

弹载斜视 SAR 成像的改进波数域算法

肖忠源* 徐华平 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要: 导弹非匀速直线运动且速度快的特点,使得弹载 SAR 回波信号的多普勒参数随斜距的变化较大,因此在波数域进行相位补偿的波数域算法很难实现弹载 SAR 测绘带内的高精度成像处理。该文在经典波数域算法及相关文献的基础上对波数域成像算法进行改进,将 2 维波数域中的方位压缩处理变换至时域或空域进行,从而可完成成像过程中多普勒参数适应距离的变化,降低原有算法使用同一参数带来的相位误差,因此改进算法能适用于宽测绘带的弹载 SAR 精确成像。仿真实验验证了改进算法的有效性。

关键词: 弹载 SAR; 宽测绘带; 波数域算法

中图分类号: TN959.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1453-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01192

A Modified Wave-number Domain Algorithm for Missile-borne Squinted SAR Data Processing

Xiao Zhong-yuan Xu Hua-ping Li Chun-sheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The Doppler parameters of missile-borne SAR received signal vary much with slant range due to missiles' high speed and non-ideal movements. Thus applying the classical wave-number domain algorithm can hardly achieve high precision for missile-borne SAR imaging processing. This paper proposes a modified wave-number domain algorithm based on the classical one to meet the demand of high resolution and wide swath for missile-borne SAR imaging. Azimuth compression is implemented in the range time domain or range space domain instead of two dimensional wave-number domain in which it is carried out for the classical algorithm. And Doppler parameters can not correspond to the variation of slant range in the two dimensional wave-number domain. Consequently the modified approach can eliminate the phase error brought by using the same Doppler parameters for the classical algorithm. Simulation result illustrates the validity of the approach.

Key words: Missile-borne SAR; Wide swath; Wave-number domain algorithm

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种具有高分辨率的微波成像雷达,其原理是利用雷达平台的运动来达到大孔径天线,从而获得方位向的高分辨率雷达图像。与光学、红外传感器相比,SAR 具有全天候、全天时工作能力的独特优点。将 SAR 应用于导弹制导中,因其能在黑夜、云雾、烟尘及强光干扰、恶劣天气等环境下发现隐蔽和伪装的目标,故 SAR 更能适应于实际作战中导弹工作的复杂环境。

在 SAR 系统中,雷达不断发射线性调频脉冲信号,接收地面回波,然后从回波信号中提取目标的相位信息,并以此获取目标图像,这一从回波信号

到形成图像的过程即为成像处理。由于 SAR 系统接收的回波在信号空间中呈弥散状,故需要一个对相位敏感的处理单元并运用相关成像处理算法来获得高分辨率的聚焦图像。

波数域算法是高分辨率 SAR 成像常用的一种算法,Bamler^[1,2]提出的波数域算法是利用正侧视模型推导而来,在这种模型下,由于多普勒中心频率为零,无法实现斜视模型下的精确成像。文献[3]给出的基于等效斜视距离模型的波数域算法能实现斜视下的成像处理。文献[4]提出了一种应用于弹载横向规避弹道的 RD 算法,该算法在没有增加成像复杂性的基础上实现了非直线孔径的成像处理,但其成像精度较低。文献[5]给出了结合运动补偿的改进波数域算法,可实现多普勒参数的精确补偿,但由于采用子孔径处理,故存在子孔径融合及成像处理

2010-11-04 收到,2011-01-17 改回

国家自然科学基金(60901055),航空基金(20090151001)资助课题

*通信作者: 肖忠源 xzy@ee.buaa.edu.cn

效率降低问题。文献[6]将改进的 CS 算法应用到大场景的弹载成像处理,能适用于宽测绘带成像,但其成像效率较低且对发射信号存在误差时的处理较差。文献[7]也给出了一种适用于低频大斜视的改进波数域算法,但其对在 2 维波数域的插值精度要求较高。文献[8]提出了一种使多普勒参数适应距离变化的波数域改进算法,但由于该算法是基于分解的距离模型而加以改进的,相比本文提出的改进算法,其成像误差要大些,且计算量也大。

