

基于Keystone变换和扰动重采样的机动平台大斜视SAR成像方法

李根^{*①} 马彦恒^① 侯建强^① 徐公国^②

^①(陆军工程大学石家庄校区无人机工程系 石家庄 050003)

^②(陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系 石家庄 050003)

摘要: 加速度和下降速度的存在使机动平台大斜视SAR的成像参数存在明显的2维空变性,严重影响场景的聚焦深度。针对这个问题,该文提出了一种基于Keystone变换和扰动重采样的机动SAR成像方法。首先,通过距离走动校正和去加速处理实现距离方位解耦以及方位频谱去混叠,然后采用方位时域的Keystone变换校正空变的距离徙动;在方位压缩过程中,通过引入时域的高阶扰动因子去除多普勒参数的2阶及3阶方位空变性,然后通过方位频域的重采样处理去除多普勒参数的方位1阶空变性。所提方法能够有效校正距离徙动轨迹和方位聚焦参数的2维空变性,实现机动平台大斜SAR的大场景成像,仿真分析验证了所提方法的有效性。

关键词: SAR成像; 大斜视; 机动平台; Keystone变换; 扰动重采样

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)10-2485-08

DOI: 10.11999/JEIT190831

Maneuvering Platform High-squint SAR Imaging Method Based on Keystone Transform and Perturbation Resampling

LI Gen^① MA Yanheng^① HOU Jianqiang^① XU Gongguo^②

^①(Department of UAV Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China)

^②(Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University Shijiazhuang Campus, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The existence of acceleration and descent velocity makes the imaging parameters of high-squint SAR mounted on maneuvering platform have obvious two-dimensional spatial variability, which affects seriously the focus depth of the scene. To solve this problem, a maneuvering SAR imaging method based on Keystone transform and azimuth perturbation resampling is proposed. First of all, the range azimuth decoupling and the azimuth spectrum de Aliasing are realized by the range walk correction and de-acceleration processing. Then the spatial-variant range cell migration is corrected by the Keystone transform in the azimuth time domain; In the process of azimuth compression, the second- and third-order spatial variabilities of Doppler parameters are removed by introducing the high-order perturbation factor in the time domain, and then the first-order spatial variability of the Doppler parameters is removed by the azimuth resampling processing in the azimuth frequency domain. The proposed method can effectively correct the two-dimensional spatial variability of range cell migration trajectory and azimuth focus parameters, and realize the large scene imaging of high-squint maneuvering SAR. Simulation analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR imaging; High-squint; Maneuvering platforms; Keystone transform; Perturbation resampling

1 引言

机动平台大斜视SAR成像系统将大幅提升导弹、战机与无人机的战场侦察、精确打击与自身生存能力。曲线的运动轨迹使机动SAR斜距历程的方位平移不变性不再成立,加速度和下降速度的存在

使成像参数存在明显的距离和方位2维空变性,相关的成像技术已经成为研究热点^[1-4]。

在大加速度条件下,基于等效速度和等效斜视角的波数域成像方法^[5,6]近似误差较大,限制了场景的聚焦深度。相较而言,设计灵活的频域成像算法更适合大场景的机动平台大斜视SAR成像。在现有的频域成像算法中,部分算法以场景中心点为参考进行距离徙动校正^[3,7],残余的空变距离徙动将

严重影响场景边缘点的聚焦效果。扰动函数是一种有效的空变性校正方法,文献[8]通过引入时域扰动因子校正了距离弯曲因子的1阶方位空变性;文献[2]通过引入2维频域的距离扰动因子校正了距离弯曲因子的1阶和2阶空变性,然而扰动函数会引入附加的空变项,同时残存的空变线性距离走动依旧限制了场景的聚焦深度。文献[9]通过引入2阶时域扰动因子校正了线性距离走动的方位向1阶空变,但距离和方位耦合的空变线性距离走动无法校正。在方位压缩过程中,为去除多普勒参数的方位向空变,多数算法采用了频域相位滤波法(Frequency Domain Phase Filtering, FDPF)[2,7,8]。该方法仅能去除多普勒调频率的1阶和2阶方位空变性,残留的方位高阶空变性依旧限制了方位聚焦深度。方位重采样法也被多次用于校正多普勒参数的空变性,但其仅能校正多普勒参数的1阶方位空变性,多用于星载SAR的正侧视成像[10,11]。

为扩展机动平台大斜视SAR的聚焦深度,本文提出了一种基于Keystone变换和扰动重采样处理的SAR成像方法。机动SAR大斜视成像时,线性距离徙动为空变距离徙动的主要分量,采用方位时域的

Keystone变换校正空变的距离徙动。为进一步提高方位向的聚焦深度,提出了一种方位向扰动重采样的方法,该方法通过引入时域的高阶扰动因子去除多普勒参数的方位向2阶及3阶空变性,然后通过方位频域的重采样处理去除多普勒参数的方位1阶空变性。所提方法可有效消除大场景中空变的距离徙动轨迹和方位聚焦参数,实现统一的聚焦成像。

2 信号模型

机动平台大斜视SAR成像模型如图1所示, SAR平台沿着曲线ABD进行恒加速度机动。B点为孔径中心,定义该时刻为方位零时刻。 $O-XYZ$ 为3维笛卡尔坐标系,其中O点为B点在地面上的垂直投影点, X轴正方向为平台在方位零时刻的水平速度方向。平台在B点的高度为 h , 速度为 $\mathbf{v} = (v_x, 0, v_z)$, 加速度为 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ 。设成像场景中心点P为平台在B点时的波束中心照射点, 斜视角 θ_A 定义为方位零时刻波束中心照射方向BP与YOZ面夹角, 参考斜距 R_{ref} 为方位零时刻场景中心点的斜距|BP|。

