

一种适于弹载平台的 PFA 波前弯曲补偿方法

李盘虎¹ 沈薇¹ 毛新华^{1,2}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 极坐标格式算法(Polar format algorithm, PFA)将球面波前近似为平面波前, 由此引入的误差会造成 SAR 图像出现严重的边缘模糊和几何失真。之前的波前弯曲补偿方法都是基于雷达平飞假设, 然而由于弹载 SAR 平台大俯冲、大斜视的机动特点, 使得现有的滤波器设计方法无法直接应用于雷达平台俯冲等机动条件, 波前弯曲误差补偿方法的应用范围因此受到很大限制。本文根据导弹飞行末端大斜视、大俯冲的机动特点, 推导了雷达俯冲机动条件下波前弯曲空间频域相位误差的精确表达式, 通过空变后滤波等处理实现了弹载 SAR 极坐标格式算法波前弯曲误差的精确补偿, 有效地解决了弹载 SAR 俯冲机动条件下 PFA 图像的模糊和几何失真问题。该方法扩展了图像后处理补偿极坐标格式算法波前弯曲误差的应用范围, 进一步完善了极坐标格式算法的波前弯曲补偿理论。最后通过仿真验证了公式和方法的正确性。

关键词: 弹载 SAR; 极坐标格式算法; 波前弯曲误差; 空变滤波; 几何失真

中图分类号: TN959.2 **文献标志码:** A

Wavefront Curvature Correction for Missile Borne Spotlight SAR Polar Format Image

Li Panhu¹, Shen Wei¹, Mao Xinhua^{1,2}

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. Radar Imaging and Microwave Photonic Technology Key Laboratory of Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The polar format algorithm (PFA) for spotlight synthetic aperture radar (SAR) is influenced by wavefront curvature error. The error introduced will cause the missile borne SAR image edge blur and geometric distortion seriously. The previous wavefront curvature compensation methods are all assumed that the height of the radar is constant. These compensation methods cannot be directly applied to the case of missile borne SAR where the platform always has large dive angle. The application range of wavefront curvature error compensation method is restricted greatly. In this paper, the precise expression of wavefront curvature phase error in the frequency domain of missile borne SAR is derived. After image domain post-processing steps, the problems of distortion and defocus of PFA image in the missile borne SAR are solved effectively. This method further improves the precision of wavefront curvature compensation. At last, the correctness of formula and method is verified by simulation.

Key words: missile borne SAR; polar format algorithm; wavefront curvature error; space variant filtering; geometric distortion

引言

聚束模式是一种常用的 SAR 成像工作模式^[1-3]。相比于条带模式,聚束模式可以获得很大的合成孔径和方位多普勒带宽,从而得到很高的方位向分辨率。极坐标格式算法(Polar format algorithm, PFA)^[2-8]是一种采用环形方式存储回波数据的聚束成像算法,鉴于极坐标格式算法的诸多优点,该算法已经成为聚束 SAR 成像的一种经典算法,由此衍生出的相关问题也已成为研究热点^[9-12]。

将球面波前按照平面波前处理是 PFA 算法理论推导过程中的一个基本假设,在该近似条件下,得到的 SAR 图像会出现严重的几何失真和边缘模糊,严重限制了 PFA 算法的有效聚焦半径。因此,寻求有效的波前弯曲补偿方法是 PFA 算法必须要解决的关键问题。

对于极坐标格式算法波前弯曲误差的补偿方法主要有 3 种,其中比较实用的一种是基于空变后滤波的补偿方法^[4-7],即通过对 SAR 图像进行空变后滤波处理,校正由波前弯曲引入的误差。对于这种空变滤波方法,滤波处理操作本身比较简单,原理和步骤也是固定的,其核心和难点在于空变滤波函数的设计。由于目前这些滤波器的设计都是基于雷达平飞假设,而弹载 SAR^[13-15]又因具有大俯冲大斜视等不同于雷达平飞的机动特点,因此现有的滤波器设计方法无法直接应用于雷达平台俯冲等机动条件,使得波前弯曲误差补偿方法的应用范围受到很大限制。

本文根据导弹飞行末端大斜视、大俯冲的机动特点,精确推导出波前弯曲空间频域相位误差的精确表达式,得到了针对大俯冲、大斜视弹载 SAR 平台的滤波器设计方法。同时通过图像后处理等操作,实现了弹载 SAR 极坐标格式算法波前弯曲误差的精确补偿,有效地解决了弹载 SAR 大斜视、大俯冲机动条件下极坐标格式算法所成图像的图像模糊和几何失真问题。新方法扩展了原有极坐标格式算法波前弯曲误差补偿方法的应用范围,是对极坐标格式算法波前弯曲补偿理论的进一步完善。

1 信号采集几何模型

弹载 SAR 大斜视、大俯冲的机动条件下的信号采集几何模型如图 1 所示。图 1 建立空间直角坐标系,坐标原点 O 为场景中心,为便于分析,假设雷达沿着直线 CA 以速度 v 斜向下做匀速运动,向下俯冲角度为 β ,雷达斜视角为 θ_s ,雷达天线的瞬时坐标记为 (x_a, y_a, z_a) ,其对应的瞬时方位角和俯仰角分别记为 θ, φ (孔径中心时刻分别为 0° 和 φ_0),场景中地面点目标 p 的坐标设为 $(x_t, y_t, 0)$,雷达天线到场景中心点 O 和目标点 p 的瞬时距离矢量分别记为 \mathbf{R}_a 和 \mathbf{R}_t ,模值 R_a 和 R_t 分别为

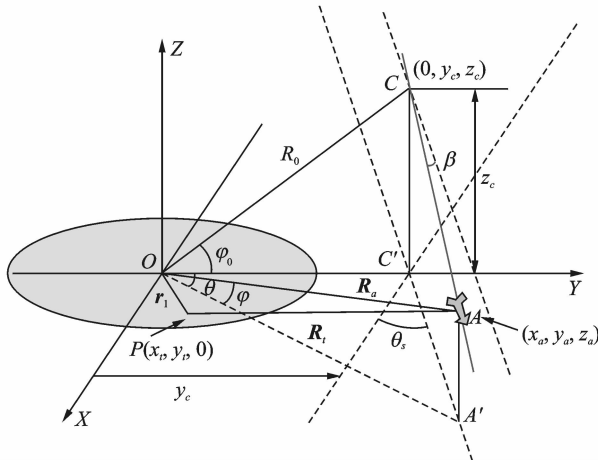


图 1 俯冲状态下聚束 SAR 的信号采集几何模型

Fig. 1 Missile borne spotlight SAR data collection geometry model

$$R_a = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2} \quad (1)$$

$$R_t = \sqrt{(x_a - x_t)^2 + (y_a - y_t)^2 + z_a^2} \quad (2)$$

2 波前弯曲误差分析

雷达发射线性调频信号 $S(\tau) = \exp(j2\pi f_0 \tau) \cdot \exp(j\pi k \tau^2)$, 遇到散射体反射的回波经过预处理后可以表示为

$$S(f_r, t) = A \exp\{j4\pi(f_0 + f_r)(R_a - R_t)/c\} = A \exp\{jK_r R_\Delta\} \quad (3)$$

