

## SAR 成像阴影边缘散焦误差分析\*

刘琦<sup>1,2,3</sup> 张月婷<sup>1,2</sup> 胡文龙<sup>1,2</sup> 仇晓兰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** SAR 图像阴影散焦误差分析是研究阴影再聚焦和提取目标阴影信息的理论基础。从阴影形成机理出发,以距离多普勒算法为例,推导阴影边缘二次距离压缩和方位压缩的二次相位误差表达式,建立了散焦误差与成像参数的关系模型。研究表明,方位压缩和二次距离压缩分别是影响阴影边缘散焦的第一环节和第二环节,其散焦误差与雷达频率、分辨率、目标高度有关。当 X 波段、Ku 波段雷达的分辨率劣于 0.07 m 时,方位压缩的阴影边缘散焦误差将达到总误差的 99.0% 以上,只需进行方位向再聚焦;当 Ku 波段雷达的分辨率优于 0.04 m 时,则需要同时优化方位压缩和二次距离压缩环节。

**关键词:** SAR 图像;阴影;散焦;误差;成像环节

**中图分类号:** TN959 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.40

## Error analysis for shadow edges focusing in SAR imaging

Liu Qi<sup>1,2,3</sup> Zhang Yueting<sup>1,2</sup> Hu Wenlong<sup>1,2</sup> Qiu Xiaolan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The shadow edges in SAR images are blurred. The error analysis for shadow edges defocusing is the theoretical basis of the shadow refocusing and target shadow information extraction. Taking the range Doppler algorithm for example, shadow quadratic phase errors of secondary range compression and azimuth compression are deduced in this paper according to the formation mechanism of shadow, which establish the relationship between the defocusing error and imaging parameters. The azimuth compression is the main step to affect the defocusing error, while secondary range compression is another. The defocusing error is related to the radar frequency, the radar resolution and the height of the target. For the X-band and Ku-band radar with a resolution worse than 0.07 m, the focusing error of the shadow edges caused by the azimuth compression would reach 99.0% of the total errors, where the refocusing in azimuth is required. When the resolution of the Ku-band radar is better than 0.04 m, the optimization of azimuth compression and secondary range compression are both required.

**Keywords:** SAR images; shadow; blurred; error analysis; imaging steps

## 1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)对照射区域进行主动辐射,当某些区域受到遮挡时,雷达几乎无法收到回波,导致了阴影。阴影在 SAR 图像中表现为低灰度值的连通区域,隐含着目标的形状轮廓、相对位置、高度等信息<sup>[1-2]</sup>,是重要的判读特征。但是,阴影边缘存在

散焦现象,随着 SAR 图像达到 1 m 分辨率甚至更高的分辨率量级,阴影边缘更容易散焦,有时甚至无法和图像背景区分开。

SAR 图像处理在环境监测和军事等方面具有非常广泛的应用<sup>[3-7]</sup>,目前,阴影边缘的散焦原因分析和聚焦方法的研究还比较少,主要集中在阴影边缘再聚焦算法的应用研究上<sup>[8-11]</sup>。挪威国防研究院(FFI)的 SPAR T 等人在

收稿日期:2015-01

\* 基金项目:国家自然科学基金(No. 61401429)、国家自然科学基金(No. 61331017)项目资助

2007年最早提出固定焦点阴影增强算法(fixed focus shadow enhancement, FFSE)<sup>[8]</sup>,将阴影视作动目标,以目标点斜距作为固定斜距处理阴影点回波,构建方位向匹配滤波器,获得了较清晰的阴影边缘。2013年,中科院电子学研究所的张月婷等人提出高度变量相位补偿方法(height-variant phase compensation, HPVC)<sup>[10-11]</sup>,利用阴影蕴含的目标高度信息重建方位向匹配滤波器,相比FFSE对垂直线目标获得了更清晰的聚焦效果。

