

基于子孔径Keystone变换的曲线轨迹大斜视SAR回波模拟

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: 大机动条件下的曲线轨迹大斜视SAR系统传递函数具有复杂的多维空变性, 现有的高效频域回波模拟算法均难以实现扩展场景的高精度回波模拟。为此, 该文提出一种基于子孔径Keystone变换的机动SAR回波模拟方法。该方法根据距离徙动校正后的距离压缩函数对场景的距离压缩回波进行快速模拟, 然后通过高精度的距离向逆处理实现扩展场景的回波模拟。为减少残余距离徙动对回波模拟精度的影响, 距离向处理过程中采用子孔径Keystone变换的方法实现空变距离徙动的精确校正。理论分析和仿真结果表明, 所提方法能够快速高精度地模拟扩展场景的机动平台大斜视SAR原始回波数据。

关键词: SAR; 回波模拟; 曲线轨迹; 子孔径Keystone变换

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)09-2261-08

DOI: 10.11999/JEIT190674

Sub-aperture Keystone Transform Based Echo Simulation Method for High-squint SAR with a Curve Trajectory

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 system transfer function of high-squint SAR system with curved trajectory has complex multi-dimensional spatial variability. The existing efficient frequency-domain echo simulation algorithms are difficult to achieve high-precision echo simulation of extended scenes. Therefore, a fast echo simulation method based on sub-aperture Keystone transform is proposed for maneuvering SAR. Based on the time-domain range compression function after range cell migration correction, the method calculates efficiently the range compression echo of scene, and then realizes the echo simulation of extended scene by high precision range inverse processing. In order to reduce the influence of residual range cell migration on the accuracy of echo simulation, the method of the Keystone transform of sub-aperture is used in range processing to achieve accurate correction of space-variant range cell migration in extended scenes. The theoretical analysis and simulation results show that the proposed method can quickly and accurately simulate the original echo data of extended scenes for high-squint SAR mounted on a maneuvering platform.

Key words: SAR; Echo simulation; Curve trajectory; Sub-aperture Keystone transform

1 引言

曲线轨迹大斜视SAR系统能显著提升导弹、战机与无人机的战场监视、精确打击与自身生存能力。基于回波数据的运动补偿是曲线SAR成像过程中必不可少的环节。在运动误差条件下, 为有效验证成像算法的性能, 需要基于已知的真实场景

SAR图像来反演原始回波数据。研究含运动误差的曲线轨迹大斜视SAR快速回波模拟方法, 对相关成像算法的验证和成像系统的设计具有重要意义。

通常, SAR回波模拟方法主要分为时域方法、2维快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)方法、1维FFT方法和成像逆处理方法4类。时域方法逐脉冲、逐散射点地生成回波数据, 能够应用于任意轨迹和任意工作模式, 具有极高的模拟精度, 但巨大的运算量使其仅适用于少数散射点的回波模

拟。2维FFT方法^[1,2]最初由Franceschetti教授提出,具有极高的运算效率,但不便于添加运动误差,且不能用于传递函数具有距离和方位2维空变的情形。Deng等人^[8]提出一种适用于机动SAR回波模拟的2维FFT方法,该方法对斜距历程进行了2阶近似且忽略了SAR传递函数的2维空变性,仅能用于小场景的回波模拟。在此基础上,刘昕等人^[4]对机动SAR传递函数的2维频域进行了距离-方位解耦,模拟了回波的距离向空变,但仅能用于小斜视角模式。1维FFT方法采用沿距离向积分的方法获取系统传递函数^[5,6],更便于添加运动误差,其运算量介于时域方法和2维频域方法之间。文献^[5,7]通过沿距离向积分计算系统传递函数的2维频谱,但仅能模拟回波的距离向空变。文献^[6]提出了一种能模拟传递函数距离和方位向2维空变的1维FFT方法,但算法推导中进行了近似处理,仅能用于水平匀速运动的SAR成像系统。成像逆处理方法^[8,9]通过成像算法的逆运算来模拟回波数据,其运算效率取决于所采用的成像算法,回波模拟精度取决于成像算法的精度。尽管现有的机动SAR大斜视频域^[10-12]和波数域算法^[13,14]具有较高的运算效率,但均存在聚焦深度有限以及成像结果需要进行插值校正的问题。

轨迹大幅度弯曲以及系统传递函数的复杂空变性,使以上算法均无法有效用于大机动条件下含运动误差的曲线轨迹SAR回波模拟,为此本文提出了一种基于子孔径Keystone变换的回波模拟方法。该方法通过计算距离徙动校正后的距离压缩包络函数,实现对距离压缩回波的高精度模拟,并采用距离向逆处理的方法获得原始回波数据。在距离向处理中,采用子孔径Keystone变换的方法去除空变的距离徙动,使该方法能用于扩展场景的回波模拟。所提方法具有和1维FFT方法相近的运算效率,但更便于添加运动误差以及模拟回波的复杂空变性。

