

基于频域插值的大角度俯冲弹载 SAR 成像方法

刘昌捷¹, 郭 苹¹, 吴富恩¹, 张梦琪¹, 唐世阳²

(1. 西安科技大学西安市网络融合通信重点实验室, 西安, 710054;

2. 西安电子科技大学雷达信号处理全国重点实验室, 西安, 710071)

摘要 弹载合成孔径雷达(SAR)在大角度俯冲运动阶段, 由于其复杂的飞行特性, 回波信号存在严重的耦合性和空变性, 这将导致传统的聚焦算法失效。针对这一问题, 提出了一种改进的极坐标格式(PFA)频域成像算法。首先建立大角度俯冲弹载 SAR 的斜距模型, 并对距离历程进行泰勒级数展开, 然后利用级数反演法推导高精度的回波二维频谱。在二维频域, 将高阶交叉耦合项进行二维分解, 并在此基础上推导出新的频域二维插值映射函数, 极大提升了聚焦成像的效果。相对于传统 PFA, 文中算法更适用于大角度俯冲弹载 SAR, 并通过仿真实验验证了其有效性。

关键词 弹载合成孔径雷达; 大角度俯冲; 级数反演; 极坐标格式算法

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.04.009

中图分类号 TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)04-0056-06

A Large-Angle Dive Missile-Borne SAR Imaging Method Based on Frequency Domain Interpolation

LIU Changjie¹, GUO Ping¹, WU Fuen¹, ZHANG Mengqi¹, TANG Shiyang²

(1. Xi'an Key Laboratory of Network Convergence Communication, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Aimed at the problems that as for missile-borne SAR at a large-angle dive movement stage, the echo signal has serious coupling and space-variance due to its complex flight characteristics to make the traditional focusing algorithm invalid, an improved frequency domain imaging algorithm of polar format algorithm (PFA) is proposed. Firstly, a range model of large-angle dive missile-borne SAR is established, and the range history is expanded in Taylor series. And then the high-precision two-dimensional spectrum of echo is derived by the series inversion method. Finally, the high-order cross-coupling terms are decomposed in the two-dimensional frequency domain. Moreover, a new two-dimensional interpolation mapping function is derived, greatly improving the performance of focused image. Compared with traditional PFA, the proposed algorithm is more suitable for large-angle dive missile-borne SAR, and is valid.

Key words missile-borne SAR; large angle dive; series reversion; polar format algorithm

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(61701393, 61971329); 陕西省重点研发计划(2020ZDLGY02-08); 空间微波技术国家级重点实验室开放基金课题(HTKJ2022KL504019)

作者简介: 刘昌捷(1997-), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。E-mail: 1020366756@qq.com

引用格式: 刘昌捷, 郭苹, 吴富恩, 等. 基于频域插值的大角度俯冲弹载 SAR 成像方法[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(4): 56-61. LIU Changjie, GUO Ping, WU Fuen, et al. A Large-Angle Dive Missile-Borne SAR Imaging Method Based on Frequency Domain Interpolation[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(4): 56-61.

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种全天候、全天时的高分辨成像雷达,能够获取高精度的二维雷达图像^[1-2]。弹载 SAR 平台将实时获取的 SAR 图像与导弹上数据库中的基准图像进行匹配,就可以再由几何关系解算导弹位置坐标,从而能够达到提高制导精度的目的^[3-4]。与水平机动情况下弹载 SAR 不同,大角度俯冲弹载 SAR 可以获取更多潜在的地面信息能够高分辨成像,具有广泛的研究前景^[5-6]。

由于大角度俯冲弹载 SAR 独特的飞行方式,速度和加速度的垂直分量远大于常规水平机动轨迹,使回波存在严重的距离-方位耦合和空变特性,导致传统的成像方法无法聚焦成像^[7]。对此国内外有不少学者提出了一些解决方法,文献[8]为了消除大角度俯冲弹载 SAR 高阶速度和加速度带来的空变,提出了一种两级频域滤波算法,然而其成像在近似线性轨迹下存在较大的包络校正误差和相位均衡误差。文献[9~11]提出几种改进的非线性调频变标算法,可在一定的斜视角下解耦合且无失真高精度成像,但是在高阶加速度的情况下,其成像会存在一定的残差。文献[12~14]提出了几种改进的快速后向投影算法(fast back projection, FBP)可以应用于大角度俯冲弹载 SAR 并获得良好的性能。然而其作为一种时域算法,效率远低于频域算法,故并不能作为大角度俯冲弹载 SAR 轨迹下的最优成像算法。

