

## 一种改进的机载前斜视 SAR 二次距离压缩成像算法

陈 琦<sup>①②</sup> 杨汝良<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘 要:** 该文基于斜视距离模型, 直接推导了适用于大斜视合成孔径雷达(SAR)成像的二次距离压缩(SRC)算法, 在此基础上提出了一种改进的机载前斜视 SAR 的 SRC 成像算法。通过补偿距离频率的三次相位项, 有效改善了大斜视 SAR 成像距离压缩旁瓣非对称畸变的问题, 通过补偿波束前视引入的平动相位项, 解决了图像位置在方位向发生偏移的问题。给出了实现步骤和算法流程, 对比了不同斜视角情况下算法改进前后的成像效果。仿真表明, 该算法能有效改善大斜视 SAR 的成像质量, 适合于大斜视机载 SAR 成像。

**关键词:** 合成孔径雷达(SAR); 前斜视; 二次距离压缩(SRC)

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1445-05

## An Improved Secondary Range Compression Imaging Algorithm for Air-borne Squint SAR

Chen Qi<sup>①②</sup> Yang Ru-liang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In this paper, a refined Secondary Range Compression (SRC) imaging algorithm for large squint air-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) is presented. Based on the squint range mode, refined SRC algorithm for squint mode SAR is deduced directly. By compensating the cubic phase term of range frequency, the problem of range compressing unsymmetrical sidelobe is improved effectively, By compensating the parallel phase term introduced by forward looking beam, the shift of image location in azimuth is solved. Implemented steps and algorithm flow are given, imaging effects are compared in different squint angle as well. The simulation demonstrates that imaging quality is improved obviously and this algorithm is suitable for large squint air-borne SAR imaging.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Forward squint-looking mode; Secondary Range Compression (SRC)

### 1 引言

近几十年来, 合成孔径雷达(SAR)作为一种先进的主动微波遥感技术, 以其高分辨率、大测绘带宽和全天候、全天候的工作特点, 已经在灾情监测、地理遥感和军事侦察等领域得到广泛应用。前斜视 SAR 波束指向机动灵活, 能多次重访热点区域, 使得前斜视 SAR 的发展日益受到重视, 尤其在军事应用领域前景广阔。

由于波束前视, 前斜视SAR的空间几何模型和回波信号特性<sup>[1]</sup>将不同于正侧视SAR, 传统的正侧视SAR成像算法无法直接用于斜视SAR成像。文献[2,3]提出了一种适合大距离徙动的SRC算法, 但在做二次距离压缩时, 调频率参数固定, 限制了算法在大斜视成像时的应用。文献[4]根据回波信号的二维频谱, 考虑了SRC调频率随多普勒频率和距离的变化, 能满足较大斜视角成像的

要求, 但二维频谱表达式的推导仍不够精确, 未能补偿二维频谱中距离频率的三次相位项和波束前视引入的平动相位项, 这在大斜视成像时会造成距离向压缩左右旁瓣不对称<sup>[5]</sup>和图像位置在方位向发生偏移的问题。文献[6]考虑了波束前视带来的附加平动相位项, 并通过运动补偿校正了该相位项造成的图像位置在方位向上发生偏移的问题, 但未能给出详细的数学表达式。

本文从前斜视 SAR 距离模型出发, 直接推导出了改进的 SRC 算法。通过补偿二维频谱中距离频率的三次相位项, 有效改善了距离向压缩旁瓣不对称的问题, 通过补偿波束前视带来的附加的平动相位项, 消除了载机相对于成像区域平动对回波信号的影响, 保留载机相对于成像区域的转动分量, 解决了斜视成像时图像位置在方位向发生偏移的问题。计算机仿真表明, 该算法能有效改善大斜视情况下的成像质量, 适合于大斜视机载 SAR 成像。

## 2 前斜视 SAR 回波信号

### 2.1 前斜视 SAR 空间几何模型

图 1 为前斜视 SAR 空间几何模型。假设  $t = 0$  时刻目标正好位于波束中心,  $R$  是  $t = 0$  时刻目标与雷达之间的距离,  $\theta$  为斜视角,  $v$  表示载机飞行速度,  $r$  是目标与载机飞行轨迹之间的最短距离,  $R(t; r)$  是目标与雷达之间的瞬时距离,  $X_0$  是点目标在方位向上的坐标。