尽管上述算法取得了较好的聚焦效果,但是,阴影边缘散焦误差受哪些成像环节影响,进行散焦误差校正的必要条件,以及误差大小与成像参数之间的关系尚不明确。这个问题需要从阴影形成机理、SAR成像算法等方面综合考虑,进一步开展研究。

基于以上想法,开展本文工作,从斜距方程出发,根据阴影边缘运动速度分析成像环节二次距离压缩和方位压缩的调频率,得出二次相位误差QPE来衡量阴影边缘的散焦误差,并设计仿真实验进行定量分析<sup>[12]</sup>。

## 2 阴影边缘散焦分析与建模

本节建立SAR成像场景和回波信号模型,并分析阴影边缘的散焦原因。

首先,建立SAR成像场景(如图1所示),目标场景由3部分组成:1)长方体目标,2)长方体目标所处地面背景,3)遮挡区域。在忽略多次散射的情况下,遮挡区域可以视为没有返回信号数据,因此形成了SAR图像中的阴影。

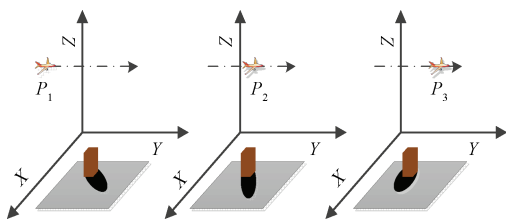


图1 SAR地物成像场景

图中:长方体表示目标,灰色区域表示地面背景,黑色区域表示遮挡区域假设雷达平台沿着Y轴方向作匀速直线运动。雷达平台在位置 $P_1$ 刚好飞入成像场景,能够接收到第一条回波数据;继续飞行,到达位置 $P_2$ ,此刻雷达与目标之间的距离为最短斜距 $R_0$ ;雷达平台继续飞行到位置 $P_3$ ,刚好接收不到成像场景的回波数据。雷达沿着飞行路径 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ 作匀速直线运动,遮挡区域随着雷达运动而运动。因此,阴影边缘在合成孔径时间内发生位置变化,回波信号经成像算法处理后出现散焦现象。

国内外研究人员提出的基于SAR成像算法的阴影再聚焦算法<sup>[8-11]</sup>,把阴影边缘上任意一点视作点目标进行分析,取得了很好的处理效果。基于此等效关系,建立点目标与阴影点B的成像几何关系(如图2所示),以推导回波模型。雷达正侧视,飞行高度为H,沿着Y轴方向以速度 $V_r$ 作匀速直线运动,在方位时间 $\eta$ 时刻抵达 $P_\eta$ 位置。目

标点A高度为h,地距为a,此刻对应的阴影点为点B。阴影点B可等效为点目标处理,根据成像几何关系推导斜距方程:

$$R_B(\eta) = \rho \cdot \sqrt{R_0^2 + (V_r \eta)^2} \quad (1)$$

式中: $V_r$ 为载机飞行速度, $\eta$ 为近距离方位向时间, $R_0$ 为目标点A的最短斜距,

$$R_0 = \sqrt{(H-h)^2 + a^2} \quad (2)$$

$$\rho = H/(H-h) \quad (3)$$

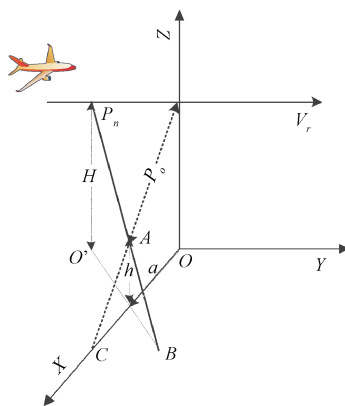


图2 点目标与阴影点的成像几何示意

根据单点目标回波信号模型<sup>[13-14]</sup>,可以得到阴影点回波模型:

$$s_B(\tau, \eta) = A_0 \omega_r[\tau - 2R_B(\eta)/c] \omega_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp\{-j4\pi f_0 R_B(\eta)/c\} \cdot \exp\{j\pi K_r(\tau - 2R_B(\eta)/c)^2\} \quad (4)$$