2 算法的基本原理

2.1 算法的加速原理

考虑SAR的发射信号为线性调频信号,接收解调后的回波模型可表示为

$$s_0(t_r, t_a) = A_0 w_r(t_r - 2R(t_a)/c) w_a(t_a) \cdot \exp(-j4\pi f_c R(t_a)/c) \cdot \exp(jK_r \pi (t_r - 2R(t_a)/c)^2) \quad (1)$$

其中 t_r 表示距离采样时间, t_a 表示离散的方位采样时间, A_0 表示点目标的复散射信息, $w_r(\cdot)$ 表示矩形窗距离包络, $w_a(\cdot)$ 表示方位包络, f_c 为发射信号载频, $R(t_a)$ 表示点目标的瞬时斜距, K_r 表示距离

调频率,第1个指数项为斜距相位信息,第2个指数项为脉冲相位信息。

距离徙动校正和距离压缩后的回波信号可以表示为

$$s_{rc}(t_r, t_a) = A_0 p_r(t_r - 2R_f/c) w_a(t_a) \cdot \exp(-j4\pi f_c R(t_a)/c) \quad (2)$$

其中 $p_r(t_r - 2R_f/c)$ 为距离压缩包络,表示为

$$p_r(t_r - 2R_f/c) = \sqrt{|K_r|} T_p \text{sinc}(K_r T_p (t_r - 2R_f/c)) \quad (3)$$

其中 T_p 表示信号的时域脉冲宽度, $\sqrt{|K_r|} T_p$ 表示信号频域脉冲压缩增益, R_f 表示散射点的距离向聚焦位置。

假设雷达接收机在方位向共采集 M 个距离脉冲,每个距离脉冲内采集 N_p 个点。由式(1)可知,时域方法模拟单个散射点的原始回波需要计算 MN_p 次复指数相位和 MN_p 次复数乘法。距离压缩后,脉冲信号由线性调频信号变为能量高度集中的sinc信号,仅需计算sinc信号峰值点附近的少数 N_s 个采样点的幅度信息,通过逆距离压缩运算即可恢复原始线性调频信号。

2.2 回波模型和距离向处理

如图1所示,机动平台在3维空间沿曲线 ABC 机动,SAR工作在聚束模式。 O 点为曲线轨迹中心点 B 在地面上的垂直投影点,以 O 点为原点建立 $O-XYZ$ 空间直角坐标系,其中 X 的正方向为平台在 B 点的水平速度方向。 P 点为波束中心照射点,坐标为 (x_c, y_c, z_c) 。斜视角 θ_A 定义为波束中心照射方向 BP 与 YOZ 平面的夹角。为便于进行空变距离徙动的校正,将曲线轨迹划分为若干个子孔径,下面主要说明单个子孔径的回波模拟方法。

定义 t_a 为子孔径方位时间, $t_a = 0$ 为子孔径中心点,平台在 $O-XYZ$ 坐标系中的曲线运动轨迹为 $[X_p(t_a) \ Y_p(t_a) \ Z_p(t_a)]$,将其在3维空间进行如式(4)的分解

$$\left. \begin{aligned} X_p(t_a) &= f_x(t_a) + E_x(t_a) \\ Y_p(t_a) &= f_y(t_a) + E_y(t_a) \\ Z_p(t_a) &= f_z(t_a) + E_z(t_a) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

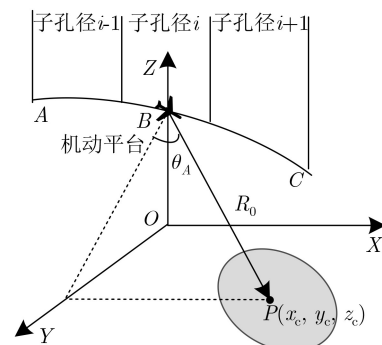


图1 曲线轨迹SAR成像几何模型

其中 $[f_x(t_a) \ f_y(t_a) \ f_z(t_a)]$ 为曲线轨迹在3维空间的 n 阶多项式拟合分量, $[E_x(t_a) \ E_y(t_a) \ E_z(t_a)]$ 为3维空间的多项式拟合误差。

成像场景中任意点目标 $Q(x, y, z)$ 的瞬时斜距为

$$R(t_a; x, y, z) = \sqrt{(X_p(t_a) - x)^2 + (Y_p(t_a) - y)^2 + (Z_p(t_a) - z)^2} \quad (5)$$

将式(5)作如式(6)的分解

$$R_0(t_a; x, y, z) = R_p(t_a; x, y, z) + R_e(t_a; x, y, z) \quad (6)$$

其中 $R_p(t_a)$ 为由多项式表示的斜距分量, 表示为

$$R_p(t_a; x, y, z) = \sqrt{(f_x(t_a) - x)^2 + (f_y(t_a) - y)^2 + (f_z(t_a) - z)^2} \quad (7)$$