根据前斜视 SAR 空间几何模型, 雷达与目标之间的瞬时距离可表示为

$$R(t; r) = \sqrt{r^2 + (X_0 - vt)^2} \quad (1)$$

$$X_0 = R \sin \theta \quad (2)$$

$$r = R \cos \theta \quad (3)$$

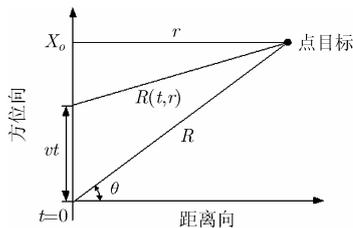


图 1 机载前斜视 SAR 空间几何模型

### 2.2 前斜视 SAR 回波信号

设发射的线性调频信号为  $m(\tau) \cdot \exp(-j\pi K_r \tau^2)$ , 其回波信号可表示为

$$ss(t, \tau; r) = G(t)m \left[ \tau - 2 \frac{R(t; r)}{c} \right] \exp \left\{ -j\pi K_r \left[ \tau - 2 \frac{R(t; r)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi R(t; r)}{\lambda} \right] \quad (4)$$

其中  $t$  为方位时间,  $\tau$  为距离时间,  $G(t)$  为天线方向图方位向增益, 近似与距离无关,  $m(\tau)$  为发射信号包络, 通常近似为矩形,  $K_r$  为发射信号调频率,  $c$  为光速,  $\lambda$  为发射信号波长。式中第 1 个相位项为距离向发射信号延迟, 第 2 个相位项为波束横过点目标形成的方位多普勒历程。

由于波束前视, 前斜视 SAR 回波信号的多普勒中心频率将不为零。由式(4)可知回波信号方位相位为  $\Phi(t) = 4\pi R(t; r)/\lambda$ , 因此前斜视 SAR 回波信号的多普勒中心频率和多普勒调频率分别为

$$f_{dc} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \Big|_{t=0} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR(t; r)}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{X_0 v}{R} = \frac{2v}{\lambda} \sin \theta \quad (5)$$

$$f_{dr} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d^2\Phi(t)}{dt^2} \Big|_{t=0} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d^2R(t; r)}{dt^2} \Big|_{t=0} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{v^2 \cos^2 \theta}{R} = -\frac{2v^2}{\lambda R} \cos^2 \theta \quad (6)$$

### 2.3 前斜视 SAR 回波信号二维耦合分析

一般  $r$  总要比  $(X_0 - vt)$  大得多, 在此条件下有如下近

似:

$$R(t; r) = \sqrt{r^2 + (X_0 - vt)^2} \approx r \left[ 1 + \frac{(X_0 - vt)^2}{2r^2} \right] = r + \frac{(X_0 - vt)^2}{2r} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4)有

$$ss(t, \tau; r) = G(t) \cdot m \left[ \tau - \frac{2r}{c} - \frac{(X_0 - vt)^2}{rc} \right] \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left[ \tau - \frac{2r}{c} - \frac{(X_0 - vt)^2}{rc} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[ r + \frac{(X_0 - vt)^2}{2r} \right] \right\} \quad (8)$$

对式(8)中的相位项进行展开有

$$-j\pi K_r \left( \tau - \frac{2r}{c} \right)^2 + j2\pi K_r \left( \tau - \frac{2r}{c} \right) \frac{(X_0 - vt)^2}{rc} - j\pi K_r \left[ \frac{(X_0 - vt)^2}{rc} \right]^2 - j \frac{4\pi r}{\lambda} - j \frac{2\pi}{\lambda r} (X_0 - vt)^2 \approx -j\pi K_r \left( \tau - \frac{2r}{c} \right)^2 + j2\pi K_r \left( \tau - \frac{2r}{c} \right) \frac{(X_0 - vt)^2}{rc} - j \frac{4\pi r}{\lambda} - j \frac{2\pi}{\lambda r} (X_0 - vt)^2 \quad (9)$$

式(9)中第 1 项为距离向线性调频项, 第 2 项为距离和方位耦合项, 第 3 项为固定相位项, 最后一项为合成孔径形成的方位多普勒相位项。

如图 2 所示, 正侧视情况下有  $X_0 = 0$ , 在一个合成孔径时间  $-T_s/2 \leq t \leq T_s/2$  内,  $|X_0 - vt| \leq L_s/2$ , 其中  $L_s$  为合成孔径长度, 耦合项  $j2\pi K_r (\tau - 2r/c) [(X_0 - vt)^2 / (rc)]$  很小, 往往忽略不计。大斜视情况下, 在一个合成孔径时间  $-T_s/2 \leq t \leq T_s/2$  内的某些时刻,  $|X_0 - vt| \gg L_s/2$ , 耦合项  $j2\pi K_r (\tau - 2r/c) [(X_0 - vt)^2 / (rc)]$  很大, 不能被忽略。