式中: $A_0$ 为任意复常量, $\tau$ 为距离时间, $\eta$ 为近距离方位向时间, $\eta_c$ 为波束中心偏离时间, $\omega_r[\tau]$ 为距离包络, $\omega_a(\eta)$ 为方位包络, $f_0$ 为雷达中心频率, $K_r$ 为距离chirp调频率。

SAR成像算法假设点目标静止不动,因此,阴影点B的数据会被近似当作最短斜距相同的点C处理,点C的瞬时斜距为:

$$R_C(\eta) = \sqrt{(\rho R_0)^2 + (V_r \eta)^2} \quad (5)$$

式(1)中点B的瞬时斜距可以表示为:

$$R_B(\eta) = \sqrt{(\rho R_0)^2 + (\rho V_r \eta)^2} \quad (6)$$

可见,阴影点B与点C斜距方程的区别在于速度不同。因此,雷达回波在进行成像处理时,阴影边缘的成像参数和静止目标的成像参数不同。而成像处理过程是针对静止目标计算匹配滤波器调频率等成像参数,导致阴影边缘的成像参数不准,必然造成散焦,在SAR图像上表现为阴影边缘模糊。

## 3 阴影边缘的散焦误差分析

### 3.1 阴影边缘散焦误差与成像参数的关系模型

根据阴影点B与点C的斜距方程,分析距离多普勒算法中各成像环节,从而研究阴影边缘散焦误差。

以距离多普勒算法(RDA)为例展开分析,该算法实质

上是对距离向和方位向进行近似的分离处理,RDA 的成像环节主要包括距离压缩(RC)、二次距离压缩(SRC)、距离徙动校正(RCMC)和方位压缩(AC)<sup>[13]</sup>。

根据阴影点 B 与点 C 斜距方程的区别,推导出二次距离压缩和方位压缩这 3 个成像环节的成像参数。其中,二次距离压缩、距离徙动校正的参数取决于距离徙动因子:

$$D_B(f_\eta, V_r) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_\eta^2}{4\rho^2 V_r^2}} \quad (7)$$

$$D_C(f_\eta, V_r) = \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 f_\eta^2}{4V_r^2}} \quad (8)$$

式中:  $f_\eta$  为方位向频率,而且

$$|f_\eta| \leq \frac{0.443V_r \cos\theta_{r,c}}{\rho_a} \quad (9)$$

根据式(7)和式(8),得出 RDA 各环节成像参数的不同,如表 1 所示。其中,  $c$  为光速,  $f_0$  为雷达工作频率,  $\theta_{r,c}$  为斜视角。

表 1 RDA 成像参数对比

成像环节	阴影点 B	点 C
SRC	$K_{src-B} = \rho D_B^3(f_\eta, V_r) \frac{2V_r^2 f_0^3}{cR_0 f_\eta^2}$	$K_{src-C} = \frac{D_C^3(f_\eta, V_r) 2V_r^2 f_0^3}{\rho cR_0 f_\eta^2}$
AC	$K_{a-B} = \frac{2\rho V_r^2 \cos^3\theta_{r,c}}{\lambda R_0}$	$K_{a-C} = \frac{2V_r^2 \cos^3\theta_{r,c}}{\rho\lambda R_0}$

RDA 中, SRC 和 AC 两个成像环节都会产生阴影边缘的二次相位误差,即 QPE。文献[10]推导了低斜视角下方位压缩的二次相位误差 QPE,本节用相同方法计算了一般情况下的方位压缩 QPE,

$$QPE_a = \pi |K_{a-B} - K_{a-C}| \left(\frac{T_r}{2}\right)^2 \quad (10)$$

根据文献[13]中式(4.37),可以得到

$$QPE_a = \frac{0.443^2 \pi \lambda R_0}{2\rho_a^2 \cos\theta_{r,c}} \left(p - \frac{1}{p}\right) \quad (11)$$

