

# 复杂航迹和起伏地形条件下 SAR 极坐标格式 算法波前弯曲误差补偿

毛新华,朱岱寅,朱兆达

(南京航空航天大学电子信息工程学院,江苏南京 210016)

**摘要:** 极坐标格式算法(PFA)受波前弯曲误差影响,其有效成像场景范围受到一定限制.采用图像域的空变后滤波处理可以有效补偿波前弯曲误差,但该方法基于雷达平台线性运动假设,无法满足大机动条件下的波前弯曲误差补偿要求.本文提出了一种改进的空变后处理方法,该方法通过对相位历史域的波前弯曲误差函数做与 PFA 成像相同的极坐标格式转换处理,得到波前弯曲误差在两维空间频域的精确表示,因此再通过分块后滤波处理能够精确补偿雷达任意航迹和地形起伏条件下 PFA 波前弯曲误差,显著提高 PFA 有效成像场景范围.最后通过仿真数据处理验证了该算法的有效性.

**关键词:** 合成孔径雷达;极坐标格式算法;波前弯曲补偿;任意航迹;起伏地形

**中图分类号:** TP958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1723-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.004

## Polar Format Algorithm Wavefront Curvature Compensation Under Complicated Flight Path and Rugged Terrain

MAO Xin-hua, ZHU Dai-yin, ZHU Zhao-da

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The space-variant defocus effect introduced by wavefront curvature in polar format algorithm (PFA) imagery limits its maximal focused scene size. Several compensation strategies have been developed in literature to solve this problem, e. g. , subaperture processing, space-variant post processing and widefield polar format algorithm. However, all these approaches are based on the assumption that radar platform is following an expected linear trajectory. They still can't meet the required precision when imaging from arbitrary radar flight path. In this paper, an improved space-variant post processing method for wavefront curvature compensation is proposed. The method computes wavefront curvature error in original phase history domain, and then transforms it into spatial frequency domain by polar format transformation used in image formation. Using the transformed error, we can accurately compensate wavefront curvature effect by space-variant post filtering. Simulation experiments show that the new algorithm has improved focused scene size when applied to phase history generated by non-ideal radar flight path.

**Key words:** synthetic aperture radar; polar format algorithm; wavefront curvature compensation; arbitrary flight path; rugged terrain

### 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(Polar Format Algorithm,简称 PFA)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<sup>[1]</sup>;(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<sup>[2]</sup>;(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<sup>[3,4]</sup>.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<sup>[3-10]</sup>.

PFA 的主要缺陷在于其采用了平面波前假设,而实际的波前是弯曲的,理想航迹下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.目前,对 PFA 波前弯曲的补偿方法主要有三种,一种是基于子孔径处理的方法<sup>[5,6]</sup>,该方法分两级实现成像,整个过程相当于进行了两级 FPA 处理.第一级 PFA 在子孔径内进行粗分辨处理,虽然成像范围较大(整个成像场景),但由于分辨率较低,因此波前弯曲效应可以忽略;粗分辨成像后,获得了场景的粗分辨位置信息,同时孔径间仍然在数据域(时域),这种既在数据域(子孔径间)又在图像域(子孔径内)的特点,为子孔径处理所特有,这为空变误差补偿提供了可能,因此第二级 PFA 在孔径间对每个粗分辨单元进行精分辨成像处理时,虽然分辨率提高了,波前弯曲已不能忽略,但由于有了目标位置的粗分辨信息,因此可以对其进行空变补偿,使补偿后波前弯曲影响仍然可以忽略.第二种波前弯曲补偿方法是 C. V. Jakowatz 等人提出的空变后处理方法<sup>[7-9]</sup>,与子孔径处理方法将波前弯曲补偿结合在算法中不同,空变后处理算法针对的是 PFA 处理得到的含有波前弯曲效应的图像,它通过对 PFA 所得图像进行图像域的空变后滤波处理,去除由于波前弯曲引起的图像散焦,从而改善波前弯曲对聚焦成像场景大小的限制,最后通过图像域的重采样校正几何失真.第三种方法是 W. G. Carrara 等人在 2004 年提出的宽场景极坐标格式算法(Widefield Polar Format Algorithm,简称 WPFA)<sup>[10]</sup>,该算法通过对回波数据进行基于方位向尺度变换的预处理,能够实现对波前弯曲引入的数据格式近似误差的空变校正.在雷达平台匀速直线运动条件下,这三种方法都能够有效补偿 PFA 波前弯曲误差,显著提高有效成像场景范围.但是,随着雷达分辨率的提高,合成孔径时间增长,雷达平台机动飞行将不可避免,而上述三种方法都无法解决机动条件下 PFA 波前弯曲误差的精确补偿问题.