二维耦合产生的根本原因在于距离徙动。距离徙动使同一个点目标的方位信号分布在不同的距离分辨单元, 造成回波信号距离向与方位向的耦合, 无法直接分为两个一维处理。经过距离徙动校正(RCMC), 用于一次方位处理的方位数据被校正到同一个距离分辨单元, 从而完成距离方位的二维解耦。

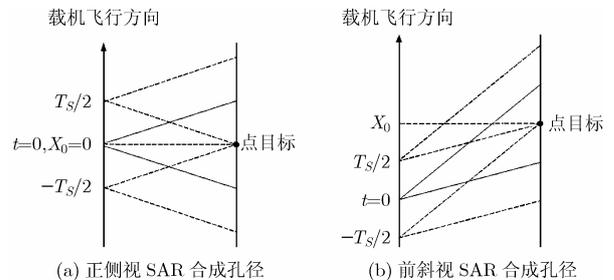


图 2 正侧视 SAR 和前斜视 SAR 合成孔径比较

## 3 改进二次距离压缩(SRC)算法

改进 SRC 算法处理步骤主要包括距离压缩、二次距离

压缩(SRC)、三次相位补偿、距离徙动校正、平动相位补偿和方位压缩。

如图3所示,在二维频域完成二次距离压缩后,改进SRC算法通过补偿二维频谱中距离频率的三次相位项,有效改善了距离向压缩旁瓣不对称问题。针对斜视SAR成像中图像位置在方位向发生偏移的问题,改进SRC算法通过补偿导致该问题的平动相位项,目标正好位于图像中心,校正了图像在方位向上的偏移。

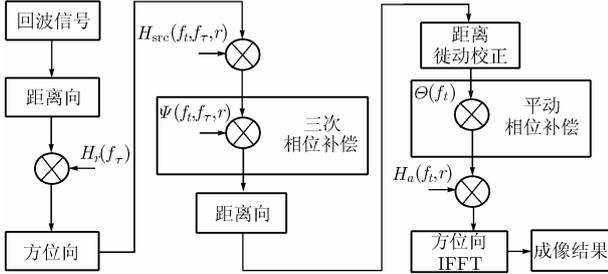


图3 改进SRC算法处理流程图

### 3.1 距离压缩

根据驻留相位原理,回波信号经距离向傅里叶变换后的表达式为

$$sS(t, f_r; r) = G(t)m(-f_r/K_r)\exp(j\pi f_r^2/K_r) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f_r + f_0)R(t; r)\right] \quad (10)$$

式中  $f_r$  为距离频率,  $f_0$  为发射信号载频。式(10)中第1个相位项是距离频率  $f_r$  的二次函数,对应于距离向聚焦。因此用于距离压缩的频域匹配函数为

$$H_r = \exp(-j\pi f_r^2/K_r) \quad (11)$$

经距离压缩后的信号表达式为

$$sS(t, f_r; r) = G(t)m(-f_r/K_r)\exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f_r + f_0)R(t; r)\right] \quad (12)$$

### 3.2 二次距离压缩

对式(12)做方位向傅里叶变换,信号进入二维频域:

$$SS(f, f_r; r) = G\left[\frac{X_0}{v} - \frac{\lambda r f}{2v^2 \cdot \gamma(f)}\right]m(-f_r/K_r)\exp\left[-j2\pi r \cdot \sqrt{\left(\frac{f_r + f_0}{c/2}\right)^2 - (f/v)^2}\right] \exp\left[-j2\pi f \frac{X_0}{v}\right] \quad (13)$$

式中  $f$  为方位频率。文献[4]中回波信号二维频谱的表达式不够精确,未包含上式中的第2个相位项,将造成图像位置在方位向上的偏移。

$$\Delta(f, f_r; r) = \exp\left[-j2\pi r \sqrt{\left(\frac{f_r + f_0}{c/2}\right)^2 - (f/v)^2}\right],$$