现有算法在 2 维波数域实现的方位向压缩处理,通常采用参考距离处(一般为测绘带中心)的多普勒参数实现整个成像场景的方位压缩。但从理论及仿真测试结果可以看出,由于多普勒参数随距离向的变化,导致 2 维波数域进行的方位压缩在距离向的宽度受到限制,即算法在距离向的聚焦深度受到了限制,因此无法适用于宽测绘带的 SAR 高分辨率成像^[9]。解决这一问题的思路即在方位压缩过程中使用随距离变化的多普勒参数,而 2 维波数域中无法做到这一点,因此必须将方位压缩变换至时域或空域中进行,以便实现多普勒参数与距离的对应。本文基于此思想,将方位压缩参考函数进行展开,利用展开式重新推导波数域算法,使其能在时域或空域进行方位压缩,因而能够在成像过程中使用变化的多普勒参数,可适用于宽测绘带的 SAR 高分辨率成像。文中利用仿真数据对改进算法进行了验证,实验结果证明了改进算法的有效性。

2 弹载斜视 SAR 成像机理

2.1 空间几何关系

本文主要探讨弹载斜视情况下的目标成像,由于导弹的飞行速度快,在较短时间内,可将导弹的非线性运动近似看作线性运动。为便于分析,近似采用基于等效斜视距离模型的空间几何关系。

基于等效斜视距离模型^[10]的几何关系图如图 1 所示,有

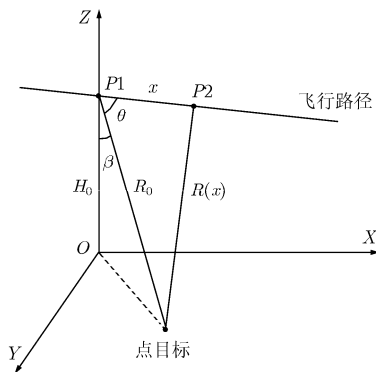


图 1 等效斜视距离模型的几何关系图

$$R(x) = \sqrt{x^2 + R_0^2 - 2xR_0 \cos \theta} \quad (1)$$

其中 $R(x)$ 为雷达天线相位中心到目标的斜距,它是目标位置的函数, R_0 为波束中心照射目标时雷达与目标之间的距离, θ 为等效斜视角, β 为入射角, H_0 为雷达高度,雷达从位置 $P1$ 飞行到位置 $P2$ 的飞行距离为 $x = vt$, v 为雷达等效速度,实际中分为水平速度和垂直速度两个分量。考虑到弹载成像的大斜视实时性要求,成像过程中必须结合运动补偿以获得聚焦性能较好的雷达图像,而等效斜视距离模型中的等效斜视角 θ 和雷达等效速度 v 恰好是通过多普勒参数求出^[11],因而采用本空间几何关系是有效的。

2.2 信号模型

SAR 发射的线性调频信号可简写为

$$s(t) = \exp\{j\pi f_r(t - (\tau_p/2))^2\}, \quad 0 \leq t \leq \tau_p \quad (2)$$

其中 f_r 为线性调频率, τ_p 为线性调频信号的脉冲宽度。

该线性调频信号到达距离为 $R(x)$ 且后向散射系数为 σ 的点目标后,经其散射后回传至雷达,回波去载频后的信号可表示为

$$s(x, t) = \sigma \cdot \exp\left\{j\pi f_r \left[t - \frac{\tau_p}{2} - \frac{2R(x)}{c}\right]^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi R(x)}{\lambda}\right\}, \quad 0 \leq t \leq \tau_p \quad (3)$$