根据式(3)推导,由于  $h \ll H$ ,进行了近似计算  $2H - h \approx 2H - 2h$ ,得到

$$QPE_a = h \frac{0.443^2 \pi \lambda}{\rho_a^2 \cos\theta_{r,c} \cos\theta_i} \quad (12)$$

式中:  $h$  为目标高度,  $\lambda$  为信号波长,  $\rho_a$  为方位向分辨率,  $\theta_{r,c}$  为斜视角,  $\theta_i$  为入射角。

分析二次距离压缩环节。SRC 是针对方位向和距离向的交叉耦合进行的,在距离频域中, SRC 滤波器可以并入到距离压缩滤波器中,根据文献[13]中式(6.21),合并后的调频率变为

$$K_m = \frac{K_r}{1 - K_r/K_{src}} \quad (13)$$

式中:  $K_r$  为距离调频率

$$K_r = \frac{0.443c}{\rho_r T_r} \quad (14)$$

式中:  $c$  为光速,  $T_r$  为脉冲持续时间,  $\rho_r$  为距离向分辨率。

SRC 校正的二次相位误差 QPE 可以推导得到,

$$QPE_{src} = \pi |K_{m-B} - K_{m-C}| \left(\frac{T_r}{2}\right)^2 \approx \pi K_r^2 \left| \frac{1}{K_{src-B}} - \frac{1}{K_{src-C}} \right| \left(\frac{T_r}{2}\right)^2 = \frac{0.443^4 \pi \lambda^3 R_0 \cos^2\theta_{r,c}}{8\rho_r^2 \rho_a^2} \cdot \left| \frac{1}{\rho D_B^3(f_\eta, V_r)} - \frac{1}{D_C^3(f_\eta, V_r)} \right| \quad (15)$$

式中:取近似条件  $K_r \ll K_{m-B}, K_r \ll K_{m-C}$ 。

为了比较 SRC 和 AC 两个成像环节 QPE 的相对大小,对式(14)进行简化,将式(14)中  $1/D_B^3(f_\eta, V_r)$  和  $1/D_C^3(f_\eta, V_r)$  展开为  $f_\eta$  的幂级数,并保留至  $f_\eta^2$  项:

$$\frac{1}{D_B^3(f_\eta, V_r)} \approx 1 + \frac{3\lambda^2 f_\eta^2}{8\rho^2 V_r^2} \quad (16)$$

$$\frac{1}{D_C^3(f_\eta, V_r)} \approx 1 + \frac{3\lambda^2 f_\eta^2}{8V_r^2} \quad (17)$$

由此得到, QPE<sub>src</sub> 最大为

$$QPE_{src} \approx \frac{0.443^4 \pi \lambda^3 R_0 \cos^2\theta_{r,c}}{8\rho_r^2 \rho_a^2} \left(p - \frac{1}{p}\right) + \frac{3 \cdot 0.443^6 \pi \lambda^5 R_0 \cos^4\theta_{r,c}}{64\rho_r^2 \rho_a^4} \left(p - \frac{1}{p^3}\right) \quad (18)$$

$$QPE_{src} \text{ 取最大值的条件为 } |f_\eta| = \frac{0.443V_r \cos\theta_{r,c}}{\rho_a}。$$

取近似条件  $h \ll H$ ,式(18)简化为:

$$QPE_{src} \approx h \frac{0.443^4 \pi \lambda^3 \cos^2\theta_{r,c}}{4\rho_r^2 \rho_a^2 \cos\theta_i} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot 0.443^2 \lambda^2 \cos^2\theta_{r,c}}{8\rho_a^2}\right) \quad (19)$$

