

机载高波段 SAR 大斜视角大场景成像算法研究

李悦丽 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 该文基于合成孔径雷达(SAR)斜视成像模式,分析了机载成像处理中斜距展开和二维解耦合近似相位误差与波长、斜视角、分辨率和测绘带宽度等参数的关系,证明二阶近似可满足常规高波段 SAR 大斜视角成像要求,但改进 RD 算法的聚集深度问题限制了成像方位孔径,常规 CS 算法未考虑二次距离压缩(SRC)的空变性,其大场景成像效果均不佳,只有 NCS 算法考虑了 SRC 随距离的线性变化,大场景高波段 SAR 成像聚焦性能最优。对毫米波 SAR 点目标成像的计算机仿真结果证明了上述分析结果。

关键词: SAR; 大斜视角成像; 二维频域解耦合; 距离走动校正; 二次距离压缩; 非线性 CS 算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2046-05

Algorithms for the Application of High Squint Large Region Image Formation to Hi-Band Airborne SAR

Li Yue-li Liang Dian-nong

(School of Electronics Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: Based on the squinted mode Synthetic Aperture Radar (SAR), this paper describes the relationship between system parameters (wavelength, squint angle, resolution, swath) and phase errors, which caused by the approximation of slant range and 2-D frequency domain decoupling. The secondary approximation is proven to be accurate enough in normal Hi-band high squint SAR image formation. But, range-focus problem with time domain range walk correction limits the azimuth aperture of the Refined Range Doppler (RRD) algorithm; and the variant space Secondary Range Compression (SRC) causes degradation in the performance of normal Chirp Scaling (CS) algorithms. So with the consideration of variant space SRC, the Nonlinear CS algorithm is suitable for large region high squint imaging. Simulations of a MMW-band SAR system demonstrate the convolution.

Key words: SAR; High squint imaging; 2-D frequency domain decoupling; Range walk correction; Secondary range compression; Nonlinear chirp scaling algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有远距离、高分辨、全天候等特点,广泛应用于多种对地观测领域,通常情况下 SAR 以正侧视模式工作,但在军事应用中,有时需要对航迹向场景进行侦察,或者对后向散射系数依赖于观测角的特定目标需进行大斜视角成像;而高波段雷达具有重量轻,小体积和低功耗等特点,机载和弹载 SAR 系统常采用高波段雷达,故有必要开展高波段 SAR 大斜视角成像研究工作。

机载高波段 SAR 大斜视角成像面临的主要问题有:(1)多普勒模糊问题;(2)距离迁徙(range cell migration)校正问题,大斜视角成像会引起严重的距离走动(range walk)现象,如场景大,还需考虑距离弯曲(range curve)的空变性。(3)运动补偿问题。国外从上世纪 90 年代起开始开展 SAR 大斜视角成像研究,DLR 重点研究了 CS 类算法用于 L 波段, C 波段和 X 波段 SAR 的成像性能^[1-3],国内近年来也陆续开

展了大斜视角成像算法的研究^[4, 5]。本文面向应用需求重点研究了机载高波段 SAR 大斜视角成像算法,首先分析大斜视成像几何关系模型的近似处理引入的相位误差,然后分析了距离走动校正前后高阶耦合项的变化,并选择 RD,扩展 CS, NCS 算法定量分析了二阶解耦合残余相位误差随波长、斜视角、分辨率和测绘带宽度等参数的变化趋势。文章指出:时域距离走动校正所带来的聚集深度问题限制了同类成像算法的方位孔径长度,而空变的二次距离压缩项则影响了常规 CS 算法的距离向聚集效果;通过补偿二次距离压缩随距离的线性变化项,NCS 算法用于大斜视角大场景成像聚焦性能最优。成像仿真实验对算法性能进行了比较和评估,验证了分析结果。

2 大斜视角成像近似误差分析

图 1 所示为条带式 SAR 斜视成像的几何关系模型,载机沿航线以速度 v 匀速飞行,斜视角为 φ_0 , t_m 表示慢时域时间,天线波束照射区域的中心点 P 到雷达的距离为 R_0 ,到雷达航线的垂直距离为 R_B ,阴影所示为成像平面,与中