其中 c 为光速, λ 为雷达的载波波长,且满足 $\lambda = c/f_0$, f_0 为载波频率。

由于目标的后向散射系数 σ 的数值对成像算法的推导不产生影响,故为方便起见,在此取 σ 的值为 1。

2.3 经典波数域算法

波数域算法最早是由 Cafforio 等人^[12]根据地震波的波动方程推导出来的,之后 Bamler^[2]又利用傅里叶变换性质重新推导了该算法。本节仅根据 Bamler 所推导的算法流程图(见图 2)作一简要介绍,以便与本文所提出的改进算法作比较。

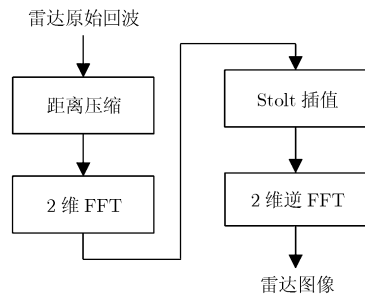


图 2 经典波数域算法流程图

从图 2 可以看出, 算法的核心是在 2 维波数域中进行的 Stolt 插值, 因而对插值精度要求较高。而 2 维波数域中无法实现多普勒参数随距离变化的更新, 在实现时通常选用参考距离处的多普勒参数进行压缩, 从而导致非参考距离处的压缩出现散焦。

3 波数域改进算法推导

首先, 对去载频后的信号进行距离压缩, 由于此部分与原有算法一致, 略去推导。用 δ -函数代替脉冲压缩后的 sinc 函数, 可得距离压缩后的信号为

$$p(x, t) = \delta\left(t - \frac{2R(x)}{c}\right) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi R(x)}{\lambda}\right\} \quad (4)$$

3.1 方位向处理

方位向处理包括方位压缩和距离徙动校正, 距离徙动校正是隐含在方位压缩参考函数中, 以下不再作特别说明。

(1) 方位压缩参考函数 用距离徙动量代替式(4)中的 $R(x)$, 则得到方位压缩参考函数^[1]

$$h_a(x, t) = \delta\left(t - \frac{2R_\Delta(x)}{c}\right) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi R_\Delta(x)}{\lambda}\right\} \quad (5)$$

其中 $R_\Delta(x)$ 为距离徙动量, 且有

$$R_\Delta(x) = R(x) - R_0 \quad (6)$$

将式(1), 式(6)代入式(5)中, 并对 t 作傅里叶变换, 将其变换到距离频域, 有

$$h_a^t(x, \omega; R_0) = \exp\left\{-j \frac{2(\omega + \omega_0)(\sqrt{x^2 + R_0^2 - 2xR_0 \cos \theta} - R_0)}{c}\right\} \quad (7)$$

其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为载波角频率, 上标 t 表示对 t 作傅里叶变换, 以下类同。

利用驻定相位原理对 $h_a^t(x, \omega; R_0)$ 作关于 x 的傅里叶变换, 将其变化至方位波数域, 有

$$H_a(k_x, \omega; R_0) = A \cdot \exp\left\{-jR_0 \left[\sin \theta \sqrt{\left(\frac{\omega + \omega_0}{c/2}\right)^2 - k_x^2} - \frac{\omega + \omega_0}{c/2} + k_x \cos \theta\right]\right\} \quad (8)$$

其中 A 为常数, k_x 为方位向波数。

(2) 方位压缩参考函数的分解模型 将式(8)中的根号部分在 $\omega = 0$ 处展开成泰勒级数, 并忽略 ω 的二次及更高次项, 有

$$\sqrt{\left(\frac{\omega + \omega_0}{c/2}\right)^2 - k_x^2} \approx \sqrt{\left(\frac{\omega_0}{c/2}\right)^2 - k_x^2} + \frac{2\omega_0}{c\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} \omega \quad (9)$$

将式(9)代入式(8), 整理后则可得方位压缩参考函数的分解模型。

$$H_a(k_x, \omega; R_0) = A \cdot \exp\left\{-jR_0 \frac{2}{c} \left[\sin \theta \sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2} - \omega_0 + \frac{ck_x \cos \theta}{2}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\omega}{c} R_0 \left[\frac{\omega_0 \sin \theta}{\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} - 1\right]\right\} \quad (10)$$