式中: A 为信号幅度; c 为光速; f_0 为载波频率; f_r 为距离频率; $K_r = 4\pi(f_0 + f_r)/c$ 为径向空间频率; R_Δ 为天线到 O 点和目标 p 点的差分距离, 其值为 $R_a - R_t$, 为便于极坐标格式算法分析, 可以将 R_Δ 作式(4)分解, 由于极坐标格式算法将实际弯曲的波前假设成平面波前, R_Δ 通常被近似成 $\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a / R_a$, 由此造成的误差 R_e 如式(5)所示。

$$R_\Delta = \frac{\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a}{R_a} - \frac{|\mathbf{r}_t|^2}{2R_a} + \frac{(\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a)^2}{2R_a^3} + \frac{(\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a)|\mathbf{r}_t|^2}{2R_a^3} + \dots \quad (4)$$

$$R_e = R_\Delta - \frac{\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a}{R_a} = -\frac{|\mathbf{r}_t|^2}{2R_a} + \frac{(\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a)^2}{2R_a^3} + \frac{(\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a)|\mathbf{r}_t|^2}{2R_a^3} + \dots \quad (5)$$

在之前的分析中, 通常都是将误差 R_e 近似为式(5)中的前两项, 然而 R_e 的此种近似已经不能满足高分辨率 SAR 的成像要求。文献[5,6]给出了基于雷达平飞假设条件下高分辨率 SAR 成像时所需 R_e 的精确表达式, 但是由于弹载 SAR 平台往往存在大俯冲和大斜视, 应用条件相对于雷达平飞假设已经发生改变, 因此文献[5,6]给出的滤波器设计方法已无法直接推广应用于雷达平台俯冲等机动条件, 所以要想使极坐标格式算法满足弹载 SAR 平台的高分辨率需求, 就必须推导出弹载 SAR 大斜视、大俯冲机动条件下 R_e 的精确表达式用以支撑该条件下的滤波器设计, 为此将式(6)中的相位 φ 按照式(7)的样式进行展开。

$$S(K_x, K_y) = \exp[jK_r(R_a - R_t)] = \exp[j\varphi] \quad (6)$$

$$\tilde{\omega} = a_{01}K_x + a_{10}(K_y - K_c) + a_{11}K_x(K_y - K_c) + a_{20}K_x^2 + a_{02}(K_y - K_c)^2 + \dots \quad (7)$$

式中 $K_c = 4\pi f_0 \cos\varphi_0 / c$ 为 K_y 的偏置。要对式(7)中泰勒系数进行求解, 必须将相位 $K_r(R_a - R_t)$ 展开成

K_x 和 K_y 的显函数。在 $K_r(R_a - R_t)$ 中 $K_r = \frac{\sqrt{K_x^2 + K_y^2}}{\cos\varphi}$, R_a 和 R_t 的值如式(1)和式(2)所示, 所以将

$K_r(R_a - R_t)$ 展开成 K_x 和 K_y 的显函数的关键是如何将 $R_a, R_t, \cos\varphi$ 展开成 K_x 和 K_y 的显函数。已知 $K_y/K_x = \tan\theta$, 因此可以先通过将 $R_a, R_t, \cos\varphi$ 展开成 $\tan\theta$ 的显函数, 然后用 K_y/K_x 替换 $\tan\theta$ 以将 $R_a, R_t, \cos\varphi$ 展开成 K_x 和 K_y 的显函数。显然 $R_a, R_t, \cos\varphi$ 是雷达瞬时坐标 x_a, y_a, z_a 的函数, x_a, y_a, z_a 又是时间变量 t 的函数, 所以分析可以以时间变量 t 为切入点展开: 在三角形 $OA'C'$ 中根据正弦定理可得

$$\frac{OC'}{\sin(\angle OA'C')} = \frac{A'C'}{\sin(\angle \theta)}, \text{ 由图 1 中的几何关系知 } \angle OA'C' = \frac{\pi}{2} - \theta - \theta_s, \text{ 化简得 } A'C' \text{ 的值为 } A'C' =$$

$$\frac{y_c \sin\theta}{\cos\theta_s \cos\theta - \sin\theta_s \sin\theta}, \text{ 转化成 } \tan\theta \text{ 的形式为 } A'C' = \frac{y_c \tan\theta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \tan\theta}, \text{ 由图 1 可知雷达天线相位中心坐标}$$

$$x_a, y_a, z_a \text{ 随 } A'C' \text{ 的变化关系为 } \begin{cases} x_a = A'C' \cos\theta_s \\ y_a = y_c + A'C' \sin\theta_s \\ z_a = z_c - A'C' \tan\beta \end{cases} \text{ 将 } A'C' = \frac{y_c \tan\theta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \tan\theta} \text{ 代入得到 } x_a, y_a, z_a \text{ 随 } \tan\theta$$

的变化关系为

$$\begin{cases} x_a = \frac{y_c \tan\theta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \tan\theta} \cos\theta_s \\ y_a = y_c + \frac{y_c \tan\theta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \tan\theta} \sin\theta_s \\ z_a = z_c - \frac{y_c \tan\theta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \tan\theta} \tan\beta \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(1,2)并用 K_y/K_x 替换 $\tan\theta$, 可得 $R_a, R_t, \cos\varphi$ 随 K_x 和 K_y 的变化关系为

$$\begin{aligned} R_a &= \sqrt{\left[\frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \cos\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2 + \left[y_c + \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \sin\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2 + \left[z_c - \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \tan\beta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2} \\ R_t &= \sqrt{\left[\frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \cos\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} - x_t \right]^2 + \left[y_c + \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \sin\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} - y_t \right]^2 + \left[z_c - \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \tan\beta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2} \\ \cos\varphi &= \frac{\sqrt{\left[\frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \cos\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2 + \left[y_c + \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \sin\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2}}{\sqrt{\left[\frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \cos\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2 + \left[y_c + \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \sin\theta_s}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2 + \left[z_c - \frac{y_c \frac{K_x}{K_y} \tan\beta}{\cos\theta_s - \sin\theta_s \frac{K_x}{K_y}} \right]^2}} \quad (9) \end{aligned}$$

