



## 论 文

## 基于去调频技术的斜视聚束 SAR 成像方法

安道祥\*, 李欣, 黄晓涛, 周智敏

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

\* 通信作者. E-mail: daoxiangnan@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-07-04; 接受日期: 2011-10-22

教育部新世纪优秀人才支持计划 (批准号: NCET-07-0223, NCET-10-0895)、国家自然科学基金 (批准号: 60972121)、全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目 (批准号: 201046) 和湖南省研究生科研创新项目 (批准号: CX2009B009) 资助

**摘要** 针对具有方位谱混叠现象的斜视聚束式合成孔径雷达 (SAR) 成像问题, 本文研究了一种基于去调频技术的成像方法. 文中首先分析了斜视聚束 SAR 中的方位谱混叠现象, 从理论上找出了斜视角影响方位粗聚焦的根本原因. 基于分析结果, 引入了回波信号非线性相位校正预处理法, 彻底消除了斜视角的影响, 从而得到正确的粗聚焦结果. 然后基于斜视成像模型, 推导了预处理回波信号的方位粗聚焦和精聚焦处理过程. 在精聚焦的方位滤波处理中, 针对非线性相位校正预处理导致的场景聚焦深度限制问题, 提出了一种改进的非线性调频变标 (NLCS) 算法, 实现了回波信号的高精度方位压缩. 仿真实验结果证明了文中理论分析的正确性和所提方法的有效性.

**关键词** 斜视聚束 SAR 方位谱混叠现象 非线性相位校正 聚焦深度 非线性调频变标

## 1 引言

聚束式合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) [1~7] 是 SAR 领域的研究热点之一. 聚束成像模式是指通过控制天线波束指向, 对地面某固定区域进行持续照射, 从而突破天线波束宽度的限制, 获得具有更高方位分辨率的 SAR 图像. 近年来, 聚束 SAR 技术发展迅猛, 一些具有高分辨率聚束 SAR 成像功能的雷达系统陆续问世, 其中机载聚束 SAR 的分辨率最高可达 0.1 m<sup>[2]</sup>, 星载聚束 SAR 的分辨率最高可达 1 m<sup>[3]</sup>.

在聚束 SAR 中, 回波信号总的方位带宽等于单个目标的 Doppler 带宽与成像场景对应的频率带宽之和 [1]. 因此同等分辨率情况下, SAR 系统在聚束成像模式下的回波信号方位带宽大于条带成像模式. 依据 Nyquist 采样定理, 在某些高分辨率聚束 SAR 中, 若要不失真地恢复原始回波信号, 系统脉冲重复频率 (pulse repetition frequency, PRF) 需达数千甚至上万赫兹. 过高的 PRF 将大大增加回波数据的采集、传输、存储和处理等负担. 此外, 在星载聚束 SAR 中, 过高的 PRF 还易引起距离模糊问题 [3~7]. 因此, 在实际高分辨率聚束 SAR 系统中, PRF 通常都小于回波信号总的方位带宽. 由于 PRF 不满足 Nyquist 采样定理, 回波信号将发生方位谱混叠现象 [4~7], 这种现象将使得聚束 SAR 的高精度成像处理变得更加复杂和困难.

聚束 SAR 的回波接收方式主要有 3 种 [1]: 正交解调、基于固定斜距的距离去调频和基于场景中心距离的二维去调频. 其中只有以第 3 种方式录取的回波信号不存在方位谱混叠现象, 但这种方式具

引用格式: 安道祥, 李欣, 黄晓涛, 等. 基于去调频技术的斜视聚束 SAR 成像方法. 中国科学: 信息科学, 2012, 42: 218-234, doi: 10.1360/112011-735

有不易实现、可选择成像算法少等缺点<sup>[1]</sup>. 因此, 实际聚束 SAR 系统仍以前两种接收方式为主, 这种情况下, 在进行成像处理时, 就必须考虑回波信号方位谱混叠现象的影响. 为解决具有方位谱混叠现象聚束 SAR 的成像问题, Lanari 等<sup>[4]</sup>提出了两步式成像法: 首先, 采用基于 SPECAN (SPECtral ANalysis) 思想的方位粗聚焦处理, 消除回波信号的方位谱混叠现象, 同时保持回波信号传输的空变特性. 然后, 采用常规条带 SAR 成像算法对粗聚焦回波进行精聚焦处理, 得到最终的 SAR 图像. 此后, Lanari 等<sup>[5]</sup>又对该方法进行改进, 将其推广到对条带/聚束混合模式 SAR 的成像处理. 但原始两步式成像法是基于正侧视聚束 SAR 模型提出来的, 受斜视角对方位粗聚焦的影响, 该方法不适用于斜视聚束 SAR 情况<sup>[4]</sup>. 为解决这个问题, 文献 [4,6] 提出了结合线性相位修正法的改进两步式成像法, 期望能够解决具有方位谱混叠现象的斜视聚束 SAR 成像问题. 然而, 由于缺少深入的理论分析, 文献 [4,6] 所提方法实际上并不能彻底解决两步式成像法对斜视聚束 SAR 的成像问题. 由本文后续研究可知, 应用文献 [4,6] 所提方法后, 只有靠近成像场景方位中心目标的聚焦质量有明显改善, 而位于场景方位边缘的目标仍然散焦严重, 且图像中有“虚假目标”出现, 图像的整体聚焦质量无法令人满意.

本文深入分析了斜视聚束 SAR 的方位谱混叠现象, 找出了斜视角影响方位粗聚焦的根本原因. 基于分析结果, 引入了非线性相位修正法, 彻底消除了斜视角对方位粗聚焦的影响, 清除了两步式成像法应用于斜视聚束 SAR 成像的障碍. 最后, 利用条带 SAR 成像算法实现回波的精确聚焦. 然而, 非线性相位修正法在消除斜视角影响的同时将会引起场景方位聚焦深度问题, 将限制可良好聚焦的成像场景幅度. 因此, 若要实现对大场景高分辨率斜视 SAR 系统良好的整体聚焦, 必须有效解决方位聚焦深度问题. 针对这个问题, 目前主要有 3 种解决方法: 子孔径成像法<sup>[8]</sup>、非线性调频变标法 (nonlinear chirp scaling, NLCS)<sup>[9,10]</sup> 和二维可分离成像法<sup>[11]</sup>. 然而, 上述方法在有效解决场景聚焦深度问题的同时, 均存在不足. 其中子孔径成像法比较复杂, 且所得图像存在幅度和相位失真. NLCS 和二维可分离成像法均采用了方位调频斜率的线性近似, 并忽略了三阶 (含) 以上的相位项, 成像精度较低, 不适用于高分辨率聚束 SAR 成像. 此外, NLCS 算法还将引起 SAR 图像的方位空变几何畸变, 需通过基于图像域的非线性插值处理予以校正, 导致成像效率下降. 除上述方法外, 针对曲线轨迹下的前斜视 SAR 成像问题, 人们还提出了结合时域距离走动校正和级数反演定理的 ECS 算法<sup>[12]</sup>. 然而, 由于未考虑场景聚焦深度限制问题, 该方法只适用于宽测绘带弹载 SAR 的成像处理, 不能实现大场景 (沿方位向) 斜视 SAR 的整体聚焦处理. 为彻底解决场景聚焦深度限制的问题, 本文提出了一种改进 NLCS 算法. 与已有方法相比, 改进 NLCS 方法具有成像精度高, SAR 图像几何形变小 (形变幅度小于 0.5 个分辨单元) 的特点, 能够实现对高分辨率大场景斜视聚束 SAR 高精度的成像处理.

本文所提基于去调频技术的高分辨率斜视聚束 SAR 成像方法的处理步骤可概括为: 首先, 利用非线性相位修正法消除斜视角的影响; 其次, 利用基于去调频技术的方位粗聚焦解决回波信号方位谱混叠问题; 最后, 利用改进 NLCS 算法实现对粗聚焦回波的精聚焦处理, 得到良好聚焦的大场景高分辨斜视聚束 SAR 图像.

## 2 问题分析

### 2.1 斜视聚束 SAR 回波模型

图 1 给出了斜平面内的斜视聚束 SAR 成像几何.  $O$  为合成孔径中心, 雷达平台以速度  $v$  沿  $X$  轴方向运动,  $\theta_s$  为斜视角 (定义为合成孔径中心到成像场景中心的连线与雷达平台飞行方向间夹角的余角),  $P$  为成像场景内的任意点目标,  $r_0$  为目标  $P$  沿斜视方向到飞行航迹的最短距离,  $r_{s0}$  为合成孔径

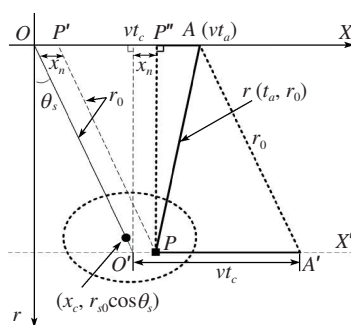


图 1 斜视聚束 SAR 成像几何关系

Figure 1 The imaging geometric relationship of squint spotlight SAR

中心与场景中心间的距离,  $(x_c, r_{s0} \cos \theta_s)$  为成像场景中心坐标.  $A(vt_a)$  为雷达平台的瞬时方位位置, 波束射线与通过  $P$  点且与航线平行的平行线交于  $O'$  点,  $x_n = vt_n$  为  $P$  与  $O'$  点间的方位间距.