$R_e(t_a)$ 为由拟合误差表示的斜距分量, 表示为

$$R_e(t_a; x, y, z) = R(t_a; x, y, z) - R_p(t_a; x, y, z) \quad (8)$$

通常情况下, 在子孔径时间内对曲线轨迹进行高阶多项式拟合后, 残余的拟合误差分量 $R_e(t_a)$ 非常小, 其空变性对距离徙动校的影响可以忽略。以波束中心照射点 (x_c, y_c, z_c) 为参考计算运动误差分量, 式(6)改写为

$$R_1(t_a; x, y, z) = R_p(t_a; x, y, z) + R_e(t_a; x_c, y_c, z_c) \quad (9)$$

为便于分析空变的距离徙动分量, 将 $R_p(t_a)$ 在 $t_a = 0$ 处进行 n 阶泰勒级数展开, 得

$$R_1(t_a; x, y, z) = k_0(x, y, z) + \sum_{i=1}^n k_i(x, y, z) t_a^i + R_e(t_a; x_c, y_c, z_c) \quad (10)$$

其中 $k_i(x, y, z)$ 为第 i 阶泰勒级数展开系数。首先, 以中心点 (x_c, y_c, z_c) 为参考, 在距离频域-方位时域构造一致的距离徙动校正和距离压缩函数为

$$H_1 = \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right) \cdot \exp\left(j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} (R_1(t_a; x_c, y_c, z_c) - R_{\text{ref}})\right) \quad (11)$$

其中 f_r 表示距离频率, $R_{\text{ref}} = k_0(x_c, y_c, z_c)$, 一致校正后的距离频域-方位时域回波信号为

$$\text{Ss}(f_r, t_a; x, y, z) = W_r(f_r) w_a(t_a) \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \left(k_0(x, y, z) + \sum_{i=1}^n d_i(x, y, z) t_a^i\right)\right) \quad (12)$$

一致的距离徙动校正和距离压缩

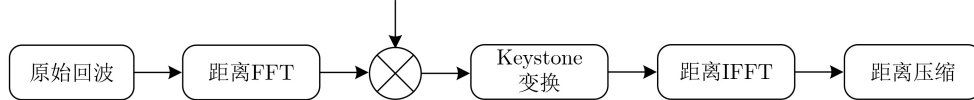


图2 距离向处理流程

其中 $W_r(\cdot)$ 为距离窗函数的频域形式, $d_i(x, y, z)$ 为第 i 阶残余空变距离徙动, 表示为

$$d_i(x, y, z) = k_i(x, y, z) - k_i(x_c, y_c, z_c) \quad (13)$$

由于子孔径的合成孔径时间较短, 线性空变分量 $d_1(x, y, z)$ 为残余空变距离徙动的主要成分, 而方位时间上的Keystone变换, 即 $t_a = f_c/(f_r + f_c)t$, 可以有效去除这种空变的线性分量。对式(12)进行Keystone变换, 并将相位项在 $f_r = 0$ 处进行2阶泰勒级数展开得

$$\text{Ss}(f_r, t; x, y, z) = W_r(f_r) w_a(t_a) \exp\left(j \left(\sum_{i=0}^2 \phi_i(t; x, y, z) f_r^i\right)\right) \quad (14)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \phi_0(t; x, y, z) &= -\frac{4\pi f_c}{c} (R_0(t; x, y, z) - (R_1(t; x_c, y_c, z_c) - R_{\text{ref}})) \\ \phi_1(t; x, y, z) &= -\frac{4\pi}{c} (k_0(x, y, z) - d_2(x, y, z) t^2) \\ \phi_2(t; x, y, z) &= -\frac{4\pi}{c f_c} d_2(x, y, z) t^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式(15)中, ϕ_0 为由 $R_0(t; x, y, z)$ 表示的精确方位调制相位; ϕ_1 为距离徙动项, 其中 $k_0(x, y, z)$ 表示目标的距离向聚焦位置, $d_2(x, y, z) t^2$ 为残余的空变距离弯曲; ϕ_2 为Keystone变换引入的微弱附加空变距离调频率, 对距离压缩的影响可忽略不计。最终, 整个距离向的处理流程如图2所示。

2.3 快速的回波模拟方法

对于成像场景中坐标为 (x, y, z) 的散射点, 首先计算其在子孔径中的距离向聚焦位置 $R_f = k_0(x, y, z)$, 并根据式(2)计算其距离压缩回波, 具体为

$$s_{\text{rc}}(t_{r1}, t; x, y, z) = A_0 p_r(t_{r1} - 2R_f/c) w_a(t) \cdot \exp(j\phi_0(t; x, y, z)) \quad (16)$$

t_{r1} 的取值仅为离散距离采样时间序列 t_r 中位于 $2R_f/c$ 附近的 N_s 个采样点。在距离向逆处理中, 可采用逆离散傅里叶变换(Inverse DFT, IDFT)的方法来实现逆Keystone变换。得到所有散射点的距离压缩回波 $\mathbf{S}_{\text{rc}}$ 后, 通过式(17)进行距离向逆处理得到原始回波 $\mathbf{S}_0$

$$\mathbf{S}_0 = F_r^{-1} (C_{\text{za}} (F_a (F_r (\mathbf{S}_{\text{rc}}))) \odot \mathbf{H}_1^*) \quad (17)$$