对比方位压缩和二次距离压缩的 QPE,即式(12)和式(19),计算二者比值:

$$\frac{QPE_{src}}{QPE_a} \approx \frac{0.443^2 \lambda^2 \cos^3\theta_{r,c}}{4\rho_r^2} \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot 0.443^2 \lambda^2 \cos^2\theta_{r,c}}{8\rho_a^2}\right) \quad (20)$$

因此,从式(12)和式(19)可以看出,方位压缩和二次距离压缩的 QPE 的影响参数相同,其误差大小雷达系统参数(波长、分辨率、斜视角、入射角)有关,且与目标高度近似成线性关系。式(20)中的 QPE 比值与目标高度和入射角无关,只与波长、分辨率和斜视角有关。

### 3.2 阴影边缘散焦误差的数值分析

为了研究方位压缩 QPE 和二次相位压缩 QPE 的关系,针对高 180 m 的点目标进行研究,选取 X 波段、1 m 分辨率和 Ku 波段、0.1 m 分辨率两组典型参数进行分析,详细成像参数如表 2 所示。

表 2 雷达成像典型参数

参数	X 波段	Ku 波段
入射角(°)	60	60
斜视角(°)	0	0
发射脉冲时宽/μs	10	10
雷达中心频率/GHz	9.6	16.8
方位向分辨率/m	1	0.1
距离向分辨率/m	1	0.1

根据式(11)和式(15)分别计算方位压缩和二次距离压缩的  $QPE$  大小,以及二者的比值,得出不同高度下成像环节  $QPE$  对比图,如图3所示。对于两种雷达,随着高度的增加,二次距离压缩  $QPE$  和方位压缩  $QPE$  都会增大,但  $QPE_{src}/QPE_a$  比值变化幅度很小。这一结果与式(12)、式(19)、式(20)的推导一致,二次距离压缩  $QPE$  和方位压缩  $QPE$  与目标高度近似成线性关系,而二者比值近似与目标高度无关,只与雷达系统参数有关。

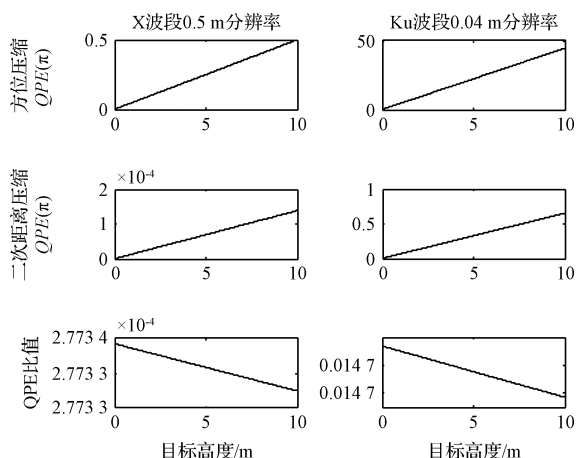


图3 不同高度的成像环节  $QPE$  对比

$\pi/2QPE$  会在峰值处引入  $\pi/6$  的相位误差,在  $\beta = 2.5$  的 Kaiser 窗下造成图像分辨率 8% 的展宽<sup>[13]</sup>,对图像质量有很大影响。因此,根据式(12)和式(19)计算阴影边缘  $QPE = \pi/2$  时,雷达分辨率与目标高度的关系。相同的目标高度,X波段雷达相比 Ku波段雷达更容易出现阴影边缘散焦。雷达分辨率达到 1 m 时,目标高度超过 40 m 会发生阴影边缘散焦;雷达分辨率达到 0.5 m 时,高度 10 m 的目标就会发生阴影边缘散焦,需要进行误差校正,通过阴影边缘再聚焦得到清晰的阴影。