至此已经把 $K_t(R_a - R_t)$ 展开成了 K_x 和 K_y 的显式函数, 通过泰勒展开, 得到式(7)中的各项系数如下

$$\begin{aligned} a_{01} &= x_t \frac{r_\omega}{r_\alpha} + (y_c - \frac{(y_c - y_t)r_\omega}{r_\alpha} + (r_\omega - r_\alpha)(\cos\varphi_0 - \frac{1}{\cos\varphi_0})) \tan\theta_s \\ a_{10} &= \frac{r_\omega - r_\alpha}{\cos\varphi_0}; a_{11} = a_{02} = 0 \\ a_{20} &= \frac{1}{2K_c} \left\{ y_c \left(2 - \frac{r_\omega}{r_{ct}} - \frac{r_{ct}}{r_{co}} \right) + \frac{x_t^2 y_c r_{co}}{r_{ct}^3} + \frac{2x_t \cos\bar{\omega}_0}{r_{ct}^3} (y_c r_{ct}^2 - (y_c - y_t) r_{co}^2) \tan\theta_s + \right. \\ &\quad \left. \frac{\cos\bar{\omega}_0}{r_{ct}} (r_{ct}^2 \cos\bar{\omega}_0^2 - (r_{co} - r_{ct})^2 + (y_c - y_t)^2 (\frac{r_{co}}{r_{ct}})^2 - 2y_c (y_c - y_t)) \tan^2\theta_s \right\} + \\ &\quad \frac{1}{K_c} \left\{ \frac{y_c z_t r_{co} [x_t + (y_c - y_t) \tan\theta_s]}{r_{ct}^3 \cos\theta_s} - \frac{z_c [x_t + (y_t - 2y_c) \tan\theta_s] \cos\bar{\omega}_0}{r_{ct} \cos\theta_s} - \frac{z_t r_{ct} \cos\bar{\omega}_0^2 \tan\theta_s}{r_{co} \cos\theta_s} \right\} \tan\beta + \\ &\quad \frac{1}{2K_c} \left\{ \frac{2y_c - r_{ct} \cos\bar{\omega}_0}{\cos^2\theta_s} - \frac{y_c r_{co} + 2z_t^2 \cos\bar{\omega}_0}{r_{ct} \cos^2\theta_s} + \frac{y_c z_t^2 r_{co}}{r_{ct}^3 \cos^2\theta_s} + \frac{r_{ct} z_t^2 \cos\bar{\omega}_0}{r_{co}^2 \cos^2\theta_s} \right\} \tan^2\beta \quad (10) \end{aligned}$$

式中 $r_{co} = \sqrt{y_c^2 + z_c^2}$ 和 $r_{ct} = \sqrt{x_t^2 + (y_t - y_c)^2 + z_c^2}$ 分别表示雷达飞行至孔径中心 C 点时, 雷达天线相位中心到场景中心 O 点和目标 p 点的距离。

3 波前弯曲误差补偿

由于 PFA 算法将实际弯曲的波前假设成平面波前, 由此假设引入的误差对所成图像的影响主要有两个方面, 一个是由式(7)中相位 φ 的一次项所引起的图像几何失真, 即目标的真实坐标 (x_m, y_m) 与其在 PFA 图像中的位置坐标 (a_{01}, a_{10}) 并不相同, 相当于 $a_{01} = x_m + \Delta x_m, a_{10} = y_m + \Delta y_m, \Delta x_m, \Delta y_m$ 分别为

PFA 图像中 x, y 的坐标与真实位置坐标 (x_m, y_m) 的位置误差;另一个是由式(7)中相位 φ 的 $a_{20} K_x^2$ 项所引起的图像散焦。由于式(7)中包含系数 a_{01}, a_{10}, a_{20} 的项所引入的误差大小均会随着目标位置坐标的变化而变化,这就要求滤波处理时需要提供目标的真实位置信息。但因目标的真实坐标 (x_m, y_m) 与其在 PFA 图像中的坐标 (a_{01}, a_{10}) 并不相同,因此需要首先根据式(10)中 a_{01}, a_{10} 的映射关系找出其真实位置坐标,然后利用该位置坐标设置空域滤波器并通过滤波消除由式(7)中相位 φ 的 $a_{20} K_x^2$ 项所引起的图像散焦。最后通过几何失真校正解决相位一次项引起的图像几何失真问题,具体的处理流程图见图 2。

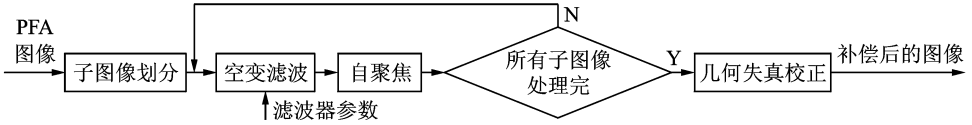


图 2 图像域后处理补偿波前弯曲处理流程

Fig. 2 Flowchart of image domain post-processing steps

3.1 空变后滤波

滤波器的设计是空变滤波过程的关键和核心,针对 PFA 图像中的每个像素点,首先根据式(7)中 a_{01}, a_{10} 的映射关系计算其对应的真实位置坐标 (x_t, y_t) ,进而得到 a_{20} 的值,然后根据 a_{20} 设计空间频域滤波器函数 $H(x_t, y_t)(K_x) = e^{-ia_{20} K_x^2}$ 。由于一幅 SAR 图像的数据量往往非常大,像素点很多,依次对每一个像素点进行该滤波过程,处理效率将会十分低下。因此通常的做法往往采用分块滤波,即将整幅 PFA 图像分成若干小块,针对每个子块图像,根据式(10)只计算其中心像素单元对应的实际坐标 (x_t, y_t) 和 a_{20} ,根据 a_{20} 构造针对子块的滤波函数 $H(x_t, y_t)(K_x)$,以此函数对该子块进行统一滤波。对所有子块图像依次进行上述过程后再把所有经过滤波输出的子块数据拼接起来即可得到重新聚焦的图像。

3.2 几何失真校正

通过之前的分析可知,图像的几何失真使得目标的真实坐标 (x_m, y_m) 与其在 PFA 图像中的位置坐标 (a_{01}, a_{10}) 并不相同,校正处理就是为了解决 PFA 图像中目标点位置的失真问题,使每一个目标点都定位在其真实位置 (x_m, y_m) 处,几何失真校正的具体操作流程如图 3 所示。

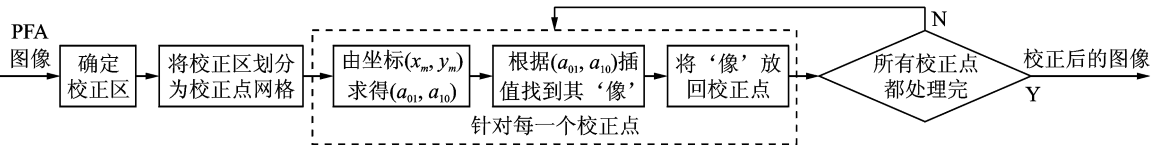


图 3 几何失真校正原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geometric distortion correction

4 仿真数据处理

4.1 点目标仿真

点目标仿真的主要参数如表 1 所示,设置的点目标呈矩形分布,具体如图 4 所示:每排 17 个点,总共 17 排,共计 289 个点,289 个黑色实心原点表示 289 个点目标,其中 Δ_x 代表方位向相邻两点之间的距离, Δ_y 代表距离向相邻两点之间的距离,两者的值均为 160 m。由此可以计算出成像场景距离向的宽度为 2 560 m,成像场景方位向的宽度为 2 560 m,对应的成像场景大小为 2 560 m \times 2 560 m,该场景大小