本文提出了一种新的空变后处理 PFA 波前弯曲误差补偿方法,该方法通过对相位历史域的波前弯曲误差函数做与 PFA 成像相同的极坐标格式转换处理,能够得到任意雷达航迹条件下波前弯曲误差在两维空间频域(直角坐标系)的精确表示,因此再利用该误差函数通过对 PFA 图像进行分块后滤波处理可以实现大机

动条件下波前弯曲误差的精确补偿.同时,结合滤波过程分块校正的特点,还可以利用 DEM 提供的场景高程数据对地形起伏引入的误差进行校正.

## 2 聚束 SAR 信号模型

聚束 SAR 数据采集几何模型如图 1 所示,为验证机动条件下成像能力,假设雷达沿着弯曲的轨迹做非匀速直线运动.以雷达波束照射的场景中心  $O$  为原点建立  $XYZ$  坐标系,在该坐标系内雷达天线相位中心位置矢量记为  $\mathbf{r}_a$ ,瞬时坐标为  $(x_a, y_a, z_a)$ (其中  $x_a, y_a, z_a$  均为方位时间  $t$  的函数),它对应的瞬时方位角和俯仰角分别记为  $\theta$  和  $\varphi$ .考虑场景中一任意点目标  $B$ ,它的位置矢量记为  $\mathbf{r}_b$ ,坐标为  $(x_b, y_b, z_b)$ ,该目标到雷达的距离矢量记为  $\mathbf{r}_{ab}$ .

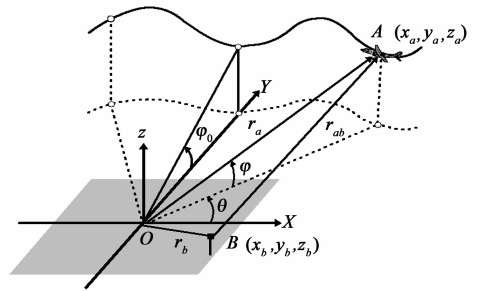


图1 聚束SAR数据采集几何模型

雷达发射宽带信号,被场景中点目标反射后接收到的回波信号通过解调、距离匹配滤波、运动补偿等预处理后可以表示为<sup>[2]</sup>

$$S(t, f_\tau) = \exp\left\{j \frac{4\pi(f_c + f_\tau) R_\Delta}{c}\right\} \quad (1)$$

其中  $f_c$  为发射信号载频,  $f_\tau$  为距离频率,  $c$  为电磁波传播速度,  $R_\Delta = |r_a| - |r_{ab}|$  为差分距离,它是方位时间  $t$  的函数.

## 3 极坐标格式算法

式(1)中差分距离  $R_\Delta$  可做如下分解<sup>[8]</sup>

$$R_\Delta = |r_a| - |r_a - r_b| = \frac{\mathbf{r}_b \cdot \mathbf{r}_a}{|r_a|} + \frac{(\mathbf{r}_b \cdot \mathbf{r}_a)^2}{2|r_a|^3} - \frac{|r_b|^2}{2|r_a|} - \frac{(\mathbf{r}_b \cdot \mathbf{r}_a)|r_b|^2}{2|r_a|^3} + \frac{|r_b|^4}{8|r_a|^3} \quad (2)$$