极坐标格式算法(polar format algorithm, PFA)由于其独特的解耦合性能,不受斜视角的限制,能获取高分辨的弹载 SAR 聚焦图像,近年来得到广泛研究^[15]。然而其波前弯曲近似为一平面,对高度信息变化敏感,其聚焦深度受到限制。特别是对于大角度俯冲弹载 SAR 来说,该飞行模式下存在较大的前视角和垂直速度,将给图像引入显著的空变,其聚焦成像效果会恶化^[16-17]。

本文考虑到 PFA 算法独特的解耦能力,在传统 PFA 算法的基础上,提出了一种改进的频域成像方法。首先建立弹载 SAR 大角度俯冲阶段的几何模型,然后对距离历程进行四阶泰勒级数展开,并通过级数反演法推导回波的二维频谱。在二维频域,对频谱高阶耦合项进行二维分解,并推导新的频域二维插值映射函数。由于补偿了回波信号的耦合性和空变性,改进的频域 PFA 在大角度俯冲情况下具有更好的聚焦性能。

1 信号模型

大角度俯冲弹载 SAR 的几何模型如图 1 所示,平台沿着非线性轨迹 g 飞行, v, a 分别是平台的速度矢量,加速度矢量。

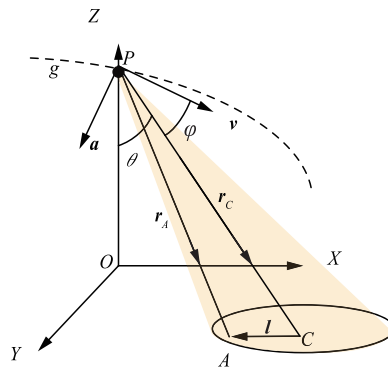


图1 大角度俯冲弹载 SAR 几何模型

假设 P 点为方位中心时刻,平台的高度为 h ,从 P 到地面场景上任意点 A 和中心参考点 C 的斜距矢量分别用 r_A 和 r_C 表示, l 是 C 点到 A 点的矢量。 θ 表示下视角, φ 表示方位中心时刻的波束与速度矢量的夹角,即前斜视角。则任意点的距离历程 $|r_A(t_m)|$ 可表示为:

$$|r_A(t_m)| = |r_C(t_m) + l| \quad (1)$$

式中: t_m 表示方位慢时间; $|\cdot|$ 表示取模运算; $|r_C(t_m)|$ 表示参考点距离历程,可以表述为下式:

$$|r_C(t_m)| = |r_C - vt_m - at_m^2/2| \quad (2)$$

设发射信号为线性调频信号,在距离压缩后,点 A 在距离频域/方位时域中的回波信号可表示为:

$$s_0(f_r, t_m) = \epsilon_0 \omega_r(f_r) \omega_a(t_m) \cdot \exp\left\{-j \frac{4\pi(f_r + f_c)}{c} |r_A(t_m)|\right\} \quad (3)$$

式中: ϵ_0 是复散射系数; $\omega_r(\cdot)$ 和 $\omega_a(\cdot)$ 是距离频域和方位时域的包络; f_c 为载频; f_r 为距离频率; c 为电磁波传播速度。

2 成像算法原理

2.1 传统的 PFA

在传统 PFA 中,对距离历程进行一维泰勒级数展开:

$$|r_A(t_m)| \approx |r_C(t_m)| + \frac{r_C(t_m)}{|r_C(t_m)|} l \quad (4)$$

将式(4)代入(3)中,经过距离压缩后的距离频域/方位时域回波信号可以表示为:

$$s_0(K_r, t_m) = \varepsilon_0 \omega_r(K_r) \omega_a(t_m) \cdot \exp\left(-jK_r \left(|\mathbf{r}_C(t_m)| + \frac{\mathbf{r}_C(t_m)}{|\mathbf{r}_C(t_m)|} \mathbf{l} \right) \right) \quad (5)$$