已经是没改进之前 PFA 算法有效聚焦场景大小的 10 倍左右。

图 5 所示为雷达斜视角度 70° 、俯冲角度 60° 条件下的点目标仿真结果。在图 5 中分别给出了各自条件下原始的 PFA 图像、经过基于雷达平飞状态的空变滤波方法处理^[5]后图像、经过基于雷达平飞状态的几何失真校正方法处理^[5]后的图像、经过本文空变滤波方法处理后的图像和经过本文几何失真校正方法处理后的图像。

表 1 雷达参数
Tab. 1 Radar parameters

参数	数值
载波频率/GHz	10
信号带宽/MHz	300
作用距离/km	10
斜视角度/ $^\circ$	70
俯冲角度/ $^\circ$	60
平台运动速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	150
脉冲重复频率/Hz	1 200
脉冲宽度/ μs	0.1

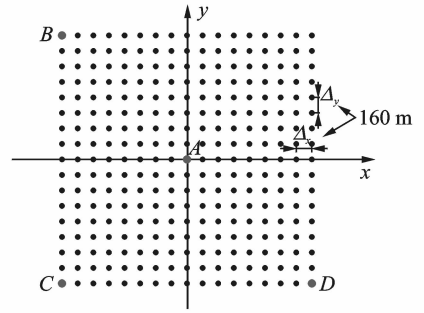
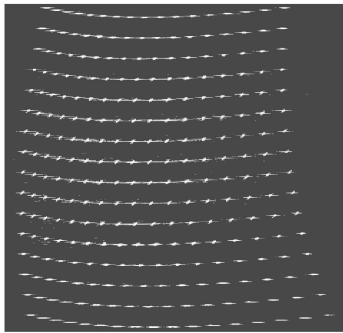
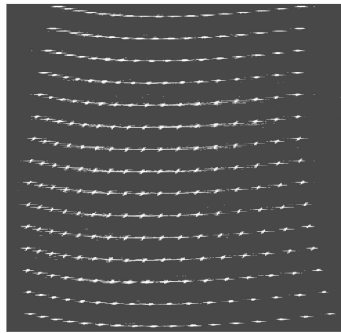


图 4 点目标分布图

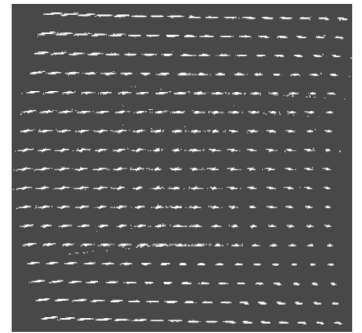
Fig. 4 Target location in the scene



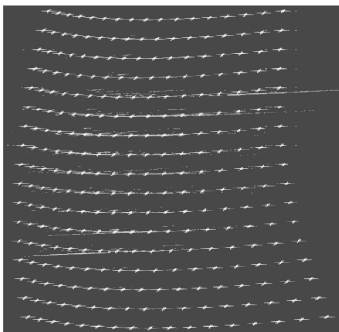
(a) PFA成像结果
(a) PFA imaging result



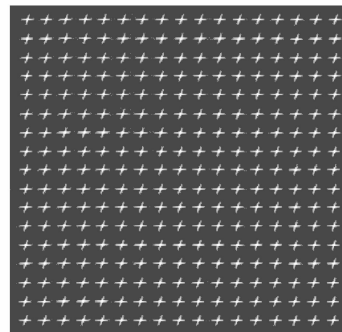
(b) 文献[5]方法滤波结果
(b) Filtered image by the method
proposed in Ref.[5]



(c) 文献[5]方法几何失真校正结果
(c) Geometric distortion correction by the
method proposed in Ref.[5]



(d) 本文方法滤波后的图像
(d) Filtered image by the proposed method



(e) 本文方法几何失真校正后的图像
(e) Geometric distortion corrected image
by the proposed method

图 5 点目标仿真图

Fig. 5 Point target simulation images

从以上仿真结果可以看出,使用基于雷达平飞状态的波前弯曲误差补偿方法来补偿斜视俯冲条件下波前弯曲误差的效果都几乎微乎其微,这说明雷达平飞条件下的补偿方法已经不再能够有效补偿斜视俯冲条件下的波前弯曲误差。而采用本文的波前弯曲补偿方法处理后,滤波和几何失真校正的处理效果都十分明显。因此可以初步得出本文的补偿方法可以改善雷达平台斜视俯冲机动状态下极坐标格式算法图像的边缘散焦和几何失真问题。

4.1.1 空变滤波效果分析

虽然可以从图5的仿真结果中初步看出本文空变滤波方法对改善图像的边缘散焦问题有效果,但是为了更加直观准确地说明问题,必须进行定量分析以给出定量分析结果。本节对补偿精度的分析结合图4点目标分布示意图中有代表性的A,B,C,D四个点目标进行。在图6~9中给出了雷达斜视角度 70° 、俯冲角度 60° 条件下A,B,C,D四个点目标分别采用雷达平飞方法和本文方法空变滤波处理后的二维响应图。