其中 F_r 表示距离FFT, F_r^{-1} 表示距离逆快速傅里叶变换(Inverse FFT, IFFT), F_a 表示方位FFT, C_{za} 表示用于实现方位IDFT的线性调频Z变换(Chirp Z Transform, CZT), H_1^* 表示由滤波函数 H_1 构成的滤波矩阵 H_1 的共轭矩阵, $\odot$ 表示矩阵点乘运算。

空变距离弯曲影响回波模拟精度, 通过控制场景的最大空变距离弯曲 $\beta_{\max}$ 可以实现对子孔径的合理划分和回波模拟精度的控制。假设子孔径的长度为 T_{sub} , 散射点 (x, y, z) 的最大空变距离弯曲 β 可表示为 $\beta = d_2(x, y, z) T_{\text{sub}}^2 / 4$, 使场景中所有散射点最大空变距离弯曲不超过 $\beta_{\max}$, 则满足

$$d_2(x_q, y_q, z_q) T_{\text{sub}}^2 / 4 \leq \beta_{\max} \quad (18)$$

其中 (x_q, y_q, z_q) 为任一场景边界点的坐标。满足式(18)的最大子孔径长度为 $T_{\text{sub}} = \sqrt{4\beta_{\max}/d_{2_max}}$, 其中 d_{2_max} 表示所有场景边界点具有的最大空变距离弯曲系数。假设曲线轨迹总合成孔径时间为 T , 子孔径划分的数量为 N_{sub} , 则

$$N_{\text{sub}} = \begin{cases} 3, & [T/T_{\text{sub}}] \leq 3 \\ [T/T_{\text{sub}}], & [T/T_{\text{sub}}] > 3 \end{cases} \quad (19)$$

其中 $[\cdot]$ 表示对“.”向上取整, $\beta_{\max}$ 对回波模拟精度的影响以及式(19)中子孔径划分的理论依据在下一节进行分析。最终, 曲线轨迹大斜视SAR的回波模拟流程如图3所示, 具体的操作步骤为:

(1) 确定距离压缩信号的时域窗长 N_s , 子孔径允许的最大空变距离弯曲 $\beta_{\max}$, 全孔径长度 T , 成

像区域中散射点的复散射系数 $A_0(x, y, z)$, 曲线轨迹的空间3维坐标 $[X_p(t_a) \ Y_p(t_a) \ Z_p(t_a)]$ 。

(2) 对曲线轨迹进行 n 阶多项式拟合, 根据式(19)计算子孔径数量 N_{sub} , 进行等长度子孔径划分。

(3) 根据式(16)计算所有散射点的距离压缩回波并进行叠加, 得到子孔径的距离压缩回波 S_{rc} , 然后根据式(17)得到子孔径的原始回波 S_0 。

(4) 重复步骤(3)得到所有子孔径回波, 将其在方位时间上进行拼接得到完整曲线轨迹的原始回波。

3 算法性能分析

为衡量SAR回波的模拟精度, 本节以峰值幅度(Peak Amplitude, PA)、主瓣宽度(Mainlobe Width, MW)、峰值旁瓣比(Peak Side lobe Ratio, PSLR)和积分旁瓣比(Integral Side Lobe Ratio, ISLR)等测量指标值作为评价标准, 分析距离压缩窗长和空变距离弯曲对距离和方位向测量指标的影响。

3.1 距离压缩窗长 N_s 对距离向聚焦的影响

定义 α 为距离窗长因子, 表示距离压缩窗长为 α 倍的距离副瓣零点宽度, 距离向过采样因子为 γ 。由式(17)可知, 距离向逆处理是一个仅包含FFT运算和矩阵点阵运算的可逆线性运算, 距离压缩信号的截取只会造成高阶副瓣的丢失, 而对位于距离压缩窗长内的主瓣和副瓣的幅度和相位均没有影响。 α 的取值对距离向ISLR指标的影响如图4所示, 随着 α 的增加, ISLR逐渐接近理论值-9.80 dB,