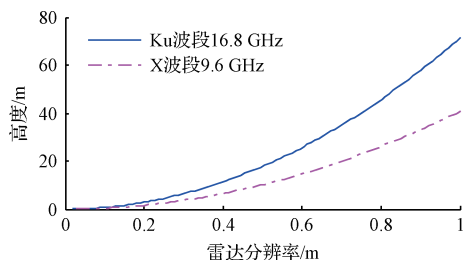


图4 阴影边缘  $QPE = \pi/2$  的取值条件

方位压缩和二次距离压缩的  $QPE$  比值,决定了进行误差校正时处理哪些成像环节。 $QPE$  比值取决于信号波长、分辨率和斜视角,选取 X 波段和 Ku 波段,在正侧视条件下进行仿真计算,分析  $QPE$  比值随雷达分辨率的变化,结果如图5所示。 $QPE$  比值与雷达分辨率相关,雷达分辨率越高, $QPE$  比值越大;在相同分辨率下,X波段雷达比 Ku 波段雷达的  $QPE$  比值更大,方位压缩环节的影响

越大。对于 Ku 波段和 X 波段了雷达,分辨率达不到 0.07 m 时, $QPE$  比值小于 0.01,方位压缩是阴影边缘成像质量的主要影响环节,带来的阴影边缘散焦误差达到总误差的 99.0%,再聚焦时只需考虑方位向。

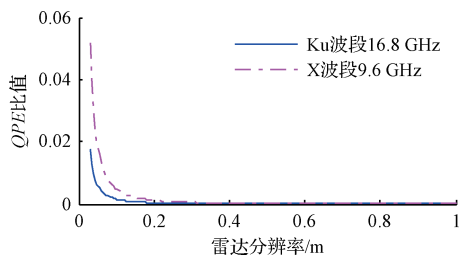


图5  $QPE$  比值随雷达分辨率的变化

当 Ku 波段雷达分辨率达到 0.04 m 时,尽管  $QPE$  比值依然不大,但对于 10 m 高目标,二次距离压缩的阴影边缘  $QPE$  超过了  $\pi/2$ ,不可忽略,需要对方位压缩和二次距离压缩分别进行误差校正处理。

#### 4 阴影边缘散焦误差仿真与验证

为了验证 3.2 节阴影边缘散焦误差分析的正确性,针对距离多普勒算法进行误差校正,分析不同成像环节分别校正的成像差别。

在距离多普勒算法中, SRC 和 AC 两个成像环节都会产生阴影边缘的二次相位误差,可以分别根据调频率构建匹配滤波器进行误差校正。有两种实现方案:1)只进行 AC 校正,2)进行 SRC 和 AC 校正。流程如图6所示。

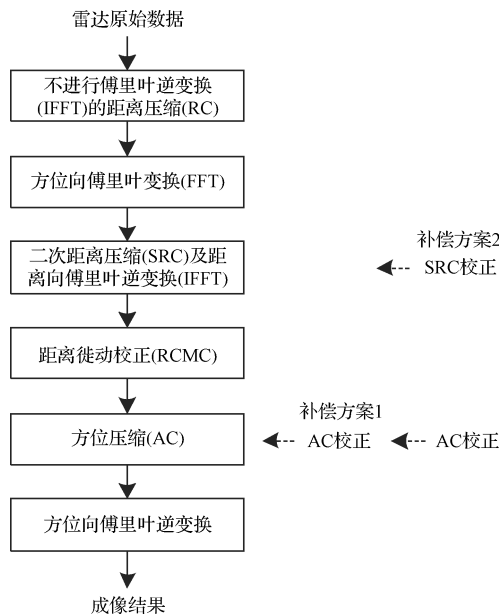


图6 RDA 处理流程

其中, SRC 校正的调频率为  $K_{src-B}$  (如表 1 所示), 频域构造滤波器:

$$H_{B-src}(f_q) = \exp\{j\pi f_q^2 / K_{src-B}\} \quad (21)$$

式中： $f_r$  为距离频率。

AC校正的调频率为  $K_{a-B}$ ，在频域构造方位向滤波器：

$$H_{B-ac}(f_\eta) = \exp\{j4\pi\rho R_0 D_B(f_\eta, v_r) f_0/c\} \quad (22)$$

式中： $\rho$  和  $D_B(f_\eta, v_r)$  分别在式(3)和式(7)中定义。

按照上述方法设计3组仿真实验，将阴影边缘等效为点目标处理，构造回波，并使用RDA聚焦成像。针对高10 m的点目标进行研究，分辨率为0.3 m，详细成像参数如表3所示。