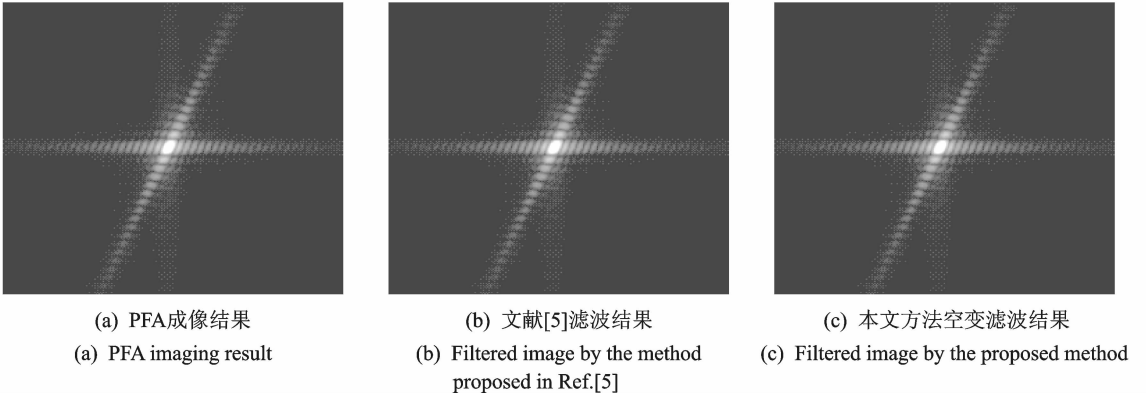


图6 A点目标二维响应

Fig. 6 Two-dimensional response of point target A

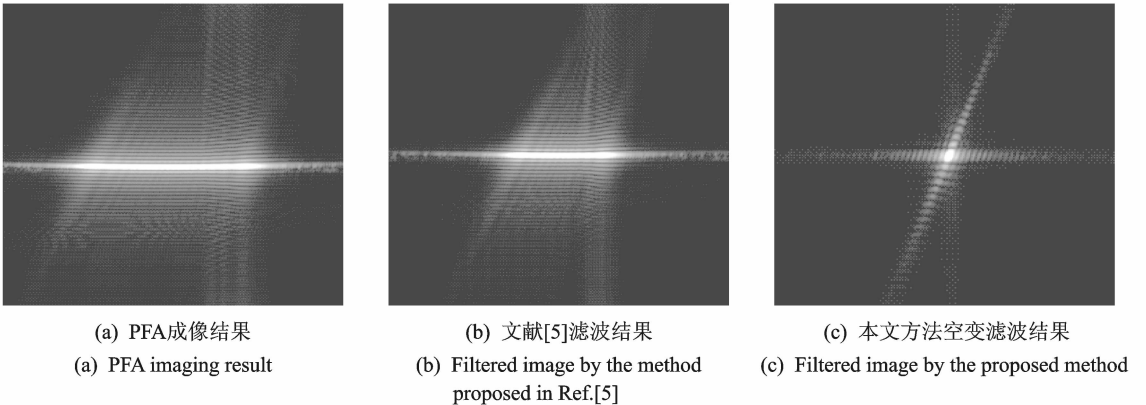


图7 B点目标二维响应

Fig. 7 Two-dimensional response of point target B

图10~13进一步给出了雷达斜视角度 70° 、俯冲角度 60° 条件下A,B,C,D四个点目标分别采用平飞方法和本文方法空变滤波处理后点目标二维响应的方位向剖面图。

