

一种基于图像后处理的极坐标格式算法波前弯曲补偿方法

毛新华¹,朱岱寅¹,叶少华²,朱兆达¹

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院,江苏南京 210016;2. 中国雷华电子技术研究所,江苏无锡 214063)

摘要: 极坐标格式算法(PFA)波前弯曲误差分析是对波前弯曲进行有效补偿的基础,以往波前弯曲误差推导过程中都对差分距离采用了二阶近似,在对大场景范围进行近场、高分辨率成像时已不能满足要求.本文采用新的方法对波前弯曲误差进行了精确的推导,得到了波前弯曲误差在空间频域的二阶泰勒展开表达式.利用推导的波前弯曲误差公式,在PFA图像域通过空变滤波和几何失真校正分别对二次和一次相位误差进行补偿,极大地改善了波前弯曲对PFA成像场景大小的限制.最后通过仿真数据处理验证了分析结果.

关键词: 合成孔径雷达;极坐标格式算法;波前弯曲;空变滤波;几何失真校正

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0244-07

Image Domain Space-variant Post-processing for Wavefront Curvature Correction in Polar Format Spotlight SAR Image

MAO Xin-hua¹, ZHU Dai-yin¹, YE Shao-hua², ZHU Zhao-da¹

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. China Leihua Electronics Technology Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214063, China)

Abstract: The polar format algorithm (PFA) for spotlight synthetic aperture radar (SAR) is based on the assumption of strictly planar wavefronts. Thus, the realistic wavefront curvature introduces phase error terms which cause space-variant geometric distortion and defocus on the formed imagery. In previous study, all the analysis on phase error induced by wavefront curvature is based on the second order approximation of the differential range. It still can't meet the required precision when imaging very large scenes at close range with high resolution. In this paper, a generalized squint mode 3D imaging geometry is considered to derive the phase history expression in wavenumber domain with consideration of the accurate differential range. Based on the phase model derived, image domain post-processing steps, including space-variant filtering and geometric distortion correction, are employed to compensate the quadratic and linear phase error terms. Simulation results validate the theoretical analysis.

Key words: synthetic aperture radar, polar format algorithm, wavefront curvature, space-variant filtering, geometric distortion correction

1 引言

聚束模式是一种适用于小场景、高分辨率成像的SAR工作模式.它通过控制天线波束指向,使雷达发射能量持续照射同一场景,可以突破天线波束宽度限制,获得很大的合成孔径,从而获得很高的方位分辨率.极坐标格式算法(PFA)^[1~3]是一种经典的聚束SAR成像算法,相比于其它成像算法,除了算法简洁高效外,它还具有如下优点:(1)时域进行相位补偿和调整,无需雷达在空域线性均匀采样,能够有效补偿雷达的非理想飞行引入的误差;(2)采用dechirp处理,处理时数据带宽仅取决于场景大小,特别适合在小场景高分辨聚束模式下应用;(3)方位重采样过程本质上包含一个keystone变

换,能够自动校正所有目标(包括运动目标)的线性距离走动,在惯导精度不高或对运动目标成像时,仍能使多普勒历史保留在同一距离单元.鉴于这些独特的优点,该算法近年来仍然得到了广泛关注和深入研究^[4~8].

PFA的缺陷在于其采用了平面波前的假设,而实际的波前是弯曲的,由此引入的误差主要表现为空间频域的一次和二次空变相位误差,对应使图像产生几何失真和散焦,限制了PFA的有效成像场景大小.特别是近场、高分辨率条件下,如果不对其进行补偿,有效的成像场景大小已不能满足要求.

波前弯曲误差分析是对其进行补偿的基础,文献[3~5]分别采用不同方法推导了由波前弯曲引入的空间频域相位误差表达式.但是,为简化分析,以往波前弯曲

误差分析都对差分距离采用了近似.在对近距离场景进行高分辨率成像时,这些近似引入的误差仍然不可忽略.本文采用新的方法,推导得到了在波前弯曲条件下雷达回波相位历史在空间频域的精确表达式.利用该相位模型,通过对 PFA 图像进行空变滤波和几何失真校正,补偿波前弯曲引入的二次和一次相位误差,能够极大地改善 PFA 对成像场景大小的限制.