式中: $K_r = 4\pi(f_r + f_c)/c$ 是距离向波数。在回波相位中, 第 1 项是空不变项, 可以在距离频域/方位域进行一致补偿消除, 构造补偿函数:

$$H_0(K_r, t_m) = \exp(jK_r |\mathbf{r}_C(t_m)|) \quad (6)$$

假设目标平坦光滑即 $\mathbf{l} = (x, y, 0)$, 经过一致补偿后中心点目标可以很好的聚焦, 然后利用插值映射来完成边缘点目标的处理:

$$\begin{cases} K_r v_x(t_m) x \rightarrow K_x x \\ K_r v_y(t_m) y \rightarrow K_y y \end{cases} \quad (7)$$

式中: $v_x(t_m)$ 与 $v_y(t_m)$ 是二维插值映射函数; K_x 和 K_y 分别表示插值映射后的距离波数和方位波数。

经过一致补偿和二维插值后, 通过二维傅里叶反变换可得到精确的聚焦图像。PFA 采用了平面波前近似, 并且在距离历程泰勒级数展开式中忽略了高次项的影响, 这大大限制了 PFA 的成像场景。

2.2 改进频域 PFA

弹载 SAR 在大角度俯冲阶段, 其运动轨迹估计较为复杂, 高阶运动参数所带来的影响不可忽略, 而传统 PFA 根据远场假设近似距离差, 其聚焦深度受到限制导致其不再适用于大角度俯冲弹载 SAR。因此, 基于大角度俯冲弹载 SAR 的几何模型, 提出了一种改进频域 PFA。

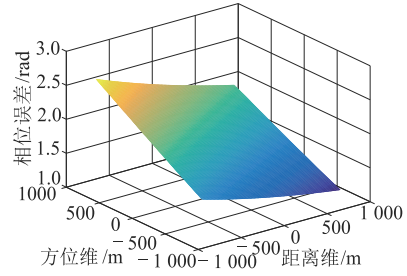
对 $|\mathbf{r}_A(t_m)|$ 在 $t_m=0$ 进行四阶泰勒级数展开:

$$|\mathbf{r}_A(t_m)| \approx \lambda_0 + \lambda_1 t_m + \lambda_2 t_m^2 + \lambda_3 t_m^3 + \lambda_4 t_m^4 \quad (8)$$

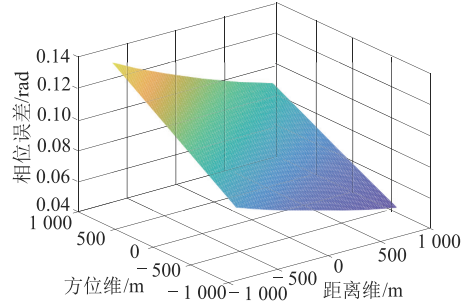
其中展开式系数可表示为:

$$\begin{cases} \lambda_0 = |\mathbf{r}_A| \\ \lambda_1 = (\lambda_0)^{-1} [\langle \mathbf{r}_A, -\mathbf{v} \rangle] \\ \lambda_2 = (2\lambda_0)^{-1} [\langle \mathbf{r}_A, -\mathbf{a} \rangle + \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle - (\lambda_1)^2] \\ \lambda_3 = (6\lambda_0)^{-1} [3\langle \mathbf{v}, \mathbf{a} \rangle - 6\lambda_1 \lambda_2] \\ \lambda_4 = (24\lambda_0)^{-1} [2^{-1} (\lambda_2)^2 + 8^{-1} \langle \mathbf{a}, \mathbf{a} \rangle + \lambda_1 \lambda_3] \end{cases} \quad (9)$$

本文对距离历程进行泰勒级数展开时采用近似处理, 由于 3 阶展开时 3 阶相位误差可以分解为线性相位和三次相位, 线性相位会使场景目标位置存在严重的偏移。因而本文对距离历程进行 4 阶泰勒级数展开, 并且忽略 5 阶以上高阶项, 这里通过仿真来验证距离历程近似处理带来的误差。仿真参数由表 1 给出, 由图 2 可知, 3 阶展开带来的误差大于 $\pi/4$, 由 5 阶以上高阶项带来的相位误差远远小于 $\pi/4$, 因此可以忽略其对成像质量的影响。