表3 阴影仿真成像参数

参数	数值
景中心斜距/m	3 300
雷达飞行速度(m/s)	80
星下点入射角(°)	60
斜视角(°)	0
雷达中心频率/GHz	16.8
发射脉冲时宽/ $\mu$ s	2.5
距离向分辨率/m	0.3
方位向分辨率/m	0.3
合成孔径时间/s	1.3

阴影成像仿真的3组实验结果如图7所示，每组实验结果均包括目标点(3 434 m处)和阴影点(3 495 m处)两个结果。图7(a)为RDA处理后的原始成像结果，能够明显观察到阴影点的模糊现象，散焦主要表现在方位向；图7(b)和图7(c)中的阴影点清晰了许多，其中图7(b)进行了方位压缩(AC)校正，图7(c)对成像环节AC、SRC一一进行校正。

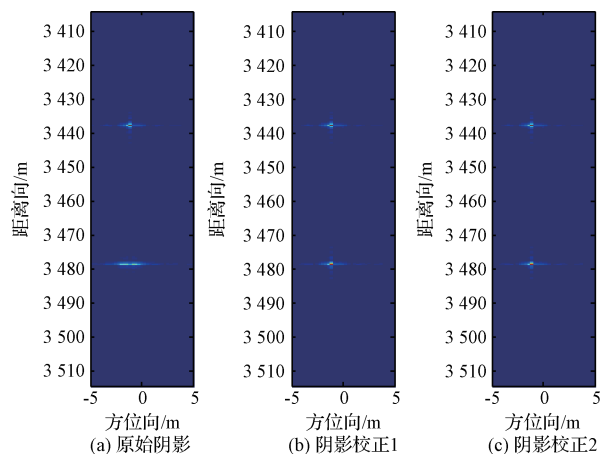


图7 阴影仿真成像结果

为了更精确的研究成像算法对阴影边缘散焦误差的影响，进一步开展了成像指标测试。以峰值点为中心截取  $32 \times 32$  的样本窗，进行16倍插值，测得精确的阴影成像指标(如表4所示)。

表4 阴影仿真测试指标

指标测试	方位向指标		距离向指标	
	冲激响应宽度(IRW)	峰值旁瓣比(PSLR)	冲激响应宽度(IRW)	峰值旁瓣比(PSLR)
原始阴影(a)	0.791	-2.231	0.265	-13.060
阴影校正(b)	0.266	-12.930	0.265	-13.326
阴影校正(c)	0.266	-12.934	0.265	-13.329

观察RDA处理后原始阴影结果的测试指标，方位向冲激响应宽度(IRW)随着阴影校正的处理，清晰度逐渐提高，从最初的0.791变为校正后的0.266，和距离向IRW相比有0.886系数的展宽。因此，SAR图像中的阴影边缘散焦现象主要表现在方位向指标上。

对比3组实验结果的方位向指标可以看出，经过AC校正，PSLR由-0.197提高到-12.930，接近-13 dB(sinc函数的PSLR值)的信号压缩标准，阴影边缘散焦误差大幅减小；当对AC、SRC一一进行校正后，和AC校正相比，PSLR由-12.930提高到-12.934，成像指标进一步优化，提升了0.03%与根据式(20)计算得出的比例0.02%在同一数量级上，与理论推导基本相符。