2 聚束 SAR 信号模型

聚束 SAR 成像几何模型如图 1 所示,场景中心 O 定义为坐标原点,视线方向地面投影定义为 Y 轴.雷达工作在斜视模式,斜视角为 θ_s ,正侧视对应 $\theta_s = 0$.为简

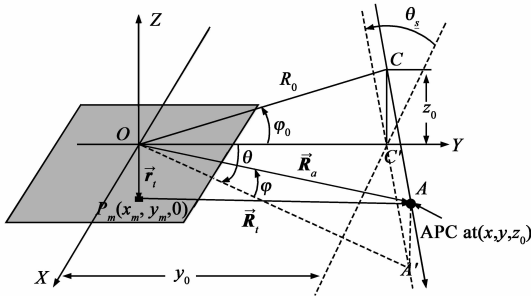


图1 聚束SAR数据采集几何模型

化分析,设雷达平台以速度 v 水平匀速直线飞行.雷达天线相位中心(APC)坐标为 (x, y, z_0) , θ 和 φ 分别为天线相位中心的瞬时方位角和俯仰角,在孔径中心时刻分别为 θ_0 和 φ_0 .场景中分布点目标 P_m ,其位置矢量为 $\mathbf{r}_t = (x_m, y_m, 0)$. \mathbf{R}_a 和 \mathbf{R}_t 分别为天线相位中心到场景中心和目标的瞬时距离矢量,瞬时距离值分别为 R_a 和 R_t ,用坐标表示即为

$$R_a = \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2} \quad (1)$$

$$R_t = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + z_0^2}$$

雷达发射宽带线性调频信号,回波经过距离向脉冲压缩和方位 dechirp 后可表示为^[3]

$$S(t, f_r) = \exp\left[j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} (R_a - R_t)\right] = \exp(jK_r R_\Delta) \quad (2)$$

其中 c 为电波传播速度, f_c 为发射信号载频, f_r 为距离向频率, $K_r = 4\pi(f_c + f_r)/c$ 表示径向空间频率, $R_\Delta = R_a - R_t$ 为 APC 到场景中心和目标的差分距离,它提供目标成像的关键信息.

为方便下面 PFA 分析,可以将差分距离作如下分解^[3,5]:

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

3 极坐标格式算法及波前弯曲效应

3.1 极坐标格式算法

在平面波前近似条件下,差分距离可近似表示为

$$R_\Delta \approx \frac{\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a}{R_a} = x_m \cos \varphi \sin \theta + y_m \cos \varphi \cos \theta \quad (4)$$

将其代入式(2),得到

$$S(K_x, K_y) = \exp[j(x_m K_r \cos \varphi \sin \theta + y_m K_r \cos \varphi \cos \theta)] \\ = \exp[j(x_m K_x + y_m K_y)] \quad (5)$$

其中 $K_x = K_r \cos \varphi \sin \theta$, $K_y = K_r \cos \varphi \cos \theta$ 分别表示方位和距离空间频率.

从式(5)可以看到,雷达回波信号与目标函数间存在简单的 Fourier 变换关系,回波的两维采样数据是场景散射函数空间频域的一个极坐标格式采样切片.PFA 利用这一关系,通过将极坐标格式数据插值成矩形格式采样数据,然后对重采样后的二维数据作二维 FFT 实现对目标的成像.

3.2 波前弯曲效应分析

实际雷达波前是球面波前,随着分辨率的提高,成像场景的增大,或者在近距离成像时,平面波前假设引入的误差变得不可忽略,必须对其进行补偿.

由波前弯曲引入的距离误差可表示为

$$R_e = R_\Delta - \frac{\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a}{R_a} = -\frac{|\mathbf{r}_t|^2}{2R_a} + \frac{(\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a)^2}{2R_a^3} \\ + \frac{(\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{R}_a) |\mathbf{r}_t|^2}{2R_a^3} + \dots \quad (6)$$

为简化分析,以往波前弯曲误差分析都采用了近似,即只保留了式(6)中前两项,忽略了高次项.但在近场对大场景范围进行高分辨率成像时,该近似仍然不能满足要求,有必要推导更加精确的表达式.

为此,我们考虑直接对回波数据(式(2))进行如下二维泰勒级数展开

$$S(K_x, K_y) = \exp[j K_r (R_a - R_t)] = \exp\left\{j \left[a_{01} K_x + a_{10} (K_y - K_c) \right. \right. \\ \left. \left. + a_{11} K_x (K_y - K_c) + a_{20} K_x^2 + a_{02} (K_y - K_c)^2 + \dots \right] \right\} \quad (7)$$

其中 $K_c = 4\pi f_c \cos \varphi_0 / c$ 为 K_y 的偏置.