由图 1 的  $\triangle APA'$ , 可求得雷达与目标间的瞬时斜距  $r(t_a; r_0)$  及其在  $t_a = t_n$  处的 Taylor 展开式

$$r(t_a; r_0) = \sqrt{(vt_a - vt_n)^2 + r_0^2 - 2r_0(vt_a - vt_n) \sin \theta_s} = r_0 - \frac{\lambda_c}{2} f_{dc}(t_a - t_n) - \frac{\lambda_c}{4} f_{dr}(t_a - t_n)^2 + \dots, \quad (1)$$

其中  $\lambda_c = c/f_c$  为中心波长,  $c$  和  $f_c$  分别为光速和信号载频.  $f_{dc}$ ,  $f_{dr}$  分别为 Doppler 中心和 Doppler 调频率 [8]

$$f_{dc} = -\frac{2}{\lambda_c} \times \frac{\partial r(t_a; r_0)}{\partial t_a} \Big|_{t_a=t_n} = \frac{2v \sin \theta_s}{\lambda_c}, \quad (2)$$

$$f_{dr} = -\frac{2}{\lambda_c} \times \frac{\partial^2 r(t_a; r_0)}{\partial t_a^2} \Big|_{t_a=t_n} = -\frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_0}. \quad (3)$$

需注意的是:  $f_{dc}$  与  $f_{dr}$  只是由斜视角  $\theta_s$  产生的 Doppler 参数. 与斜视条带 SAR 不同, 在斜视聚束 SAR 中, 目标的方位谱中心频率除与斜视角  $\theta_s$  有关外, 还与目标的方位位置有关.

设发射信号为线性调频信号, 则接收到的目标  $P$  的基带回波信号为 (忽略常数项)

$$ss(\tau, t_a; r_0) = w_r \left[ \tau - \frac{2r(t_a; r_0)}{c} \right] w_a \left[ \frac{t_a}{T_{\text{spot}}} \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda_c} r(t_a; r_0) \right] \exp \left[ j\pi\gamma \left( \tau - \frac{2r(t_a; r_0)}{c} \right)^2 \right], \quad (4)$$

其中  $w_r[\cdot]$ ,  $w_a[\cdot]$  分别为距离和方位包络.  $T_{\text{spot}}$  为合成孔径时间,  $\gamma$  为调频率. 对式 (4) 作距离 FFT, 得

$$Ss(f_r, t_a; r_0) = W_r(f_r) w_a \left[ \frac{t_a}{T_{\text{spot}}} \right] \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \exp \left[ -j \frac{4\pi(f_r + f_c)}{c} r(t_a; r_0) \right], \quad (5)$$

其中  $f_r$  为距离频率.

## 2.2 斜视角对方位粗聚焦的影响

与正侧视聚束 SAR 相比, 斜视聚束 SAR 的方位谱混叠现象更加复杂. 在斜视聚束 SAR 的二维频谱中, Doppler 中心频率可表示为

$$f_{dc}(f_r) = \frac{2f_c v \cos^2 \theta_s}{cr_0} x_n + \frac{2f_c \sin \theta_s}{c} + \frac{2f_r \sin \theta_s}{c}. \quad (6)$$

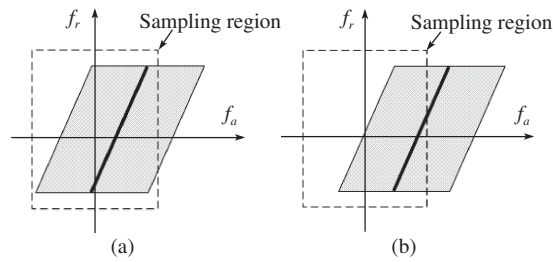


图 2 目标二维频谱示意图

Figure 2 Illumination of the target 2D spectrum. (a) Case 1; (b) case 2

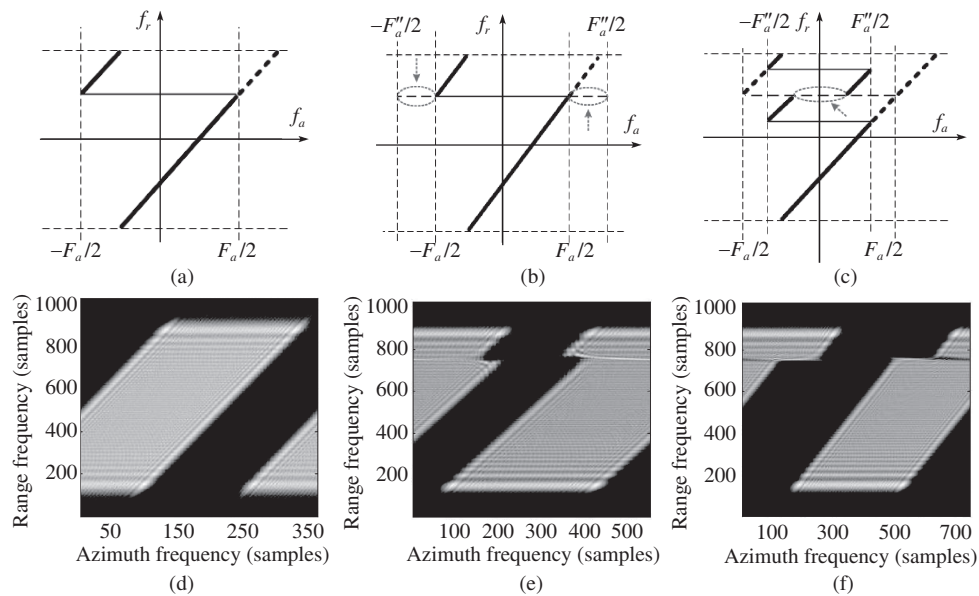


图 3 方位粗聚焦前后的频谱变化情况. 上方: Doppler 中心线示意图; 下方: 仿真目标频谱

**Figure 3** Illumination of the 2D spectrum variance in the azimuth coarse focusing. Upper: Doppler centroid line; lower: the 2D spectrum of a simulated target. (a) Original Doppler centroid line; (b) after azimuth deramping ( $F_a'' > F_a$ ); (c) after azimuth deramping ( $F_a'' < F_a$ ); (d) original 2D spectrum; (e) after azimuth deramping ( $F_a'' > F_a$ ); (f) after azimuth deramping ( $F_a'' < F_a$ )

式 (6) 右侧第 1 项是与目标方位位置  $x_n$  有关的常数, 将引起二维频谱的方位偏移; 第 2 项是由斜视角产生的 Doppler 中心频率; 第 3 项是关于距离频率的线性函数, 将导致二维频谱发生扭曲形变. 其中后两项是由斜视角  $\theta_s$  所引起<sup>[13]</sup>. 图 2 给出了斜视聚束 SAR 中可能存在的两种目标二维频谱示意图. 其中灰色区域表示二维频谱支撑域, 粗实线表示 Doppler 中心线. 图 2 (a) 和 (b) 分别表示 Doppler 中心线不存在方位折叠和存在方位折叠的情况. 由本节后续分析可知, Doppler 中心线的方位折叠现象正是引起错误方位粗聚焦结果的根本原因.