在 t_n 时刻, 平台运动到C点, 成像区域中任意点Q点的坐标 $x_0(R_0, t_n)$ 和 $y_0(R_0, t_n)$ 满足式(1)的关系

$$\left. \begin{aligned} x_0(R_0, t_n) &= R_0 \sin \theta_A + v_x t_n + \frac{1}{2} a_x t_n^2 \\ y_0(R_0, t_n) &= \frac{1}{2} a_y t_n^2 + \sqrt{(R_0 \cos \theta_A)^2 - \left(h + v_z t_n + \frac{1}{2} a_z t_n^2\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 R_0 表示Q点的瞬时斜距|CQ|, Q在任意方位时刻 t_a 的瞬时斜距可表示为

$$R(t_a; R_0, t_n) = \sqrt{\left(x_0(R_0, t_n) - v_x t_a - \frac{1}{2} a_x t_a^2\right)^2 + \left(y_0(R_0, t_n) - \frac{1}{2} a_y t_a^2\right)^2 + \left(h + v_z t_a + \frac{1}{2} a_z t_a^2\right)^2} \quad (2)$$

4阶泰勒展开模型在机动SAR成像中被广泛使用[2,8,12,13], 为便于求解回波信号的2维频谱, 将式(2)进行如式(3)的4阶泰勒级数展开

$$R(t_a; R_0, t_n) \approx \sum_{i=0}^4 k_i(R_0; t_n) t_a^i \quad (3)$$

其中, $k_i(R_0; t_n)$ 表示第 i 阶泰勒级数展开系数。

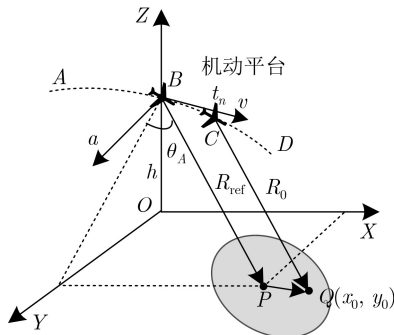


图1 机动平台大斜视SAR成像模型

3 基于Keystone变换的距离向处理

假设雷达发射信号为线性调频信号, 接收机收到的解调后的基带回波信号在距离频域可表示为

$$\begin{aligned} Ss(f_r, t_a; R_0, t_n) &= \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right) \\ &\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \left(\sum_{i=0}^4 k_i(R_0, t_n) t_a^i\right)\right) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 t_a 为方位时间, f_r 为距离频率, K_r 为距离调频率, f_c 为发射信号载频, c 为光速。对于机动平台大斜视SAR成像, 大斜视角的存在将使回波信号的距离-方位谱产生严重耦合, 而加速度的存在则会改变回波信号的方位调频率, 使多普勒带宽产生混叠或近0现象, 在机动SAR成像中通常需要去除加速度的影响[1,8,12]。构造场景中心点处的距离走动校正和去加速度函数为

$$H_1(f_r, t_a) = \exp \left(-j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \cdot (k_{10}t_a + k_{2a}t_a^2 + k_{3a}t_a^3 + k_{4a}t_a^4) \right) \quad (5)$$

其中 $k_{10} = k_1(R_{\text{ref}}, 0)$ 为场景中心点处的线性距离走动系数, k_{2a} , k_{3a} 和 k_{4a} 分别表示场景中心点处距离徙动系数 $k_2(R_{\text{ref}}, 0)$, $k_3(R_{\text{ref}}, 0)$ 和 $k_4(R_{\text{ref}}, 0)$ 中与加速度相关的分量。将式(4)乘以式(5), 可得距离方位解耦和去加速度处理后的回波信号为

$$S_s(f_r, t_a) = \exp \left(-j\pi \frac{f_r^2}{K_r} \right) \times \exp \left(-j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \cdot \left(k_0(R_0, t_n) + d_1(R_0, t_n)t_a + \sum_{i=2}^4 (k_i(R_0, t_n) - k_{ia})t_a^i \right) \right) \quad (6)$$

其中 $d_1(R_0, t_n) = k_1(R_0, t_n) - k_{10}$ 为空变线性距离走动, 是空变距离徙动的主要分量, 将通过Keystone变换的方法进行去除。将 $t_a = tf_c/(f_r + f_c)$ 代入式(6)进行Keystone变换, 其中 t 表示新的方位采样时间, 并将相位项展开至距离频率的2阶项得

$$S_{s_{\text{key}}}(f_r, t; R_0, t_n) = \exp \left(j \left(\sum_{i=0}^2 \phi_i(t; R_0, t_n) f_r^i \right) \right) \quad (7)$$

其中

$$R_0(R_f, t_n) = \frac{2k_{r-2}(t_n)R_{\text{ref}} - k_{r-1}(t_n) + \sqrt{k_{r-1}(t_n)^2 + 4k_{r-2}(t_n)(R_f - k_{r-0}(t_n))}}{2k_{r-2}(t_n)} \quad (11)$$

