成像算法研究, 电子与信息学报, 2004, 26(Suppl.): 91-96.

李 勇: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像算法和雷达信号处理。

朱岱寅: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为雷达成像和信号处理。

朱兆达: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号检测与处理。