根据图 1 所示几何关系,可得到  $\mathbf{r}_b \cdot \mathbf{r}_a / |r_a| = x_b \cos \varphi \cos \theta + y_b \cos \varphi \sin \theta + z_b \sin \varphi$ ,因此可将式(2)所示差分距离分成两部分,第一部分是 PFA 成像所需的项  $R_\Delta^p = x_b \cos \varphi \cos \theta + y_b \cos \varphi \sin \theta$ ,其余为波前弯曲和地形起伏( $z_b \neq 0$ )引入的误差项  $R_\Delta - R_\Delta^p$ .将上述差分距离代入式(1),对应得到回波信号可分解为两项的乘积

$$S(t, f_\tau) = S_P(t, f_\tau) \cdot S_E(t, f_\tau) \quad (3)$$

其中

$$S_p(t, f_r) = \exp\left\{j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} R_{\Delta}^p\right\},$$

$$S_E(t, f_r) = \exp\left\{j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} (R_{\Delta} - R_{\Delta}^p)\right\} \quad (4)$$

当雷达作用距离远( $|r_a|$ 比较大)成像场景小( $|r_b|$ 较小)且场景没有高程起伏( $z_b = 0$ )时,式(3)中  $s_E(t, f_r)$ 的影响可以忽略不计,此时回波信号可近似为

$$S(t, f_r) \approx S_p(t, f_r)$$

$$= \exp\left\{j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} (x_b \cos\varphi \cos\theta + y_b \cos\varphi \sin\theta)\right\} \quad (5)$$

极坐标格式算法通过对式(5)做一个极坐标格式数据转换和二维傅里叶变换实现对目标的聚焦成像.极坐标格式数据转换在数学上等效于对式(5)做变量替换  $4\pi(f_c + f_r) \cos\varphi \cos\theta/c = k_x$ ,  $4\pi(f_c + f_r) \cos\varphi \sin\theta/c = k_y$ ,因此极坐标格式数据转换后,信号可表示

$$S(k_x, k_y) = P[S(t, f_r)] = \exp\{j(x_b k_x + y_b k_y)\} \quad (6)$$

其中  $P[\cdot]$ 表示极坐标格式转换.最后,再对式(6)做一个二维傅里叶变换实现成像

$$F[S(k_x, k_y)] = \text{sinc}_a(x - x_b) \cdot \text{sinc}_r(y - y_b) \quad (7)$$

其中  $F[\cdot]$ 表示二维傅里叶变换,  $\text{sinc}_a(\cdot)$ 和  $\text{sinc}_r(\cdot)$ 分别表示方位和距离向的 sinc 函数.

## 4 波前弯曲误差补偿

实际的雷达波前是球面波前,而 PFA 采用了平面波前近似(忽略了式(3)中  $s_E(t, f_r)$ 的影响),这在对小场景进行远距离和低分辨率成像时是合理的.但随着分辨率的提高,成像场景的增大,特别是在近距离成像条件下,平面波前近似引入的误差变得不可忽略,必须对其进行补偿才能满足成像精度的要求.而我们知道,波前弯曲引入的误差大小不仅具有孔径依赖性,还会随着目标的空间位置变化而变化,即还具有位置空变性,因此,要精确补偿波前弯曲误差既要具有雷达的空间位置信息,还要具有目标的位置信息.然而,在回波相位历史域,虽然有雷达的位置信息,但此时还没有获取目标的位置信息,而在 PFA 图像域,虽然有了目标位置信息,但却没有了雷达的位置信息,这给波前弯曲误差的精确补偿带来了极大的挑战.目前,比较可行的补偿方法是先通过 PFA 处理(不考虑波前弯曲误差)得到场景的粗聚焦图像,然后将粗聚焦图像分成若干小的子块(选择合适的子块大小使波前弯曲误差可以忽略)并将其返回空间频域或者相位历史域再进行波前弯曲误差的校正.但已有的空间频域补偿方法要求得到波前弯曲误差在空间频域的解析表达式,因此在雷达平台非匀速直线运动条件下应用受到限制,而返回相位历史域校正方法虽然能够在雷达任意航迹条件下

校正波前弯曲误差,但由于处理过程复杂,计算效率比较低.