由式(10)可看出, 该分解模型的相位由距离频率无关项(但与距离有关)和距离频率线性项两项组成。需要说明, 该分解只保留 ω 的一次项, 若要求更高的分辨率, 则需补偿 ω 的高次项, 但成像效率会有所降低。

(3) 方位向处理 利用分解后的方位压缩参考函数对经距离压缩后的 SAR 回波进行方位压缩处理, 可得到^[1]

$$Q^x(k_x, R_0) = \frac{1}{2\pi} \int P(k_x, \omega) H_a^*(k_x, \omega; R_0) \exp\left\{j \frac{2\omega R_0}{c}\right\} d\omega \quad (11)$$

其中 $P(k_x, \omega)$ 为经距离压缩后的回波 $p(x, t)$ 的 2 维傅里叶变换, $H_a^*(k_x, \omega; R_0)$ 为 $H_a(k_x, \omega; R_0)$ 的共轭。

实际处理时, 通常将成像场景的中心线对应的波束中心照射斜距作为参考距离, 记为 $R_{0\text{ref}}$, 则有 $H_a(k_x, \omega; R_0) = H_a(k_x, \omega; R_{0\text{ref}}) \cdot H_a(k_x, \omega; R_0 - R_{0\text{ref}})$ (12)

由于距离傅里叶变换是将每条数据线的起始点作为时间零点, 即对应斜距为 R_{min} 的时刻, 而实际的时间零点为斜距等于零的位置, 故有

$$P^t(k_x, \omega) = P^{t'}(k_x, \omega) \cdot \exp\left\{-j \frac{\omega 2R_{\text{min}}}{c}\right\} \quad (13)$$

其中 $t' = t - t_{\text{min}}$, 且 $t_{\text{min}} = 2R_{\text{min}}/c$ 。

将式(10), 式(12), 式(13)代入式(11)有

$$Q^x(k_x, R_0) = \exp\left\{j(R_0 - R_{0\text{ref}}) \frac{2}{c} \left[\sin \theta \sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2} - \omega_0 + \frac{ck_x \cos \theta}{2}\right]\right\} \cdot \frac{1}{2\pi} \int \tilde{P}(k_x, \omega) \cdot \exp\left\{j \frac{2\omega}{c} \left[(R_0 - R_{0\text{ref}}) \frac{\omega_0 \sin \theta}{\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} + (R_{0\text{ref}} - R_{\text{min}})\right]\right\} d\omega \quad (14)$$

其中 $\tilde{P}(k_x, \omega) = P^{t'}(k_x, \omega) \cdot H_a^*(k_x, \omega; R_{0\text{ref}})$ 。

利用傅里叶变换性质, 解出式(14)中的积分项可得

$$Q^x(k_x, R_0) = \exp\left\{j(R_0 - R_{0ref})\frac{2}{c}\left[\sin\theta\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2} - \omega_0 + \frac{ck_x \cos\theta}{2}\right]\right\} \cdot \tilde{P}\left(k_x, (R_0 - R_{0ref}) \cdot \frac{\omega_0 \sin\theta}{\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} + (R_{0ref} - R_{min})\right) \quad (15)$$

令 $R'_0 = R_0 - R_{min}$ ，则有

$$Q^x(k_x, R'_0) = \exp\left\{j(R'_0 + R_{min} - R_{0ref})\frac{2}{c}\left[\sin\theta\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2} - \omega_0 + \frac{ck_x \cos\theta}{2}\right]\right\} \cdot \tilde{P}\left(k_x, (R'_0 + R_{min} - R_{0ref}) \cdot \frac{\omega_0 \sin\theta}{\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} + (R_{0ref} - R_{min})\right) \quad (16)$$