(a) 三阶展开误差



(b) 四阶展开误差

图 2 相位误差图

基于式(8)的高阶泰勒级数展开, 利用级数反演法来推导回波的二维频谱, 并保留到 4 阶可得:

$$s_1(f_r, f_a) = \varepsilon_0 \omega_r(f_r) \omega_a(f_a) \exp(-j4\pi \frac{f_r + f_c}{c} \Pi) \quad (10)$$

频谱的相位 Π 可以表示为:

$$\begin{aligned} \Pi = & \mu_0 + \mu_1 \left(\frac{c f_a}{f_r + f_c} \right) + \mu_2 (2) \\ & + \mu_3 (3) + \mu_4 (4) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: f_a 是方位频率。

频谱系数为:

$$\begin{cases} \mu_0 = -\lambda_0 + \frac{\lambda_1^2}{4\lambda_2} + \frac{\lambda_1^3 \lambda_3}{8\lambda_2^3} - \frac{\lambda_1^4 \lambda_4}{16\lambda_2^4} + \frac{9\lambda_3^2 \lambda_1^4}{64\lambda_2^5} \\ \mu_1 = \frac{\lambda_1}{2\lambda_2} + \frac{3\lambda_1^2 \lambda_3}{8\lambda_2^3} - \frac{\lambda_1^3 \lambda_4}{4\lambda_2^4} + \frac{9\lambda_3^2 \lambda_1^3}{16\lambda_2^5} \\ \mu_2 = \frac{1}{4\lambda_2} + \frac{3\lambda_1 \lambda_3}{8\lambda_2^3} - \frac{3\lambda_1^2 \lambda_4}{8\lambda_2^4} + \frac{27\lambda_3^2 \lambda_1^2}{32\lambda_2^5} \\ \mu_3 = \frac{\lambda_3}{8\lambda_2^3} + \frac{9\lambda_3^2 \lambda_1^3}{16\lambda_2^5} - \frac{\lambda_1 \lambda_4}{4\lambda_2^4} \\ \mu_4 = \frac{9\lambda_3^2}{1024\lambda_2^5} - \frac{\lambda_4}{256\lambda_2^4} \end{cases} \quad (12)$$

式(11)中, 频谱系数 μ_0 和 μ_1 分别为距离调制项和方位调制项, 可以确定目标的距离向和方位向位置。

频谱系数 ($\mu_n, n \geq 2$) 对应的项是 f_r 和 f_a 之间的交叉耦合相位, 必须在成像处理过程中消除。同时, 由式(12)可知, μ_n 与目标位置有关, 具有空变性。在大角度俯冲弹载 SAR 中, 由于存在较大的加

速度和高阶加速度,与传统情况相比具有显著的空变,大大降低了传统 PFA 的性能。为了消除高阶交叉耦合项,在二维频域将频谱系数用二维泰勒级数展开:

$$\mu_n = \mu_n^C + \kappa_n(\mu_0 - \mu_0^C) + \rho_n(\mu_1 - \mu_1^C), n \geq 2 \quad (13)$$

式中: μ_n^C 是参考点 C 的频谱系数; κ_n 和 ρ_n 为二维泰勒级数展开式的系数。 ($\mu_n, n \geq 2$) 可以被解耦成 3 个可分离的部分,即第 1 项参考项、第 2 项距离相关项和第 3 项方位相关项。根据式(13)中的二维展开式,将式(10)中的相位重新表示为:

$$\begin{aligned} \delta = & 4\pi\alpha\mu_0^C + \mu_1^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right) + \mu_2^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^2 + \mu_3^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^3 + \mu_4^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^4 + \\ & 4\pi\alpha \left(1 + \kappa_2 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^2 + \kappa_3 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^3 + \kappa_4 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^4\right) (\mu_0 - \mu_0^C) + \\ & 4\pi\alpha \left(\frac{f_a}{\alpha} + \rho_2 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^2 + \rho_3 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^3 + \rho_4 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^4\right) (\mu_1 - \mu_1^C) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\alpha = (f_r + f_c)/c$, 式(14)相位中第 1 项为参考项,可通过构造一致补偿函数消除,一致补偿函数构造如下:

$$H_2(f_r, f_a) = \exp \left\{ -j4\pi\alpha \left\{ \begin{aligned} & \mu_0^C + \mu_1^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right) + \mu_2^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^2 + \\ & \mu_3^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^3 + \mu_4^C \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^4 \end{aligned} \right\} \right\} \quad (15)$$