**方位粗聚焦原理:** 通过改变线性调频信号的调频斜率降低回波信号的方位带宽, 使回波信号的方位采样满足 Nyquist 采样定理, 从而消除方位谱混叠现象. 方位粗聚焦后, 回波信号的 Doppler 中心频率不变, 但方位采样率将发生变化. 令  $F_a$  表示原始脉冲重复频率 (PRF),  $F_a''$  表示方位粗聚焦后的方位采样率, 通常情况下  $F_a'' \neq F_a$ <sup>[4]</sup>. 图 3 (a) 给出了原始回波二维频谱的 Doppler 中心线示意图, 其中粗实线为基带内的 Doppler 中心线, 粗虚线为发生方位折叠前的 Doppler 中心线部分. 图 3 (b) 和 (c)



分别表示在  $F_a'' < F_a$  和  $F_a'' > F_a$  情况下, 对回波信号实施方位粗聚焦后, 基带内的 Doppler 中心线示意图. 可发现, 粗聚焦前未发生折叠的 Doppler 中心部分, 粗聚焦后, 将以  $F_a''$  为周期发生折叠. 由于只存在一次折叠, 因此这种折叠是连续的, 不会引起频谱失真现象. 对于粗聚焦前已经以  $F_a$  为周期发生折叠的基带 Doppler 中心部分来说, 粗聚焦后, 也将以  $F_a''$  为周期发生二次折叠. 由图 3 (b) 和 (c) 可发现, 当  $F_a'' \neq F_a$  时, 由于前后两次折叠的周期不同, 将导致粗聚焦回波信号的二维频谱发生错位失真现象 (箭头所指处). 与图 3 (a) ~ (c) 相对应, 图 3 (d) ~ (f) 给出了仿真点目标的二维频谱在方位粗聚焦前后的变化情况. 可发现, 所得仿真结果与上述理论分析结论完全吻合.

总结上述分析可知, 导致粗聚焦回波发生方位谱错位失真有两个原因: 一是原始回波的基带 Doppler 中心发生了方位折叠; 二是方位粗聚焦后, 回波信号的方位采样率发生变化, 即  $F_a'' \neq F_a$ . 当这两个条件同时满足时, 就会导致错误的粗聚焦结果. 实际情况中, 对于已发生方位欠采样的斜视聚束 SAR 回波信号来说, 上述两点都将存在. 若不采取有效措施, 粗聚焦回波信号将不可避免地发生方位谱错位失真现象. 频谱错位失真将严重影响 SAR 图像的聚焦质量: 一方面真实目标的聚焦质量会严重下降, 另一面 SAR 图像将出现大量“虚假目标”. 因此, 若想实现两步式成像法对斜视聚束 SAR 的正确成像, 必须消除斜视角对方位粗聚焦的影响.

### 3 方位粗聚焦

#### 3.1 Doppler 中心校正预处理

由第 2 节分析可知, 若要消除粗聚焦回波的频谱错位失真现象, 有两种方法可选择: 一是消除原始回波基带 Doppler 中心的方位折叠现象; 二是粗聚焦前后回波信号的方位采样率保持不变. 而若要获得理想的方位分辨率, 通常情况下有  $F_a'' > F_a$ , 因此只能从第一种方法的研究入手. 为此, 文献 [4] 提出了线性相位修正法. 为便于算法间的对比分析, 这里先对线性相位修正法作简要介绍, 然后给出本文采用的方法.

**方法 1: 线性相位修正法.** 线性相位修正法是指在二维时域内, 将原始回波乘以线性相位校正因子  $\exp(-j4\pi f_c \sin \theta_s t_a / c)$ . 结合式 (6) 可知, 乘以上述因子后, 由斜视角引起的 Doppler 中心频率将被补偿为零 (式 (6) 右侧第 2 项). 其作用相当于将回波二维频谱沿方位向平移了  $-2f_c \sin \theta_s / c$ . 实施线性相位校正后, 成像场景所有目标的方位谱中心频率将由目标所在的方位位置决定 (式 (6) 右侧第 1 项). 而 Doppler 中心频率关于距离频率  $f_r$  的线性变化关系 (式 (6) 中的第 3 项) 并未改变, 回波二维频谱的扭曲形变现象依然存在.

**方法 2: 非线性相位修正法.** 与方法 1 不同, 本文采用的是在距离频域、方位时域内进行的非线性相位修正法<sup>[14]</sup>. 相位校正因子为

$$C(f_r, t_a) = \exp \left[ -j \frac{4\pi f_c v \sin \theta_s}{c} t_a \right] \exp \left[ -j \frac{4\pi f_r v \sin \theta_s}{c} t_a \right]. \quad (7)$$

对比式 (7) 和 (6) 可发现, 非线性相位修正法除了完成与方法 1 相同的频谱方位平移外 (式 (7) 右侧第 1 个指数项), 还消除了 Doppler 中心频率关于距离频率的线性变化关系 (式 (7) 右侧第 2 个指数项), 即校正了二维频谱的扭曲形变现象. 将式 (7) 与 (5) 相乘, 得到预处理后的回波信号为

$$Ss'(f_r, t_a; r_0) = W_r(f_r) w_a \left[ \frac{t_a}{T_{\text{spot}}} \right] \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \exp \left\{ -j \frac{4\pi (f_r + f_c)}{c} [r(t_a; r_0) + v \sin \theta_s t_a] \right\}. \quad (8)$$

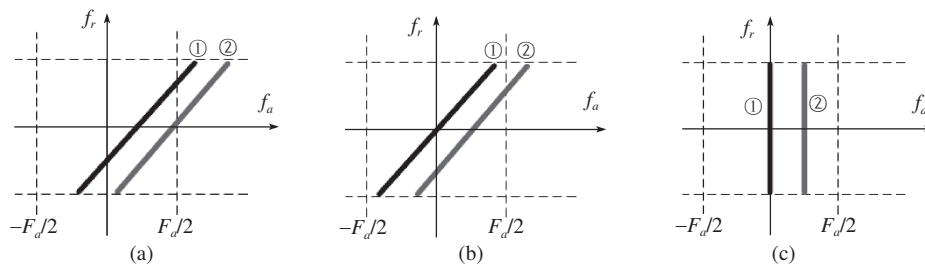


图 4 Doppler 中心校正预处理示意图

**Figure 4** Illumination of the Doppler centroid correction preprocessing. (a) Original Doppler centroid in baseband; (b) after applying method 1; (c) after applying method 2

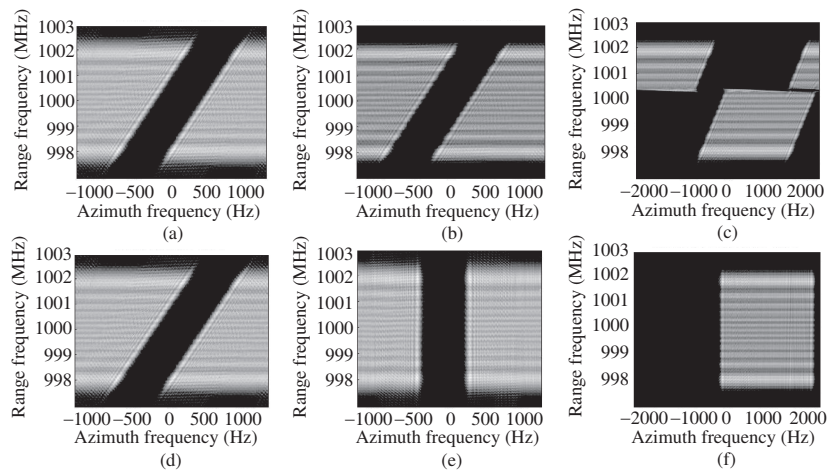


图 5 场景方位边缘目标的回波频谱变化情况

**Figure 5** Illumination of the 2D spectrum variance of the target located at azimuth scene edge. (a) Original 2D spectrum; (b) after applying method 1; (c) after azimuth coarse focusing; (d) original 2D spectrum; (e) after applying method 2; (f) after azimuth coarse focusing

下面通过示意图对上述两种方法的作用加以分析. 图 4 (a) ~ (c) 给出了上述两种方法处理过程的示意图, 其中直线①表示场景方位中心目标对应的 Doppler 中心线, 直线②表示场景方位边缘目标对应的 Doppler 中心线. 由图 4(b) 可发现, 应用方法 1 后, 直线①的方位折叠现象被消除了; 但对于直线②来说, 由于还存在由目标方位位置产生的频谱方位偏移和由斜视角产生的扭曲形变现象, 导致其仍存有残余方位折叠现象. 图 4 (c) 给出了应用方法 2 后的结果. 可发现, 由于同时消除了频谱的方位偏移和扭曲形变现象, 直线①和直线②的方位折叠现象均被彻底消除.

下面通过点目标仿真实验对上述理论分析加以验证. 仿真参数如下: 信号载频 10 GHz, 信号带宽 50 MHz, 采样频率 60 MHz, 雷达平台速度 7 km/s, 目标斜距距离 300 km, 斜视角  $30^\circ$ , 方位分辨率 3 m, PRF 为 2.6 kHz. 图 5 给出了场景方位边缘点目标 (对应于图 4 直线②的情况) 回波的二维频谱在方位粗聚焦前后的变化情况. 可发现, 所得仿真结果与上述分析完全吻合, 从而证明了理论分析的正确性.