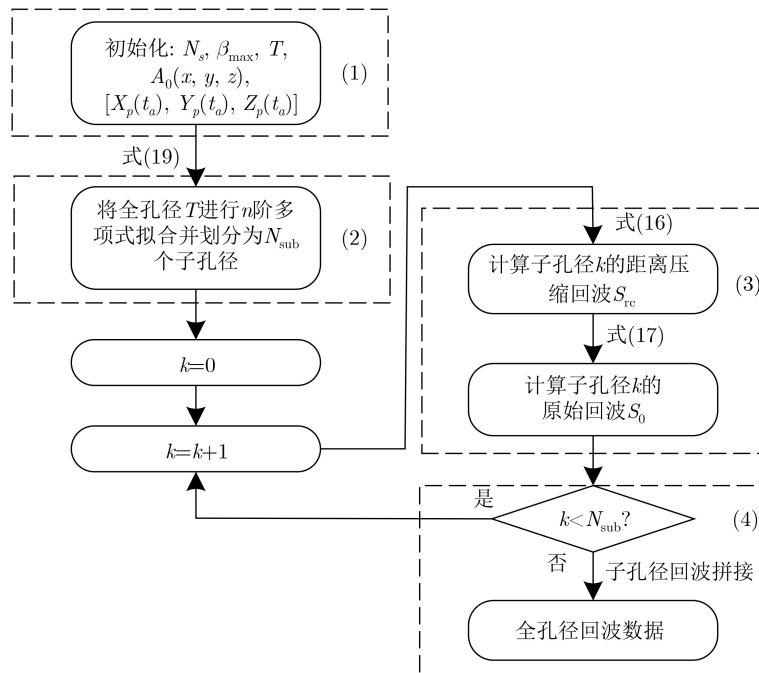


图3 曲线轨迹大斜视SAR回波模拟流程图

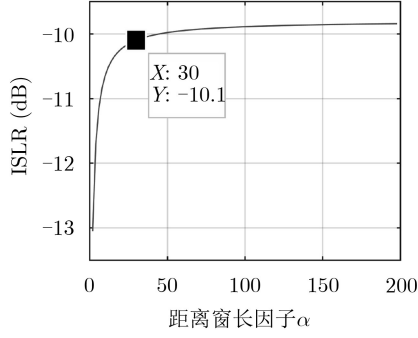


图4 距离压缩信号的截取对ISLR的影响

为充分保留距离压缩副瓣, 可选择 $\alpha=30$, 此时距离向ISLR为 -10.1 dB, 较接近理论值。

3.2 残余空变距离弯曲对方位向聚焦的影响

当单个散射点最大空变距离弯曲为 β 时, 随方位时间变化的空变距离弯曲表示为 $R_{\text{rcm}} = 4\beta t^2 / T_{\text{sub}}^2$, 其中 t 表示方位时间, 取值范围为 $[-T_{\text{sub}}/2, T_{\text{sub}}/2]$ 。在距离聚焦位置, 空变距离弯曲引起的附加方位包络表示为

$$w_{a_add}(t) = \sqrt{|K_r|T_p} \text{sinc}(K_r T_p 4\beta t^2 / T_{\text{sub}}^2) \quad (20)$$

在进行精确的方位相位补偿后, 聚焦后的方位剖面图可用附加方位包络的傅里叶变换来表示, 即

$$S_a(f_a) = \int_{-T_{\text{sub}}/2}^{T_{\text{sub}}/2} w_{a_add}(t) e^{-j2\pi f_a t} dt \quad (21)$$