对该相位项做泰勒展开有

$$\Delta(f, f_r; r) = \exp\left[\Delta(f, 0; r) + f_r \frac{d\Delta(\cdot)}{df_r}\bigg|_{f_r=0} + f_r^2 \frac{d^2\Delta(\cdot)}{df_r^2}\bigg|_{f_r=0} + f_r^3 \frac{d^3\Delta(\cdot)}{df_r^3}\bigg|_{f_r=0} + \dots\right]$$

$$= \exp\left[-j\frac{4\pi r \cdot \gamma(f)}{\lambda} - j\frac{4\pi r}{c \cdot \gamma(f)} f_r + j\frac{\pi r c f^2}{2v^2 f_0^3 \cdot \gamma^3(f)} f_r^2 - j\frac{\pi r c f^2}{2v^2 f_0^4 \cdot \gamma^5(f)} f_r^3 + \dots\right] \quad (14)$$

式(14)中第3个相位项仍然是距离频率  $f_r$  的二次函数,对应于距离时间-多普勒域的一个线性调频信号,即经过距离压缩的信号在进行方位傅里叶变换之后又重新扩散,在距离向上产生新的线性调频分量。对该线性调频分量的匹配即为二次距离压缩。

该线性调频分量与目标距离  $r$  有关,且随方位频率  $f_t$  的增大而增大。在正侧视情况下多普勒中心频率  $f_{dc}$  为零,方位频率  $f$  在  $-B_d/2$  和  $B_d/2$  之间,  $B_d$  为多普勒带宽,该调频分量的影响可以忽略。而在大斜视情况下  $f_{dc}$  将变得很大,  $f$  在  $f_{dc} - (B_d/2)$  和  $f_{dc} + (B_d/2)$  之间,这时调频分量的影响就必须考虑,否则已经压缩好的目标在距离向重新扩散,影响距离向成像效果。完成二次距离压缩的匹配函数为

$$H_{src}(f, f_r; r) = \exp\left[-j\frac{\pi r c f^2}{2v^2 f_0^3 \cdot \gamma^3(f)} f_r^2\right] \quad (15)$$

其中

$$\gamma(f) = \sqrt{1 - \lambda f/(2v)} \quad (16)$$

### 3.3 三次相位补偿

式(14)中第4个相位项是距离频率  $f_r$  的三次函数,正侧视或小斜视情况下,方位频率  $f$  在多普勒零频附近,三次相位项非常小,对成像的影响可以忽略。

在大斜视情况下多普勒中心频率远离零频,方位频率  $f$  将变得很大,不能再忽略三次相位项的影响<sup>[7]</sup>。不对该项作补偿,残留的奇次相位误差将造成压缩旁瓣的不对称<sup>[8]</sup>,且斜视角越大,不对称越严重。因此完成三次相位补偿的匹配函数为

$$\Psi(f, f_r; r) = \exp\left[j\frac{\pi r c f^2}{2v^2 f_0^4 \cdot \gamma^5(f)} f_r^3\right] \quad (17)$$

### 3.4 距离徙动校正

如图4所示,目标与雷达之间的瞬时距离  $R(t; r)$  可用下式表示:

$$R(t; r) = \frac{r}{\cos\theta(t)} = \frac{r}{\sqrt{1 - \sin^2\theta(t)}} \quad (18)$$

其中  $\theta(t)$  为目标与雷达之间的瞬时斜视角。由式(4)可得

$$\sin\theta(t) = \lambda f/(2v) \quad (19)$$

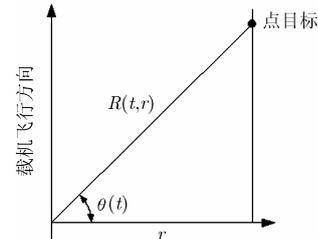


图4 距离时间-多普勒域瞬时距离

将式(19)代入式(18)可得

$$R(f;r) = \frac{r}{\sqrt{1-[\lambda f/(2v)]^2}} = \frac{r}{\gamma(f)} \quad (20)$$

式(20)即为目标与雷达之间的瞬时距离在距离时间-多普勒域的表达式,是与方位频率  $f$  有关的曲线。显然,位于相同  $r$  处的各点目标在距离时间-多普勒域内的距离徙动轨迹都是相同的,这为统一校正  $r$  距离处各点目标的距离徙动提供了方便。

由式(20)可知,距离为  $r$  的点目标其回波延迟在距离时间-多普勒域内的表达式为

$$\Delta\tau(f;r) = \frac{2R(f;r)}{c} = \frac{2r/\gamma(f)}{c} \quad (21)$$

式(14)中  $f_r$  的线性项可写成如下形式

$$-j\frac{4\pi r}{c\cdot\gamma(f)}f_r = -j2\pi f_r \cdot \frac{2r/\gamma(f)}{c} = -j2\pi f_r \cdot \Delta\tau(f;r) \quad (22)$$

显然该项是目标回波延迟在二维频域的表达式,决定了成像时目标在距离向上的实际位置。经距离徙动校正后,徙动轨迹为式(20)的曲线被校正到一条直线,使得方位压缩可以沿每个距离门进行。

### 3.5 平动相位补偿

式(13)中的第 2 个相位项为波束前视引入的平动相位项,本质上为方位时间延迟  $X_0/v$  变换到多普勒域的表达式。该相位项的存在是斜视 SAR 回波信号区别于正侧视 SAR 回波信号的主要特征。对该相位项做补偿,将校正图像在方位向上产生的偏移。完成平动相位补偿的函数为

$$\Theta(f) = \exp(j2\pi f X_0/v) \quad (23)$$

### 3.6 方位压缩

式(14)中的第 1 个相位项是方位频率  $f$  的函数,利用幂级数展开公式可以将该项表示为

$$\begin{aligned} -j\frac{4\pi r}{\lambda}\gamma(f) &= -j\frac{4\pi r}{\lambda}\sqrt{1-[\lambda f/(2v)]^2} \\ &= -j\frac{4\pi r}{\lambda}\left[1 - \frac{1}{2}[\lambda f/(2v)]^2 - \frac{1}{8}[\lambda f/(2v)]^4 \right. \\ &\quad \left. - \frac{3}{48}[\lambda f/(2v)]^6 - \dots\right] \\ &\approx -j\frac{4\pi r}{\lambda} - j\pi\frac{f^2}{f_{dr}} \end{aligned} \quad (24)$$

上式中第 1 项为固定相位项,第 2 项为方位向线性调频信号,对应于方位向聚焦,其中多普勒调频率为  $f_{dr} = -2v^2/(\lambda r)$ 。因此完成方位向聚焦的匹配函数为

$$H_a(f;r) = \exp(j\pi f^2/f_{dr}) \quad (25)$$

## 4 计算机仿真

### 4.1 仿真参数

本文对 9 个分布点目标进行成像仿真,成像范围选择为  $500\text{m} \times 500\text{m}$ ,各点在距离向和方位向上均相距  $200\text{m}$ 。具体仿真参数为:斜视角  $\theta = 45^\circ$ ,中心斜距  $R = 41.7\text{km}$ ,发

射信号波长  $\lambda = 0.03\text{m}$ ,发射信号脉宽  $\tau = 2\mu\text{s}$ ,发射信号带宽  $B = 60\text{MHz}$ ,载机飞行速度  $v = 200\text{m/s}$ ,正侧视合成孔径长度  $L_s = 250\text{m}$ ,方位分辨率和距离分辨率均为  $2.5\text{m}$ 。

### 4.2 仿真结果

图 5 给出了斜视角  $\theta = 45^\circ$  时的 9 个分布点目标成像结果。由图可知,在  $500\text{m} \times 500\text{m}$  的成像范围内,9 个点目标均得到了聚焦,获得了清晰的图像。

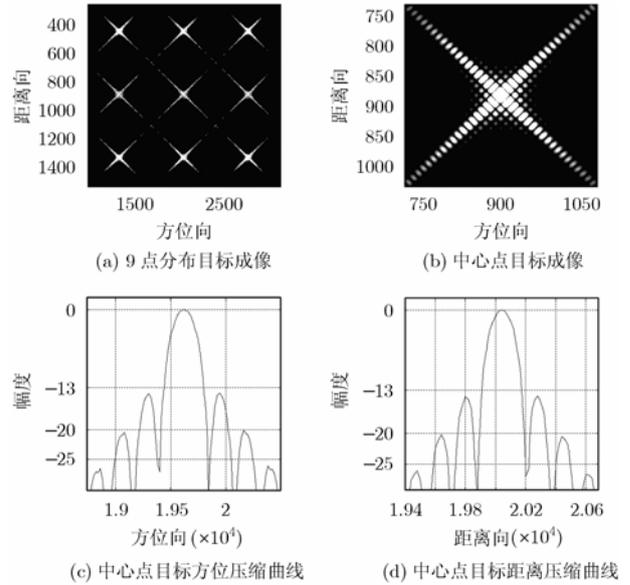


图 5 改进 SRC 算法 9 点分布目标成像结果

### 4.3 分析及比较

大斜视成像时不对三次相位进行补偿,距离向压缩旁瓣将不对称,且不对称随斜视角的增大而趋于严重。图 6 给出了斜视角  $\theta = 45^\circ$  时, SRC 算法改进前后距离向压缩效果的比较。