### 3.2 方位粗聚焦处理

消除斜视角的影响后, 即可进行方位粗聚焦处理<sup>[4]</sup>. Doppler 中心校正预处理后的方位时域回波

信号为

$$s'_a(t_a; r_0) = \text{rect} \left[ \frac{t_a}{T_{\text{spot}}} \right] \exp \left[ -j\pi f_{dr} (t_a - t_n)^2 \right]. \quad (9)$$

令  $r_{\text{ref}}$  表示参考斜距, 则方位粗聚焦参考信号可表示为

$$s_{\text{ref}}(t_a; r_{\text{ref}}) = \exp \left( -j\pi f_{dr, \text{ref}} t_a^2 \right), \quad (10)$$

其中  $f_{dr, \text{ref}} = -\frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_{\text{ref}}}$  为参考信号的 Doppler 调频斜率. 方位粗聚焦处理是通过时域回波信号与粗聚焦参考信号作方位向卷积处理实现的<sup>[4]</sup>, 即

$$\begin{aligned} s''_a(t_a; r_0) &= s'_a(t_a; r_0) \otimes_{az} s_{\text{ref}}(t_a; r_{\text{ref}}) \\ &= \underbrace{\exp(-j\pi f_{\text{ref}} t_a^2)}_{\text{Residual phase}} \int \underbrace{\text{rect} \left[ \frac{z_a}{T_{\text{spot}}} \right]}_{s'_a(z_a; r_0)} \underbrace{\exp \left[ j\pi f_{dr} (z_a - t_n)^2 \right]}_{s_{\text{ref}}(z_a; r_{\text{ref}})} \underbrace{\exp(-j\pi f_{\text{ref}} z_a^2) \exp(j2\pi f_{\text{ref}} t_a z_a)}_{\text{DFT kernel}} dz_a, \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\otimes_{az}$  表示方位向卷积处理. 可发现, 整个方位粗聚焦过程包括参考信号相乘、方位 DFT 变换和残余相位 (residual phase) 补偿 3 个步骤. 基于上述推导, 很容易得出方位粗聚焦的离散域推导过程, 这里不再赘述.

## 4 精聚焦处理

### 4.1 距离向精聚焦

对式 (11) 作二维 FFT, 求得方位粗聚焦回波的二维频谱  $SS''(f_a; r_0)$  为

$$SS''(f_r, f_a; r_0) = SS'(f_r, f_a; r_0) \cdot \exp \left[ -j\pi \left( \frac{f_a^2}{f_{dr, \text{ref}}} \right) \right], \quad (12)$$

其中  $SS'(f_r, t_a; r_0)$  为预处理回波的二维频谱. 指数项为方位粗聚焦参考信号的频谱, 只要在方位频域内乘以该项的共轭, 即可将其补偿. 由式 (1) 可知, 若要求得方位粗聚焦回波的二维频谱, 需先求得预处理回波的二维频谱. 对式的 Taylor 级数进行整理, 写成下述形式

$$r(t_a; r_0) \approx \sqrt{r_0^2 + v^2 \cos^2 \theta_s (t_a - t_n)^2} - v(t_a - t_n) \sin \theta_s + \frac{v^3 \sin \theta_s \cos^2 \theta_s}{2r_0} (t_a - t_n)^3. \quad (13)$$

与式 (1) 相比, 式 (13) 相当于忽略了 Taylor 级数展开式中 5 次 (含) 以上的奇次展开项. 这种近似具有很高的精度, 能够满足绝大多数高分辨率大斜视 SAR 的成像要求. 将式 (13) 代入式 (8) 并作方位 FFT, 得

$$\begin{aligned} SS'(f_r, f_a; r_0) &\approx W_r(f_r) W_a(f_a) \exp \left[ -j \frac{4\pi(f_r + f_c)}{c} v t_n \sin \theta_s \right] \exp(-j2\pi f_a t_n) \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \\ &\times \exp \left[ -j \frac{4\pi r_0}{c} \sqrt{(f_r + f_c)^2 - \left( \frac{c f_a}{2v \cos \theta_s} \right)^2} \right] \exp \left[ j r_0 \frac{2\pi \sin \theta_s f_a^3}{\lambda_c \cos \theta_s (f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $f_{aM} = 2v \cos \theta_s / \lambda_c$ . 式 (14) 中的第 3 个指数项为距离调制项, 乘以该项的共轭即可实现距离匹配滤波. 第 4 个指数项为距离方位耦合项. 针对该项的补偿, 有多种方法可选择<sup>[1,6,13,14]</sup>, 这里本文采

用修正 Stolt 插值法<sup>[15]</sup>. 根据式 (14) 的耦合项形式, 构造如下所示的修正 Stolt 变量映射关系:

$$f'_r = \sqrt{(f_r + f_c)^2 - \left(\frac{cf_a}{2v \cos \theta_s}\right)^2} - \sqrt{f_c^2 - \left(\frac{cf_a}{2v \cos \theta_s}\right)^2}, \quad (15)$$

其中  $f'_r$  为修正 Stolt 映射后的距离频率. 对插值后的回波信号作距离 IFFT, 得

$$sS''(\tau, f_a, r_0) = \text{sinc} \left[ B_r \left( \tau - \frac{2(r_0 + vt_n \sin \theta_s)}{c} \right) \right] W_a(f_a) \exp(-j2\pi f_a t_n) \\ \times \exp \left[ -j \frac{4\pi r_0}{c} \sqrt{f_c^2 - \left(\frac{cf_a}{2v \cos \theta_s}\right)^2} + j r_0 \frac{2\pi \sin \theta_s}{\lambda_c \cos \theta_s} \frac{f_a^3}{(f_{aM}^2 - f_a^2)^{3/2}} \right], \quad (16)$$

其中  $B_r$  为发射信号带宽. 至此, 就得到了距离精聚焦后的距离 Doppler 域回波信号.

## 4.2 方位向精聚焦

由式 (16) 可发现, 回波距离包络中存在方位空变的偏移误差  $vt_n \sin \theta_s$ , 这将导致回波信号发生方位滤波失配, 从而影响目标的聚焦质量. 而若要忽略这种影响, 则目标的方位位置  $x_n$  必须满足<sup>[8]</sup>

$$|x_n| \leq \frac{\delta x_{\text{ADOF}}}{2} = \frac{2\rho_a^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c |\sin \theta_s|}, \quad (17)$$

其中  $\delta x_{\text{ADOF}}$  为斜距  $r_0$  处的方位聚焦深度 (azimuth depth of focus, ADOF),  $\rho_a$  为方位分辨率. 当成像场景的方位宽度满足式 (17) 时, 则可通过将式 (16) 直接乘以其第 2 个指数的共轭, 完成方位压缩. 但假如成像场景方位宽度不满足式 (17), 则方位聚焦深度的影响不可忽略. 此外, 由式 (17) 可发现, SAR 图像方位分辨率越高, 斜视角越大, 波长越长, 则方位聚焦深度越小. 相应地, 实施高精度方位滤波处理越复杂、越困难.

令  $\Phi(f_a; r_0)$  表示式 (5) 的相位项, 将其在  $f_a = 0$  处作 Taylor 级数展开, 得

$$\Phi(f_a; r_0) \approx -\frac{4\pi r_0}{\lambda_c} - \frac{2\pi x_n}{v} f_a + \frac{2\pi r_0}{\lambda_c f_{aM}^2} f_a^2 + \frac{2\pi r_0 \sin \theta_s}{\lambda_c f_{aM}^3 \cos \theta_s} f_a^3 + \dots \\ = \psi_0 + \psi_1 f_a + \psi_2 f_a^2 + \psi_3 f_a^3 + \sum_{m=4}^{\infty} \psi_m f_a^m, \quad (18)$$

其中系数  $\psi_0, \psi_1, \psi_2$  和  $\psi_3$  分别为

$$\psi_0 = -\frac{4\pi r_0}{\lambda_c}, \quad \psi_1 = -\frac{2\pi x_n}{v}, \quad \psi_2 = \frac{2\pi r_0}{\lambda_c f_{aM}^2} = -\frac{\pi}{K_a}, \quad \psi_3 = \frac{2\pi r_0 \sin \theta_s}{\lambda_c f_{aM}^3 \cos \theta_s}; \quad (19)$$

系数  $\psi_2$  中的  $K_a = -\frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_0}$  为斜距  $r_0$  处的方位调频斜率. 令  $r_{\text{LRWC}} = r_0 + vt_n \sin \theta_s$  表示目标包络所在斜距. 将  $r_{\text{LRWC}}$  代入  $K_a$  中, 将其展开成关于  $t_n$  的级数, 并保留到二阶展开项, 得

$$K_a \approx -\frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_{\text{LRWC}}} - \frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_{\text{LRWC}}} \frac{v \sin \theta_s}{r_{\text{LRWC}}} t_n - \frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_{\text{LRWC}}} \frac{v^2 \sin^2 \theta_s}{r_{\text{LRWC}}^2} t_n^2 \\ = K_{\text{LRWC}} + K_{\text{LRWC}} \cdot K_s \cdot t_n + K_{\text{LRWC}} \cdot K_s^2 \cdot t_n^2, \quad (20)$$