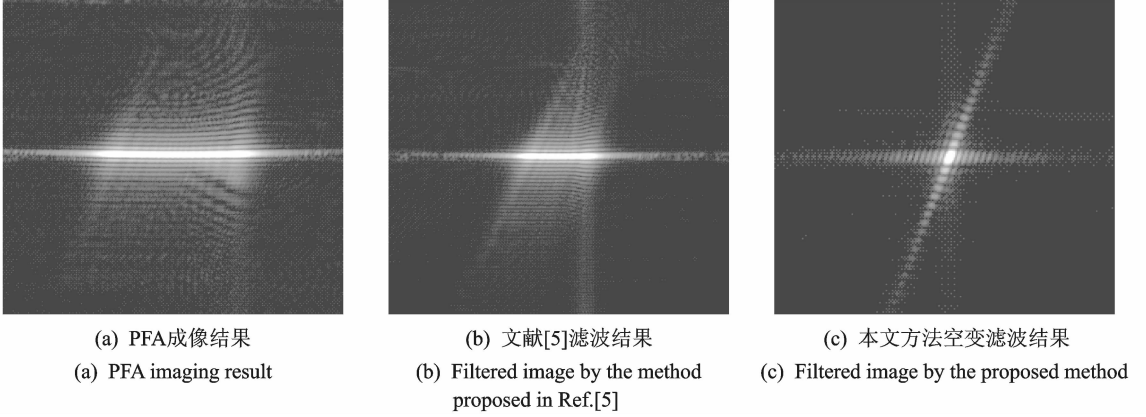


图 8 C点目标二维响应

Fig. 8 Two-dimensional response of point target C

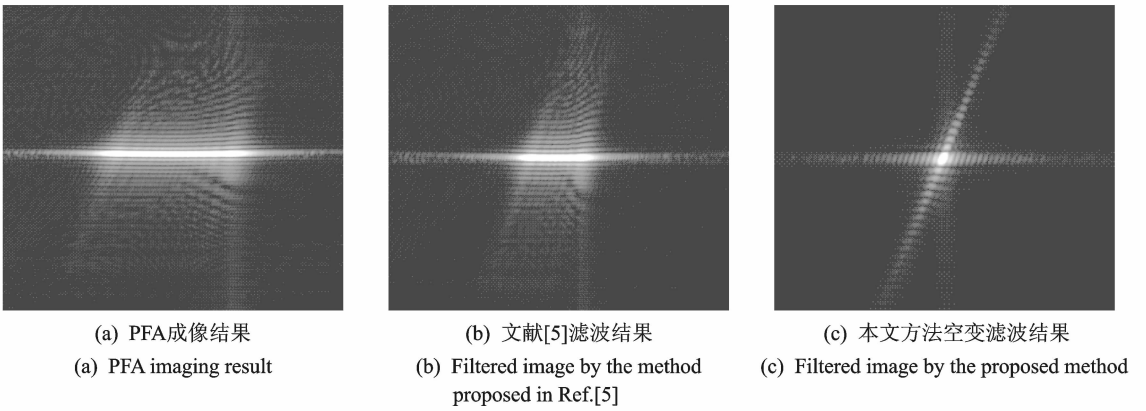


图 9 D点目标二维响应

Fig. 9 Two-dimensional response of point target D

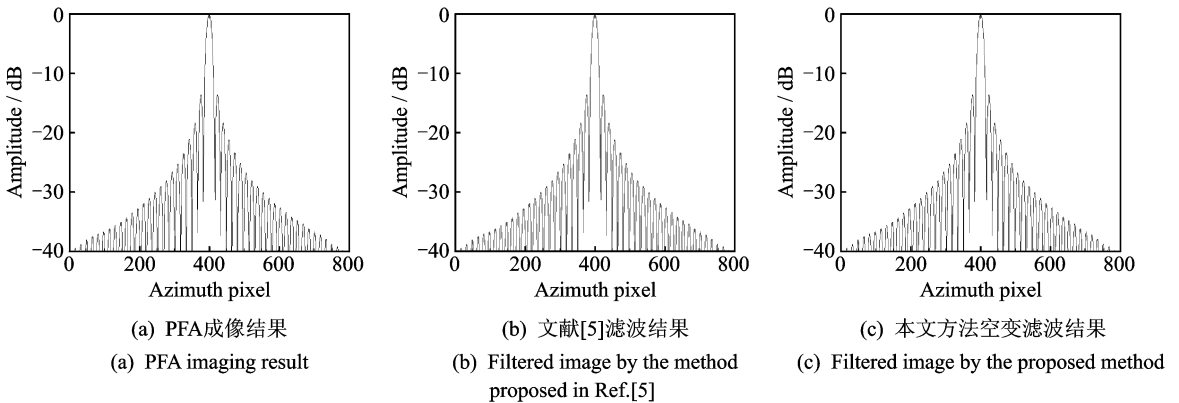


图 10 A点目标二维响应的方位向剖面图

Fig. 10 Azimuth profile of two-dimensional response of point target A

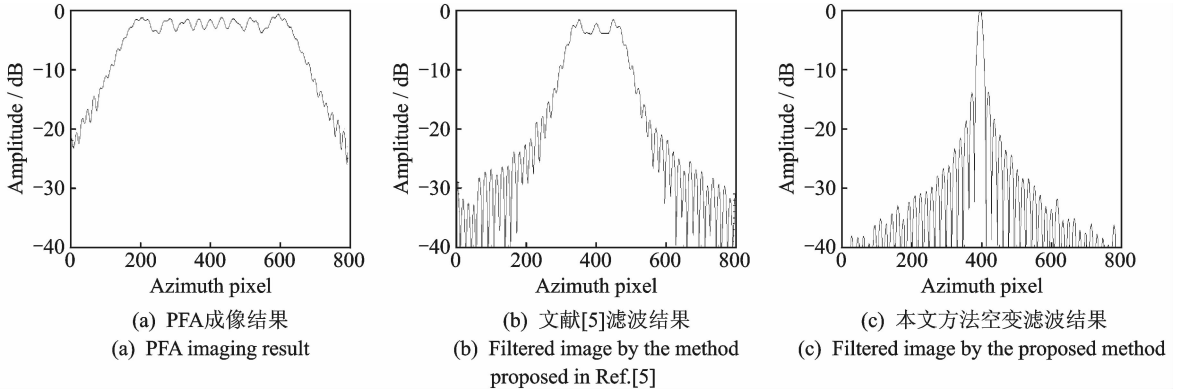


图 11 B点目标二维响应的方位向剖面图

Fig. 11 Azimuth profile of two-dimensional response of point target B

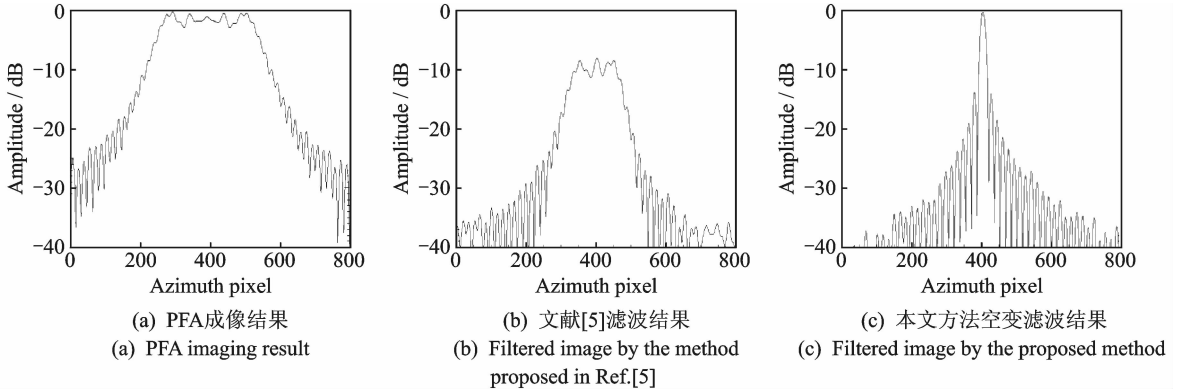


图 12 C点目标二维响应的方位向剖面图

Fig. 12 Azimuth profile of two-dimensional response of point target C

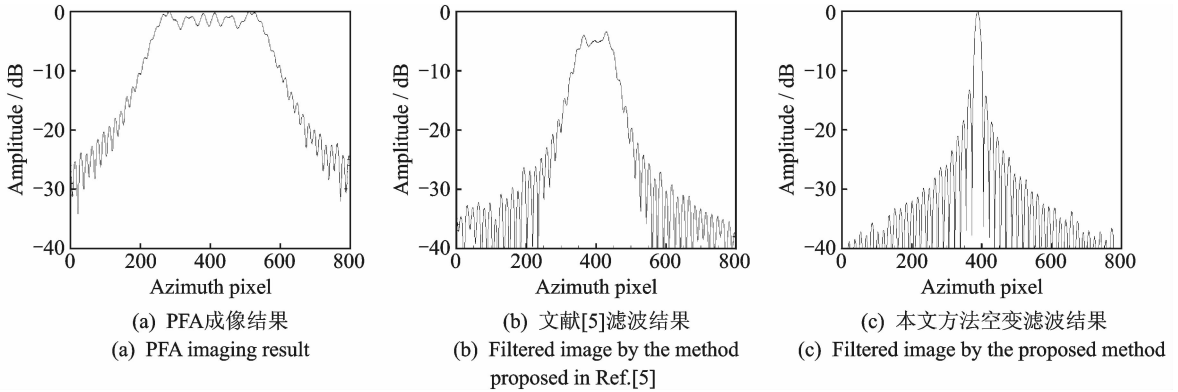


图 13 D点目标二维响应的方位向剖面图

Fig. 13 Azimuth profile of two-dimensional response of point target D

通过前面给出的点目标二维响应图和方位向剖面图可以看出,由于场景中心点 A 本身不存在误

差,所以不论雷达平飞状态下的补偿方法还是本文俯冲状态下的补偿方法,补偿前后都呈现出良好的聚焦状态。而对于非场景中心点 B, C, D 来讲,极坐标格式算法自身存在的波前弯曲误差致使 PFA 图像中 B, C, D 三个点目标的聚焦效果相对较差,均存在不同程度的散焦。雷达斜视俯冲条件下的波前弯曲误差如果依旧使用之前平台平飞状态下的波前弯曲误差补偿公式进行补偿,已经无法收到好的补偿效果。而经过本文推导的波前弯曲误差公式补偿以后,各自的二维响应都呈现出良好的聚焦状态,方位向剖面均呈现出理想或者近似理想的 sinc 函数形式。可见,本文的滤波方法实现了对雷达平台斜视俯冲机动条件下极坐标格式算法波前弯曲误差二次项的精确补偿,很好地改善了雷达俯冲状态下 PFA 图像的边缘散焦问题。

4.1.2 几何失真校正效果分析

从图 5 的仿真结果中初步得出本文所述的几何校正方法对改善图像的几何失真问题有效,并且本文方法的处理效果要明显优于原有雷达平台平飞状态下校正方法的处理效果,尤其是将 PFA 图像中呈弯曲排列的点目标校正到了当初设置的线形分布的状态,这一现象给人的感觉最为明显直观。为了更加准确地说明问题,必须进行定量分析以给出定量分析结果,在表 2 中给出了雷达斜视角度 70° 、俯冲角度 60° 条件下 A, B, C, D 四个点目标的几何失真校正结果。

表 2 点目标几何失真校正结果

Tab. 2 Geometric distortion correction results of point targets

方法	A/m	B/m	C/m	D/m
真实坐标	(0.0,0.0)	(-1 280.0,1 280.0)	(-1 280.0,-1 280.0)	(1 280.0,-1 280.0)
PFA 坐标	(0.0,0.0)	(-781.1,1 355.5)	(-980.4,-1 183.5)	(1 905.8,-1 183.8)
原有公式	(0.0,0.0)	(-1 183.0,1 290.0)	(-1 201.0,-1 270.0)	(1 330.0,-1 290.0)
本文公式	(0.0,0.0)	(-1 280.0,1 280.0)	(-1 280.0,-1 280.9)	(1 280.6,-1 280.0)