经过一致补偿处理后,通过二维傅里叶反变换 (IFFT) 可以很好地聚焦中心点目标,边缘点目标可以通过二维插值实现良好聚焦,新的插值函数推导如下:

$$\begin{cases} \alpha \left(1 + \kappa_2 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^2 + \kappa_3 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^3 + \kappa_4 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^4\right) \rightarrow f'_r \\ \alpha \left(\frac{f_a}{\alpha} + \rho_2 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^2 + \rho_3 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^3 + \rho_4 \left(\frac{f_a}{\alpha}\right)^4\right) \rightarrow f'_a \end{cases} \quad (16)$$

f'_r 和 f'_a 分别为映射后的距离频率和方位频率,经过一致补偿和二维插值后,回波信号可以表示为:

$$s_1(f_r, f_a) = \varepsilon_0 \omega_r(f_r) \omega_a(f_a) \cdot \exp[-j4\pi(f'_r(\mu_0 - \mu_0^C) + f'_a(\mu_1 - \mu_1^C))] \quad (17)$$

最后,通过二维傅里叶反变换可得到精确的聚焦图像。本文的成像流程图如图 3,成像流程与传统 PFA 相似,不同之处主要在于改进的 PFA 推导了新的频域插值函数,与传统 PFA 相比,改进的 PFA 具有更高的聚焦深度和聚焦性能。

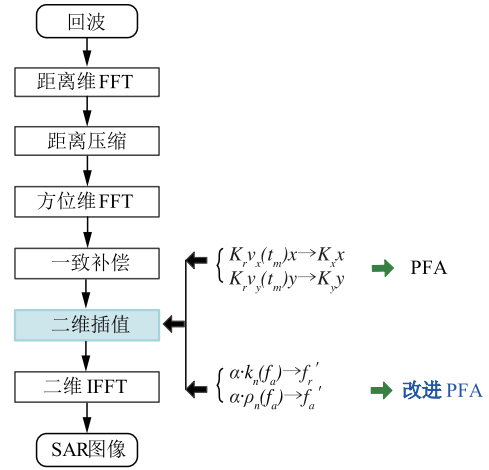


图 3 成像流程图

3 算法性能分析与实验

3.1 算法复杂度

分析传统 PFA 和本文算法计算量,设 N 是方位向采样点数, M 是距离向采样点数。在本文算法中,进行 2 次距离向 FFT/IFFT、2 次方位向 FFT/IFFT、2 次复数乘法和 2 次插值。因此,其计算量为:

$$O_1 = NM \log_2 N + NM \log_2 M + 2NM + 4kNM \quad (18)$$

传统 PFA 则进行了 2 次距离向的 FFT/IFFT, 1 次方位维的 IFFT, 2 次插值以及 1 次复数乘法。其计算量为:

$$O_2 = MN \log_2 N + NM \log_2 \frac{M}{2} + MN + 4kNM \quad (19)$$

式中: k 表示二维插值的核长度。从分析可知改进 PFA 和传统 PFA 计算量相近,但是本文算法聚焦性能更适用于大角度俯冲弹载 SAR 的情况。

3.2 仿真分析

仿真参数如表 1 所示。在地面场景上设置了 9 个点目标,如图 4 所示。在大角度俯冲弹载 SAR 轨迹下进行仿真,并给出了改进频域 PFA 与传统 PFA 的成像结果对比。

大角度俯冲弹载 SAR 的飞行方向和机动状态分别由速度矢量和加速度矢量决定,在仿真实验中忽略了高阶运动参数的影响。

表 1 仿真参数

| 参数 | 数值 |
|----------------------------|----------------|
| 斜视角/(°) | 17.2 |
| 采样频率/MHz | 200 |
| 速度/(m/s) | (0, 350, -650) |
| 加速度/(m/s ²) | (-10, 20, -50) |
| 2 阶加速度/(m/s ²) | (-5, 8, -25) |
| 高度/km | 7 |
| 斜距/km | 16 |
| 载频/GHz | 17 |
| 带宽/MHz | 125 |