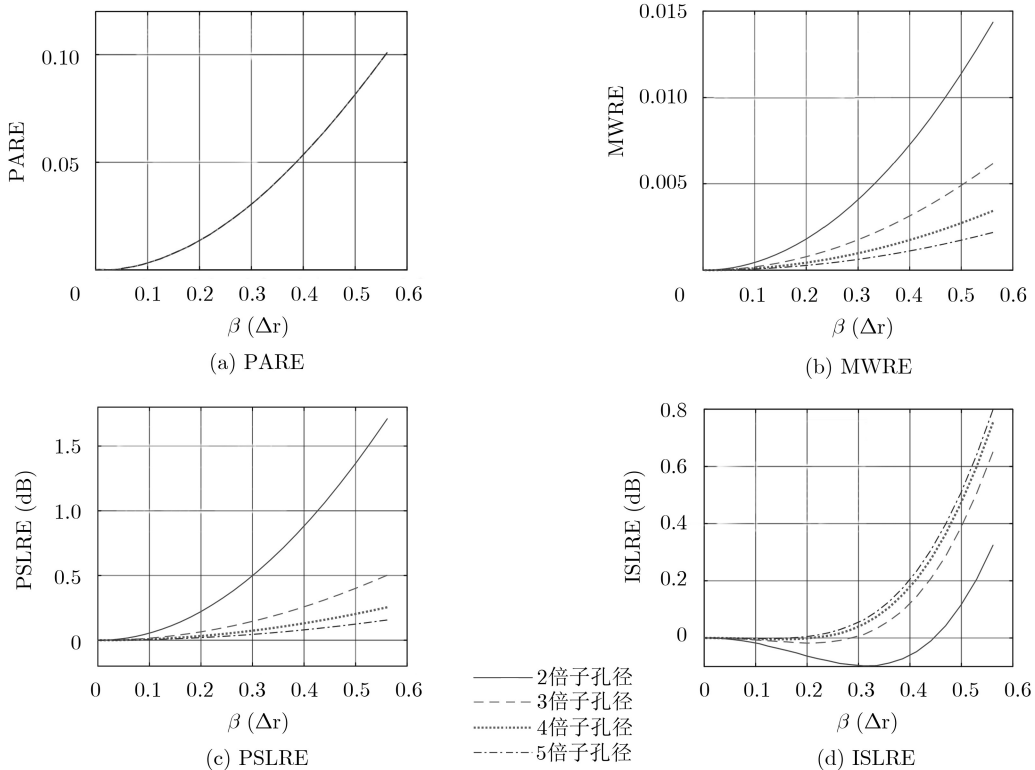
当存在多个子孔径时, 需要将多个子孔径的附

加方位包络进行拼接, 然后根据式(21)计算聚焦后的方位向剖面图。本文采用数值法分析了 β 对方位向聚焦质量的影响, β 的单位为距离分辨单元 $\Delta r = c/(2B_r)$, B_r 表示距离信号带宽。图5给出了2到5倍子孔径拼接下, β 对方位向测量指标PA, MW, PSLR和ISLR的影响, 其中 β 对PA和MW影响通过计算测量值与理论值的相对误差PARE和MWRE来表示, β 对PSLR和ISLR的影响通过计算测量值与理论值的绝对误差PSLRE和ISLRE来表示, 具体表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{PARE} &= (\text{PA}_p - \text{PA}_t) / \text{PA}_t \\ \text{PSLRE} &= \text{PSLR}_p + 13.26 \\ \text{MWRE} &= (\text{MW}_p - \text{MW}_t) / \text{MW}_t \\ \text{ISLRE} &= \text{ISLR}_p + 9.80 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中“ X_p ”表示“ X ”的实际测量值, “ X_t ”表示“ X ”在不存在空变距离弯曲情况下的理论值。

由式(20)可知, β 较小时, 附加方位包络将起到近似二次窗函数的作用, 加窗将使主瓣展宽、副瓣降低。从图5中可以看出, 在相同的 β 值下, 子孔径的拼接将破坏近似二次窗函数效应, 使MW和PSLR等指标更接近理论值, 但子孔径的拼接会对包络形成近似高频调制, 进而使高阶副瓣电平升高, 导致ISLR指标轻度恶化。同时可以看出, β 值越小, 各项测量指标越接近理论值, 子孔径的划分可以使相同的成像区域具有更小的 β 值, 因此子孔

图5 多倍子孔径拼接下 β 对方位向测量指标的影响

径划分的方式可以有效提高回波模拟精度并扩大有效的回波模拟区域。然而,子孔径数量的增加也会增大回波模拟的运算量。观察图5可以发现,3倍子孔径拼接可以在基本不增加运算量的基础上有效提高回波模拟精度,回波模拟时子孔径的数量应不小于3。

3.3 算法运算量分析

根据1.1节分析可知,模拟单个散射点的距离压缩回波仅需计算 M 次斜距相位、 N_s 次距离压缩包络以及 MN_s 次复数乘法。通常,1次sinc函数和复指数相位的计算分别需要3次和6次复数乘法。模拟单个散射点原始回波需要 $7MN_p$ 次复数乘法,而模拟距离压缩回波仅需 $6M+3N_s+MN_s$ 次复数乘法。假设成像场景中共有 Q 个散射点,传统时域方法的运算量为 $7QMN_p$,采用所提方法计算距离压缩回波的运算量为 $Q(M+3)N_s$,进行大场景模拟时,频域距离逆处理计算原始回波的运算量远小于计算距离压缩回波的运算量,可以忽略。因此,所提方法相对于传统时域方法的加速比近似为

$$\eta = \frac{7QMN_p}{Q(6M+3N_s+MN_s)} \approx \frac{7\gamma T_p B_r}{(6+\gamma\alpha)} \quad (23)$$

式(23)表明,信号的时宽带宽积 $T_p B_r$ 越大,所提方法的加速比越高。

4 仿真分析

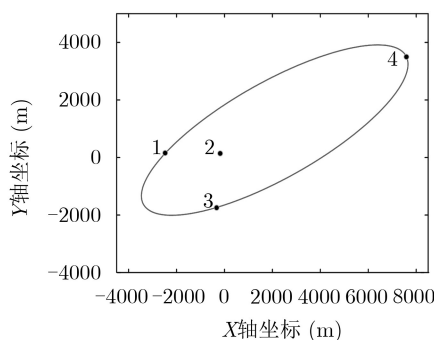
本节采用仿真分析的方法对所提回波模拟方法进行验证,仿真软件为MATLAB2016a,仿真平台主频3.70 GHz,内存16 GB。用于回波模拟的曲线轨迹由平台3阶运动方程叠加高度方向上的正弦运动误差组成,其中运动误差的最大幅度为2 m。SAR系统参数和曲线轨迹中心点时的平台运动参数如表1所示,成像区域为平台位于曲线轨迹中心点时的波束照射区域,参数 $\alpha=30^\circ$, $\beta_{\max}=0.1$, $\Delta r=0.05$ m,根据式(19)计算子孔径数量为3,长度均为1 s。如图6(a)所示,为评估回波模拟精度,在波束照射区域内布置4个点目标,其中点目标1,3和4位于波束照射区域的边缘,点目标2位于波束中心照射点。