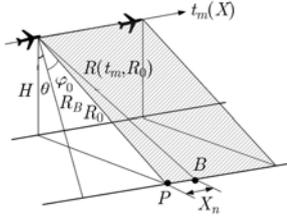


图1 大斜视角成像几何关系模型

心点横距为 X_n 的场景上点目标 B 在 t_m 时刻的瞬时斜距表达式为^[6]

$$R(t_m; R_B) = \sqrt{R_0^2 + (vt_m - X_n)^2 - 2R_0(vt_m - X_n)\sin\varphi_0} \quad (1)$$

2.1 斜距近似误差分析

由于 $|vt_m - X_n| \ll R_0$, 将式(1)在 $X = X_n$ 处进行泰勒展开, 得到用多普勒参数表示的多阶逼近距离模型为

$$R(t_m; R_B) = \frac{R_B}{\cos\varphi_0} - \frac{\lambda}{2} f_{DC} \left(t_m - \frac{X_n}{V} \right) - \frac{\lambda}{4} f_{DR} \left(t_m - \frac{X_n}{V} \right)^2 - \frac{\lambda}{12} f'_{DR} \left(t_m - \frac{X_n}{V} \right)^3 + \dots \quad (2)$$

其中第2项为距离走动, 第3项为二次距离弯曲, 第4项为三次距离偏移。大斜视角成像会引起严重的距离走动现象, 对距离走动校正的方法可分为时域校正和频域校正, 对距离弯曲的校正则多在频域完成, 三次距离偏移量的补偿则需视具体情况确定, 其绝对值在方位孔径边缘 $T_a/2$ 达到最大为^[7]

$$\Delta R_3 = \frac{\lambda}{12} f'_{DR} t_m^3 = \frac{(vT_a)^3 \cos^3\varphi_0 \sin\varphi_0}{16R_0^2} \quad (3)$$

$$\text{等效最大相位误差为 } \varepsilon_3 = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_3 \quad (4)$$

由于式(3)引起的距离偏移很小, 通常可忽略其对包络的影响, 但需考虑对应相位误差对方位聚焦性能的影响。式(3)中的方位孔径时间 T_a 的取值与雷达系统波长和方位分辨率有关, 可先求出相应方位分辨率所需 SAR 的孔径长度 L_a , ρ_a 为方位分辨力, K_a 为加权系数, 采用矩形窗时 $K_a = 1$, $\Delta\theta$ 为相参积累角:

$$L_a = 2R_0 \text{tg} \frac{\Delta\theta}{2} \approx R_0 \Delta\theta = 2R_0 \arcsin \left(\frac{K_a \lambda}{4\rho_a} \right) \quad (5)$$

然后估算单点目标成像所需的孔径时间:

$$T_a = \frac{L_a}{v} = \frac{2R_B}{v \cos\varphi_0} \arcsin \left(\frac{K_a \lambda}{4\rho_a} \right) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4), 得到不同波段雷达在一定方位分辨率条件下 ($\rho_a = 1\text{m}$), 三次距离偏移等效相位误差随斜视角的变化曲线如图2所示。图2表明 ε_3 具有随着斜视角的增大而增大的趋势, 由于三次相位误差主要引起脉压输出信号的非对称畸变, 当存在强目标时会在图像上产生重影^[8], 因此对波长较长的 SAR, 当斜视角增大时不能忽略三次相位误差的补偿; 但随波长减小, 合成孔径长度变小, 三次距离偏移引起的最大相位误差也随之减小, 采用二次近似足以满足中分辨成像的要求。

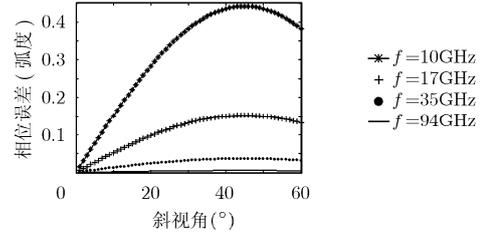


图2 $\varepsilon_3 \sim \varphi_0$ 曲线 ($\rho_a = 1\text{m}$)

2.2 时域距离走动校正的影响

假定雷达发射 LFM 信号, \hat{t} 表示快时间, f_c 表示中心频率, T_p 表示信号脉宽, γ 表示调频率, 采用驻定相位原理, 点目标回波基频信号变换到波数域的表达式为^[6]

$$s(f_r, f_a; R_B) = \sigma_n a_r(\bullet) a_a(\bullet) \exp(-j\pi f_r^2 / \gamma) \exp[-j2\pi f_a R_0 \sin\varphi_0 / v] \exp \left[-j4\pi \frac{R_B}{\lambda} \sqrt{\left(1 + \frac{f_r}{f_c}\right)^2 - \left(\frac{\lambda f_a}{2v}\right)^2} \right] \quad (7)$$