为了解决雷达平台高机动条件下波前弯曲误差补偿精度和效率的矛盾,本文提出了一种在空间频域进行波前弯曲误差补偿的新方法,该方法处理流程如图 2 所示.首先,对回波数据进行 PFA 处理得到目标的粗聚焦图像(没有考虑波前弯曲和地形高度起伏),并将得到的粗聚焦图像分成若干子图像块.子块大小的选择需考虑两个因素,首先,要保证子块内波前弯曲误差散焦效应的空变性可以忽略,但几何失真的空变性允许存在(波前弯曲导致的图像几何失真空变性要比散焦的空变性更严重,选取更小的子块固然可以使几何失真的空变性也能忽略,但会由于子块数过多导致算法效率降低);另外,必须保证子块内地形的起伏可以忽略,即子块内所有目标近似在同一高度上.上述条件满足时,子块内由于航迹扰动和地形起伏引入的波前弯曲误差可以进行统一补偿.然后,对每一个图像子块,将其返回空间频域并以子块中心为参考进行误差补偿,由于补偿前子块内目标散焦空变性可以忽略,因此补偿后所有目标都得到精确聚焦,但除子块中心点外,其余目标仍存在几何失真,因此补偿后还需对子块图像进行几何失真校正;最后,将所有校正后的子图像进行拼接就可以得到整个场景的精确聚焦图像.

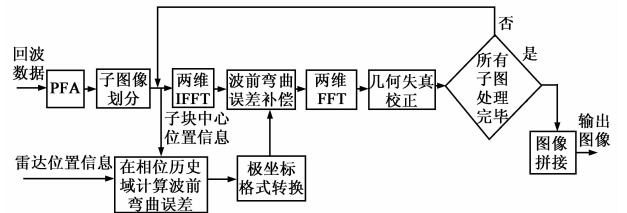


图2 波前弯曲误差补偿算法处理流程

在上述误差补偿过程中,关键问题之一是如何获取图像子块中心点的波前弯曲误差在两维空间频域的精确表示.由于只有在相位历史域才有雷达的位置信息,我们只能直接得到波前弯曲误差在相位历史域的精确表示,即式(4)中  $S_E(t, f_r)$ ,而无法在两维空间频域直接计算得到波前弯曲误差表达式,因此问题转化为如何利用  $S_E(t, f_r)$ 得到两维空间频域的波前弯曲误差.在雷达平台匀速直线运动条件下,文献[2,8,9]推导得到了  $S_E(t, f_r)$ 在两维空间频域的二阶近似,但这些方法都无法进一步推广应用到任意雷达航迹条件下.

在极坐标格式算法中,相位历史域到两维空间频域的转变是通过极坐标格式转换完成的.极坐标格式转换是对信号的一个二维插值操作,在满足 Nyquist 采样定理前提下,它满足

$$P[S_p(t, f_r) \cdot S_E(t, f_r)] = P[S_p(t, f_r)] \cdot P[S_E(t, f_r)] \quad (8)$$

由式(8)我们可以看到,与利用傅里叶变换将信号

从相位历史域变换到空间频域不同,相位历史域中基本成像项和误差项的乘积在通过极坐标格式转换变换到空间频域后,恰好等于两个信号分别作极坐标格式转换后的乘积,因此,波前弯曲误差在空间频域表示,可以通过对相位历史域的波前弯曲误差  $S_E(t, f_c)$  作与粗聚焦成像时完全相同的极坐标格式转换得到,即  $P[S_E(t, f_c)]$ .

在雷达平台高机动条件下,波前弯曲误差项  $S_E(t, f_c)$  中存在较大的高频分量,因此在极坐标格式插值时为了保证插值精度通常要求较长的插值核,从而影响了算法的计算效率.考虑到极坐标格式插值满足

$$P[S_E(t, f_c)] = P\left[\exp\left\{j\frac{4\pi(f_c + f_c)}{c}(R_\Delta - R_\Delta^p)\right\}\right] \\ = \exp\left\{jP\left[\frac{4\pi(f_c + f_c)}{c}(R_\Delta - R_\Delta^p)\right]\right\} \quad (9)$$

因此,对波前弯曲误差项的插值可以转化为对该误差项的相位进行插值,而误差项相位的频率要远低于误差项的频率,因此这种实现方式可以降低对插值核长度的要求.