上式中泰勒系数的求解要求将回波相位 $\Phi = K_r (R_a - R_t)$ 表示成 K_x 和 K_y 的显式函数,考虑到 $K_r = \sqrt{K_x^2 + K_y^2} / \cos \varphi$,因此泰勒级数展开的关键是如何将 $\cos \varphi$ 、 R_a 和 R_t 表示为 K_x 和 K_y 的函数.

由于空间频率满足 $K_x / K_y = \tan \theta$,因此首先考虑将 $\cos \varphi$ 、 R_a 和 R_t 表示成 $\tan \theta$ 的函数.在图 1 三角形 $OA'C'$ 中,由正弦定理可以得到如下关系

$$\frac{OC'}{\sin(\pi/2 - \theta_s - \theta)} = \frac{C'A'}{\sin \theta} \quad (8)$$

化简后得到

$$C'A' = \frac{y_0 \sin \theta}{\cos \theta_s \cos \theta - \sin \theta_s \sin \theta} = \frac{y_0 \tan \theta}{\cos \theta_s - \sin \theta_s \tan \theta} \quad (9)$$

由此可计算得到天线相位中心(APC)的 XY 坐标随 $\tan \theta$ 的变化关系

$$\begin{aligned} R_a &= \sqrt{\left(\frac{y_0 \cos \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y}\right)^2 + \left(y_0 + \frac{y_0 \sin \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y}\right)^2 + z_0^2} \\ R_t &= \sqrt{\left(\frac{y_0 \cos \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y} - x_m\right)^2 + \left(y_0 + \frac{y_0 \sin \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y} - y_m\right)^2 + z_0^2} \\ \cos \varphi &= \frac{\sqrt{\left(\frac{y_0 \cos \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y}\right)^2 + \left(y_0 + \frac{y_0 \sin \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{y_0 \cos \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y}\right)^2 + \left(y_0 + \frac{y_0 \sin \theta_s K_x / K_y}{\cos \theta_s - \sin \theta_s K_x / K_y}\right)^2 + z_0^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

至此,已将回波相位 $\Phi = K_r (R_a - R_t)$ 中各项均表示为了关于 K_x 和 K_y 的显式函数,因此利用泰勒展开公

$$\begin{aligned} a_{10} &= (r_{co} - r_{ct}) / \cos \varphi_0 \\ a_{01} &= x_m r_{co} / r_{ct} + (y_0 - r_{co} (y_0 - y_m) / r_{ct} + (r_{co} - r_{ct}) (\cos \varphi_0 - 1 / \cos \varphi_0)) \tan \theta_s \\ a_{20} &= \frac{1}{2K_c} \left\{ \begin{aligned} &y_0 \left(2 - \frac{r_{co}}{r_{ct}} - \frac{r_{ct}}{r_{co}} \right) + \frac{x_m^2 y_0 r_{co}}{r_{ct}^3} + \frac{2x_m \cos \varphi_0}{r_{ct}^3} (y_0 r_{ct}^2 - (y_0 - y_m) r_{co}^2) \tan \theta_s \\ &+ \frac{\cos \varphi_0}{r_{ct}} \left(r_{ct}^2 \cos^2 \varphi_0 - (r_{co} - r_{ct})^2 + (y_0 - y_m)^2 \frac{r_{co}^2}{r_{ct}^2} - 2y_0 (y_0 - y_m) \right) \tan^2 \theta_s \end{aligned} \right\} \\ a_{11} &= a_{02} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $r_{co} = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}$ 和 $r_{ct} = \sqrt{x_m^2 + (y_m - y_0)^2 + z_0^2}$ 分别为孔径中心时刻天线相位中心到场景中心和目标的距离。

泰勒展开式(7)中,一次项系数 a_{10} 和 a_{01} 对应点目标在图像中的几何位置,其中 a_{10} 为图像距离坐标, a_{01} 为方位坐标. 在球面波前条件下,除场景中心点外,其余点目标经 PFA 成像后均存在一定的几何位置失真. 二次相位项是引起目标散焦的主要因素,由式(12)可知二次项系数中只有 a_{20} 非零,其大小与目标几何位置有关,如果不进行补偿,会导致成像结果出现空变的方位散焦,目标离场景中心越远,散焦越严重,因此 PFA 有效的成像场景大小受到限制。