式(16)即为改进后的波数域算法的最终实现式，由于式中采用与 R'_0 对应的多普勒参数，即完成多普勒参数随距离变化的更新，可实现非参考距离处方位向的精确聚焦。

3.2 改进算法的实现

改进算法的实现流程图如图 3 所示。由图 3 可看出，除参考函数相乘在 2 维波数域进行，其余关键步骤均在距离时域或空域进行。

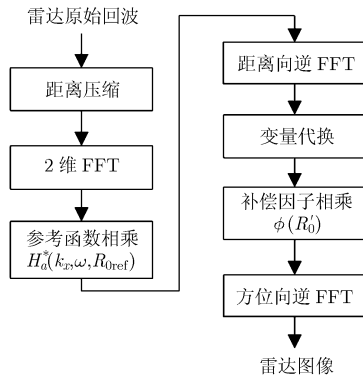


图 3 改进算法流程图

- (1)将雷达原始回波进行距离压缩;
- (2)作 2 维 FFT, 并乘上参考距离处的方位压缩

参考函数的共轭

$$H_a^*(k_x, \omega; R_{0ref}) = \exp\left\{jR_{0ref}\frac{2}{c}\left[\sin\theta\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2} - \omega_0 + \frac{ck_x \cos\theta}{2}\right]\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{2\omega}{c}R_{0ref}\left[\frac{\omega_0 \sin\theta}{\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} - 1\right]\right\} \quad (17)$$

(3)作距离向逆 FFT;

(4)利用式(18)作坐标变换处理

$$R_0 = (R'_0 + R_{min} - R_{0ref})\frac{\omega_0 \sin\theta}{\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2}} + (R_{0ref} - R_{min}) \quad (18)$$

(5)乘上补偿因子

$$\phi(R'_0) = \exp\left\{j(R'_0 + R_{min} - R_{0ref})\frac{2}{c}\left[\sin\theta\sqrt{\omega_0^2 - (ck_x/2)^2} - \omega_0 + \frac{ck_x \cos\theta}{2}\right]\right\} \quad (19)$$

(6)作方位向逆 FFT, 得到复图像。

4 仿真实验分析

为验证改进算法的有效性，选取弹载斜视 SAR 点目标回波数据进行仿真。仿真参数为：雷达波长 0.03 m，天线孔径 0.6 m，发射信号带宽 50 MHz，信号脉宽 5 μ s，采样率 60 MHz，导弹水平速度 800 m/s，垂直速度 600 m/s，脉冲重频 4000 Hz，导弹初始高度 10000 m，入射角 30°，等效斜视角 85°。在场景中设置 9 个点目标，沿方位向的中间 3 个点所在距离为参考距离，并且距离向相邻两点目标的间隔为 500 m，方位向相邻两点目标的间隔为 75 m。为减小仿真数据规模，某些参数与实际不符。本实验分别对基于等效斜视距离模型的波数域成像算法^[3]及本文的改进算法进行仿真，选取场景中 3 个点目标(A, B, C)进行分析，在未加权情况下各项指标参数如表 1, 表 2 所示，成像结果如图 4, 图 5 所示，由于两算法在距离向指标均一致，只截取方位向剖面图如图 6~图 9 所示。

比较两指标参数表及成像结果可知，两种算法在参考距离处的指标参数基本一致，在非参考距离

表 1 基于等效斜视距离模型的波数域成像算法的指标参数

| 点目标位置* | 方位向 | | | 距离向 | | |
|-----------------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|
| | 分辨率(m) | PSLR(dB) | ISLR(dB) | 分辨率(m) | PSLR(dB) | ISLR(dB) |
| A(512,2048) | 0.300 | -13.259 | -10.085 | 2.651 | -13.347 | -10.055 |
| B(712,2053.625) | 0.312 | -1.005 | 10.698 | 2.661 | -13.332 | -10.129 |
| C(712,1741.563) | 0.313 | -0.081 | 10.546 | 2.656 | -13.302 | -10.052 |