为了进一步提高算法计算效率,我们在式(9)中对相位的极坐标格式转换作了进一步的改进.考虑到极坐标格式转换只是对相位的一个二维重采样(实际实现时通常通过两个一维重采样代替),如果相位的解析表达式是已知的(任意方位时间  $t$  和距离频率  $f_c$  的相位都可以直接得到),则可以将极坐标采样输出位置代入表达式直接计算得到重采样后的相位输出,完全避免插值.在雷达平台匀速直线运动条件下,我们可以得到相位误差关于时间  $t$  和距离频率  $f_c$  的解析表达式,因此无需插值就可以得到两维空间频域的波前弯曲误差.在任意航迹条件下,雷达的瞬时位置只能由运动测量系统提供,此时只能得到相位误差在方位时间  $t$  域的若干离散采样,因此极坐标格式转换中的方位插值不可避免,但距离向的重采样仍然可以省略.

对各个子图像分别进行上述波前弯曲误差补偿后,原理上将其进行无缝拼接即可得到整个场景的高分辨率聚焦图像.由于 PFA 粗聚焦图像和补偿后的子图像都存在几何失真,因此图像拼接前还须进行必要的几何失真校正.为提高算法效率,我们将几何失真校正和图像拼接嵌入到成像处理过程中,提出了如图 3 所示几何失真校正方法,该方法整个处理过程建立在逐子图像块校正的基础上.首先,在地理坐标系中将成像场景分成若干子块,考虑到图像的边缘效应,为了得到拼接的连续图像,要求截取的相邻子块间有一定的重叠.对每一个子块,利用 PFA 几何失真映射关系<sup>[9]</sup>(雷达平台机动主要引入高频误差,因此几何失真关系仍可根据理想航迹得到)找到子块中心点在 PFA 粗聚焦图像

中的位置,并以此为中心,截取包含子块的一个子图像.对该子块图像以中心点为参考进行波前弯曲补偿后,子图像得到精确聚焦,但除中心点外,其余目标仍然存在几何失真,因此最后再对子图像进行几何失真校正就可以得到该子块的无失真精确聚焦图像.所有子块处理结束后,直接拼接就可得到整个场景的无失真精确聚焦图像.

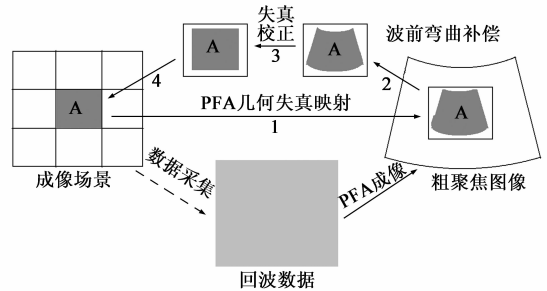


图3 几何失真校正示意图

## 5 仿真数据处理

利用 UHF 波段超宽带 SAR 仿真回波数据对算法进行了验证,仿真系统主要参数如下:工作频率 400MHz,作用距离 5km,距离和方位分辨率均为 0.5m.在该参数及理想航迹条件下,PFA 有效聚焦场景半径仅为 80m 左右.设置地面仿真点目标分布如图 4 所示,其中 ABCD 为具有高度的四个目标,高度分别为 30m,40m,50m 和 60m,相邻点目标距离和方位间距均为 70m,对应整个场景范围为 840m × 840m,已远超出 PFA 有效成像场景大