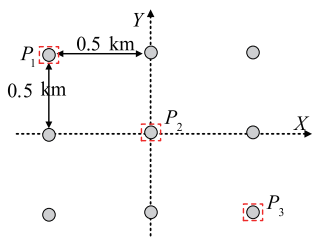


图4 仿真点目标示意图

图5为传统PFA的点目标聚焦结果,可以看出传统PFA对中心点目标可以很好地聚焦,但是在大幅度俯冲弹载SAR情况下,弯曲轨迹造成高阶项误差以及空变特性更明显,使得边缘点聚焦效果较差。

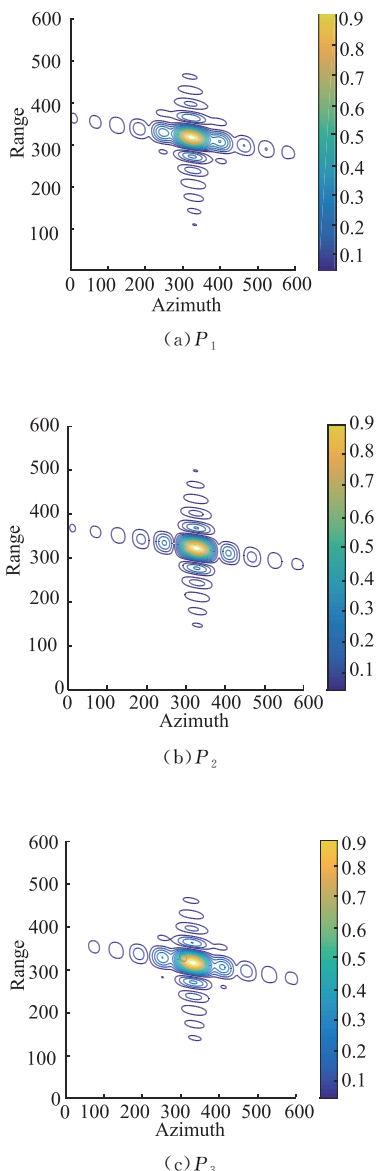


图5 传统PFA聚焦结果图

使用改进的频域PFA聚焦点目标 P_1 、 P_2 和 P_3 的成像结果如图6所示。可以看出改进的频域PFA对场景中心目标和边缘点目标都能很好地聚焦。

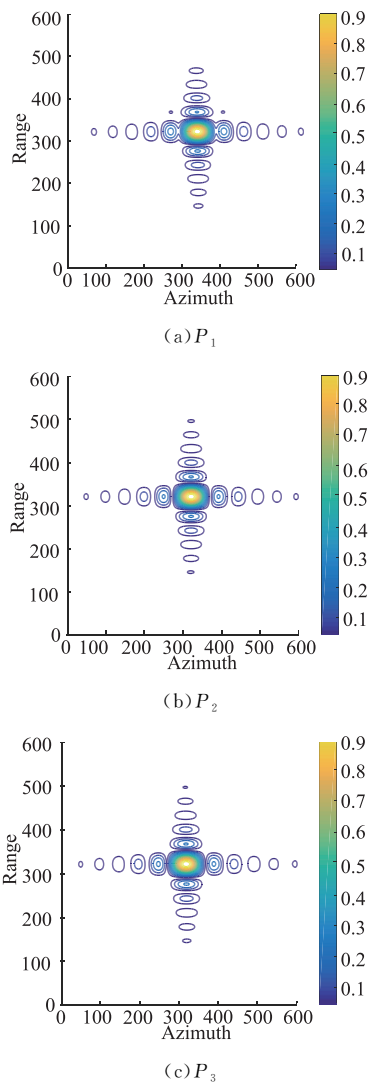


图6 改进PFA聚焦结果图

为了更好地对比2种算法的性能,表2给出了2种算法下点目标在方位向的聚焦性能参数,即脉冲响应宽度(impulse response width, IRW)、峰值旁瓣比(peak sidelobe ratio, PSLR)和积分旁瓣比(integrated sidelobe ratio, ISLR)。分析表2可知,改进PFA得到的性能参数都接近理想值,而传统PFA得到的性能参数在方位向上有很大的退化。这表明,与传统PFA相比,本文所提算法更适合大幅度俯冲弹载SAR,也证明了改进频域PFA算法的优越性。