从表 2 中不难看出,对于场景中心点 A ,由于本身不存在误差,其在 PFA 图像中的位置坐标、使用原有雷达平飞状态下的几何失真校正方法处理后的位置坐标以及使用本章几何失真校正方法处理后的位置坐标都和其真实位置坐标一致。而对于 B, C, D 三个非场景中心点而言,它们在 PFA 图像中的位置坐标与其自身的真实位置坐标相比均呈现出了不同程度的几何失真,使用雷达平台平飞条件下的几何失真校正方法处理后的坐标相比其真实位置坐标有改善,但改善效果甚微,依旧失真严重。经过本文的校正方法处理后,在误差允许的范围内,点目标均已在其真实坐标处,改善效果十分明显。结果说明本文的补偿方法消除了俯冲机动条件下波前弯曲误差一次项 a_{01}, a_{10} 所带来的影响,该方法在改善雷达平台斜视俯冲机动条件下极坐标格式算法图像的几何失真方面有效、可用,并且效果要远远好于原有方法。

4.2 面目标仿真

面目标仿真的主要参数如表 3 所示,仿真结果如图 14 所示。为了更加直观地说明本文方法对波前弯曲误差的补偿效果,在面目标图像的中心和 4 个角位置上分别布置了 9 个强点目标,强点分 3 排,每排 3 个,整体呈规则的正方形,强点的整体形状如图 15 所示,可以通过观察图像中心和 4 个角位置的强点变化来说明本文方法的滤波效果和几何失真校正效果。为便于描述,把面目标图像的 4 个角和中心分别标注成区域 1、区域 2、区域 3、区域 4 和区域 5,图 16~18 分别给出了 PFA 面目标图像、空变滤波后的面目标图像以及几何失真校正后面目标图像各自区域 1~5 的局部放大图。