4 波前弯曲补偿

从前面的分析可知,波前弯曲对 PFA 图像主要产生两方面的影响,一是目标位置的几何失真,即真实位置 (x_m, y_m) 处的目标在图像中的位置变为 (a_{01}, a_{10}) ; 另外一个影响就是由方位二次相位误差引起的目标空变散焦. 本文采用图像后处理的方法来补偿波前弯曲效应,即用图像域的重采样校正几何失真,用空变滤波处理校正空变二次相位误差. 由于滤波过程需要目标的真实位置信息,在图像几何失真校正前,像素的名义位置 and 实际位置并不一致,这给空变滤波带来了麻烦. 解

$$x = \frac{y_0 \cos \theta_s \tan \theta}{\cos \theta_s - \sin \theta_s \tan \theta}; \quad y = y_0 + \frac{y_0 \sin \theta_s \tan \theta}{\cos \theta_s - \sin \theta_s \tan \theta} \quad (10)$$

将式(10)代入 $\cos \varphi$ 、 R_a 和 R_t 的表达式,同时考虑到 $\tan \theta = K_x / K_y$,可以得到式(11).

式可以得到各系数分别如式(12)所示。

决的方法可以从两方面考虑,一种是先进行几何失真校正,再进行空变滤波,几何失真校正后像素名义位置 and 实际位置一致,便于后面的空变滤波. 但是,几何失真校正改变了原有的一维相位误差结构,使得几何校正后图像空间频域数据不仅有方位向的相位误差,还有距离向的相位误差,因此后续的空变滤波必须在空间两维进行,这极大地增加了滤波的计算复杂度. 另一种可行的方法是滤波前不进行几何失真校正,仅通过几何失真映射关系对像素单元进行重定位,找出其实际空间位置,用该空间位置信息来设计空域滤波器. 相对于第一种方法,该方法只需增加少量的空间位置计算,对计算效率影响可以忽略,因此本文将采用第二种方法,其信号处理流程如图2所示。

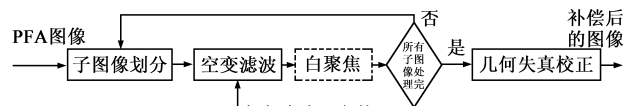


图2 图像域后处理校正波前弯曲处理流程

4.1 空变后滤波处理

构造 SAR 图像方位空变滤波器

$$h_{(x_m, y_m)}(x) \leftrightarrow H_{(x_m, y_m)}(K_x) \quad (13)$$

其中 (x_m, y_m) 是图像像素点实际空间坐标, $H_{(x_m, y_m)}(K_x) = \exp(-j a_{20} K_x^2)$ 是空间频域滤波器函数,它是波前弯

曲引入的二次相位误差函数的共轭。

由于图像存在几何失真,图像像素名义位置 (a_{01}, a_{10}) 并不等于其实际空间位置 (x_m, y_m) ,为此,空变滤波器构造前还需通过式(12)迭代计算得到像素单元的实际空间坐标。然后,针对图像每个像素单元,根据其实际空间坐标 (x_m, y_m) 由式(13)构造滤波器 $H_{(x_m, y_m)}(K_x)$ (对应的空域系统函数为 $h_{(x_m, y_m)}(x)$)。其后的滤波过程既可以通过在方位空域卷积 $h_{(x_m, y_m)}(x)$ 实现,也可以通过在空间频域乘以 $H_{(x_m, y_m)}(K_x)$ 实现。通常,为了利用FFT快速实现滤波,选择在频域进行。通过对每一像素单元进行上述滤波处理,就能得到重新聚焦的图像。

上面的滤波过程虽然只是方位一维处理,但由于要对所有像素单元分别进行滤波,即逐像素变化滤波器参数,因此运算量仍然很大。为了进一步提高滤波效率,采用逐子块空变滤波代替逐像素单元空变滤波,可以极大地减小滤波运算量。首先,对PFA处理图像进行分块,将成像区局域化,得到子块图像,考虑到滤波后图像子块间的连续性,要求方位子块间有一定的重叠。然后,以子块中心为参考,对每个子块图像进行统一的空不变滤波。滤波后,子块中心完全重聚焦,非中心点仍有少量残留散焦,但通过选取足够小的子块大小,可以使该散焦效应控制在可忽略范围内。