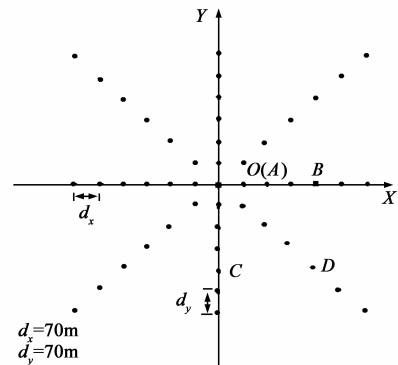


图4 仿真点目标分布

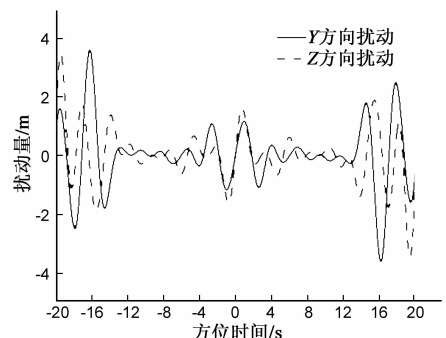


图5 雷达平台扰动

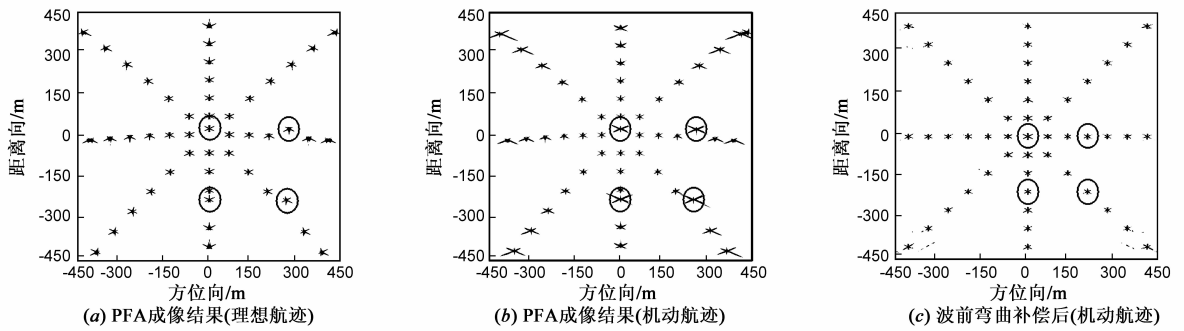


图6 成像结果

小,必须考虑对波前弯曲误差进行补偿.为了验证在雷达非匀速直线运动条件下本文算法的波前弯曲补偿性能,假设雷达在  $Y$  和  $Z$  方向分别有一个高频扰动,扰动大小如图 5 所示.

图 6(a)、(b)给出了对仿真回波数据直接 PFA 成像的结果,其中图 6(a)为雷达理想航迹条件下成像结果,图 6(b)为雷达航迹存在高频扰动时成像结果,从图中可以看到,受波前弯曲误差影响,除了靠近场景中心的部分目标外,其余目标均存在明显的几何失真和散焦,而且,在雷达航迹存在扰动条件下,波前弯曲散焦效应更加明显.

图 6(c)是采用本文算法对波前弯曲补偿后的成像结果,从图中我们可以粗略的看出几何失真和散焦效应都得到了很好的补偿.为进一步分析补偿精度,下面以图 4 中  $ABCD$  四个有代表性的点目标为例,从几何失真和聚焦精度两方面给出本文补偿方法处理结果的详细分析.

表 1 给出了算法对四个点目标的定位结果.从表中可以看到,直接 PFA 成像结果中四个点目标都明显偏离了其真实位置,因此图像存在较大的几何失真(从图 6(a)、(b)也能够明显看出).而通过本文方法补偿波前弯曲误差后,在测量精度范围内,目标定位结果与其真实位置基本吻合.

表 1 几何定位结果(单位:m)

	A	B	C	D
目标真实位置	(0.0,0.0)	(280.0,0.0)	(0.0,-280.0)	(280.0,-280.0)
极坐标格式算法	(0.0,22.4)	(280.7,20.4)	(0.0,-247.9)	(269.5,-249.9)
波前弯曲补偿后	(0.0,0.0)	(280.1,0.0)	(0.0,-279.7)	(280.1,-280.1)

图 7 给出了四个点目标的两维点目标响应图(为了细化旁瓣结构,图像在距离和方位向都进行了 8 倍的重采样).从图中可以看到,通过本文方法进行波前弯曲补偿后,所有目标聚焦效果都接近理想,波前弯曲效应得到明显补偿.

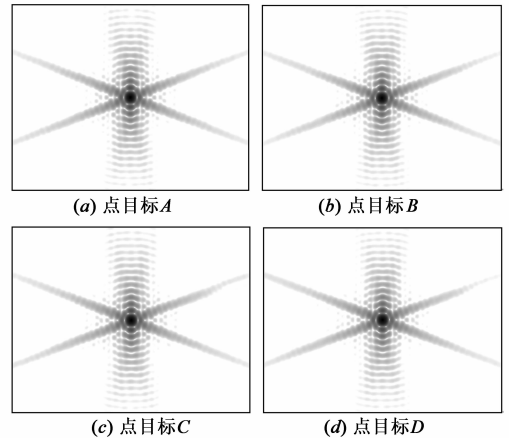


图7 两维点目标响应

## 6 结论

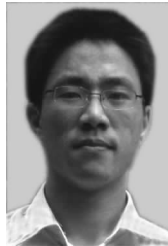
本文提出了一种新的波前弯曲误差补偿方法,该方法在相位历史域计算波前弯曲误差并将其通过极坐标格式转换变换到两维空间频域进行补偿,有效地解决了雷达平台大机动条件下极坐标格式算法的波前弯曲误差补偿问题,同时结合补偿过程需要分块处理的特点,该方法还能够克服地形起伏对成像的影响(在已知地形高度条件下).仿真结果表明即使在雷达航迹存在高频扰动条件下本文方法仍能提供对大场景的精确聚焦成像.随着成像分辨率的提高,合成孔径时间增长,雷达平台非线性运动将不可避免,因此本文算法在对大场景进行超高分辨率成像或低频超宽带成像时将具有很大的应用前景.

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [3] 毛新华,朱岱寅. SAR 极坐标格式成像算法对运动目标响应特性[J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1472 - 1478.

- MAO Xin-hua, ZHU Dai-yin. Response of PFA to moving target in SAR imaging[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2009, 30(8): 1472 - 1478. (in Chinese)
- [4] Zhu D Y, Mao X H, Li Y, Zhu Z D. Far-field limit of PFA for SAR moving target imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 917 - 929.
- [5] Doerry A W. Synthetic aperture radar processing with polar formatted subaperture[A]. Conference Record of the 28th Asilomar Conference on Signals, System & Computers[C]. Pacific Grove, California: IEEE Computer Society Press, 1994. 1210 - 1215.
- [6] 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 Y, Xing M D, Bao Z, et al. Wavefront curvature compensation based on overlapped subaperture polar format algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(6): 1108 - 1113. (in Chinese)
- [7] 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]. Proceeding of International Conference on Image Processing [C]. Washington DC: IEEE Computer Society, 1997. 861 - 864.
- [8] Doerry A W. Wavefront Curvature Limitations and Compensation to Polar Format Processing for Synthetic Aperture Radar Images[R]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2007.
- [9] 毛新华, 朱岱寅, 叶少华, 朱兆达. 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[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 244 - 250.  
Mao X H, Zhu D Y, Ye S H, Zhu Z D. Image domain space-variant post-processing for wavefront curvature correction in polar format spotlight SAR image[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 244 - 250. (in Chinese)
- [10] Carrara W G, Goodman R S, Ricoy M A. New algorithms for widefield SAR image formation [A]. Proceedings of IEEE Radar Conference [C]. Philidelphia: IEEE Press, 2004. 38 - 43.

### 作者简介



**毛新华** 男, 博士, 1979 年 12 月出生于湖南涟源. 现为南京航空航天大学电子信息工程学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为合成孔径雷达信号处理, 已在国内外学术期刊和会议上发表论文 20 余篇.

E-mail: xinhua@nuaa.edu.cn