其中  $K_{\text{LRWC}} = -\frac{2v^2 \cos^2 \theta_s}{\lambda_c r_{\text{LRWC}}}$  为斜距  $r_{\text{LRWC}}$  处的方位调频率,  $K_s = K_{\text{LRWC}} \frac{v \sin \theta_s}{r_{\text{LRWC}}}$  为方位调频斜率的变化率. 可发现, 近似后的方位调频斜率是关于目标方位位置时间  $t_n$  的二次函数. 与方位调频斜率的



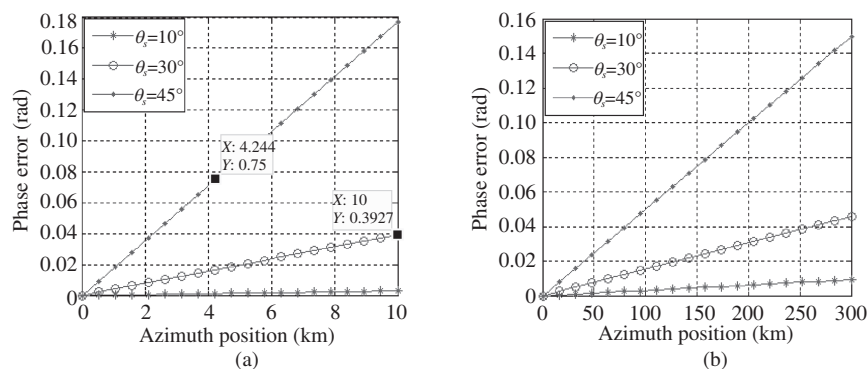


图 6 方位空变相位误差随目标方位位置的变化关系

**Figure 6** Illumination of the relationship between the azimuth-dependent phase error and target's azimuth position. (a) The 3rd order azimuth-dependent phase versus to the targets' azimuth position; (b) the higher order azimuth-dependent phase versus to the targets' azimuth position

线性近似<sup>[11]</sup>相比, 式 (20) 具有更高的近似精度. 同理, 将  $r_{\text{LRWC}} = r_0 + vt_n \sin \theta_s$  代入高阶相位项  $\psi_m$  ( $m \geq 3$ ) 中, 得

$$\psi_m = \psi_{m,\text{LRWC}} + \psi_{m,s} \cdot t_n, \quad m \geq 3, \quad (21)$$

其中  $\psi_{m,\text{LRWC}} = \frac{\psi_m}{r_0} r$ ,  $\psi_{m,s} = -\frac{\psi_m}{r_0} v \sin \theta_s$ . 可发现, 高阶相位项可分解成方位非空变项 (式 (21) 右侧第 1 项) 和方位空变项 (式 (21) 右侧第 2 项). 图 6 给出了不同斜视角下, 三阶方位空变相位和高阶方位空变相位随目标方位位置的变化曲线. 实验中, 信号载频 10 GHz, 雷达平台速度 7 km/s, 目标斜距 300 km, 方位分辨率 1 m.

由图 6 可发现, 随着斜视角的增大, 方位分辨率的提高或成像场景方位宽度的增大, 方位空变相位越来越大. 其中三阶方位空变相位远大于高阶方位空变相位. 对于常规聚束 SAR 来说, 其成像场景的方位宽度通常在几公里至十几公里的范围, 这时高阶方位空变相位很小, 可忽略, 即认为高阶相位不存在方位空变性. 基于这种分析, 构造如下所示的方位非空变相位补偿函数

$$H_{\text{HOPC}}(f_a; r_{\text{LRWC}}) = \exp \left( - \sum_{m=3}^{\infty} j\psi_{m,\text{LRWC}} f_a^m \right). \quad (22)$$

将式 (18)~(21) 代入式 (16) 中, 然后将所得结果与式 (22) 相乘, 得

$$sS''(\tau, f_a; r_{\text{LRWC}}) = \text{sinc} \left[ B_r \left( \tau - \frac{2r_{\text{LRWC}}}{c} \right) \right] W_a(f_a) \exp \left( j\psi_1 f_a - j\pi \frac{f_a^2}{K_a} + j\psi_{3,s} t_n f_a^3 \right). \quad (23)$$

为求取调频变标函数和补偿三阶方位空变项, 在方位非线性调频变换前, 需先进行 4 次滤波处理, 即乘以

$$H_{\text{Filter}}(f_a) = \exp [j\pi (Y_3 f_a^3 + Y_4 f_a^4)]. \quad (24)$$

将式 (24) 与 (23) 相乘, 得到 4 次滤波后的回波信号为

$$sS''(\tau, f_a; r_{\text{LRWC}}) = \text{sinc} \left[ B_r \left( \tau - \frac{2r_{\text{LRWC}}}{c} \right) \right] W_a(f_a) \exp(j\psi_1 f_a) \exp \left[ -j\pi \frac{f_a^2}{K_a} + j\pi (Y_3 + \psi'_{3,s} t_n) f_a^3 + j\pi Y_4 f_a^4 \right], \quad (25)$$

其中  $\psi'_{3,s} = \psi_{3,s}/\pi$ . 对式 (25) 作方位 IFFT, 得

$$ss''(\tau, t_a; r_{\text{LRWC}}) = \text{sinc} \left[ B_r \left( \tau - \frac{2r_{\text{LRWC}}}{c} \right) \right] w_a \left[ \frac{t_a}{T_{\text{spot}}} \right] \cdot \exp \left[ j\pi K_a (t_a - t_n)^2 + j\pi (Y_3 + \psi'_{3,s} t_n) K_a^3 (t_a - t_n)^3 + j\pi Y_4 K_a^4 (t_a - t_n)^4 \right]. \quad (26)$$

由式 (26) 可发现, 所得方位调频信号在形式上与距离调频信号非常相似, 其差别只是时间变标因子不同而已. 根据式 (26), 构造如下所示的四阶方位非线性调频变标因子

$$C_{\text{NCS}}(t_a) = \exp(j\pi q_2 t_a^2 + j\pi q_3 t_a^3 + j\pi q_4 t_a^4). \quad (27)$$

将式 (27) 与 (26) 相乘, 得到方位非线性调频变标处理后的回波信号. 对所得信号作方位 FFT, 得

$$\begin{aligned} sS''(\tau, f_a; r_{\text{LRWC}}) = & \text{sinc} \left[ B_r \left( \tau - \frac{2r_{\text{LRWC}}}{c} \right) \right] W_a \left( \frac{f_a - q_2 t_n}{K_a + q_2} \right) \exp \left[ -j2\pi \frac{f_a + K_a t_n}{K_a + q_2} f_a \right] \\ & \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{(K_a + q_2)^2} \left[ K_a (f_a - q_2 t_n)^2 + q_2 (f_a + K_a t_n)^2 \right] \right\} \\ & \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{(K_a + q_2)^3} \left[ (Y_3 + \psi'_{3,s} t_n) K_a^3 (f_a - q_2 t_n)^3 + q_3 (f_a + K_a t_n)^3 \right] \right\} \\ & \times \exp \left\{ j \frac{\pi}{(K_a + q_2)^4} \left[ Y_4 K_a^4 (f_a - q_2 t_n)^4 + q_4 (f_a + K_a t_n)^4 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (28)$$

整理式 (28), 将其相位项写成关于  $t_n$  和  $f_a$  的级数, 得

$$\begin{aligned} \Theta(f_a) \approx & A(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4, f_a, f_a^2, f_a^3, f_a^4) + B(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) t_n f_a + C(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) t_n^2 f_a \\ & + D(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) t_n f_a^2 + E(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) t_n^2 f_a^2 + F(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) t_n f_a^3 \\ & + G(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4, t_n, t_n^2, t_n^3, t_n^4) + \phi_{\text{res}}(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4, f_a, t_n). \end{aligned} \quad (29)$$

式 (29) 右侧第 1 项为理想的方位调制项; 第 2 项为目标方位位置项; 第 3 项是关于  $f_a$  的一次函数, 该项系数与  $t_n^2$  有关, 将导致 SAR 图像出现方位空变的几何畸变. 第 4~6 项为方位空变的方位调制项, 正是这些项的方位滤波失配导致了场景聚焦深度问题. 第 7 项与方位频率无关, 该项对目标聚焦质量没有影响, 可忽略. 第 8 项为其他 Taylor 级数展开项之和, 它们通常很小, 同样可以忽略.