下面给出空变滤波的具体实现过程:

步骤1:子图像划分——将PFA处理得到的图像以一定标准(要求使滤波后子图像边缘点散焦可以忽略)划分成 $N_x \times N_y$ 个子块图像,每个子块大小为 $L_x \times L_y$,子块间间隔为 $L_{sx} \times L_{sy}$,其中 N_x, N_y 分别为方位和距离向子块个数, L_x, L_y 分别为方位和距离向子块大小, L_{sx}, L_{sy} 分别为方位和距离向子块间隔。

步骤2:滤波——对每个图像子块,通过几何失真映射关系计算中心像素单元的实际空间位置 (x_m, y_m) ,利用该位置信息构造滤波函数 $H_{(x_m, y_m)}(K_x)$;对子块图像进

行方位方向FFT变换到空间频域,乘以 $H_{(x_m, y_m)}(K_x)$ 后再做方位逆FFT变换回空间域,得到滤波后的子图像。

步骤3:数据筛选和图像拼接——选取滤波后子图像中心的 $L_{sx} \times L_{sy}$ 大小区域作为滤波器的输出,将各子块滤波输出进行拼接即可得到重聚焦的图像。

这种子块内空不变、子块间空变的滤波方法,极大地提高了滤波器的运算效率,同时可将由于子块内空不变滤波引起的图像质量下降控制在可忽略范围内,这为机上实时高分辨处理提供了可能。

4.2 几何失真校正

由式(12)可知,根据地面散射点的真实坐标 (x_m, y_m) 可以得到其在PFA图像中对应的像素位置 (a_{01}, a_{10}) ,因此,几何失真校正可以通过在图像域进行重采样实现。首先,根据波束照射范围确定地面校正区,使校正区覆盖感兴趣的波束扫描区域。然后将校正区划分为校正点网格,如图3所示,使校正点均匀分布在地面XY坐标系内,相邻点横向间隔为 ρ_x ,纵向间隔为 ρ_y ,分别对应校正后图像的方位和距离像素单元。针对每个校正点,根据式(12)计算得到其在PFA图像中的坐标 (a_{01}, a_{10}) ,由该坐标在PFA图像中通过插值找到其‘像’,将其放回校正点,如图3所示,就实现了单个校正点的几何失真校正。对所有校正点逐个进行上述校正,就能够实现PFA图像的几何失真校正。