其中 $k_{r-i}(t_n)$ 表示 $k_0(R_0, t_n)$ 在 $R_0 = R_{\text{ref}}$ 处的第 i 阶泰勒级数展开系数。

距离徙动校正后, 基于距离向聚焦位置 R_f 表示的方位调制相位 $\phi_a(t; R_f, t_n)$ 表示为

$$\phi_a(t; R_f, t_n) = \phi_0(t; R_0(R_f, t_n), t_n) \quad (12)$$

式(11)中, $k_0(R_0, t_n)$ 在 $R_0 = R_{\text{ref}}$ 处进行了2阶泰勒级数展开, 在表1的参数下, $k_0(R_0, t_n)$ 的展开误差在 ϕ_a 中引入的非线性相位误差约为0.01 rad, 对方位压缩的影响可以忽略不计。

$$\left. \begin{aligned} \phi_0(t; R_0, t_n) &= k_0(R_0, t_n) + d_1(R_0, t_n)t \\ &+ \sum_{i=2}^4 (k_i(R_0, t_n) - k_{ia})t_a^i \\ \phi_1(t; R_0, t_n) &= -\frac{4\pi}{c} (k_0(R_0, t_n) \\ &- (k_2(R_0, t_n) - k_{2a})t^2 + 2(k_3(R_0, t_n) - k_{3a})t^3) \\ \phi_2(t; R_0, t_n) &= -\frac{\pi}{K_r} \\ &- \frac{4\pi((k_2(R_0, t_n) - k_{2a})t^2 + 3(k_3(R_0, t_n) - k_{3a})t^3)}{cf_c} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(7)中 ϕ_0 为方位调制项, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为距离徙动和距离压缩项。 ϕ_1 中 $k_0(R_0, t_n)$ 表示Keystone变换后点目标的距离向聚焦位置, 从 ϕ_1 中可以看出, Keystone变换后 ϕ_1 中的线性距离徙动项被完全去除, 可在方位时域构造如式(9)所示的一致距离徙动校正和距离压缩函数

$$H_2(f_r, t) = \exp \left(-j \left(\sum_{i=1}^2 \phi_i(t; R_{\text{ref}}, 0) f_r^i \right) \right) \quad (9)$$

将式(7)乘以式(9), 并进行距离向逆傅里叶变换, 可得距离徙动校正和距离压缩后的信号为

$$ss_{\text{key}}(t_r, t; R_0, t_n) = \text{sinc}(t_r - 2k_0(R_0, t_n)/c) \cdot \exp(j\phi_0(t; R_0, t_n)) \quad (10)$$

其中 t_r 表示距离时间。假设 R_f 为距离压缩后某一距离单元对应的斜距, 根据 $R_f = k_0(R_0, t_n)$, 可得距离向聚焦位置为 R_f 、方位位置为 t_n 的散射点对应的初始斜距 R_0 为

4 基于扰动重采样的方位压缩处理

4.1 方位向处理

为便于分析 $\phi_a(t; R_f, t_n)$ 的方位空变性, 将其在 $t = 0$ 处进行4阶泰勒级数展开, 得

$$\phi_a(t; R_f, t_n) = \sum_{i=0}^4 g_i(R_f, t_n)t^i \quad (13)$$

其中 $g_i(R_f, t_n)$ 表示第 i 阶泰勒级数展开系数。为分析 $g_i(R_f, t_n)$ 的高阶方位空变性, 将 $g_i(R_f, t_n)$ 在 $t_n = 0$ 处进行如式(14)所示的泰勒级数展开

表1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
载频	15 GHz	地面斜视角	60°
距离带宽	300 MHz	平台高度	4 km
合成孔径时间	3 s	中心斜距	12 km
脉冲宽度	5 μs	速度	(150, 0, -30) m/s
脉冲重复频率	1.5 kHz	加速度	(2.4, 0.8, -2.2) m/s ²

$$\left. \begin{aligned} g_1(R_f, t_n) &= g_{10} + g_{11}t_n + g_{12}t_n^2 + g_{13}t_n^3, \\ g_2(R_f, t_n) &= g_{20} + g_{21}t_n + g_{22}t_n^2 + g_{23}t_n^3, \\ g_3(R_f, t_n) &= g_{30} + g_{31}t_n + g_{32}t_n^2, \\ g_4(R_f, t_n) &= g_{40} + g_{41}t_n \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

采用级数反演法^[14]将式(13)变换到方位频域可得

$$\Phi_a(f_a; R_f, t_n) = \sum_{i=0}^4 \varphi_{ai}(R_f, t_n) f_a^i \quad (15)$$

其中 $\Phi_a(f_a; R_f, t_n)$ 表示方位频域调制相位, $\varphi_{ai}(R_f, t_n)$ 表示第*i*阶方位频率系数, 具体形式见文献^[14]。

为给方位频域聚焦参数的高阶方位空变校正提供足够的变标系数, 构造如式(16)所示高阶时域扰动函数

$$H_3(t; R_f) = \exp(j(p_1 t + (p_3 - g_{30})t^3 + (p_4 - g_{40})t^4 + p_5 t^5)) \quad (16)$$

其中 $p_1 = g_{10}$ 用于去除非空变的多普勒中心, p_3 , p_4 和 p_5 为待定的高阶时域扰动系数。

将式(10)乘以式(16), 然后采用级数反演法变换到方位频域, 保留至方位频率5阶项得

$$sS(t_r, f_a; R_f, t_n) = \text{sinc}(t_r - 2R_f/c) \cdot \exp\left(j \sum_{i=0}^5 \varphi_i(R_f, t_n) f_a^i\right) \quad (17)$$