最后一项为二维耦合项, 记为 $\Phi(f_r, f_a; R_B)$, 可展开为 (f_r / f_c) 的泰勒级数表达式^[9]:

$$\Phi(f_r, f_a; R_B) = \Phi_0(f_a; R_B) + \Phi_1(f_a; R_B) \frac{f_r}{f_c} + \Phi_2(f_a; R_B) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 + \Phi_3(f_a; R_B) \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 + \dots \quad (8)$$

二阶, 三阶耦合项是影响聚焦性能的主要误差来源, 其表达式如下:

$$\eta_2 = \frac{2\pi R_B \sin^2\varphi}{\lambda \cos^3\varphi} \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2, \quad \eta_3 = -\frac{2\pi R_B \sin^2\varphi}{\lambda \cos^5\varphi} \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^3 \quad (9)$$

已知二维频率与二维分辨率的关系:

$$|f_r|_{\max} = c/4\rho_r, \quad |f_a|_{\max} = f_{dc} + v/2\rho_a = \frac{2v \sin\varphi_0}{\lambda} + v/2\rho_a \quad (10)$$

将距离频率和方位频率的最大值代入式(9), 可得到各阶耦合项随斜视角变化的趋势, 如图3所示。对一定斜视角, 波长越短, 耦合程度越小, 由于二阶耦合项对成像测绘带影响最大, 耦合越小, 距离调频率近似程度越高, 成像测绘带越宽, 以 8mm 波长雷达为例, 当斜视角小于 60° 的时候, 三阶耦合项小于 $0.0001R_B$, 可忽略三阶以上的耦合项; 如距离走动校正进行时域完成, 则 f_{dc} 补偿为 0, 由于大幅度减小了 $|f_{a \max}|$, 二阶耦合项明显减小。图4为时域距离走动校正后的二阶耦合项随斜视角变化趋势。

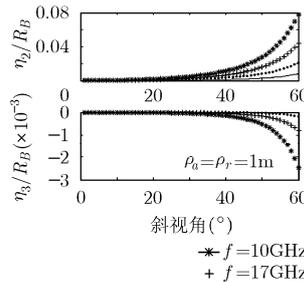


图3 $\eta_2 / \eta_3 \sim \varphi_0$ 曲线(走动校正前)

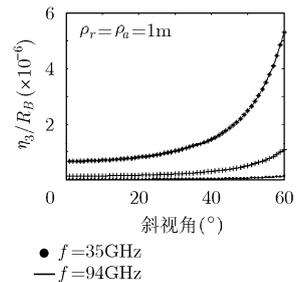


图4 $\eta_2 \sim \varphi_0$ 曲线(走动校正后)

但时域距离走动校正会带来聚焦深度问题, 距离走动校正范围需小于聚焦深度 δR_0 [7]:

$$\delta R_0 \leq \frac{2\lambda R_0^2}{(vT_a \cos \varphi_0)} = \frac{2\rho_a^2 \cos^2 \varphi_0}{\lambda} \quad (11)$$

δR_0 对应横向聚焦深度为 $L_F = \delta R_0 / \sin \varphi_0$ 。如图 5(a) 所示, 在一定分辨率条件下 ($\rho_a = 1\text{m}$) 横向聚焦深度随斜视角增大而急剧减小, 成像所需合成孔径长度 L_a 则随斜视角增大而增大(见式(4)和图 5(b)), 用于高分辨成像时存在方位孔径过小, 成像幅宽受限的问题, 但在实时信号处理要求高而分辨率适中的机载和弹载成像中可以优先考虑采用。