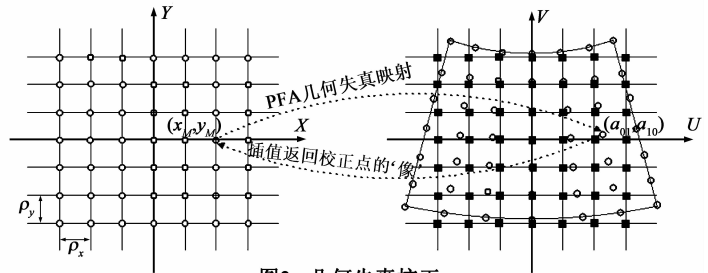


图3 几何失真校正

在某些应用场合(如条带图像拼接),可能还需要将图像校正到以场景稳定建立的坐标系内(X轴平行于载机飞行方向)。我们通过将校正区网格直接建立在在

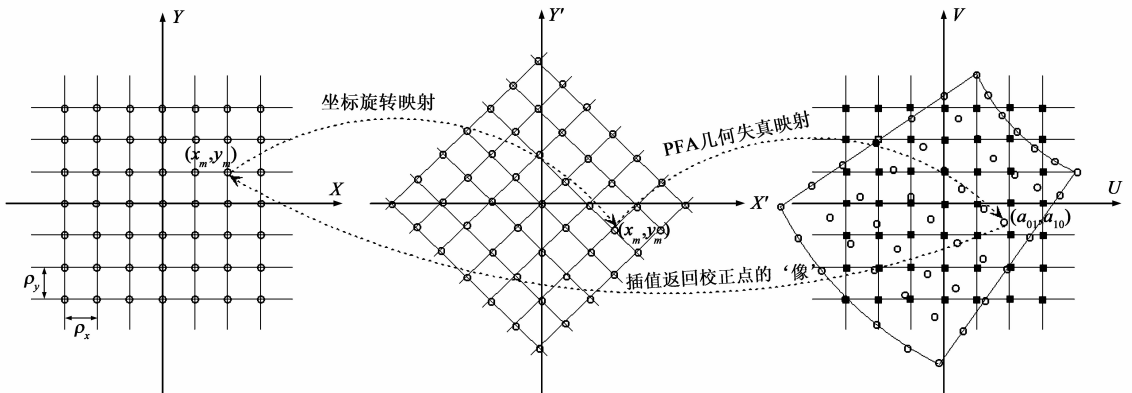


图4 结合图像旋转的几何失真校正

场景稳定坐标系内的方法同时实现几何失真校正和图像坐标系变换,其实现过程如图 4 所示. 首先将稳定坐标系内的校正点坐标 (x_M, y_M) 通过如下坐标旋转变换到以视线方向建立的坐标系内 (Y 轴沿视线方向, 即本文信号模型采用的坐标系) 的坐标 (x_m, y_m) .

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin\theta_s \\ \sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} \quad (14)$$

再通过式 (12) 将 (x_m, y_m) 转换为 PFA 图像坐标 (a_{01}, a_{10}) . 最后以坐标 (a_{01}, a_{10}) 在 PFA 图像中通过插值找到其‘像’放回校正点坐标 (x_M, y_M) 处. 这样, 通过一次插值过程就同时实现了几何失真校正和图像坐标变换.

5 仿真数据处理

仿真分正侧视和斜视两种情况进行, 具体仿真参数如表 1 所示, 在该参数条件下, PFA 有效成像场景半径仅为 250m 左右^[3]. 我们设置

仿真点目标如图 5 所示, 其中黑色实心点代表点目标位置, 相邻点目标方位间距为

90m, 距离间距为 120m, 总的仿真点数为 225 (15 × 15) 点, 对应成像区范围为 1260m × 1680m, 已远超出 PFA 有效成像场景大小.

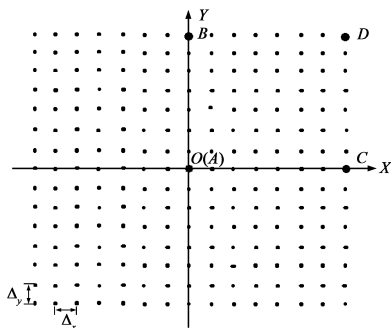
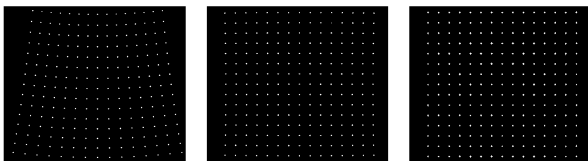


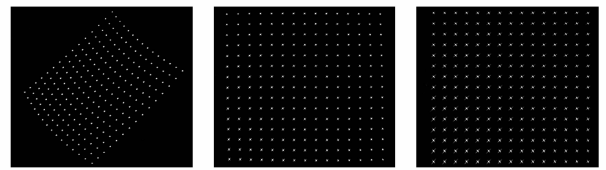
图5 仿真点目标分布

分别采用原有的近似公式^[3,5]和本文推导的公式对波前弯曲效应进行补偿, 得到仿真成像结果如图 6 和图 7 所示. 从图中可以粗略地看到, 两种补偿方法都能有效补偿波前弯曲效应. 为进一步分析补偿精度, 下面给出两种补偿方法处理结果的定量分析比较.



(a) PFA 图像 (b) 原有方法补偿结果 (c) 本文方法补偿结果

图6 正侧视时成像结果



(a) PFA 图像 (b) 原有方法补偿结果 (c) 本文方法补偿结果

图7 斜视45度时成像结果

5.1 空变滤波效果比较

选择场景中有代表性的 ABCD 四点 (见图 5) 进行点目标分析, 比较两种方法的补偿精度. 由于波前弯曲引入的二次相位误差仅存在于方位向, 空变滤波也只在方位一维进行, 因此只分析点目标响应的方位剖面. 图 8 和图 9 分别给出了正侧视和斜视 45 度条件下 PFA 图像经波前弯曲补偿后四个点目标的方位剖面图 (经过 16 倍插值). 从图中可以看到, 对于场景中心点 A, 由于不存在误差, 两种方法处理后具有相同的响应; 但对于非场景中心点, 本文方法处理精度明显优于原有补偿方法.