采用所提方法对点目标的回波进行模拟,并采用BP算法进行成像处理。由于散射点分布范围较大,故将散射点升采样后的成像结果按散射点的位置分布规律移动到同一张图中显示,即图6(b)所示的成像结果。从图6(b)可以看出,所有点目标均能良好聚焦,且主副瓣清晰可见。为进一步评估点目标的聚焦质量,表2对图6(b)中点目标的方位向测量指标进行量化分析,从表2可以看出,所提方法点目标的方位向测量指标非常接近理论值。

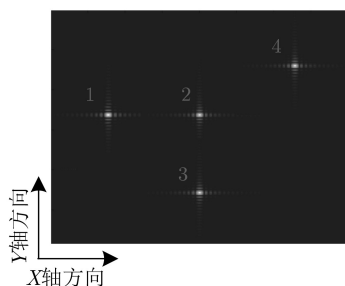
图7给出了所提方法对面目标回波的仿真效

表 1 仿真参数

SAR系统参数	数值	运动参数	数值
载频	15 GHz	斜视角	60°
距离带宽	300 MHz	平台高度	4 km
距离过采样因子	1.2	中心斜距	13 km
合成孔径时间	3 s	速度	(150, 0, -35) m/s
脉冲宽度	5 μ s	加速度	(2.2, 1.2, -0.8) m/s ²
脉冲重复频率	2 kHz	加加速度	(0.2, 0.1, -0.1) m/s ³
天线波束宽度	14°		



(a) 散射点分布情况



(b) 散射点成像结果

图 6 散射点的分布示意图和成像结果

果, 仿真场景大小为 1066×1657 个像素点, 像素点之间的距离为0.5 m, 平行于X轴放置, 场景中心为波束中心照射点。图7(a)为原始SAR图像, 图7(b)为本文方法模拟回波的成像结果, 图7(c)为传统时域方法生成参考回波的成像结果, 成像算法均为文献[15]中的频域算法, 可以发现曲线轨迹和大斜视角的存在使成像结果存在明显的几何畸变, 这也表明现有的频域机动平台大斜视算法难以采用其逆向算法对任意场景进行回波模拟。

为量化分析面目标的回波仿真效果, 选用结构相似度、图像熵和图像对比度等指标作为量化参数, 分析距离窗长因子 α 对模拟回波成像结果中图像量化指标的影响, 并选择图7(c)作为参考图像。仿真结果如图8所示, 其中虚线表示理论值(熵值为12.14, 对比度为14.04), 结构相似度的理论值为1。距离压缩信号的截取将使距离向高阶副瓣减少, 因此图8中模拟回波生成图像的熵值低于理论值, 对比度高于理论值。随着 α 增大, 本文方法生

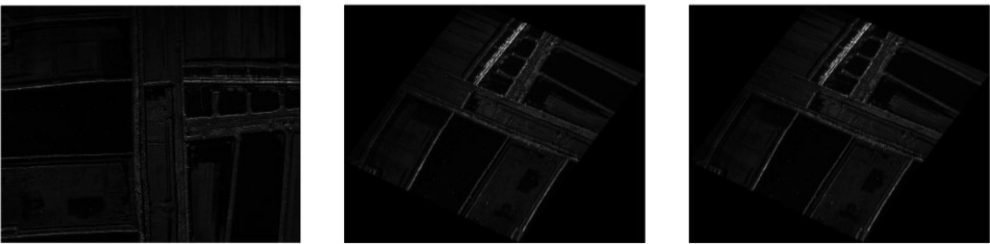
成图像的各项指标参数逐渐接近理论值。但 α 的增加会导致运算量增加, 从图8可以看出, $\alpha = 30$ 时, 各项图像指标接近理论值, 此时本文方法用时 6.2×10^3 s, 传统时域方法为 1.8×10^6 s, 加速比为290, 与式(23)计算的理论值294基本一致, 表明所提方法具有较高的回波模拟效率。

5 结束语

本文提出一种基于子孔径Keystone变换的曲线轨迹大斜视SAR回波模拟方法, 该方法模拟距离徙动校正后的时域距离压缩回波, 并采用距离向逆处理的方法获得原始回波。在距离向处理中, 采用子孔径Keystone变换的方法实现了精确的距离徙动校正, 通过分析残余空变距离徙对方位聚焦的影响, 给出了子孔径的划分依据并分析了回波模拟精度, 仿真结果表明所提方法具有较高的效率和精度。该方法可用于曲线轨迹聚束SAR的回波模拟, 下一步将研究如何使所提方法扩展到任意轨迹和任意成像模式下的回波模拟。