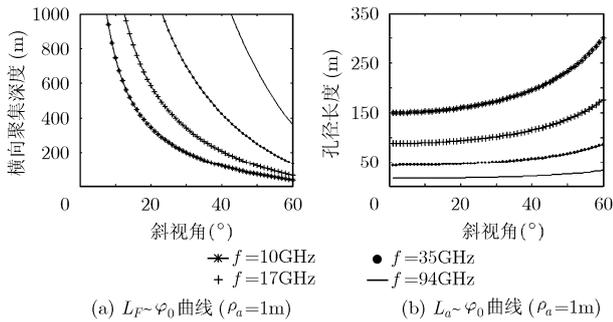


图5 横向聚焦深度,合成孔径长度与斜视角的关系曲线

2.3 二阶解耦合残余误差分析

大斜视角成像的二阶耦合项是频域处理的主要误差来源, 二阶解耦合后的残余误差对大斜视角成像的影响主要取决于调频率近似程度, 对式(7)作距离向 IFFT 得到距离调频率 $\gamma_e(f_a; R_B)$ 的表达式:

$$\frac{1}{\gamma_e(f_a; R_B)} = \frac{1}{\gamma} - R_B \frac{2\lambda \sin^2 \varphi}{c^2 \cos^3 \varphi} \quad (12)$$

调频率 $\gamma_e(f_a; R_B)$ 不仅随方位频率变化, 还随距离变化, 由于波数域不能表征距离量, 对二阶耦合项解耦合, 必须选择一定的参考距离 R_{B0} , 对调频率进行等效近似, 处理后的二阶残余相位误差主要引起主瓣展宽和峰值旁瓣比(PSLR)下降。进行调频率近似处理后的残余二阶耦合相位误差在回波距离频率脉冲边缘达到最大值 $\Delta\phi_{\max}$:

$$\Delta\phi_{\max} = \pi\Delta\gamma_e \left(\frac{T_P}{2} \right)^2 \leq \pi/4 \quad (13)$$

以 $\pi/4$ 作为误差门限, 由式(13)可确定成像允许的最大斜视角和测绘带宽度, 图 6 对 RD, ECS, NCS 等 3 种算法进行调频率等效近似后的最大残余二阶相位误差进行了分析, 从仿真结果分析: 当二维分辨率一定时, 残余二阶解耦合误差随测绘带增大而增大, 随波长的减小而减小, 随斜视角增大而增大, RD 误差最大, CS 算法相对 RD 算法改善效果不明显, 但考虑到 RD 算法在校正距离弯曲时还引入了小斜视角近似^[6], 所以实际可处理的斜视角还达不到图 6 中所示的范围, CS 算法可处理的斜视角实际上远远大于原始 RD 算法; NCS 算法的残余二阶耦合误差最小, 成像分辨率 1m, 成像测绘带 6km 时, 对 Ka 波段最大斜视角可达 50° 。

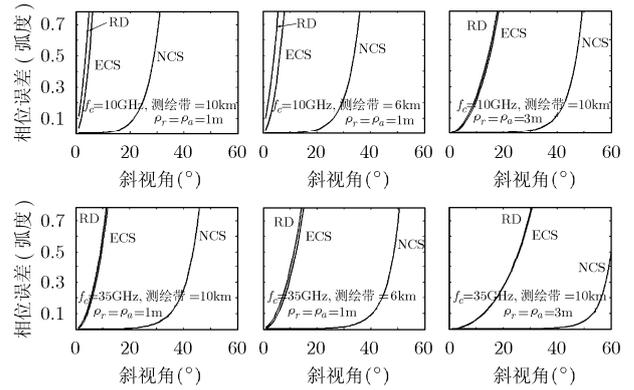


图6 3种成像算法的 $\Delta\phi_{\max} \sim \varphi_0$ 曲线

3 数据处理方法

3.1 方位向数据处理

斜视 SAR 回波的系统参数 PRF 由式(14)所决定:

$$BW_{fa} < \text{PRF} < 1/(2D/c + T_P) \quad (14)$$

其中 BW_{fa} 为方位向多普勒带宽, D 为测绘带宽度。为保证不发生多普勒模糊, 方位向采样的数据率一般远高于成像分辨率所需的处理带宽, 因此有必要在方位滤波后进行降采样处理(down sample)提高成像效率, 通常采用方位频谱扩展的方法^[2, 10], 但如 $\text{PRF} \gg BW_{pa}$, 传统的方位频谱扩展方法效率不高, 可在方位向滤波降采样处理后, 将方位频谱搬移到多普勒带宽中心的位置, 再按式(15)进行频谱扩展, 达到大大降低方位向处理量的目的:

$$\min(f_{DC}) - \frac{BW_{pa}}{2} < f_a < \max(f_{DC}) - \frac{BW_{pa}}{2} \quad (15)$$