表 2 改进算法的指标参数

| 点目标位置* | 方位向 | | | 距离向 | | |
|-------------|--------|----------|----------|--------|----------|----------|
| | 分辨率(m) | PSLR(dB) | ISLR(dB) | 分辨率(m) | PSLR(dB) | ISLR(dB) |
| A(512,2048) | 0.300 | -13.266 | -10.089 | 2.661 | -13.349 | -10.437 |
| B(712,2048) | 0.299 | -13.278 | -10.100 | 2.666 | -13.306 | -10.481 |
| C(712,1748) | 0.300 | -13.278 | -10.102 | 2.661 | -13.305 | -10.477 |

* 表示点目标冲激响应的峰值位置

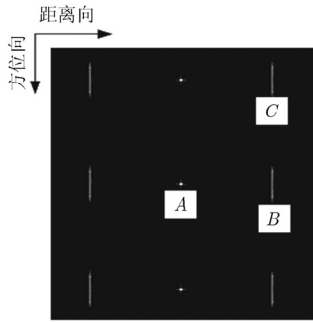


图 4 基于等效斜视距离模型的波数域成像算法的成像结果

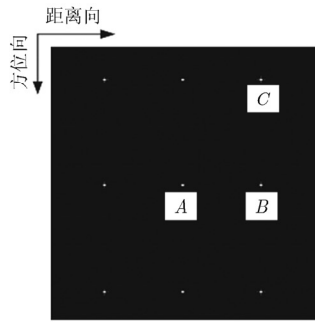


图 5 改进算法的成像结果

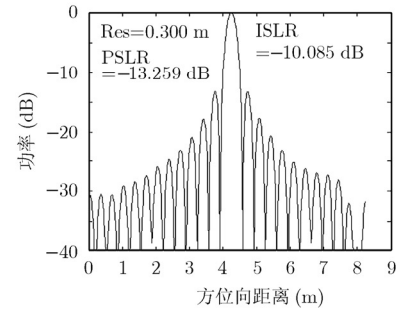


图 6 基于等效斜视距离模型的波数域成像算法 A 点方位向剖面图

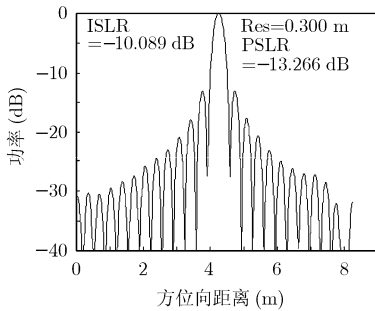


图 7 改进算法 A 点方位向剖面图

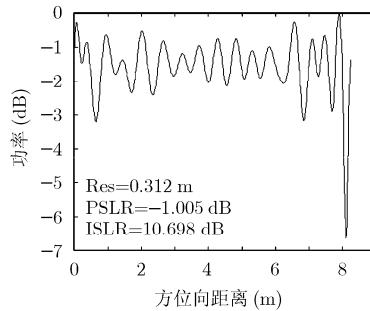


图 8 基于等效斜视距离模型的波数域成像算法 B 点方位向剖面图

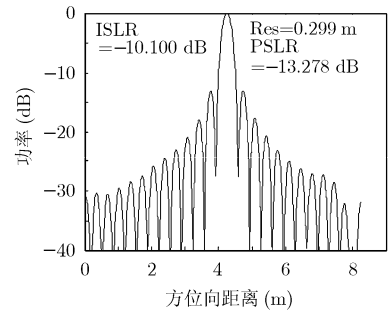


图 9 改进算法 B 点方位向剖面图

处的参数差别较大。从表 1 中 B,C 两点方位向的指标参数、成像结果及剖面图均可看出，基于等效斜视距离模型的波数域算法无法使用随距离变化的多普勒参数进行方位压缩，导致非参考距离处出现严重的散焦现象，在雷达高速飞行的弹载平台中表现得尤为明显；而改进算法可实现多普勒参数随距离变化的更新，能保持非参考距离处与参考距离处点目标成像质量的一致性，适用于较大测绘带的 SAR 成像处理。但正如之前所述，改进算法在将方位压缩参考函数分解时略去了高次项，成像精度会稍低，在更高分辨率的需求下，需考虑高次项对成像精度的影响，并加以补偿。