5.2 几何失真结果比较

表 2 和表 3 分别给出了正侧视和斜视 45 度条件下 PFA 图像经过波前弯曲补偿后四个点目标的定位结果. 从中可以看到, 用原有近似公式补偿后, 对于非场景中心点, 仍存在较大的失真; 而用本文推导公式补偿后, 目标都能够精确地定位到其真实位置处.

表 2 正侧视时几何失真校正结果

	A	B	C	D
实际位置	(0.0, 0.0)	(0.0, 840.0)	(630.0, 0.0)	(630.0, 840.0)
原有方法	(0.0, 0.0)	(0.0, 834.7)	(625.1, -0.6)	(628.9, 827.5)
本文方法	(0.0, 0.0)	(0.0, 840.0)	(630.0, 0.0)	(630.0, 840.0)

表 3 斜视 45 度时几何失真校正结果

	A	B	C	D
实际位置	(0.0, 0.0)	(0.0, 840.0)	(630.0, 0.0)	(630.0, 840.0)
原有方法	(0.0, 0.0)	(2.5, 826.0)	(630.7, -3.8)	(636.5, 816.9)
本文方法	(0.0, 0.0)	(0.0, 840.0)	(629.9, 0.0)	(629.9, 840.0)

6 结论

采用 PFA 算法对近场目标进行高分辨率成像时, 原有波前弯曲误差分析由于采用了近似, 其精度已不能满足要求. 本文采用新的方法推导了在考虑波前弯曲条件下雷达回波相位历史在空间频域的精确相位表达式. 利用该相位模型, 通过对 PFA 图像进行空变滤波和几何失真校正等图像后处理, 能够精确补偿波前弯曲引入的二次和一次相位误差, 极大地改善波前弯曲对 PFA 有效成像场景大小的限制. 因此, 该方法在对大场景范围进行大斜视高分辨率成像时具有很大的应用前景.