3.2 CS 因子的选择与距离向数据处理

CS 类算法利用线性调频(LFM)信号的调频尺度变换特性实现距离徙徙校正, 采用的 CS 因子为

$$C_s(f_{a\text{REF}}, f_a) = \cos \varphi_{\text{REF}} / \cos \varphi - 1 \quad (16)$$

$f_{a\text{REF}}$ 为 CS 校正选择的参考方位多普勒频率, 其值与斜视角 φ_{REF} 对应, $f_{a\text{REF}}$ 不同, 则 CS 变换的尺度不同。CS 操作后, 回波距离相位中心发生偏移, $f_{a\text{REF}}$ 越接近 f_{DC} , CS 变换后的相位中心偏移越小。因此, 对于斜视 SAR, 由于 $R(f_a; R_B) = R_B / \cos \varphi$, 如果采用标准 CS 因子, 则回波的距离相位中心偏移过大, 容易发生距离向折叠现象, 必须通过增大处理的测绘带宽度才能避免(会影响运算效率); 此外, 尺度因子的二次相位项会在距离调频信号中引入随距离变化的频移, 当频移足够大时会引起信号频带混叠或偏离处理带宽, 造成距离向脉冲响应函数恶化^[3]。为防止出现上述情况, CS 因子所选择的参考方位多普勒频率不应过度偏离 f_{DC} , 如扩展 CS 算法采用的就是 $C_s(f_{DC}, f_a)$, 非线性 CS 算法则选择靠近 f_{DC} 的多普勒频率作为参考频率。

4 计算机仿真实验

4.1 点目标成像效果对比

为验证处理方法和成像算法, 按照表 1 给出的参数对

35GHz 毫米波 SAR 大斜视角成像效果进行了计算机仿真, 相对测绘带宽定义为 $\Delta R_B/R_B$ 。图 7 给出了分别采用时域校正距离走动频域校正距离弯曲的改进 RD 算法^[6]、扩展 CS 算法^[10]以及非线性 CS 算法^[3]对参考距离处和测绘带边缘点目标进行成像的结果。

表 1 毫米波合成孔径雷达系统参数

项目	数值	项目	数值
航线至参考目标最近距离	10km	斜视角	45°, 50°
载频	35GHz	飞行速度	200m/s
波长	8.6mm	分辨率	1m×1m
雷达方位波束角宽度	2°	最大相对测绘带宽	0.3
信号带宽	150MHz	发射信号脉宽	5 μs

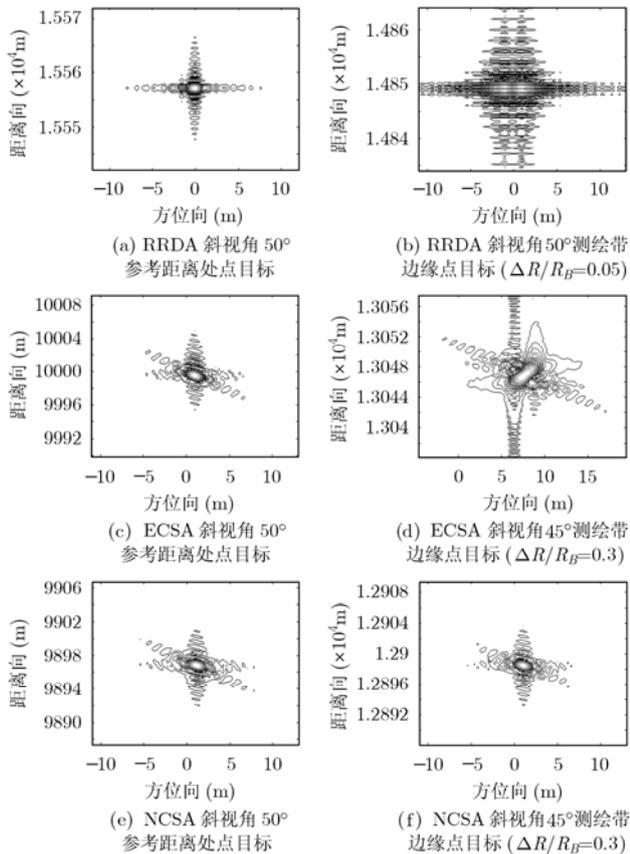


图 7 8mm SAR 点目标仿真图像

从成像结果可以看出对位于参考距离处的点目标, 改进 RD, 扩展 CS 与 NCS 算法在斜视角 50° 左右得到的点目标聚焦效果都很好, CS 类算法当斜视角增大时会出现明显的非正交旁瓣, 而 RD 算法得到的成像结果没有非正交旁瓣; 当点目标位于最大相对测绘带宽 0.3 处时 CS 类成像结果如图 7(d)和 7(f)所示, 其中扩展 CS 算法的所成点目标距离向