表2 聚焦结果性能参数

| 算法/目标 | IRW/m | PSLR/dB | ISLR/dB |
|--------------|-------|---------|---------|
| 传统PFA/ P_1 | 2.400 | -3.170 | -2.390 |
| 传统PFA/ P_2 | 1.570 | -12.860 | -9.870 |
| 传统PFA/ P_3 | 2.650 | -4.150 | -3.650 |
| 改进PFA/ P_1 | 1.623 | -13.010 | -9.570 |
| 改进PFA/ P_2 | 1.610 | -13.160 | -10.010 |
| 改进PFA/ P_3 | 1.630 | -13.040 | -9.770 |

4 结语

本文针对大角度俯冲弹载 SAR 聚焦成像问题深入研究,在建立任意点斜距模型的基础上,对其进行四阶泰勒级数展开,并通过级数反演法推导回波的二维频谱,在二维频域对交叉耦合项进行二维泰勒级数展开,并推导了新的频域插值函数,提出了一种适用大角度俯冲弹载 SAR 改进的频域 PFA 成像算法。根据实验结果,改进频域 PFA 相比传统 PFA 具有更高的精度,更适用于大角度俯冲弹载 SAR。

参考文献

- [1] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005:116-182.
- [2] LIANG Y, DANG Y, LI G, et al. A Two-Step Processing Method for Diving-Mode Squint SAR Imaging with Sub-Aperture Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 811-825.
- [3] 别博文,孙路,邢孟道,等. 基于局部直角坐标和子区域处理的弹载 SAR 频域成像算法[J]. 电子与信息学报,2018,40(8):1779-1786.
- [4] 梁颖,张群,杨秋,等. 基于 FMCW 的弹载 SAR 俯冲成像方法研究[J]. 电子科技大学学报,2015,44(5):668-673.
- [5] LI D, LIN H, LIU H, et al. Focus Improvement for High-Resolution Highly Squinted SAR Imaging Based on 2-D Spatial-Variant Linear and Quadratic Rems Correction and Azimuth-Dependent Doppler Equalization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(1):168-183.
- [6] HUAI Y, LIANG Y, DING J, et al. An Inverse Extended Omega-K Algorithm for SAR Raw Data Simulation with Trajectory Deviations[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(6):826-830.
- [7] WU Y, SUN G C, YANG C, et al. Processing of Very High Resolution Spaceborne Sliding Spotlight SAR Data Using Velocity Scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(3):1505-1518.
- [8] 党彦锋,梁毅,别博文,等. 俯冲段大斜视 SAR 子孔径成像二维空变校正方法[J]. 电子与信息学报,2018,40(11):2621-2629.
- [9] ESPETER T, WALTERSCHEID I, KLARE I, et al. Bistatic Forward-Looking SAR: Results of a Spaceborne-Airborne Experiment[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2011,8(4):765-768.
- [10] ZHONG H, ZHANG S, HU J, et al. Focusing Non-parallel-Track Bistatic SAR Data Using Extended Nonlinear Chirp Scaling Algorithm Based on a Quadratic Ellipse Model[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12):2390-2394.
- [11] 周松,包敏,周鹏,等. 基于方位非线性变标的弹载 SAR 下降段成像算法[J]. 电子与信息学报,2011,33(6):1420-1426.
- [12] ZHANG L, LI L, QIAO Z, XU Z. A Fast BP Algorithm with Wavenumber Spectrum Fusion for High-Resolution Spotlight SAR Imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing, 2014, 11(9):1460-1464.
- [13] LUO Y, ZHAO F, LI N. A Modified Cartesian Factorized Back-Projection Algorithm for Highly Squint Spotlight Synthetic Aperture Radar Imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(6):902-906.
- [14] 叶晓明,张国峰,胡晓光,等. 近前视弹载 SAR 的改进后向投影成像算法[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(3):492-501.
- [15] 李盘虎,沈薇,毛新华. 一种适于弹载平台的 PFA 波前弯曲补偿方法[J]. 数据采集与处理,2018,33(1):93-105.
- [16] TANG Y, XING M D, BAO Z. The Polar Format Imaging Algorithm Based on Double Chirp-Z Transforms[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4):610-614.
- [17] CHEN J, WANG W, LUO Y, et al. Extended Polar Format Algorithm for Large-Scene High-Resolution WAS-SAR Imaging [J]. Remote Sensing, 2021, 14:5326-5338.

(编辑:徐敏)