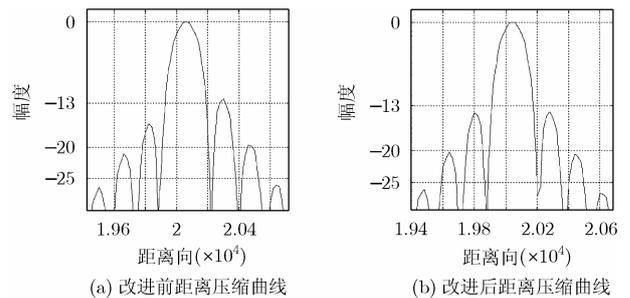


图 6 SRC 算法改进前后距离向压缩效果比较

表 1 给出了不同斜视角情况下,算法改进前后距离压缩左右第 1 旁瓣电平差的比较。从表中可看出,改进 SRC 算法能有效降低距离压缩左右第 1 旁瓣电平差,改善成像效果,且斜视角越大,改善效果越明显。

图 7 给出了平动相位补偿前后,9 点分布目标的成像结果。从图中可看出,改进前各点目标的位置在方位向上发生了偏移,在距离向上与目标实际位置基本对应。改进后目标位置在方位向和距离向都与实际位置基本对应。

表1 算法改进前后距离向压缩左右第1旁瓣电平差比较

斜视角(°)	距离向压缩左右第1旁瓣电平差(dB)									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
SRC 算法	0.057	0.049	0.083	0.350	0.505	0.843	0.931	1.985	2.253	3.868
改进 SRC 算法	0.036	0.032	0.056	0.081	0.087	0.096	0.089	0.122	0.131	0.142

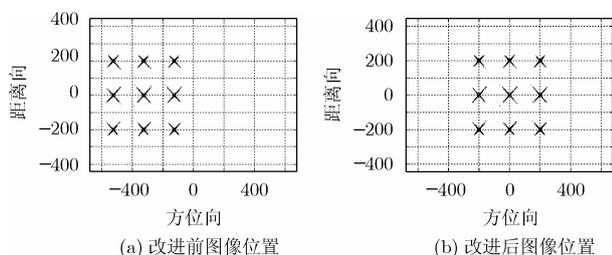


图7 SRC算法改进前后图像位置比较

## 5 结束语

前斜视 SAR 在无人机载 SAR、双站 SAR 和分布式小卫星中有着重要应用,是合成孔径雷达的一个重要发展方向。本文从前斜视 SAR 回波信号和距离模型出发,直接推导出一种改进的 SRC 算法,仿真表明该算法能有效改善斜视成像距离压缩旁瓣不对称和图像方位偏移的问题,提高了成像质量,是一种适合于高分辨率、大斜视角机载 SAR 成像的算法。

## 参考文献

- [1] Davidson G W and Cumming I. Signal properties of spaceborne squint mode SAR. *IEEE Trans. on GRS*, 1997, 35(3): 611-617.
- [2] Jin M Y and Wu C. A SAR correlation algorithm which accommodates large-range migration. *IEEE Trans. on GRS*, 1984, 22(6): 592-597.
- [3] Chang C Y, Jin M, and Curlander J C. Squint mode SAR processing algorithm. In Proc. IGARSS, Vancouver, Canada, 1989: 1072-1076.
- [4] 汪亮, 禹卫东. SAR 大斜视角成像的改进 RD 算法实现. *电子与信息学报(增刊)*, 2004, 26(9): 202-206.  
Wang Liang and Yu Wei-dong. The implementation of large squint mode airborne SAR processing using improved RD algorithm. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(9): 202-206.
- [5] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001: 167-168.
- [6] 朱岱寅, 朱兆达等. 机载 SAR 斜视区域成像研究. *电子学报*, 2002, 30(9): 1387-1389.  
Zhu Dai-yan and Zhu Zhao-da, et al. Studies on airborne squint-looking SAR patch-mapping. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(9): 1387-1389.
- [7] 刘光炎, 黄顺吉. 非线性 CS 算法的前斜视 SAR 成像. *电子与信息学报*, 2002, 24(10): 1308-1315.  
Liu Guang-yan and Huang Shun-ji. Nonlinear CS algorithms for forward-squint SAR imaging. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(10): 1308-1315.
- [8] 张澄波. 综合孔径雷达原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989: 163-178.

陈琦: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为前斜视和前视合成孔径雷达信号处理。

杨汝良: 男, 1943 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事机载、星载合成孔径雷达系统研究工作。