的主瓣展宽, 旁瓣抬高, 聚焦效果明显恶化; NCS 算法成像聚焦效果没有明显变化, 改进 RD 算法点目标成像结果主要是方位向聚集性能恶化, 方位向主瓣展宽, 旁瓣抬高, 当相对测绘带宽增大 0.05 时已经非常明显, 仿真结果与上文的理论分析是一致的。

4.2 成像性能评估

(1)成像质量比较 算法对毫米波 SAR 成像时只需补偿到二阶近似误差即可, ECS 算法在波数域完成 RCM 补偿, 其等效调频率近似误差主要引起距离向主瓣展宽和 PSLR (峰值旁瓣比)下降; 改进 RD 算法在时域完成距离走动的校正, 频域残余距离徙动校正后的等效调频率近似误差可忽略, 在孔径边缘成像质量的恶化体现为方位向主瓣展宽和 PSLR 的下降; NCS 算法进一步补偿了调频率随距离的线性变化, 大斜视角大场景成像聚焦性能最优。

(2)运算效率比较。从成像流程分析, 改进 RD 算法和扩展 CS 算法主要由四次 FFT 运算组成; NCS 算法主要由六次 FFT 运算组成, 改进 RD 和扩展 CS 算法的运算量较小, 更适合实时处理。

5 结束语

本文基于大斜视角 SAR 的几何模型, 从斜距近似、解耦合处理和等效调频率近似的角度分析了高波段 SAR 成像处理算法的主要误差来源, 以及雷达系统参数与解耦合残余二阶相位误差的关系, 证明了 NCS 算法用于高波段 SAR 大场景大斜视角成像的聚焦效果最好, 而改进 RD 算法和 ECS 算法则需分别通过在方位向和距离向划分子孔径提高聚集精度, 仿真试验的结果与理论分析吻合。本文所讨论的算法未考虑几何校正和运动补偿问题, 这将是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] Moreira A and Huang Y. Chirp scaling algorithm for processing SAR data with high squint angle and motion error [A]. SPIE: SAR Data Processing for Remote Sensing, 1994, 2316: 268-277.
- [2] Moreira A and Huang Y. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(9): 1029-1040.
- [3] Davidson G W, Cumming I G, and ITO M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.
- [4] 邵玉龙, 朱兆达. 前斜视机载 SAR 成像处理的 RD 算法研究 [J]. *信号处理*, 1999, 15(3): 249-253.
Shao Yu-long and Zhu Zhao-da. Study on RD algorithm used in squint mode airborne SAR processing[J]. *Signal Processing*, 1999, 15(3): 249-253.

- [5] 刘光炎, 黄顺吉. 非线性 CS 算法的前斜视 SAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1308–1315.
Liu Guang-yan and Huang Shun-ji. Nonlinear CS algorithm for forward-squint SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(10): 1308–1315.
- [6] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第 5 章.
Bao Zheng, Xing Men-dao, and Wang Tong. Radar Image Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005, Chapter 5.
- [7] Yeo Tat Soon, Tan Ngee Leng, and Zhang Cheng Bo, *et al.*. A new subaperture approach to high squint SAR processing [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 954–968.
- [8] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 第 4 章.
Zhang Cheng-bo. Synthetic Aperture Radar Principle, System Analysis and Application [M]. Beijing: Publishing House of Science, 1989, Chapter 4.
- [9] 王亮, 练有品, 黄晓涛, 周智敏. 大斜视角与大波束角 SAR 成像比较[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1672–1675.
Wang Liang, Lian You-pin, Huang Xiao-tao, and Zhou Zhi-min. Comparison of large-squint and large-beamwidth SAR imaging, *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(9): 1672–1675.
- [10] Moreira A, Mittermayer J, and Scheiber R. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(5): 1123–1136.
- 李悦丽: 女, 1973 年生, 副教授, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 梁甸农: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统总体设计、信号处理等领域的研究工作.