为消除式 (29) 中方位空变的几何失真项和方位调制项, 进行如下赋值: 令  $B(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4)$  等于  $-\pi/\alpha$ , 其中  $\alpha \neq 0.5$  为引入常数, 其他包含  $t_n^p f_a^l$ ,  $p \neq 0$ ,  $l \neq 0$  的系数等于零, 由此得到一个五元一次方程组

$$\begin{cases} B(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) = -\pi/\alpha, \\ C(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) = 0, \\ D(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) = 0, \\ E(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) = 0, \\ F(q_2, q_3, q_4, Y_3, Y_4) = 0. \end{cases} \quad (30)$$

求解上述方程组, 得

$$\begin{cases} q_2 = K_{\text{LRWC}}(2\alpha - 1), \\ q_3 = \frac{K_{\text{LRWC}}K_s(2\alpha - 1)}{3}, \\ q_4 = \frac{K_s^2(10\alpha - 5) + 3\psi'_{3,s}K_{\text{LRWC}}^2(2\alpha - 1)}{12}, \\ Y_3 = \frac{K_s(4\alpha - 1)}{3K_{\text{LRWC}}^3(2\alpha - 1)}, \\ Y_4 = \frac{K_s^2(16\alpha - 5) + 3\psi'_{3,s}K_{\text{LRWC}}^2(4\alpha - 1)}{12K_{\text{LRWC}}^3(2\alpha - 1)}. \end{cases} \quad (31)$$

将式 (31) 代入式 (28) 中, 并整理, 得

$$sS''(\tau, f_a; r_{\text{LRWC}}) = W_a \left[ \frac{f_a - q_2 t_n}{1/(K_{\text{LRWC}} + q_2) - K_s t_n (K_{\text{LRWC}} + q_2)^2} \right] \text{sinc} \left[ \tau - \frac{2r_{\text{LRWC}}}{c} \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{t_n}{2\alpha} f_a \right] \\ \times \exp \left[ -j\pi \frac{1}{(K_{\text{LRWC}} + q_2)} f_a^2 + j\pi \frac{Y_3 K_{\text{LRWC}}^3 + q_3}{(K_{\text{LRWC}} + q_2)^3} f_a^3 + j\pi \frac{Y_4 K_{\text{LRWC}}^4 + q_4}{(K_{\text{LRWC}} + q_2)^4} f_a^4 \right]. \quad (32)$$

可发现, 实施方位非线性调频变标处理后, 回波包络和相位间的空变性被消除了, 这意味着可采用统一的方位滤波器进行方位压缩处理. 观察式 (32) 中的  $W_a[\cdot]$  项可发现, 方位谱存在包络平移. 设目标 Doppler 带宽为  $B_d$ , 若要保证方位包络的偏移幅度不超出采样率, 则需满足  $|q_2 t_n| \leq (F_a'' - B_d)/2$ . 实际情况中, 方位粗聚焦后, 回波信号在方位向将是过采样的, 因此通常情况下上述不等式是成立的, 即方位包络的偏移幅度不会超出过采样率, 目标聚焦质量不会受到影响. 若是方位谱偏移幅度超出上述条件的限制, 则可采用频谱扩展<sup>[13]</sup>等方法消除包络偏移的影响. 根据式 (32), 构造如下所示的方位滤波函数

$$H_{\text{AC}}(f_a; r_{\text{LRWC}}) = \exp \left[ j\pi \frac{1}{(K_{\text{LRWC}} + q_2)} f_a^2 - j\pi \frac{Y_3 K_{\text{LRWC}}^3 + q_3}{(K_{\text{LRWC}} + q_2)^3} f_a^3 - j\pi \frac{Y_4 K_{\text{LRWC}}^4 + q_4}{(K_{\text{LRWC}} + q_2)^4} f_a^4 \right]. \quad (33)$$

将式 (33) 与 (32) 相乘, 完成方位压缩. 最后, 对回波信号作方位 IFFT, 得到聚焦 SAR 图像

$$ss''(\tau, t_a; r_0) = \text{sinc} \left[ \tau - \frac{2(r_0 + vt_n \sin \theta_s)}{c} \right] \text{sinc} \left[ t_a - \frac{t_n}{2\alpha} \right] \exp \left( j \frac{q_2 t_n}{K_a + q_2} t_a \right). \quad (34)$$

由式 (34) 可发现, 成像后, 目标聚焦位置为  $(r_0 + vt_n \sin \theta_s, \frac{t_n}{2\alpha})$ , 偏离了其真实位置  $(r_0, x_n)$ . 因此, 成像后, 需采用简单的几何形变校正, 恢复目标的真实位置, 具体处理步骤为: 首先, 将 SAR 图像变换到距离频域, 乘以几何校正因子  $\exp[-j4\pi(f + f_c)vt_n \sin \theta_s/c]$ , 消除距离几何形变, 恢复目标真实的距离位置; 其次, 调整 SAR 图像方位采样间距, 将原始采样间距乘以  $2\alpha$ , 恢复目标真实的方位位置, 从而得到无失真的 SAR 图像.

假如在式 (20) 的近似处理中, 只保留到一阶 Taylor 展开项, 同时忽略高阶相位补偿 (式 (23)), 则所提改进 NLCS 算法将退化为二维分离成像法<sup>[11]</sup>; 而假如令  $q_2 = q_4 = Y_3 = Y_4 = 0$ , 同时忽略高阶相位补偿 (式 (23)), 则所提方法将退化为传统 NLCS 算法<sup>[9]</sup>. 因此, 上述两种方法可看成是本文方法的一种特例. 由于采用了更高精度的近似处理, 本文所提方法具有更高的成像精度, 适用于高分辨率大场景斜视聚束 SAR 的成像处理.

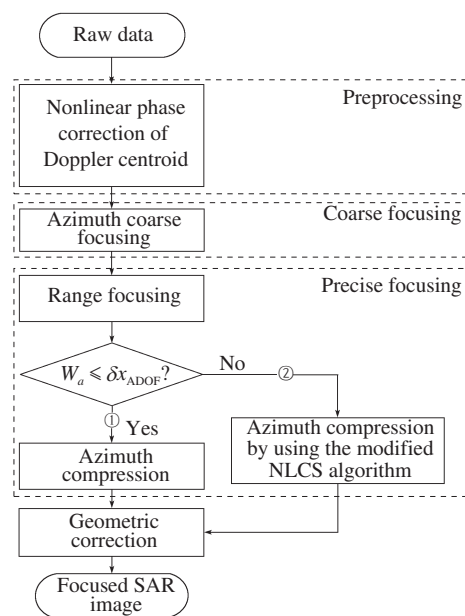


图 7 斜视聚束 SAR 两步式成像处理流程

Figure 7 The signal processing flow of the proposed two-step approach for squint spotlight SAR imaging

## 5 斜视聚束 SAR 成像处理流程

基于上述推导, 图 7 给出了本文所提斜视聚束 SAR 成像方法的处理流程. 整个流程包括回波预处理、方位粗聚焦和精聚焦 3 个步骤. 其中回波预处理的作用是消除斜视角对方位粗聚焦的影响, 方位粗聚焦的作用是消除方位欠采样导致的方位谱混叠现象, 最后通过精聚焦处理获得高质量 SAR 图像. 在精聚焦的方位滤波处理中, 给出了不存在场景聚焦深度限制时的直接方位压缩方法 (记为流程①) 和存在场景聚焦深度限制时的改进方位压缩方法 (记为流程②). 图 7 中  $W_a$  表示成像场景的方位宽度. 实际应用中, 人们可根据具体的 SAR 系统参数和实际的成像质量要求, 选择最优的处理流程.

## 6 仿真实验

为验证本文所作理论分析的正确性及所提方法的有效性, 我们进行了两个仿真成像实验. 第 1 个实验是低分辨率斜视聚束 SAR 成像处理, 目的是观察方位谱混叠现象对斜视聚束 SAR 成像的影响, 同时验证本文所采用的回波 Doppler 中心校正预处理方法的有效性. 第 2 个实验是高分辨率斜视聚束 SAR 成像处理, 目的是验证本文所提改进 NLCS 算法的有效性.

### 6.1 低分辨率斜视聚束 SAR 情况

仿真实验中, 在  $10\text{ km} \times 1.5\text{ km}$  (距离向  $\times$  方位向) 的场景内放置了 9 个点目标, 排成 3 行 3 列的阵列, 中心目标位于成像场景中心处, 目标的距离向间距为  $4.5\text{ km}$ , 方位向间距为  $0.75\text{ km}$ . SAR 系统参数如表 1 所示.