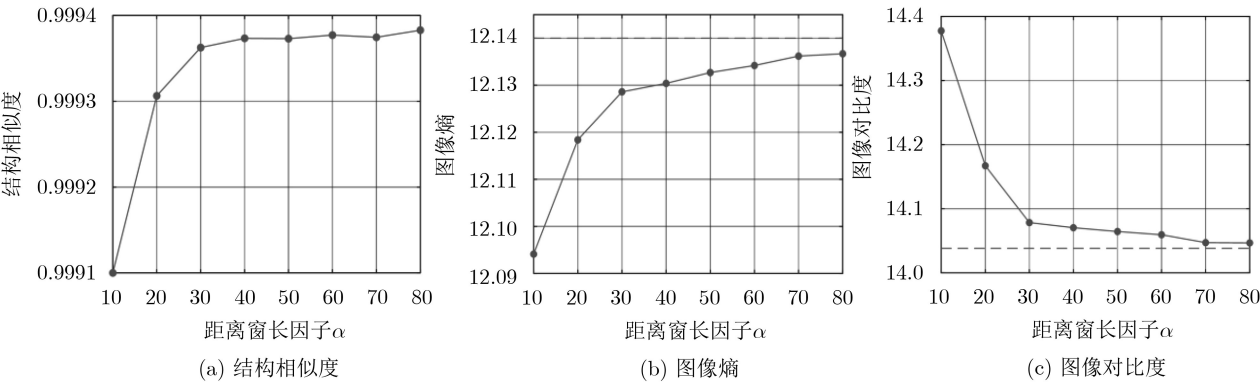
表 2 点目标的方位向测量指标量化分析结果

点目标	PARE	MWRE	PSLRE(dB)	ISLRE(dB)
1	1.3e-03	1.0e-04	6.1e-03	-2.8e-03
2	5.2e-06	1.0e-06	7.1e-06	8.7e-06
3	1.2e-05	2.1e-06	1.4e-04	3.2e-05
4	1.5e-04	5.2e-06	6.5e-04	6.8e-05



(a) 原始图像 (b) 本文模拟回波成像结果 (c) 参考回波成像结果

图 7 面目标回波仿真效果分析



(a) 结构相似度 (b) 图像熵 (c) 图像对比度

图 8 距离窗长因子对图像量化指标的影响

参考文献

- [1] FRANCESCHETTI G, IODICE A, PERNA S, *et al.* SAR sensor trajectory deviations: Fourier domain formulation and extended scene simulation of raw signal[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2323–2334. doi: [10.1109/tgrs.2006.873206](#).
 - [2] FRANCESCHETTI G, IODICE A, PERNA S, *et al.* Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2851–2860. doi: [10.1109/TGRS.2006.875786](#).
 - [3] DENG Bin, LI Xiang, WANG Hongqiang, *et al.* Fast raw-signal simulation of extended scenes for missile-borne SAR with constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 44–48. doi: [10.1109/LGRS.2010.2050675](#).
 - [4] 刘昕, 张林让, 刘楠, 等. 基于级数反演法的变速运动SAR回波二维频域模拟算法[J]. 宇航学报, 2014, 35(7): 827–833. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2014.07.012](#).
LIU Xin, ZHANG Linrang, LIU Nan, *et al.* 2-D fourier domain algorithm for side-looking SAR with variable velocity based on reversion of series[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(7): 827–833. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2014.07.012](#).
 - [5] 刁桂杰, 许小剑. 大斜视SAR原始数据的快速模拟算法研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 684–689. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00498](#).
DIAO Guijie and XU Xiaojian. Fast algorithms for SAR raw data simulation with large squint angles[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 684–689. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00498](#).
 - [6] DELL'AGLIO D A G, DI MARTINO G, IODICE A, *et al.* A unified formulation of SAR raw signals from extended scenes for all acquisition modes with application to simulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4956–4967. doi: [10.1109/TGRS.2018.2844094](#).
 - [7] 汪丙南, 张帆, 向茂生. 基于混合域的SAR回波快速算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 690–695. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00555](#).
WANG Bingnan, ZHANG Fan, and XIANG Maosheng. SAR raw signal fast algorithm in mixed domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 690–695. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.00555](#).
 - [8] MENG Ziqiang, LI Yachao, LI Chunbiao, *et al.* A raw data simulator for bistatic forward-looking high-speed maneuvering-platform SAR[J]. *Signal Processing*, 2015, 117: 151–164. doi: [10.1016/j.sigpro.2015.05.008](#).
 - [9] HUAI Yuanyuan, LIANG Yi, DING Jinshan, *et al.* An inverse extended Omega-K algorithm for SAR raw data simulation with trajectory deviations[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(6): 826–830. doi: [10.1109/LGRS.2016.2548240](#).
 - [10] 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](#).
 - [11] 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](#).
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](#).
 - [12] 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](#).
 - [13] 别博文, 孙路, 邢孟道, 等. 基于局部直角坐标和子区域处理的弹载SAR频域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1779–1786. doi: [10.11999/JEIT171107](#).
BIE Bowen, SUN Lu, XING Mengdao, *et al.* A frequency-domain algorithm based on local Cartesian coordinate and subregion processing for missile-borne SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1779–1786. doi: [10.11999/JEIT171107](#).
 - [14] 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](#).
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](#).
 - [15] 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](#).
- 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