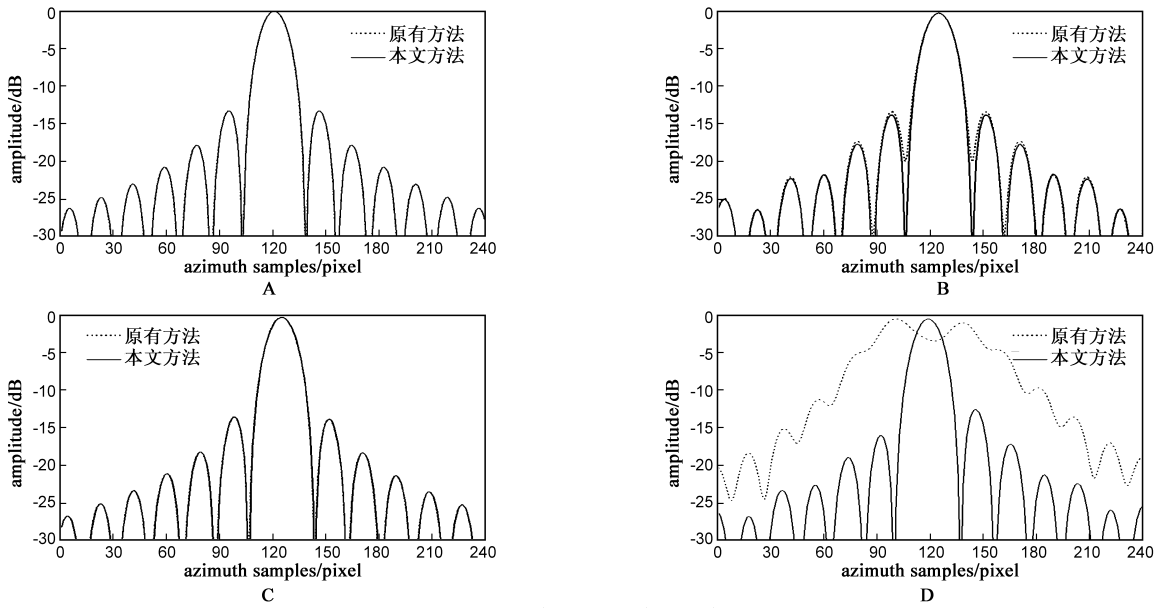


图8 正侧视成像结果点目标方位剖面比较

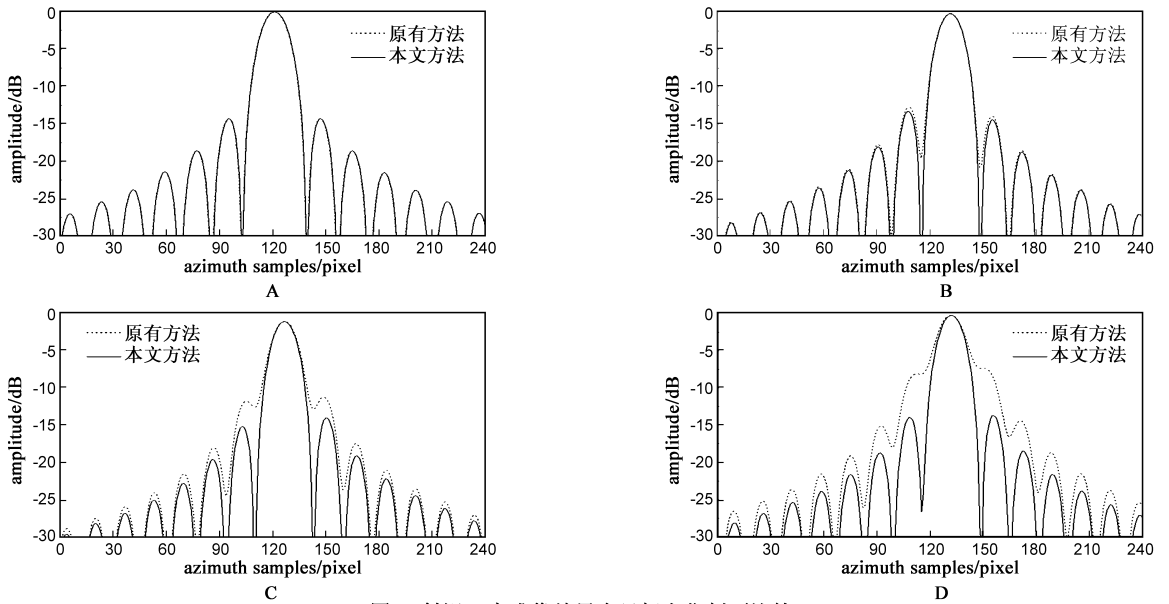


图9 斜视45度成像结果点目标方位剖面比较

参考文献:

- [1] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotating objects[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(1): 23 - 52.
- [2] Jakowatz C V, Wahl D E, Eichel P H, et al. Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [3] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [4] Brian D R, Randolph L M. Taylor expansion of the differential range for monostatic SAR[J]. IEEE Transaction on Aerospace

and Electronic Systems, 2005, 41(1): 60 - 64.

- [5] Doerry A W. Wavefront Curvature Limitations and Compensation to Polar Format Processing for Synthetic Aperture Radar Images[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2007.
 - [6] Xinhua Mao, Daiyin Zhu, Xin Nie, et al. A two dimensional overlapped subaperture polar format algorithm based on stepped-chirp signal[J]. Sensor, 2008, 8(5): 3438 - 3446.
 - [7] 唐禹, 邢孟道, 保铮等. 基于重叠子孔径极坐标算法的波前弯曲效应的补偿[J]. 电子学报, 2008, 36(6): 1108 - 1113.
- TANG Yu, XING Meng-dao, BAO Zheng, et al. Wavefront curvature compensation based on overlapped subaperture polar format algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6):

1108 – 1113. (in Chinese)

- [8] Doren N E, Jakowatz C V, Wahl D E, et al. General formulation for wavefront curvature correction in polar-formatted spotlight-mode SAR images using space-variant post-filtering[A].

Proceedings of International Conference on Image Processing [C]. Washington DC: IEEE Computer Society, 1997. 861 – 864.

作者简介:



毛新华 男, 1979 年 12 月出生, 出生于湖南涟源. 2003 年本科毕业于南京航空航天大学电子工程系. 2009 年于南京航空航天大学信息科学与技术学院获博士学位, 现为南京航空航天大学电子工程系讲师. 从事合成孔径雷达信号处理方面的研究.

E-mail: xinhua@nuaa.edu.cn



朱岱寅 男, 1974 年 7 月出生, 出生于江苏无锡. 1996 年本科毕业于东南大学无线电工程系, 分别于 1998 年和 2002 年在南京航空航天大学电子工程系获硕士和博士学位. 现为南航电子工程系教授、博士生导师, 主要从事雷达成像和信号处理方面的研究.

E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn