

# 基于改进极坐标格式算法的大斜视 SAR 成像方法

薛鹏凤, 郭 苹

(西安科技大学通信与信息工程学院, 西安, 710600)

**摘要** 针对大斜视合成孔径雷达成像(SAR)模式下,回波存在较大的距离走动和严重的距离-方位交叉耦合等问题,对传统极坐标格式算法(PFA)进行改进,提出了一种基于改进的 PFA 算法的大斜视 SAR 成像方法。根据实际回波数据存储的形式,建立了大斜视 SAR 的斜距模型,通过对距离向与方位向的二维泰勒级数展开设计了一种斜距平面的二维插值函数,有效地提高了成像算法的聚焦深度。与传统 PFA 不同,斜距平面的距离展开能够避免回波数据的投影,所以改进的算法更适用于地形起伏不平的成像场景。仿真数据和实测数据分析验证了该方法的有效性。

**关键词** 合成孔径雷达;大斜视;斜距平面;极坐标格式算法

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.03.013

**中图分类号** TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2022)03-0082-07

## A Modified Polar Format Algorithm for Highly-Squinted SAR

XUE Pengfeng, GUO Ping

(Communication and Information Engineering College, Xi'an University of  
Science and Technology, Xi'an 710600, China)

**Abstract** Aimed at the problems that large range migration and severe range-azimuth cross coupling remain in returning echo under condition of the highly-squinted synthetic aperture radar imaging (SAR) mode, the conventional polar format algorithm (CPFA) is modified and a method for highly-squinted SAR is proposed. According to the actual echo data storage form, the algorithm establishes a slanted data model of the highly-squinted SAR, and designs a two-dimensional interpolating function of the slant range plane through the expansion of the two-dimensional Taylor series in the range and azimuth directions, effectively improving the depth-of-focus. Moreover, the modified polar format algorithm (MPFA) is more suitable for the undulating terrain because the projection of real data onto ground plane performed in CPFA is avoided. The simulation and real data experiments show that the proposed approach is valid.

**Key words** synthetic aperture radar; highly-squinted; slant range plane; polar format algorithm

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像是一种先进的微波遥感技术,能够获得二维高分辨率图像<sup>[1-2]</sup>。相比于正侧视工作模式,大斜视

SAR 能够提前探测成像区域并获得高分辨率的图像,独特的优势使得大斜视 SAR 有着广泛的应用前景,相关的成像方法已经成为了研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

**收稿日期:** 2021-11-18

**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)

**作者简介:** 薛鹏凤(1997-),女,陕西榆林人,硕士生,研究方向为合成孔径雷达成像研究。E-mail:940663251@qq.com

**引用格式:** 薛鹏凤,郭苹.基于改进极坐标格式算法的大斜视 SAR 成像方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2022,23(3):82-88. XUE Pengfeng, GUO Ping. A Modified Polar Format Algorithm for Highly-Squinted SAR[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2022, 23(3): 82-88.

由于大斜视 SAR 存在线性距离徙动和严重的距离-方位交叉耦合现象,导致传统的成像方法无法使用,目前已有学者提出了一些解决方法。文献[5]为了消除大斜视时回波的耦合,改进了非线性调频变标算法。文献[6~8]提出了一系列基于子孔径操作的斜视 SAR 成像方法,然而,这种方法计算量大,操作复杂,适用性较差。在文献[9]中,提出了一种改进的笛卡尔分解后投影(back projection, BP)算法,该算法利用变换的笛卡尔坐标系将收发模式近似视为斜视模式。文献[10]提出了一种基于 BP 算法的点目标扩展函数二维不正交的自聚焦方法。然而, BP 作为一种时域算法,它的效率低于频域算法,因此不是最佳选择。

传统的极坐标格式算法(conventional polar format algorithm, CPFA)操作简单,已被证实可以获得高分辨率的 SAR 图像,在大斜视 SAR 中有一定的应用<sup>[11-12]</sup>。CPFA 将场景中心点作为滤波器补偿的参考点。然而,算法利用远场假设来近似距离差,严重限制了聚焦深度<sup>[13-14]</sup>。随着场景尺寸的增加和斜视角的增大,带来的残余误差会随之变大,最终会导致图像出现空变失真和散焦。特别是对于大斜视 SAR 来说,聚焦结果严重恶化。

本文深入研究了大斜视 SAR 成像问题,建立了大斜视 SAR 任意点目标的瞬时斜距模型,考虑到斜距平面的数据,采用二维泰勒级数展开推导了新的插值映射函数,并详细介绍了改进的极坐标格式算法(modified polar format algorithm, MPFA),最后进行了仿真和实测数据的验证。

## 1 模型

大斜视 SAR 成像几何模型如图 1 所示,雷达平台沿着 Y 轴运动,运动轨迹为虚线 PM,速度为  $v$ 。

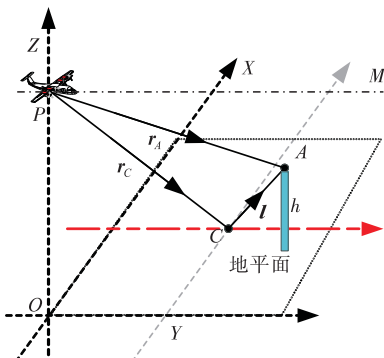


图 1 大斜视 SAR 成像几何模型图

设点  $P$  为方位中心时刻,即参考时刻。 $h$  为点目标的高度,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, $l$  表示从  $C$

到  $A$  的位置矢量。因此,任意点目标  $A$  的瞬时斜距  $R_A(t_m)$  可以表示为:

$$|R_A(t_m)| = |R_C(t_m) + l| \quad (1)$$

式中: $t_m$  表示方位向的慢时间; $|\cdot|$  表示范数运算; $R_C(t_m)$  是参考点  $C$  的距离历程。值得注意的是,点目标可能具有一定高度。

经过矢量分析,瞬时斜距还可以由图 1 所示的斜距矢量  $r_A$  来表示,即:

$$|R_A(t_m)| = \sqrt{(|r_A|^2 - y_A^2) + (vt_m - y_A)^2} \quad (2)$$

式中: $y_A$  是点  $A$  在  $Y$  轴的值。

距离压缩函数为:

$$H_C(\gamma, t_m) = \exp(j\pi\gamma t_m^2) \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为发射线性调频信号的调频率。

距离压缩后,点  $A$  在距离频域/方位时域中的回波信号表示为:

$$S_0(K_r, t_m) = \varepsilon_0 \omega_r(K_r) \omega_a(t_m) \exp(-jK_r |R_A(t_m)|) \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_0$  表示复散射系数; $\omega_r(\cdot)$  和  $\omega_a(\cdot)$  分别是距离频域和方位时域的窗函数; $K_r$  为距离波数。

## 2 成像算法原理

### 2.1 传统的极坐标格式算法

在 CPFA,首先将式(1)中的瞬时斜距进行一维泰勒级数展开为:

$$|R_A(t_m)| = [R_C(t_m) + l] \approx |R_C(t_m)| + \frac{R_C(t_m)}{|R_C(t_m)|} l \quad (5)$$

因为 CPFA 采用了平面波近似,即(5)中的近似是基于  $l \ll |R_C(t_m)|$  的假设导出的,泰勒级数展开时忽略了高次项。雷达信号的回波相位可以表示为:

$$\varphi_{\text{CPFA}}(K_r, t_m) = -K_r \left[ |R_C(t_m)| + \frac{R_C(t_m)}{|R_C(t_m)|} l \right] \quad (6)$$

式(6)中,可以利用一致补偿函数与回波相乘来去除第 1 项,即:

$$H_B(K_r, t_m) = \exp(jK_r |R_C(t_m)|) \quad (7)$$

第 2 项可以通过映射函数消除,即:

$$\left( K_r \frac{R_C(t_m)}{|R_C(t_m)|} \right) l \rightarrow K_n l \quad (8)$$

式中: $K_n$  是新的波数向量。

假设目标是没有地形起伏( $l = (x, y, 0)$ ),则式(8)可以通过 CPFA 中的二维插值实现,表示为:

$$\begin{cases} K_r \xi_x(t_m) x \rightarrow K_x x \\ K_r \xi_y(t_m) y \rightarrow K_y y \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\xi_x(t_m)$  与  $\xi_y(t_m)$  分别是 CPFA 在  $X$  向和  $Y$  向的插值系数;  $K_x$  和  $K_y$  分别表示距离波数和方位波数。

经过一致补偿和二维插值后, 回波信号变为:

$$S_1(K_x, K_y) = \varepsilon_0 \omega_r(K_x) \omega_a(K_y) \cdot \exp\{-j(K_x x + K_y y)\} \quad (10)$$

最后, 利用二维傅里叶逆变换来获得最终的聚焦结果。

## 2.2 改进的极坐标格式算法

由于空间矢量  $\mathbf{r}$  具有二维信息, 本文选择将斜距平面作为处理数据的域, 引入了一种新的插值方式来处理大斜视 SAR 数据, 采用的多变量泰勒级数展开法比传统的单变量泰勒级数展开法具有更高的精度。

首先将式(2)在参考点  $C$  进行  $\mathbf{r}$  变量与  $y$  变量的二维泰勒级数展开, 并忽略高阶项, 即:

$$|\mathbf{R}_A(t_m)| \approx |\mathbf{R}_C(t_m)| + \mu_r(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) + \mu_y(t_m)(y_A - y_C) \quad (11)$$

其中  $\mu_r(t_m)$  和  $\mu_y(t_m)$  都是展开系数, 表示为:

$$\begin{cases} \mu_r(t_m) = \frac{\partial |\mathbf{R}_A(t_m)|}{\partial |\mathbf{r}_A|} \Big|_{A=C} = \frac{|\mathbf{r}_C|}{\sqrt{(|\mathbf{r}_C|^2 - y_C^2) + (v_m - y_C)^2}} \\ \mu_y(t_m) = \frac{\partial |\mathbf{R}_A(t_m)|}{\partial |y_A|} \Big|_{A=C} = \frac{-v_m}{\sqrt{(|\mathbf{r}_C|^2 - y_C^2) + (v_m - y_C)^2}} \end{cases} \quad (12)$$

回波的相位可以被表示为:

$$\varphi_{\text{MPFA}}(K_r, t_m) = -K_r [|\mathbf{R}_C(t_m)| + \mu_r(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) + \mu_y(t_m)(y_A - y_C)] \quad (13)$$

利用式(7)进行一致补偿后, 参考点可以被很好地聚焦, 而其他点则不能。与 CPFA 类似, 第 2 项和第 3 项可以通过二维插值和映射来消除, 那 MPFA 的二维映射函数推导如下:

$$\begin{cases} K_r \mu_r(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) \rightarrow K'_r(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) \\ K_r \mu_y(t_m)(y_A - y_C) \rightarrow K'_y(y_A - y_C) \end{cases} \quad (14)$$

经过一致补偿和二维插值后, 信号变为:

$$S_0(K'_r, K'_y) = \varepsilon_0 \omega_r(K'_r) \omega_a(K'_y) \cdot \exp\{-j[K'_r(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) + K'_y(y_A - y_C)]\} \quad (15)$$

最终利用二维傅里叶逆变换即可得到精确的聚焦图像。

MPFA 的成像流程如图 2 所示。显然, MPFA 与传统的 CPFA 算法处理流程基本一致, 二者的区别主要在二维插值函数, 这是由距离历程的不同展开方式带来的, 也是 MPFA 的核心。

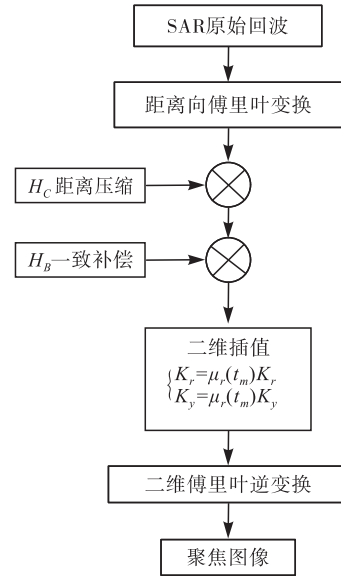


图 2 MPFA 流程图

## 3 算法性能分析

### 3.1 残余相位误差分析

下面对决定算法聚焦深度的残余相位误差进行了详细分析, 并与 CPFA 进行了比较。根据图 2 的算法流程图, 我们可以看出近似只存在于 PFA 的距离历程展开公式中。因此, 残余相位误差主要由距离展开的精度决定, 分别根据式(5)、(11)推导为:

$$Err_{\text{CPFA}} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ |\mathbf{R}_A(t_m)| - |\mathbf{R}_C(t_m)| + \frac{|\mathbf{R}_C(t_m)|}{|\mathbf{R}_C(t_m)|} l \right] \quad (16)$$

$$Err_{\text{MPFA}} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[ |\mathbf{R}_A(t_m)| - \mu_r(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) - |\mathbf{R}_C(t_m)| - \mu_y(t_m)(y_A - y_C) \right] \quad (17)$$

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
载波频率/GHz	9.65	高度/km	7
信号带宽/MHz	150	斜距/km	15
采样频率/MHz	160	速度/(m/s)	100
方位分辨率/m	0.443	斜视角/(°)	60

采用表 1 中列出的仿真参数, 分别对 CPFA 和本文所提 MPFA 的残余相位误差进行比较。如图 3 所示, 场景大小为  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  (距离向  $\times$  方位向), 等高线的单位是  $\pi$ 。可以看出, 图 3(a) 的 CPFA 中的最大相位误差比  $\pi/4$  大得多, 而图 3(b) 中由 MPFA 带来的最大相位误差则远远小于  $\pi/4$ , 这表明 MPFA 对距离模型采取斜距平面的二维泰勒展开带来的残余相位误差足够小, 能够得到良好的聚焦效果。

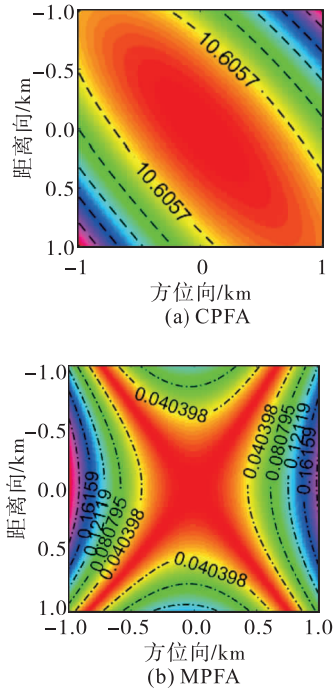


图 3 距离/方位向的残余相位误差

此外,CPFA 假设地面是平坦的,导致对目标高度变换十分敏感,而 MPFA 包含了高度信息在式(11)的扩展中,可以避免这种现象。图 4 和图 5 分别给出了目标高度的变化时 MPFA 和 CPFA 的残余相位误差,可以看出当目标高于(或低于)地平面时,CPFA 的残余误差远大于  $\pi/4$ ,这将极大地恶化最终成像结果从而限制场景大小,而 MPFA 对目标高度变化并不敏感,其带来的相位误差对最终成像质量造成的影响是可以忽略的。

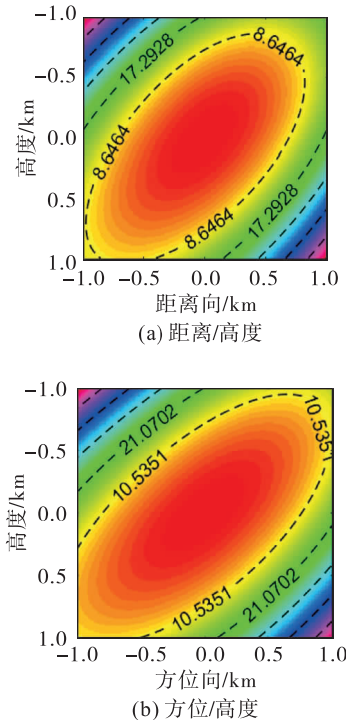


图 4 CPFA 的残余相位误差

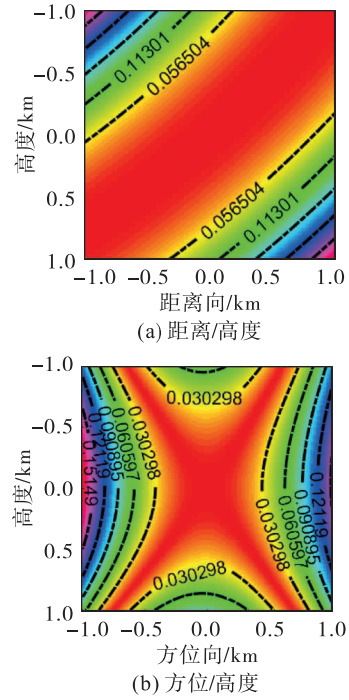


图 5 MPFA 的残余相位误差

### 3.2 计算量分析

由上述分析可知,MPFA 和 CPFA 的操作流程都是一样的,进行了两次距离维的 FT/IFT,一次方位维的 IFT,两次插值运算以及一次复数乘法。为了明确所提算法的运算效率,通过公式推导给出计算负荷,总的计算量为:

$$O = MN \log_2 N + NM \log \frac{M}{2} + MN + 4kNM \quad (18)$$

式中: $M$  和  $N$  分别表示距离和方位的采样点数; $k$  表示二维插值的核长度。

总体来说,MPFA 与 CPFA 具有相同的计算量,但是 MPFA 有更好的聚焦性能,更适用于大斜视 SAR 模式。

### 3.3 场景分析

CPFA 的平面波近似主要是指用实际距离在波束射线上的投影代替了雷达到点目标的距离。MPFA 引入斜距平面作为处理数据的域,但仍有一定的近似,为了分析近似产生的问题,主要考虑二阶相位误差造成的散焦,这是限制成像场景范围的最主要因素。

将 MPFA 中的斜距矢量进行泰勒展开,并忽略三阶以上的高阶项:

$$\begin{aligned} |\mathbf{R}_A(t_m)| \approx & |\mathbf{R}_C(t_m)| + \mu_r(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) + \\ & \mu_y(t_m)(y_A - y_C) + \frac{1}{2}\mu_{rr}(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|)^2 + \\ & \frac{1}{2}\mu_{ry}(t_m)(|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|)(y_A - y_C) + \frac{1}{2}\mu_{yr}(t_m) \cdot \\ & (|\mathbf{r}_A| - |\mathbf{r}_C|) \cdot (y_A - y_C) + \frac{1}{2}\mu_{yy}(t_m)(y_A - y_C)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

其中展开系数如下:

$$\begin{cases} \mu_{rr}(t_m) = \frac{\partial^2 |\mathbf{R}_A(t_m)|}{\partial |\mathbf{r}_A|^2} \Big|_{A=C} = \frac{|\mathbf{R}_C(t_m)|^2 - |\mathbf{r}_C|^2}{|\mathbf{R}_C|^2} \\ \mu_{ry}(t_m) = \frac{\partial \left( \frac{\partial |\mathbf{R}_A(t_m)|}{\partial |\mathbf{r}_A|} \right)}{\partial |\mathbf{r}_A|} \Big|_{A=C} = \frac{(vt_m) |\mathbf{r}_C|}{|\mathbf{R}_C|^3} \\ \mu_{yr}(t_m) = \frac{\partial \left( \frac{\partial |\mathbf{R}_A(t_m)|}{\partial |\mathbf{r}_A|} \right)}{\partial |y_A|} \Big|_{A=C} = \frac{(vt_m) |\mathbf{r}_C|}{|\mathbf{R}_C|^3} \\ \mu_{yy}(t_m) = \frac{\partial^2 |\mathbf{R}_A(t_m)|}{\partial |y_A|^2} \Big|_{A=C} = \frac{(vt_m)^2}{|\mathbf{R}_C|^3} \end{cases} \quad (20)$$

假设孔径中心足够大,那么  $\mathbf{R}_C$  可以被假设为相对于时间是恒定的<sup>[15]</sup>。通过将些假设应用于式(19),可以看出其由相对于慢时间的常数项、线性项和二次项组成。常数项和线性项将在最终图像中引入一定的偏移,但不会引起任何散焦或分辨率损失。而与慢时间二次相关的项将导致散射体的空变散焦。

由于非线性距离差引起的散焦相位误差不能超过  $\pi/2$ ,即:

$$\Phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{2} \frac{(vt_m)^2}{|\mathbf{R}_C|^3} (y_A - y_C)^2 \leq \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

令  $y_A - y_C = r_1$ ,合成孔径的最大范围为  $vt_m = \pm \frac{L_a}{2}$ ,合成孔径长度  $L_a$ ,则:

$$\frac{\pi}{2} \geq -\frac{\pi}{2\lambda} \frac{r_1^2 L_a^2}{|\mathbf{R}_C|^3} \quad (22)$$

图像的方位分辨率为  $\rho = \frac{\lambda |\mathbf{R}_C|}{2L_a}$ ,则:

$$r_1 \leq 2\rho \sqrt{\frac{|\mathbf{R}_C|}{\lambda}} \quad (23)$$

最大聚焦半径  $r_{\max M} = r_1 + y_C$ ,则 MPFA 的最大场景聚焦半径为:

$$r_{\max M} \leq 2\rho \sqrt{\frac{|\mathbf{R}_C|}{\lambda}} + y_C \quad (24)$$

通过文献[15]可知,CPFA 的最大聚焦半径为:

$$r_{\max C} \leq 2\rho \sqrt{\frac{|\mathbf{R}_C|}{\lambda}} \quad (25)$$

综上,MPFA 的最大聚焦半径与 CPFA 相比扩大了  $y_C$ 。

## 4 仿真实验与结果分析

为了验证所提算法的有效性,本节分别进行了仿真实验以及实测数据的验证。

### 4.1 仿真分析

仿真参数见表1。模拟大斜视回波数据,在图6

所示的场景上布置4个点目标,PT0是场景中心点,它和PT3在水平面上具有相同的坐标,但是点目标高度是有所不同的。

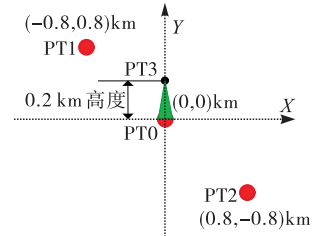


图6 仿真场景示意图

为了对比出本文所提算法的优势,图7仿真了CPFA的点目标PT0、PT1和PT2的聚焦结果。我们可以看到尽管场景中心点目标PT0能够被CPFA很好地聚焦,但是边缘上的目标PT1和PT2由于大的残余相位误差而严重散焦。

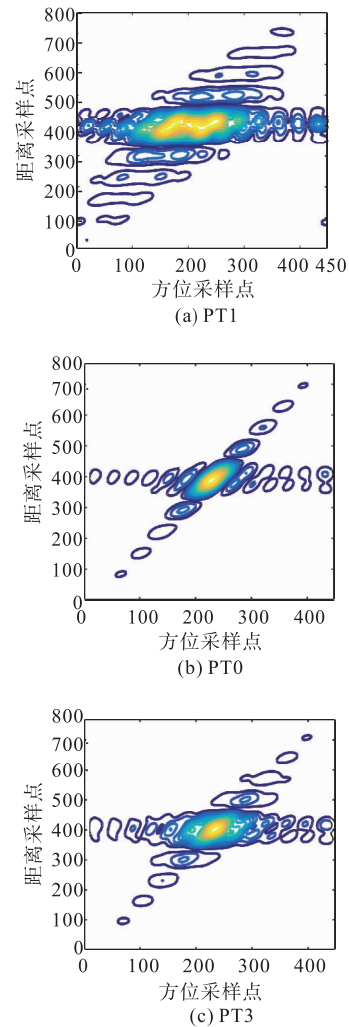


图7 CPFA 聚焦结果图

MPFA 仿真点目标PT0、PT1和PT2的聚焦结果由图8给出。可以看到MPFA成像结果在距离和方位维上都有很好的聚焦效果。为了评估该算法的性能,图中左上角给出场景中不同距离处的点目标的方位向的成像性能参数,从理论上来说,积分

旁瓣比(integrated sidelobe ratio, ISLR)理论值在-9.80 dB左右,峰值旁瓣比(peak sidelobe ratio, PSLR)在-13.26 dB左右<sup>[16]</sup>,MPFA 的性能参数和理想值是非常接近的,证明了本文改进算法的优越性。

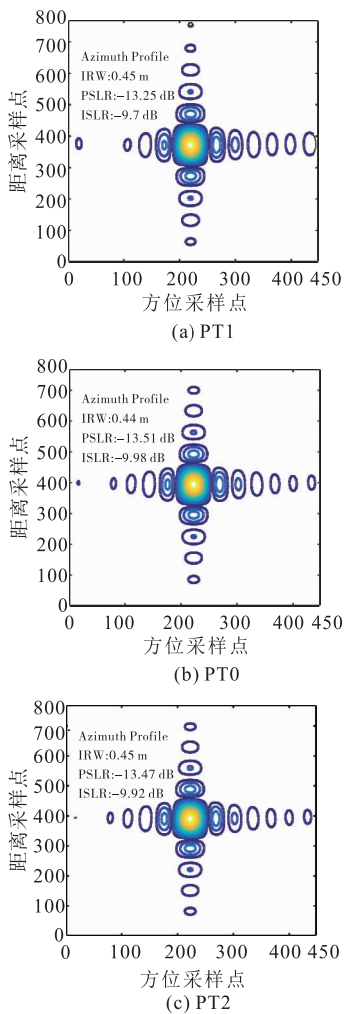
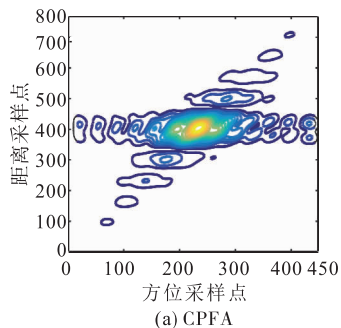


图 8 MPFA 聚焦结果图

MPFA 与 CPFA 对点目标 PT3 的仿真结果如图 9 所示。需要注意的是与 PT0 相比,即比较图 9(b)和图 8(b),可以看出 PT3 的目标高度对 MPFA 的成像质量没有影响,这意味着本文所提出的方法与文献<sup>[17]</sup>中传统方法不同,MPFA 对目标的高度是不敏感的。但是由于目标是以错误的位置投影到斜面上的(叠掩现象)<sup>[17]</sup>,所以 MPFA 仍然不能确定目标的高度信息。因此,我们将在下一步工作中研究校正地形变化带来的几何失真。



(a) CPFA

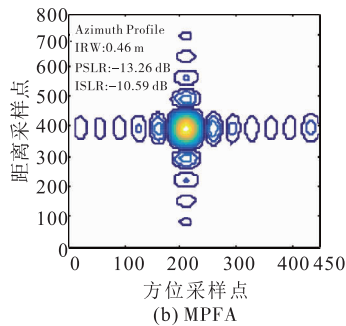
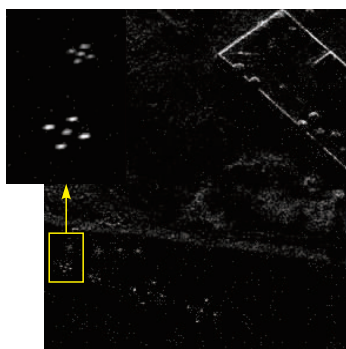