由此可见，方位压缩和二次距离压缩是阴影边缘散焦的影响环节，其中方位压缩的影响最大，在分辨率较差情况下二次距离压缩的影响可忽略不计，验证了上文的理论分析。

## 5 结论

本文从误差关系模型建立和误差仿真两种角度开展分析，探讨了SAR成像算法对阴影边缘散焦误差的影响，得出如下结论：

阴影边缘散焦误差与雷达频率、分辨率、目标高度有关。当雷达分辨率为1 m时，目标高度超过40 m，阴影边缘会发生明显散焦；当分辨率优于0.5 m时，10 m高目标的阴影边缘就会明显散焦，需要进行阴影再聚焦。

阴影边缘散焦误差与方位压缩和二次距离压缩等成像环节有关，其中方位压缩是对阴影边缘成像质量影响最大的成像环节。对于X波段、Ku波段及更高频率的合成孔径雷达，分辨率劣于0.07 m时，方位压缩的阴影边缘散焦误差将达到总误差的99.0%以上，只需进行方位向再聚焦。当Ku波段雷达的分辨率优于0.04 m时，则需要同时校正方位压缩和二次距离压缩的散焦误差。

## 参考文献

- [1] ESCH T, SCHENK A, ULLMANN T, et al. Characterization of land cover types in terra-SAR-X images by combined analysis of speckle statistics and intensity information[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(6):1911-1925.

- [2] JAHANGIR M, BLACKNELL D, MOATE C P, et al. Extracting information from shadows in SAR imagery[C]. International Conference on Machine Vision, 2008:107-112.
- [3] FENG D CH, QIN H Y, ZENG Y. Study on straw incineration monitoring based on the combination of remote sensing image [J]. Instrumentation, 2014, 1(3):25-40.
- [4] 朱贺, 李臣明, 张丽丽, 等. 联合灰度阈值分割及轮廓形态识别的河道提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11):1288-1296.
- [5] 鲁萌萌, 赵凤军, 李宁. 基于词包模型的高分辨率 SAR 图像特征提取[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6):62-69.
- [6] 赵泉华, 高郡, 李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11):2519-2530.
- [7] 范宗杰, 徐向辉, 周晓丽. 一种基于 SIFT 算法的 SAR 图像配准方法 [J]. 电子测量技术, 2014, 37(8):70-74.
- [8] SPARR T, HANSEN R E, CALLOW H J, et al. Enhancing target shadows in SAR images[J]. Electronics Letters, 2007, 43(5):69-70.
- [9] WEE P A, CHEN H X. Sharpening of shadow edges in ultra high resolution SAR images[C]. International Conference on Radar, 2008:65-69.
- [10] ZHANG Y T, CHEN H ZH, DING CH B, et al. A novel approach for shadow enhancement in high-resolution sar images using the height-variant phase compensation algorithm[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(1):189-193.
- [11] ZHANG Y T, LI F F, LIU Q, et al. An approach for shadow enhancement about tall and narrow targets in SAR images[C]. IEEE IGARSS, 2015:3263-3265.
- [12] LIU Q, ZHANG Y T, QIU X L, et al. Cause analysis for the blurring phenomenon of shadow edges in terms of SAR imaging algorithms[C]. IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2015:602-605.
- [13] CUMMING I G, WONG F H. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 洪文, 等译, 北京:电子工业出版社, 2012:96-180.
- [14] 张林涛, 洪峻, 明峰, 等. 基于点目标的机载 SAR 极化定标改进算法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(3):33-36.

#### 作者简介

刘琦, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像理解。

E-mail: liuqi113@mails.ucas.ac.cn

张月婷, 1983 年出生, 助理研究员, 主要研究方向为 SAR 图像仿真、SAR 图像理解。

胡文龙, 1963 年出生, 研究员, 主要研究方向为雷达信号与信息处理、图像处理与应用。

仇晓兰, 1982 年出生, 副研究员, 主要研究方向为 SAR 成像技术、干涉 SAR 处理、SAR 星地一体化仿真技术等。