由表 1 所列参数可算得, 天线方位向转角约为  $0.34^\circ$ , 合成孔径长度约为  $2\text{ km}$ , 合成孔径时间约为

表 1 SAR 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of SAR system

Parameters	Center frequency	Signal bandwidth	Sampling frequency	Platform velocity
Values	10 GHz	50 MHz	60 MHz	7 km/s
Parameters	Center slant range	Azimuth resolution	PRF	Squint angle
Values	300 km	3 m	1800 Hz	30°

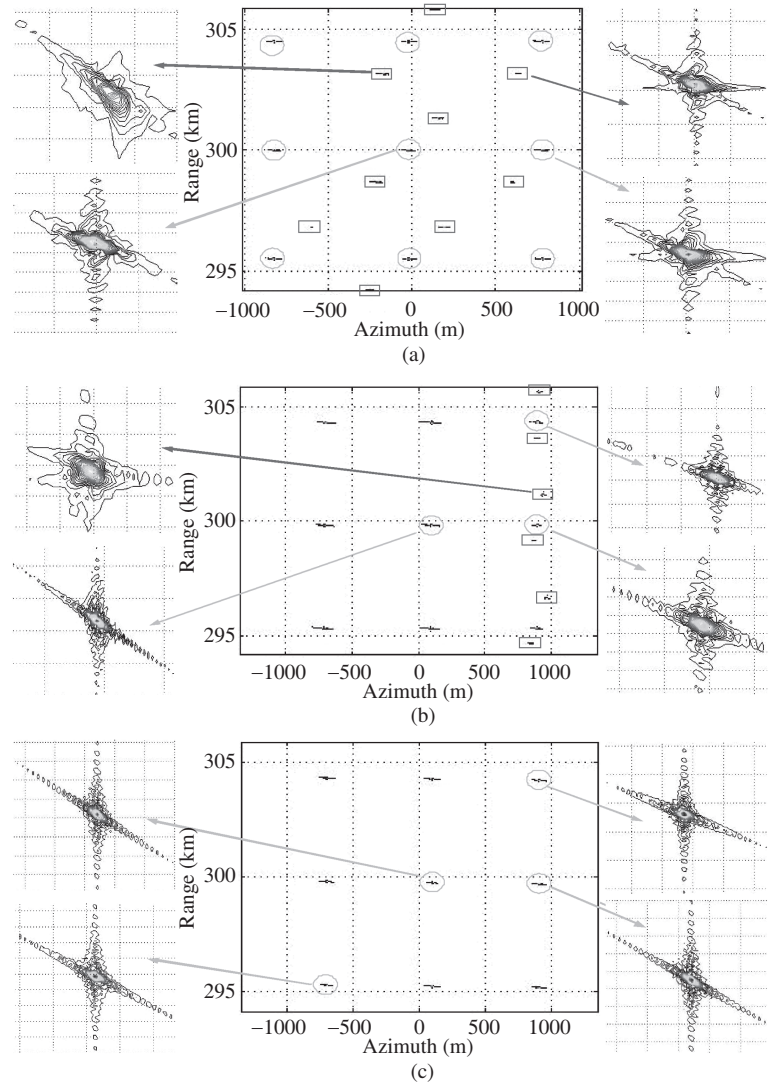


图 8 低分辨率斜视聚束 SAR 仿真成像结果

Figure 8 Simulated results of the low resolution squint spotlight SAR imaging. (a) Original two-step approach; (b) the two-step approach integrated with the linear phase correction preprocessing; (c) our proposed algorithm

0.29 s. 回波信号总的方位带宽约为 4 kHz, 远大于 PRF, 因此将发生方位谱混叠现象. 此外, 利用表 1 参数可算得场景方位聚焦深度  $\delta x_{\text{ADOF}} \approx 1.8$  km, 大于成像场景的方位宽度, 因此可忽略场景聚焦深度的限制. 图 8 给出了采用不同方法获得的成像结果. 在应用本文所提方法时, 采用了图 7 流程①的



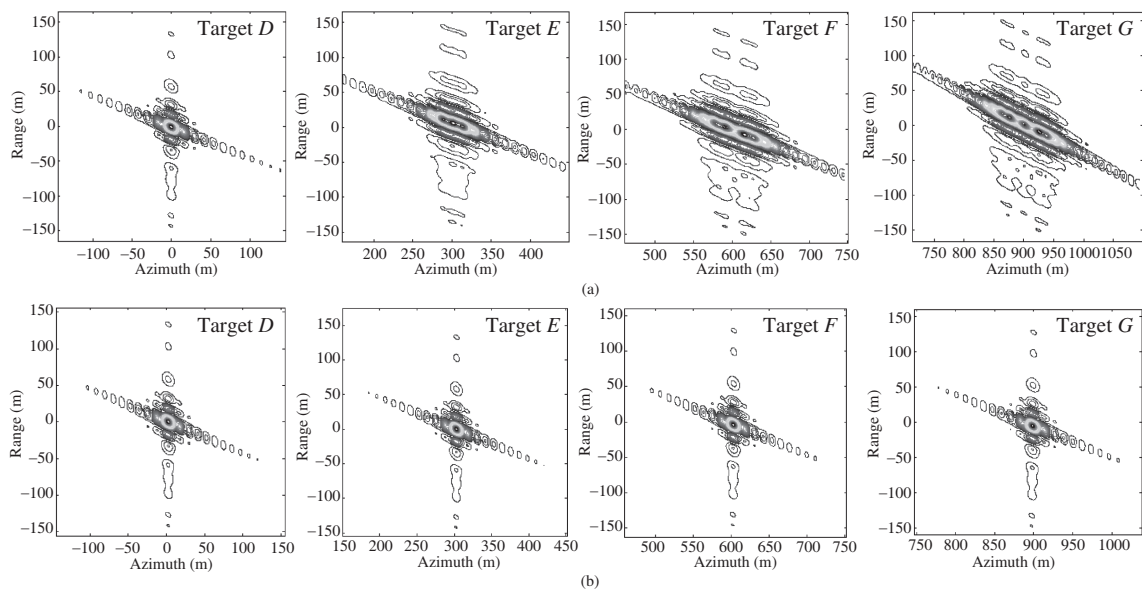


图 9 高分辨率斜视聚束 SAR 成像仿真

**Figure 9** Simulated imaging results of the high resolution squint spotlight SAR. (a) The imaging results obtained by using the flow ① shown in Figure 7; (b) the imaging results obtained by using the flow ② shown in Figure 7

成像处理流程. 为真实反映目标聚焦情况, 成像过程中未采取任何加权或旁瓣抑制措施.

由图 8 (a) 可发现, 直接应用传统两步式成像法进行成像处理时, 由于斜视角的影响, 产生了错误的方位粗聚焦结果. 在所得 SAR 图像中, 真实目标 (图中圆框标记处) 散焦严重, 同时出现了大量“虚假目标” (图中方框标记处). 在应用结合线性相位修正法的两步式成像法<sup>[2,6]</sup>后, 斜视角的影响被部分消除. 成像后, 靠近场景方位中心的目标的聚焦质量有了很大改善, 但靠近场景方位边缘的目标由于受到残余 Doppler 折叠的影响, 仍然产生了错误的方位粗聚焦结果, 目标散焦情况依然比较严重, 且图像中仍存在“虚假目标”, 如图 8 (b) 所示. 与之相比较, 图 8 (c) 给出了利用本文所提方法获得的成像结果. 可发现, 由于斜视角的影响被彻底消除, 得到了正确的方位粗聚焦处理结果. 在所得 SAR 图像中, 不但所有真实目标均实现了良好聚焦, 且图像中不再有“虚假目标”. 上述成像结果证明了本文所提方法的有效性.

## 6.2 高分辨率斜视聚束 SAR 情况

在本仿真实验, 采用如下参数设置: 图像二维分辨率为 1 m, PRF 为 3 kHz, 成像场景大小为 2 km × 1.8 km (距离向 × 方位向), 其他参数同表 1. 利用上述参数可算得, 场景方位聚焦深度  $\delta x_{\text{ADOF}} \approx 0.2$  km, 远小于成像场景的方位宽度, 此时场景方位聚焦深度将对成像结果的影响不可忽略.