图 9 PT3 聚焦结果图

以上所述均表明基于二维泰勒级数展开的 MPFA 能够有效提高大斜视 SAR 的聚焦深度,在目标高度存在的情况下仍然可以取得良好的聚焦效果。

### 4.2 实测数据分析

为了进一步验证所提方法的有效性,采用 MPFA 对聚束模式 ka 波段大斜视 SAR 实验数据进行处理,并与 CPFA 成像结果进行对比。平台速度为 40 m/s,高度约为 3 000 m,斜视角为 60°,发射信号带宽为 1 200 MHz,方位分辨率为 0.2 m。图 10 为 CPFA 和 MPFA 的实验结果,两种算法都增加了汉明窗口,同时为了便于结果的对比分析,将 MPFA 斜距平面的聚焦结果投影到地平面上。通过观察 2 幅图像中黄框区域提取的放大的图像,可以看出 MPFA 对成像结果聚焦良好,而 CPFA 在大斜视时会发生散焦。从实测数据角度说明了所提算法的有效性。



(a) CPFA



(b) MPFA

图 10 实测数据结果图

## 5 结语

本文针对大斜视 SAR 模式的成像问题进行了深入研究,建立了数据录取平面的斜距模型,并基于该斜距模型利用二维泰勒展开推导了新的插值系数,提出一种适用于大斜视 SAR 的 PFA 成像处理方法,该方法利用斜距平面的插值校正降低了大斜视 SAR 带来的二维耦合,极大地提高了聚焦深度。实验结果表明,本文所提 MPFA 与 CPFA 相比,精度较高,能够满足大斜视 SAR 模式的成像要求,并且对地面目标高度信息不敏感,更适合起伏的地形。

### 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.
- [2] 张刚,李涛. 一种基于旋转角反射器的双基地前视 SAR 干扰方法[J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 488-493.
- [3] 张刚,杨立波,祝明波,等. 弹载 SAR 大斜视 SPECAN 成像算法[J]. 无线电工程, 2012, 42(11): 10-13.
- [4] WANG S, LIU W. High-Resolution Squinted SAR Imaging Algorithm Applied in the Near-Field Environment[J]. Complexity, 2020.
- [5] 吴勇,宋红军,郑经波,等. 大斜视 SAR 的改进 NCS 算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 749-753.
- [6] 李震宇,带有多普勒中心空变校正的大斜视 SAR 成像方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(4): 88-94, 197.
- [7] 怀园园,梁毅,李震宇,等. 一种基于方位谱重采样的大斜视子孔径 SAR 成像改进 Omega-K 算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1743-1750.
- [8] 李根,马彦恒,侯建强,等. 基于子孔径 Keystone 变换的曲线轨迹大斜视 SAR 回波模拟[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(9): 2261-2268.
- [9] LUO Y, ZHAO F, Li N, et al. A Modified Cartesian Factorized Back-Projection Algorithm for Highly Squint Spotlight Synthetic Aperture Radar Imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 16(6): 902-906.
- [10] 闫梦圆,高安琪,薛晨,等. 基于 BP 和 PGA 算法的斜视 SAR 成像方法[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2021, 28(3): 25-31.
- [11] WALKER J L. Range-Doppler imaging of rotating objects[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980 (1): 23-52.
- [12] 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.
- [13] GORHAM L A, RIGLING B D. Scene Size Limits for Polar Format Algorithm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52 (1): 73-84.
- [14] WANG Y, LI J, CHEN J, et al. A Parameter-Adjusting Polar Format Algorithm for Extremely High Squint SAR Imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 640-650.
- [15] RIGLING B D, MOSES R L. Taylor Expansion of the Differential Range for Monostatic SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1): 60-64.
- [16] 吴玉峰,张红波,叶少华. 一种适合于斜视 TOPS SAR 的改进 PFA 成像方法[J]. 上海航天, 2018, 35(6): 18-23.
- [17] JAKOWATZ C V J, WAHL D E, EICHEL P H, et al. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach: A Signal Processing Approach [M]. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

(编辑:徐楠楠)