令 $\varphi_{i_k}(R_f)$ 表示 $\varphi_i(R_f, t_n)$ 在 $t_n = 0$ 处的第*k*阶泰勒级数展开系数, 频域多普勒系数 $\varphi_i(R_f, t_n)$ 的1阶方位空变分量 $\varphi_{i_1}(R_f)t_n$ 可通过后续的方位重采样处理去除, 为实现扩展场景的机动平台大斜视SAR成像, 需借助待定的时域扰动系数 p_3 , p_4 和 p_5 去除 $\varphi_2(R_f, t_n)$ 的2阶和3阶方位空变分量以及 $\varphi_3(R_f, t_n)$ 的2阶方位空变分量, 即构造如式(18)的方程组

$$\begin{aligned} \varphi_{2_2}(R_f, p_3, p_4) &= 0, \varphi_{2_3}(R_f, p_3, p_4, p_5) \\ &= 0, \varphi_{3_2}(R_f, p_3, p_4, p_5) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

其中 p_3 , p_4 和 p_5 的值可通过求解式(18)获得。

扰动校正后, 可得一致的方位频域滤波相位为

$$H_4(f_a, R_f) = \exp\left(-j\pi \sum_{i=2}^5 \phi_{i_0}(R_f) f_a^i\right) \quad (19)$$

在进行高阶时域扰动和一致的方位频域相位滤波后, 残余的方位调制相位表示为

$$\Phi_{af_res}(f_a; R_f, t_n) = \sum_{i=1}^4 \varphi_{i_1}(R_f) t_n f_a^i \quad (20)$$

根据式(20), 构造如式(21)所示的方位重采样方程去除频域多普勒参数 $\varphi_i(R_f, t_n)$ 的1阶方位空变分量。

$$\sum_{i=1}^4 \varphi_{i_1}(R_f) t_n f_a^i = -2\pi t_n f_{a_new} \quad (21)$$

其中 f_{a_new} 表示新的方位频率。方位重采样后, 通过方位向逆傅里叶变换可得方位聚焦后的信号为

$$ss(t_r, t; R_f, t_n) = \text{sinc}(t_r - 2R_f/c) \cdot \text{sinc}(t - t_n + \text{offset}(R_f, t_n)) \quad (22)$$

其中 $\text{offset}(t_n)$ 表示方位向的聚焦偏移, 具体为 $\text{offset}(R_f, t_n) = (\varphi_{1_2}(R_f)t_n^2 + \varphi_{1_3}(R_f)t_n^3)/(2\pi)$, 可在几何畸变校正过程中去除。

最终, 所提算法的成像流程如图2所示。

由图2可知, 所提方法需要进行2次距离向FFT/IFFT运算, 2次方位向FFT/IFFT运算, 4次复数乘法运算以及2次方位向插值运算(1次时域的keystone变换, 1次频域的方位重采样)。通常情况下, 做*N*点FFT或IFFT运算需要 $5N\log_2 N$ 次浮点运算, 做*N*点复数乘法运算需要 $6N$ 次浮点运算, *N*点的插值运算需要 $2N(2N_{\text{ker}} - 1)$ 次浮点运算, N_{ker} 表示插值核的长度^[15]。假设回波数据在距离和方位向分别有 N_r 和 N_a 个采样点, 则所提方法的浮点运算量为

$$C = N_r N_a \times [10 \times \log_2 N_r + 10 \times \log_2 N_a + 24 + 4(2N_{\text{ker}} - 1)] \quad (23)$$

所提方法需要进行插值运算, 运算量与插值核的长度有关, 大于传统的无插值频域成像算法, 与波数域成像算法和基于方位重采样处理的频域成像算法运算量相当。

4.2 有效成像区域分析

残余空变距离徙动、SAR系统脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)和方位压缩时残余的非线性相位共同约束了算法的有效成像区

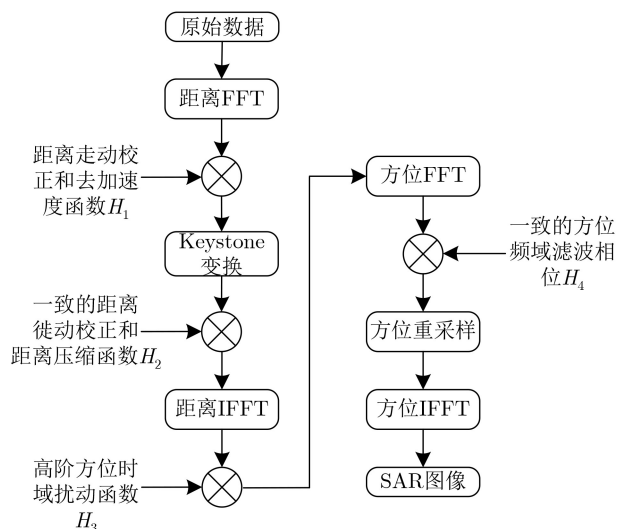


图2 成像算法流程

域。在距离徙动校正过程中,对距离徙动进行了线性近似,Keystone变换及一致的距离徙动校正后,残余的距离徙动主要为2阶空变距离弯曲($k_2(R_f, t_n) - k_{20})t^2$ 。在合成孔径时间 T 内,最大的残余距离徙动表示为

$$\text{MRRCM}(R_f, t_n) = (k_2(R_f, t_n) - k_{20})T^2/4 \quad (24)$$

定义 Δr 为SAR系统的距离分辨率, SAR成像的距离徙动校正通常要求残余距离徙动不超过 $\Delta r/4$, 因此, 残余距离徙动对成像区域的约束为

$$\text{MRRCM}(R_f, t_n) \leq \Delta r/4 \quad (25)$$

距离徙动校正后, 目标回波信号的多普勒中心和方位带宽分别表示为 $f_{ac}(R_f, t_n) = g_1(R_f, t_n)/2\pi$ 和 $B_a(R_f, t_n) = |g_2(R_f, t_n)T/\pi|$ 。Keystone变换要求成像区域内所有散射点的方位频域支撑区不重叠, 因此SAR系统的PRF对成像区域的约束为

$$|f_{ac}(R_f, t_n) \pm B_a(R_f, t_n)/2| \leq \text{PRF}/2 \quad (26)$$

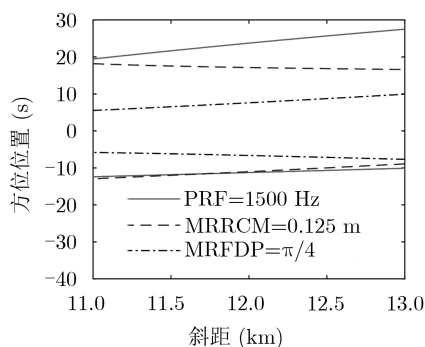
在方位压缩过程中, 残余的非线性相位可以表示为

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{pres}}(f_a; R_f, t_n) = & \sum_{i=2}^4 \varphi_i(R_f, t_n) f_a^i \\ & - \sum_{i=2}^4 \varphi_{i-1}(R_f, t_n) t_n f_a^i \\ & - \sum_{i=2}^3 \varphi_{i-2}(R_f) t_n^2 f_a^i \\ & - \varphi_{2-3}(R_f) t_n^3 f_a^2 \end{aligned} \quad (27)$$

在散射点的频域支撑区内, 扰动重采样后, 最大残余频域相位可近似表示为

$$\begin{aligned} \text{MRFDP}(R_f, t_n) \approx & |\Phi_{\text{pres}}(f_{ac}(R_f, t_n) + B_a(R_f, t_n)/2; \\ & R_f, t_n) - \Phi_{\text{pres}}(f_{ac}(R_f, t_n) \\ & - B_a(R_f, t_n)/2; R_f, t_n)| \end{aligned} \quad (28)$$

SAR的方位向聚焦通常要求最大误差不超过 $\pi/4$, 因此, 所提方位聚焦方法对成像区域的约束为



(a) 聚焦平面上的有效成像区域分析

$$\text{MRFDP}(R_f, t_n) \leq \pi/4 \quad (29)$$

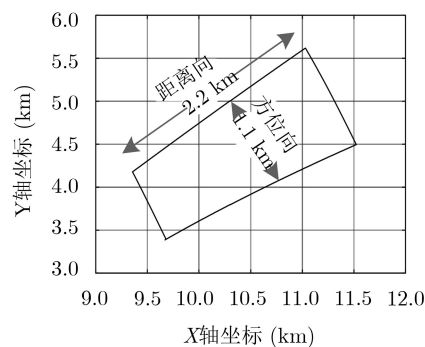
式(25)、式(26)和式(29)共同约束了所提方法的有效成像区域, 在表1的参数下, 仿真分析了PRF、MRRCM和MRFDP对聚焦平面成像区域的约束, 其中方位位置用 t_n 表示, 结果如图3(a)所示。可以看出, 残余的频域相位误差决定了场景方位向的聚焦深度; 根据聚焦平面和地平面的几何校正关系, 图3(b)给出了所提方法在地平面上的有效聚焦区域, 该区域由方位压缩时残余的频域相位误差决定, 在表1的参数下, 有效成像区域在方位向上的幅宽约为1.1 km, 在距离向上的幅宽约为2.2 km, 距离幅宽主要取决于仿真选取的距离块长度。

5 仿真结果及分析

本节通过仿真分析来验证所提算法的有效性, 仿真采用表1中的参数, 其中距离分辨率为0.5 m。采用文献[16]方法计算的场景中心点处的方位分辨率为0.65 m。仿真场景如图4所示, 在地平面 XOY 上沿方位0时刻的雷达视线投影方向及其垂向布下一个 3×3 的点阵, 点阵位于有效成像区域内, 距离向和方位向长度均为1 km。选取图4中标号为1~3的3个点目标进行仿真分析, 其中2号目标为场景中心点, 1号和3号目标为具有较强空变性的点目标。

扰动校正^[2,8,13]是一种有效的空变距离徙动校正方法, 为验证Keystone变换方法校正空变距离徙动的有效性, 选择文献[13]中的频域扰动校正方法的作为参考方法进行对比分析。频域扰动校正方法和本文方法的距离徙动校正结果分别如图5(a)和5(b)所示。从图5(a)中可以看出, 由于频域扰动校正方法忽略了空变线性距离走动对距离徙动校正的影响, 图5(a)中1号和3号点目标残留的空变距离徙动依旧跨越了多个距离采样单元, 而从图5(b)中可以看出, Keystone变换方法可以有效校正以线性分量为主的空间距离徙动。

FDPF方法是一种有效的多普勒参数空变校正



(b) 地平面上的有效成像区域

图3 有效成像区域分析

方法,被多次用于机动平台大斜视SAR的方位压缩处理^[2,8,12,13]。为验证所提扰动重采样方法进行高阶频域聚焦参数空变校正的有效性,在采用Keystone变换方法进行空变距离徙动校正的基础上,分别选用FDPF方法^[13]和扰动重采样方法对点目标进行方位聚焦处理。

图6(a)和6(b)分别给出了两种方法下点目标方位向剖面图,由于FDPF方法仅能校正多普勒调频率的1阶和2阶空变性,然而机动SAR大斜视成像时,场景边缘点目标成像参数空变强烈,多普勒调频率的3阶方位空变性以及高阶多普勒参数的空变性均无法忽略,因此在图6(a1)和图6(a3)中,残留的多普勒参数高阶空变分量使FDPF方法聚焦后的

点目标存在明显的方位向散焦现象。与FDPF方法相比,扰动重采样方法可以校正更高阶的多普勒参数空变性。从图6(b)中可以看出,由于同时校正了2阶多普勒参数的1~3阶方位空变性,3阶多普勒参数的1阶和2阶方位空变性,以及4阶多普勒参数的1阶方位空变性,本文所提扰动重采样方法具有更好的方位向聚焦效果。

为进一步量化分析方位向聚焦效果,表2给出了图6中方位向剖面图的峰值旁瓣比(Peak to Side Lobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integral Side Lobe Ratio, ISLR)以及主瓣宽度(Mainlobe Width, MW)等测量指标的量化分析结果,其中MW的单位为方位采样单元。可以看出,对于空变点目标,所提方法的测量指标与理论值 $PSLR=-13.26$ dB, $ISLR=-9.8$ dB, $MW=15.60$ 基本吻合,而FDPF方法的测量指标相比理论值有较大偏差。

6 结束语

本文研究了机动平台大斜视SAR成像中的2维空变校正问题,提出了一种基于Keystone变换和扰动重采样的成像方法。其中Keystone变换能够有效校正包含距离-方位耦合空变在内的复杂空变距离徙动,扰动重采样的方法,实现了多普勒调频率的1~3阶方位空变性、3阶多普勒参数的1阶和2阶方

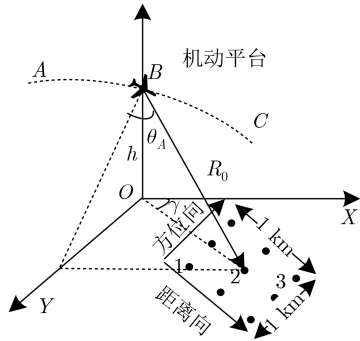


图4 机动SAR成像目标分布示意图

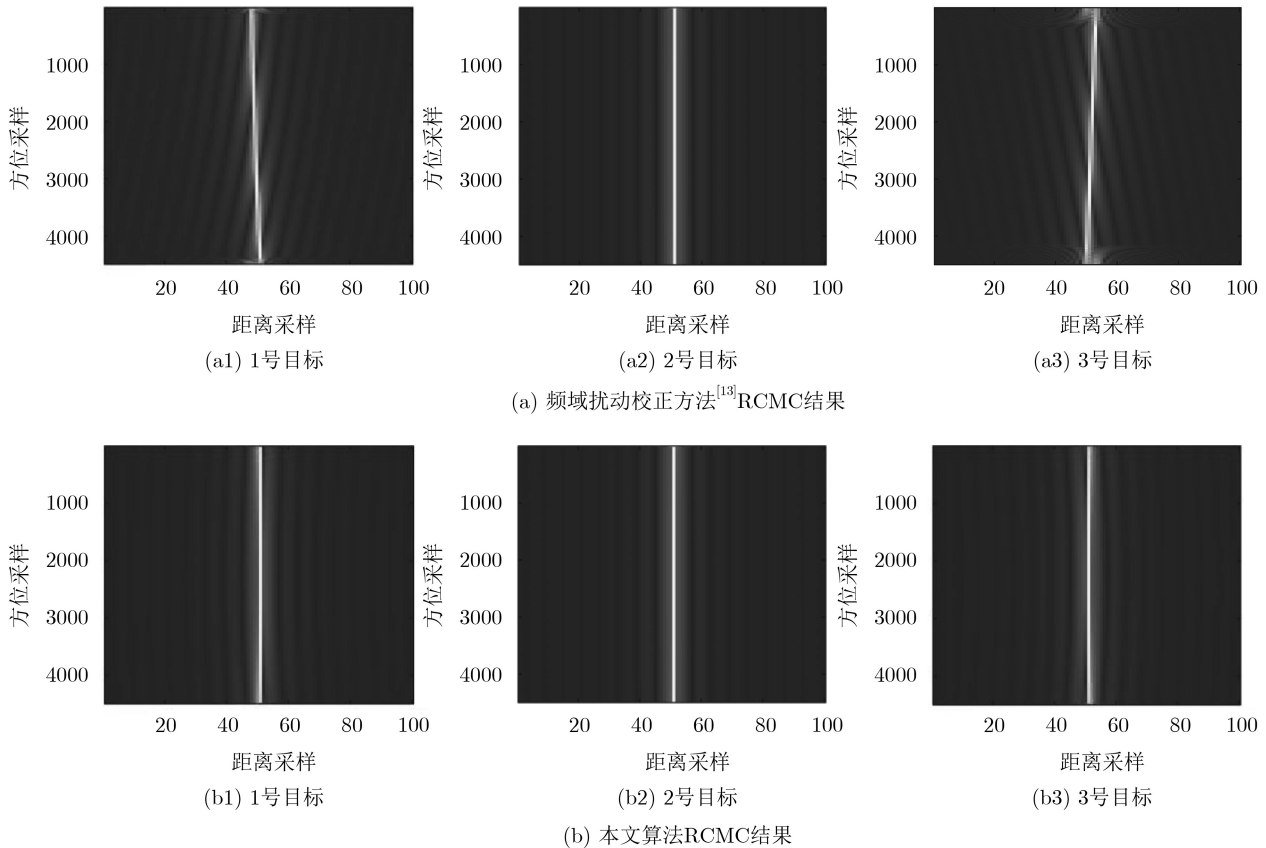


图5 空变距离徙动校正结果

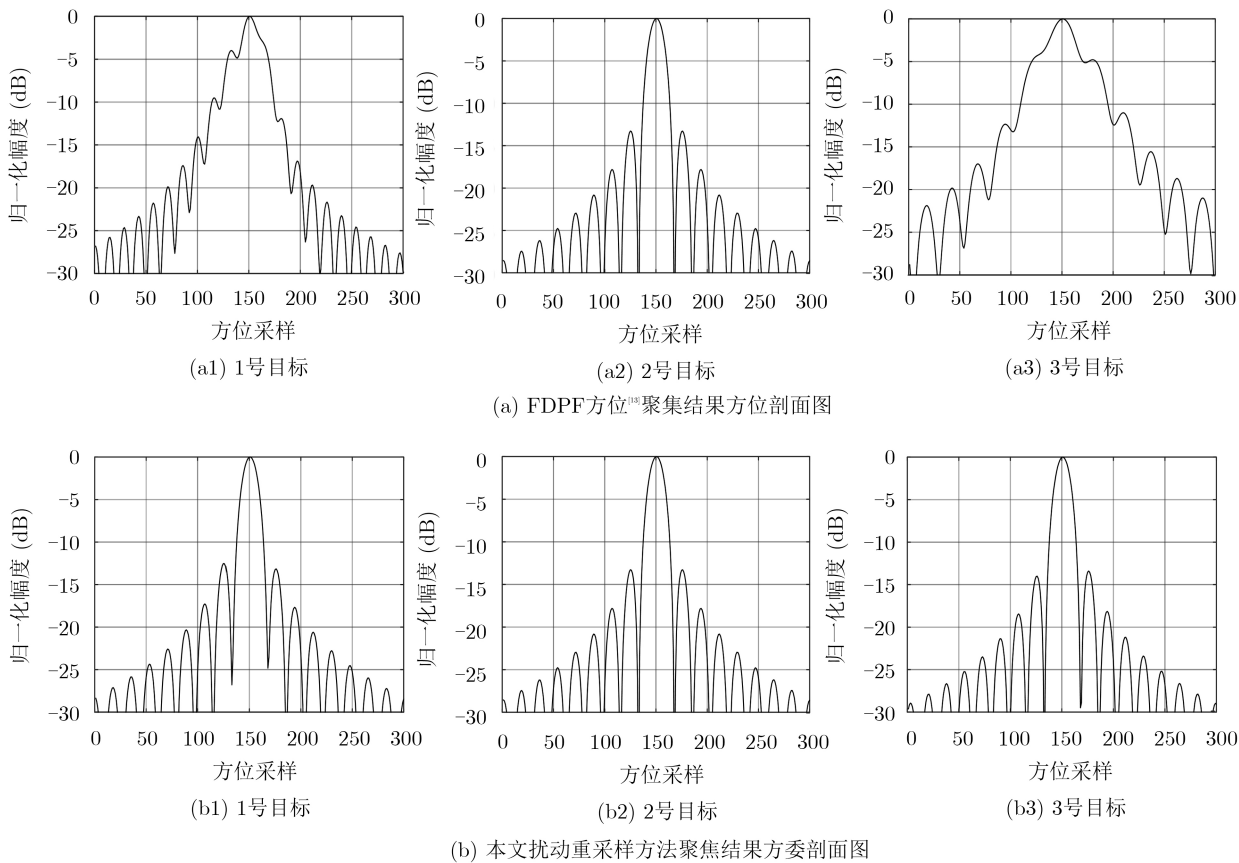


图 6 点目标聚焦结果方位剖面图

表 2 点目标方位向测量指标

测量指标	FDPF方法 ^[13]			本文扰动重采样方法		
	点1	点2	点3	点1	点2	点3
PSLR(dB)	-3.98	-13.26	-4.78	-12.68	-13.27	-13.39
ISLR(dB)	-7.11	-9.83	-6.78	-9.37	-9.81	-10.28
MW	20.67	15.60	28.35	15.62	15.61	15.62

位空变性以及4阶多普勒参数的1阶方位空变性的同时校正，有效地提高了场景边缘点的聚焦质量，仿真结果验证了所提成像方法的有效性。

参 考 文 献

[1] ZENG Tao, LI Yinghe, DING Zegang, *et al.* Subaperture approach based on azimuth-dependent range cell migration correction and azimuth focusing parameter equalization for maneuvering high-squint-mode SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6718–6734. doi: [10.1109/TGRS.2015.2447393](#).

[2] DANG Yanfeng, LIANG Yi, BIE Bowen, *et al.* A range perturbation approach for correcting spatially variant range envelope in diving highly squinted SAR with nonlinear trajectory[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(6): 858–862. doi: [10.1109/LGRS.2018.2812158](#).

[3] LIAO Yi, ZHOU Song, and YANG Lei. Focusing of SAR

with curved trajectory based on improved hyperbolic range equation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(3): 454–458. doi: [10.1109/LGRS.2018.2794471](#).

[4] 李宁, 别博文, 邢孟道, 等. 基于多普勒重采样的恒加速度大斜视SAR成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(12): 2873–2880. doi: [10.11999/JEIT180953](#).

LI Ning, BIE Bowen, XING Mengdao, *et al.* A doppler resampling based imaging algorithm for high squint SAR with constant acceleration[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2873–2880. doi: [10.11999/JEIT180953](#).

[5] LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* An improved range model and Omega-k-based imaging algorithm for high-squint SAR with curved trajectory and constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(5): 656–660. doi: [10.1109/LGRS.2016.2533631](#).

- [6] 邓欢, 李亚超, 梅海文, 等. 弹载曲线轨迹双基SAR反向滤波PFA成像与图像畸变校正算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2638–2644. doi: [10.11999/JEIT170994](https://doi.org/10.11999/JEIT170994).
DENG Huan, LI Yachao, MEI Haiwen, *et al.* New back-filtering PFA imaging algorithm and distortion correction method for missile-borne bistatic SAR with curved track[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2638–2644. doi: [10.11999/JEIT170994](https://doi.org/10.11999/JEIT170994).
- [7] 江淮, 赵惠昌, 汉敏, 等. 基于变量解耦的俯冲加速段弹载SAR大场景成像算法[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 078403. doi: [10.7498/aps.63.078403](https://doi.org/10.7498/aps.63.078403).
JIANG Huai, ZHAO Huichang, HAN Min, *et al.* An imaging algorithm for missile-borne SAR with downward movement based on variable decoupling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(7): 078403. doi: [10.7498/aps.63.078403](https://doi.org/10.7498/aps.63.078403).
- [8] LI Zhenyu, XING Mengdao, LIANG Yi, *et al.* A frequency-domain imaging algorithm for highly squinted SAR mounted on maneuvering platforms with nonlinear trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4023–4038. doi: [10.1109/TGRS.2016.2535391](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2535391).
- [9] 江淮, 陈思, 赵惠昌, 等. 一种弹载SAR子孔径成像算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2526–2530. doi: [10.11999/JEIT161337](https://doi.org/10.11999/JEIT161337).
JIANG Huai, CHEN Si, ZHAO Huichang, *et al.* Subaperture imaging algorithm for missile-borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2526–2530. doi: [10.11999/JEIT161337](https://doi.org/10.11999/JEIT161337).
- [10] 刘文康, 景国彬, 孙光才, 等. 基于两步方位重采样的中轨SAR聚焦方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 136–142. doi: [10.11999/JEIT180238](https://doi.org/10.11999/JEIT180238).
LIU Wenkang, JING Guobin, SUN Guangcai, *et al.* Medium-earth-orbit SAR data focusing method based on two-step azimuth resampling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(1): 136–142. doi: [10.11999/JEIT180238](https://doi.org/10.11999/JEIT180238).
- [11] TANG Shiyang, LIN Chunhui, ZHOU Yu, *et al.* Processing of long integration time spaceborne SAR data with curved orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 888–904. doi: [10.1109/TGRS.2017.2756109](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2756109).
- [12] 别博文, 梁毅, 党彦锋, 等. 曲线轨迹SAR大斜视子孔径成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(3): 500–505. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07).
BIE Bowen, LIANG Yi, DANG Yanfeng, *et al.* Sub-aperture imaging algorithm for high squint SAR with curvilinear flight tracks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(3): 500–505. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07).
- [13] 党彦锋, 梁毅, 别博文, 等. 俯冲段大斜视SAR子孔径成像二维空变校正方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2621–2629. doi: [10.11999/JEIT180021](https://doi.org/10.11999/JEIT180021).
DANG Yanfeng, LIANG Yi, BIE Bowen, *et al.* Two-dimension space-variance correction approach for diving highly squinted SAR imaging with sub-aperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2621–2629. doi: [10.11999/JEIT180021](https://doi.org/10.11999/JEIT180021).
- [14] NEO Y L, WONG F, and CUMMING I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93–96. doi: [10.1109/LGRS.2006.885862](https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.885862).
- [15] LI Dong, LIN Huan, LIU Hongqing, *et al.* Focus improvement for high-resolution highly squinted SAR imaging based on 2-D spatial-variant linear and quadratic RCMs correction and azimuth-dependent doppler equalization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1): 168–183. doi: [10.1109/jstars.2016.2569561](https://doi.org/10.1109/jstars.2016.2569561).
- [16] TANG Shiyang, ZHANG Linrang, GUO Ping, *et al.* Processing of monostatic SAR data with general configurations[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6529–6546. doi: [10.1109/TGRS.2015.2443835](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2443835).
- 李 根: 男, 1991年生, 博士生, 主要从事机动平台大斜视SAR成像和压缩感知雷达成像研究.
马彦恒: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 主要从事机动SAR成像、低小慢目标探测等方向的研究.
侯建强: 男, 1991年生, 博士生, 主要从事曲线SAR 3维成像研究.
徐公国: 男, 1990年生, 博士生, 主要从事雷达信号处理与传感器融合研究.

责任编辑: 余 蓉