在成像场景内共放置了 7 个点目标, 所有目标沿方位向排成一行, 即具有相同的斜距和不同的方位位置. 沿着雷达平台飞行方向将所有目标编号为 A ~ G, 其中目标 D 位于成像场景方位中心处, 目标间的方位间距为 300 m. 由上述参数可算得回波信号总的方位带宽约为 9 kHz, 远大于 PRF, 因此回波信号将发生方位谱混叠现象. 由于图像分辨率较高, 而成像场景又较大, 不便于观察目标的聚焦情况, 为此, 我们从所得图像中提出了目标 D ~ G 的子图像, 然后将其放大后进行观察. 图 9 (a) 和 (b) 分别给出了采用图 7 流程①和②获得的成像结果. 所给予图像均经过了相同的频域补零的升采样处

表 2 目标聚焦质量衡量参数

Table 2 Measured parameters of the targets focused quality

	$\rho_a$ (m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)
Target <i>D</i>	0.87	-13.29	-10.27
Target <i>E</i>	0.87	-13.23	-10.16
Target <i>F</i>	0.87	-13.11	-10.09
Target <i>G</i>	0.87	-13.23	-10.35

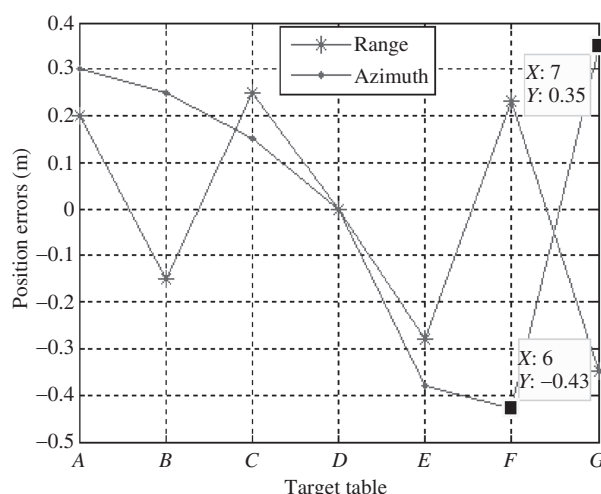


图 10 目标二维聚焦位置误差

Figure 10 The targets position errors in azimuth and range direction

理. 此外, 与第 6.1 小节的仿真实验一样, 成像过程中未采取任何加权或旁瓣抑制措施.

由图 9 (a) 可发现, 受方位空变的方位滤波失配的影响, 目标偏离方位中心越远, 其散焦情况越严重. 而在采用改进 NLCS 算法的方位滤波处理后, 所有目标均实现了良好聚焦, 场景聚焦深度限制问题被有效解决. 为定量评估目标聚焦质量, 我们计算了目标 *D* ~ *G* 的方位分辨率  $\rho_a$  (3 dB 宽度), 峰值旁瓣比 (PSLR) 和积分旁瓣比 (ISLR) 3 项指标<sup>[13]</sup>, 计算结果如表 2 所示. 可发现, 所有指标参数均接近或达到理论值.

此外, 为评估所得 SAR 图像的几何形变情况, 图 10 给出了目标 *A* ~ *G* 的二维聚焦位置与理论聚焦位置间的误差值. 可发现, 所有目标的二维聚焦位置偏差均小于 0.5 个分辨单元. 在大多数情况下, SAR 图像的这种几何失真幅度完全可以忽略.

## 7 结论

本文首先分析了斜视聚束 SAR 中的方位谱混叠现象, 找出了斜视角影响方位粗聚焦处理的根本原因. 其次, 基于分析结果, 引入了 Doppler 中心的非线性相位校正法, 彻底消除了斜视角对回波方位粗聚焦的影响, 得到正确的粗聚焦结果. 最后, 基于粗聚焦回波信号, 推导了精聚焦处理过程. 在精聚

焦的方位压缩处理中, 针对场景方位聚焦深度限制问题, 提出了一种改进 NLCS 算法, 实现了粗聚焦回波的高精度无失真方位压缩处理. 仿真实验结果证明了文中所作理论分析的正确性及所提方法的有效性.

## 参考文献

- 1 Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms. Norwood: Artech House, 1995
- 2 Cantalloube H, Dubois-Fernandez P. Airborne X-band SAR imaging with 10 cm resolution: technical challenge and preliminary results. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 152: 163–176
- 3 Mittermayer J, Sch?ttler B, Younis M. TerraSAR-X commissioning phase execution summary. IEEE Trans Geosc Rem Sens, 2010, 48: 649–659
- 4 Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, et al. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach. IEEE Trans Geosc Rem Sens, 2001, 39: 1993–2004
- 5 Lanari R, Zoffoli S, Sansosti E, et al. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2001, 148: 363–372
- 6 Wang G D, Zhou M Q, Li C S. A Deramp Chirp scaling algorithm for high-resolution spaceborne spotlight SAR imaging. Chinese J Electr, 2003, 31: 1784–1789 [王国栋, 周荫清, 李春升. 高分辨星载聚束 SAR 的 Deramp Chirp Scaling 成像算法. 电子学报, 2003, 31: 1784–1789]
- 7 Ding Z G, Long T, Zeng T, et al. Deramp range migration processing for space-borne spotlight synthetic aperture radar. Adv Spac Res, 2008, 41: 1822–1826
- 8 Yeo T S, Tan N L, Zhang C B, et al. A new subaperture approach to high squint SAR processing. IEEE Trans Geosc Rem Sens, 2001, 39: 954–968
- 9 Wong F H, Yeo T S. New application of nonlinear chirp scaling in SAR data processing. IEEE Trans Geosc Rem Sens, 2001, 39: 946–953
- 10 Wong F H, Cumming I G, Neo Y L. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm. IEEE Trans Geosc Rem Sens, 2008, 46: 2493–2505
- 11 Huang Y B, Bao Z. A new two-dimension-separated approach to high squint SAR processing. J Electr Inf Tech, 2005, 27: 1–5 [黄源宝, 保铮. 大斜视 SAR 成像的一种新的二维可分离处理方法. 电子与信息学报, 2005, 27: 1–5]
- 12 Liu G G, Zhang L R, Liu X, et al. Missile-borne large region squint SAR algorithm based on a curve trajectory. J Electr Inf Tech, 2011, 33: 628–633 [刘高高, 张林让, 刘昕, 等. 一种曲线轨迹下的大场景前斜视 SAR 成像算法. 电子与信息学报, 2011, 33: 628–633]
- 13 Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data. Norwood: Artech House, 2005
- 14 Bao Z, Xing M D, Wang T. Radar imaging technique. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005 [保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005]
- 15 Reigber A, Alivizatos E, Potsis, Moreira A. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153: 301–310

## A novel approach based on deramping technique for the squinted spotlight SAR imaging

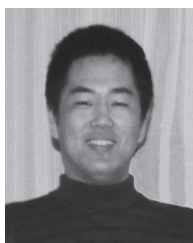
AN DaoXiang\*, LI Xin, HUANG XiaoTao & ZHOU ZhiMin

*School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*

\*E-mail: daoxiangnan@yahoo.com.cn

**Abstract** This paper presents an imaging algorithm based on the deramp processing technique to resolve the imaging problem of the squinted spotlight synthetic aperture radar (SAR) in the presence of the azimuth spectrum folding phenomenon. First of all, we carried out the analysis of the azimuth spectrum folding phenomenon in squinted spotlight SAR, and found the reason for the squint angle impacts on the azimuth coarse focusing. Based on the analysis result, a nonlinear phase correction preprocessing method is introduced, which can completely remove the influence of the squint angle on the azimuth coarse focusing, and the correct coarse focused result is obtained. Then, based on the squinted SAR imaging model, the coarse focusing and precise focusing of the preprocessed echo data are deducted, respectively. In the azimuth matched filtering step of the precise focusing, a modified nonlinear chirp scaling (NLCS) algorithm is proposed for overcoming the azimuth depth of focus (ADOF) limitation problem, which is induced by the nonlinear phase correction preprocessing, and a high precise azimuth compression is achieved. Simulation experiment results prove the validity of the proposed algorithms.

**Keywords** squinted spotlight SAR, azimuth spectrum folding phenomenon, nonlinear phase correction, depth of focus, nonlinear chirp scaling



**AN DaoXiang** was born in 1982. He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in information and communication engineering from National University of Defense Technology, Changsha in 2004, 2006, and 2011, respectively. Currently, he is a Lecturer of the National University of Defense Technology. His research interests include ultra-wideband SAR image formation, ultra-wideband SAR motion compensa-

tion, and high resolution SAR image formation.



**HUANG XiaoTao** was born in 1972. He received the B.S. and Ph.D. degrees in information and communication engineering from National University of Defense Technology, Changsha in 1990 and 1999, respectively. He is currently a Professor of National University of Defense Technology. His fields of interest include radar theory, signal processing and radio frequency signal suppression.



**LI Xin** was born in 1982. He received the M.S. degree in electromagnetic and microwave technology from Air Force Radar Academy, Wuhan in 2008. Currently, he is a Ph.D. candidate at National University of Defense Technology. His research interests include radar imaging, through wall detecting, and bistatic SAR.



**ZHOU ZhiMin** was born in 1957. He received the B.S. degree in aeronautical radio measurement and control, the M.S. and Ph.D. degrees in information and communication engineering from National University of Defense Technology, Changsha in 1982, 1989, and 2002, respectively. He is currently a Professor of National University of Defense Technology. He is a senior member of the Chinese Institute of Electronics. His fields of interest include ultra-wideband radar system and real-time signal processing.