5 结束语

本文对经典波数域算法及相关文献中的基于等效斜视距离模型的波数域算法进行改进，将原有算法在 2 维波数域中进行的方位向压缩处理变换至距

离时域或空域进行，使成像处理过程中使用的多普勒参数能与距离一一对应，从而降低原有算法使用同一参数带来的成像误差，提高非参考距离处的成像精度，仿真结果验证了改进算法的有效性，因而可适用于较宽测绘带的高分辨率 SAR 成像。应该指出，本文仅根据多普勒参数应适应距离的变化这一要求而对经典波数域算法作了相应改进，而对实际弹载 SAR 成像而言，还有一些问题仍需作进一步的深入研究，如弹载 SAR 系统的工作模式、运动补偿、实时性以及大斜视成像等，后续的研究将围绕这些问题展开。

参考文献

[1] Bamler R. A systematic comparison of SAR focusing algorithms[C]. Proc. IGASS' 91, Helsinki, 1991: 1005-1009.
 [2] Bamler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706-713.
- [3] 刘利国, 周荫清. 基于等效斜视距离模型的高分辨率星载SAR波数域成像算法[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1998-2001.
Liu Li-guo and Zhou Yin-qing. Equivalent-squint-range-model wavenumber domain focusing algorithm for high resolution spaceborne SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 1998-2001.
- [4] 秦玉亮, 王建涛, 王宏强等. 基于RD算法的横向规避弹道弹载SAR成像[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 729-733.
Qin Yu-liang, Wang Jian-tao, and Wang Hong-qiang, *et al.* Range-Doppler algorithm-based missile-borne SAR imaging with lateral avoidance trajectory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(4): 729-733.
- [5] 谭鹤伟, 邓云凯. 一种改进的斜视SAR运动补偿波数域算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 156-159.
Tan Ge-wei and Deng Yun-kai. A kind of method of extended wavenumber domain algorithm for squint SAR motion compensation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 156-159.
- [6] 易予生, 张林让, 刘昕等. 一种弹载侧视SAR大场景成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 587-592.
Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, and Liu Xin, *et al.* A large scene imaging algorithm for missile-borne side-looking SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 587-592.
- [7] An Dao-xiang, Huang Xiao-tao, and Zhou Zhi-min. Extended wavenumber domain algorithm for airborne low frequency SAR in highly squinted mode[C]. Radar Conference, 2009 IET International, Guilin, 2009: 1-4.
- [8] 刘利国. 大测绘带星载SAR波数域成像算法研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 295-298.
Liu Li-guo. The refined wavenumber domain algorithms for wide swath spaceborne SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 295-298.
- [9] Ian G C and Frank H W. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Norwood: Artech House Publishers, 2005, Chapter 5-Chapter 7.
- [10] 黄岩, 李春升, 陈杰等. 高分辨率星载SAR改进Chirp Scaling成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35-38.
Huang Yan, Li Chun-sheng, and Chen Jie, *et al.* Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(3): 35-38.
- [11] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 132-185.
Wei Zhong-quan. Synthetic Aperture Radar Satellite[M]. Beijing: Science press, 2001: 132-185.
- [12] Cafforio C, Prati C, and Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(2): 194-207.
- 肖忠源: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为高分辨率雷达成像处理.
- 徐华平: 女, 1977年生, 博士, 副教授, 从事SAR成像处理及图像处理研究.
- 李春升: 男, 1963年生, 博士, 教授, 从事SAR卫星总体仿真及成像处理研究.