表 3 面目标仿真主要雷达参数

Tab. 3 Radar parameters

参数	数值
载波频率/GHz	35
信号带宽/GHz	1
作用距离/km	12.5
斜视角度/ $^\circ$	72
俯冲角度/ $^\circ$	41

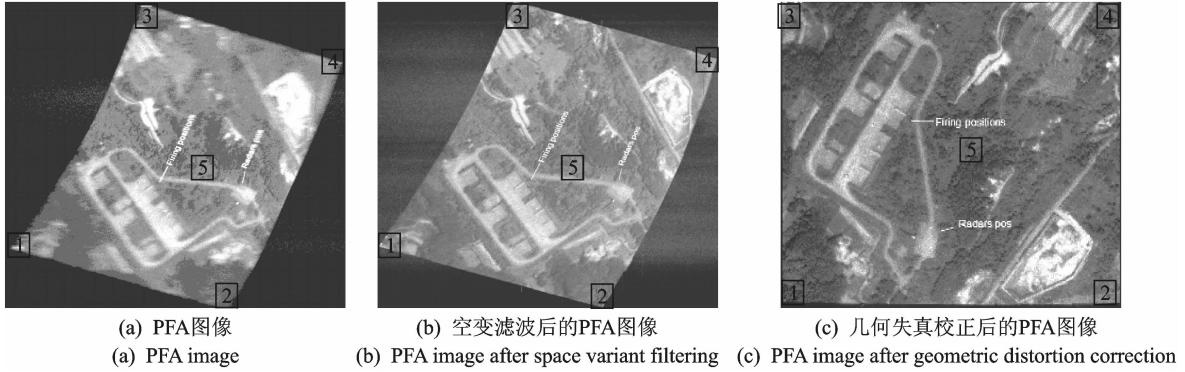


图 14 面目标仿真图像

Fig. 14 Area target simulation images

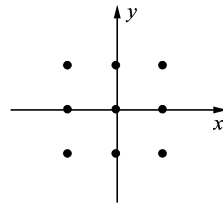


图 15 强点目标形状示意图

Fig. 15 Point targets

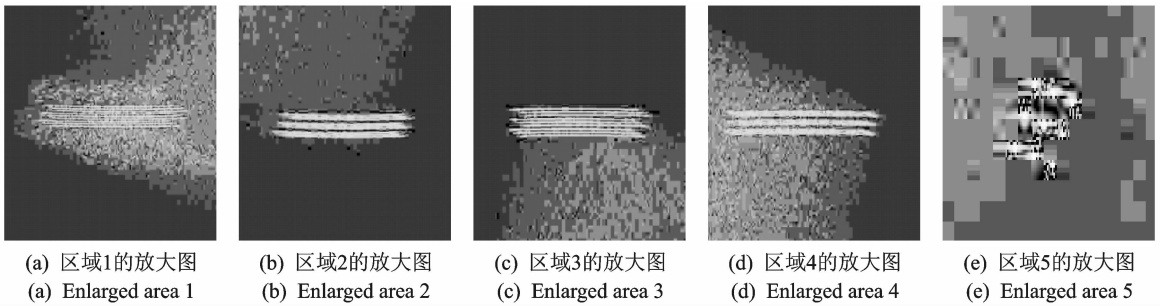


图 16 面目标 PFA 图像的局部放大图

Fig. 16 Enlarged area of PFA image

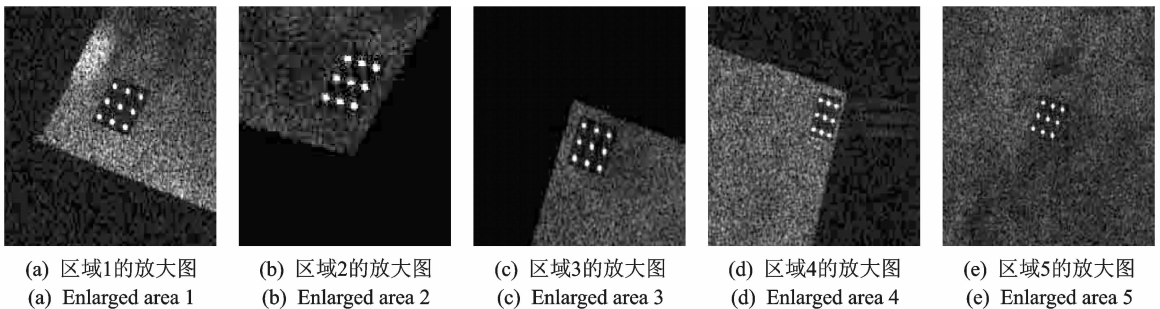


图 17 空变滤波后面目标图像的局部放大图

Fig. 17 Enlarged area of target images after space variant filtering

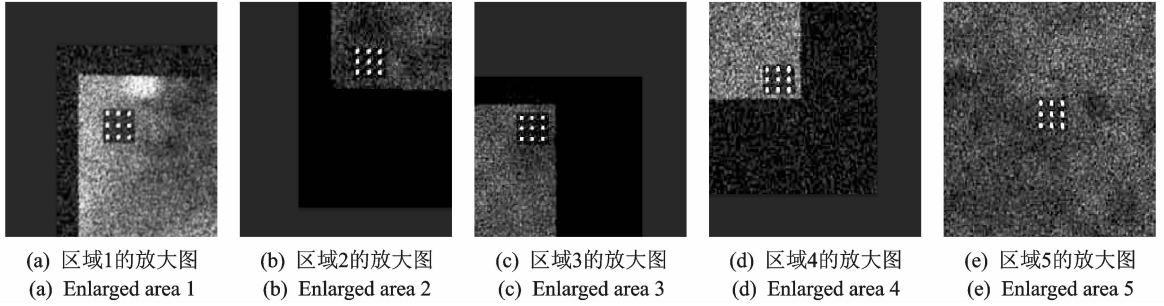


图 18 几何失真校正后面目标图像的局部放大图

Fig. 18 Enlarged area of target images after geometric distortion correction

从图 16 的面目标 PFA 图像的局部放大图中可以看出,由于波前弯曲误差的影响,不论是图像中心区域的亮点目标还是图像 4 个角区域设置的亮点目标,散焦和几何失真问题都十分严重,已经完全看不出来是当初设置的模样;在图 17 所示的空变滤波后面目标图像的局部放大图中,可以发现通过滤波,原本 PFA 图像中各个区域散焦十分严重的亮点目标,已经聚焦良好,但是位置依然失真,扭曲变形严重;在图 18 中,通过几何失真校正以后,空变滤波后面目标图像各个区域中依然扭曲变形存在严重位置失真的亮点目标,几何失真得到了很好的校正,恢复到了当初设置的整体形状,聚焦良好,呈规则的正方形。通过对面目标图像各区域中设置的亮点目标的分析可以看出,本文方法对于补偿雷达平台俯冲机动状态下极坐标格式算法的波前弯曲误差有着良好的效果,对于扩展极坐标格式算法的应用范围具有一定的理论和工程实践价值。

5 结束语

在采用 PFA 算法进行高分辨率成像时,已有的基于雷达平飞假设的波前弯曲误差补偿方法以及基于雷达平飞假设的波前弯曲误差补偿公式均已不能满足弹载雷达大斜视、大俯冲机动状态下的补偿要求,本文根据导弹飞行末端大斜视、大俯冲的机动特点,建立全新的信号分析模型,精确推导得到了雷达俯冲机动条件下波前弯曲空间频域相位误差的精确表达式。同时本文设计了适用于大俯冲、大斜视弹载 SAR 平台的空变滤波器,通过图像后处理等相关操作精确地补偿了极坐标格式算法波前弯曲误差,对于在弹载 SAR 大斜视、大俯冲的机动条件下极坐标格式算法所成图像的图像模糊和几何失真问题的改善效果明显,扩展了极坐标格式算法原有波前弯曲误差补偿方法的应用范围,是对极坐标格式算法波前弯曲补偿理论的进一步完善,对于将图像后处理补偿极坐标算法波前弯曲误差的方法推广应用于雷达平台俯冲等机动条件具有一定的理论和工程实践价值。

参考文献:

- [1] 肖靖. 聚束 SAR 极坐标格式算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
Xiao Jing. Research on the polar format algorithm in spotlight SAR[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004.
- [2] 毛新华. PFA 在 SAR 超高分辨率成像和 SAR/GMTI 中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
Mao Xinhua. Study on the application of PFA in SAR ultra-high resolution imaging and SAR/GMTI[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009.
- [3] 邵鹏,李亚超,李学仕,等. 一种应用于斜视聚束模式的改进极坐标格式成像算法[J]. 电子与信息学报,2015,37(2):303-308.
Shao Peng, Li Yachao, Li Xueshi, et al. A modified polar format algorithm applied to squinted spotlight SAR imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(2):303-308.

- [4] Doerry A W. Wavefront curvature limitations and compensation to polar format processing for synthetic aperture radar images[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2007.
- [5] 毛新华,朱岱寅,叶少华,等.一种基于图像后处理的极坐标格式算法波前弯曲误差补偿方法[J].电子学报,2010,38(1):244-250.
Mao Xinhua, Zhu Daiyin, Ye Shaohua, et al. Image domain space-variant post-processing for wavefront curvature correction in polar format spotlight SAR image[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(1): 244-250.
- [6] Mao Xinhua, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. Polar format algorithm wavefront curvature compensation under arbitrary radar flight path[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(3):526-530.
- [7] 丁岚,毛新华,朱岱寅.基于二维空变滤波的 PFA 波前弯曲误差补偿[J].航空学报,2015,36(2):605-613.
Ding Lan, Mao Xinhua, Zhu Daiyin. Polar format algorithm wavefront curvature error compensation using 2D space-variant post-filtering [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(2):605-613.
- [8] 何成宇.任意航迹双基 PFA 波前弯曲补偿算法及 GPU 实现[D].南京:南京航空航天大学,2014.
He Chengyu. Wavefront curvature compensation in bistatic polar format algorithm under arbitrary flight path and its realization on GPU[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014.
- [9] Horvat M S, Gorham L A, Rigling B D. Scene size bounds for PFA imaging with postfiltering [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2):1402-1406.
- [10] Qiu X L, Hu D H, Ding C B. An omega-K algorithm with phase error compensation for bistatic SAR of a translational invariant case [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(8): 2224-2232.
- [11] 何成宇,毛新华.适用于任意雷达航迹的双基 PFA 波前弯曲误差补偿[J].数据采集与处理,2013,28(4):485-490.
He Chengyu, Mao Xinhua. Wavefront curvature compensation in bistatic polar format algorithm under arbitrary flight path [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(4):485-490.
- [12] Mao Xinhua, Zhu Daiyin, Zhu Zhaoda. An overlapped subaperture polar format algorithm based on sub-chirp signals [C]// Proceeding of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Nanjing: [s. n.], 2008: 2073-2076.
- [13] 彭岁阳,张军,沈振康.弹载聚束 SAR 平台的 PFA 算法[J].宇航学报,2011,32(3):592-598.
Peng Suiyang, Zhang Jun, Shen Zhenkang. PFA algorithm for missile borne spotlight SAR platform[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(3): 592-598.
- [14] 龚玉明.聚束模式下弹载 SAR 成像算法研究[D].成都:电子科技大学,2015.
Gong Yuming. Research on missile borne spotlight SAR imaging algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2015.
- [15] 易予生.弹载合成孔径雷达成像算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2009.
Yi Yusheng. Research on imaging algorithm of missile-borne synthetic aperture radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.

作者简介:



李盘虎(1989-),男,硕士研究生,研究方向:雷达信号处理、SAR 成像算法, E-mail: 1015512420 @ qq.com。



沈薇(1994-),女,硕士研究生,研究方向:无人机载 SAR 成像算法。



毛新华(1979-),男,副教授,研究方向:合成孔径雷达信号处理、空时自适应处理。

(编辑:夏道家)

