

DOI:10. 20079/j. issn. 1001-893x. 220724002

改进的 NLCS 星弹双基 SAR 俯冲前视成像算法*

席子瑞,段崇棣,左伟华,李财品,李东涛

(空间电子信息技术研究院,西安 710100)

摘 要:在俯冲阶段由于导弹具有加速度,速度大小和方向会发生急剧变化,其收发瞬时斜距会变复杂,将导致距离-方位向耦合严重和方位空变性问题,若直接进行方位向聚焦压缩,会造成图像畸变。针对这两个难题,采用一种改进的非线性变标(Nonlinear Chirp Scaling, NLCS)算法运用到新型星弹双基系统模型中。首先建立了星弹双基系统模型;接着利用级数反演法推导了二维频谱表达式,在二维频域中通过完成距离压缩和徙动校正来消除距离-方位耦合的影响,再利用改进的 NLCS 算法对方位向多普勒调频率进行补偿解决方位向空变性问题,完成方位向压缩聚焦,从而得到良好的成像结果。与改进的距离多普勒(Range Doppler, RD)算法相比,该算法减少了 1.013×10^8 浮点运算量(Floating Point Operations per Second, FLOPS),边缘点方位向聚焦效果有了很大的改善,方位向峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Ratio, ISLR)、分辨率分别提升了 2.41 dB, 1.29 dB, 1.16 m, 证明了该方法的有效性与可行性。

关键词:星弹双基 SAR; 前视成像; 非线性变标算法; 级数反演

开放科学(资源服务)标识码(OSID):  [微信扫码二维码](#)
[听独家语音释文](#)
[与作者在线交流](#)
[享本刊专属服务](#)

中图分类号:TN958 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2024)01-0051-07

A Spaceborne-missile Bistatic SAR Diving Forward-looking Imaging Algorithm Based on Modified Nonlinear Chirp Scaling

XI Zirui, DUAN Chongdi, ZUO Weihua, LI Caipin, LI Dongtao

(China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: In diving stage, due to the acceleration of the missile, the amplitude and direction of velocity change sharply and the slant range becomes complicated, which leads to serious range-azimuth coupling and the space variance of Doppler phase. If the azimuth focusing compression is carried out directly, the image must be distorted. To address these two challenges, a modified Nonlinear Chirp Scaling (NLCS) algorithm is applied to the new spaceborne-missile bistatic system model. Firstly, the spaceborne-missile bistatic system model is established. Then, a two-dimensional (2D) spectral expression is derived by using the method of series reversion. In the 2D frequency domain, the effects of range-azimuth coupling are eliminated by completing range compression and migration correction, and the modified NLCS algorithm is used to compensate the azimuth frequency modulation rate to solve the space variance of Doppler phase problem, complete azimuthal compression focusing, and get good imaging results. Compared with the improved Range Doppler (RD) algorithm, the proposed algorithm reduces 1.013×10^8 floating point operations per second (FLOPS), the azimuthal focusing effect of edge points has been greatly improved, and the peak sidelobe ratio (PSLR), integrated sidelobe ratio (ISLR), and resolution are improved by 2.41 dB, 1.29 dB, and 1.16 m, respectively, which proves the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: spaceborne-missile bistatic SAR; forward-looking imaging; nonlinear chirp scaling algorithm; series reversion

* 收稿日期:2022-07-24;修回日期:2022-09-22
基金项目:国家级项目基金
通信作者:段崇棣 Email:1055460097@qq.com

0 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 具有一定的穿透能力,可以全天候全天时工作^[1],已广泛应用于军用和民用领域。卫星作为发射源在一定的轨道高度上运行,具有抗打击能力强、波束覆盖范围广的优点;导弹作为接收端具有高分辨率识别的优势^[2]。星弹双基地系统结合了星载 SAR 和弹载 SAR 的优点,可以将星载 SAR 的大范围覆盖、高安全性与弹载 SAR 的高分辨率、高机动性相结合,有效获取包含背景在内的场景目标,提高打击目标的能力,实现察打一体化^[3]。

在导弹俯冲下降阶段,由于导弹存在加速度,其速度大小和方向在不停地变化,回波信号存在严重的距离-方位向耦合。另外,在目标前视的情况下,方位向存在着剧烈的空变性,这是星弹双基 SAR 面临的两大难题。一些改进的前视算法如 Omega-K^[4]、CS^[5] (Chirp Scaling) 和 RD (Range Doppler)^[6] 算法只适用于匀速且飞行轨迹平行的机载 SAR 实验,不适用于高机动性弹载 SAR 模型。BP^[7] (Back Projection) 算法能够处理双基系统中高机动性移动平台,但算法的效率很低。文献[8]提出了一种改进的 FFBP (Fast Factorized Back Projection) 算法对弹载前视成像进行了实验仿真,获得良好的成像效果。文献[9]提出了改进的非线性变标 (Nonlinear Chirp Scaling, NLCS) 算法实现了对双基静态系统的高效处理,但是文中没有对方位向调频率进行具体分析和补偿,方位向聚焦受到影响。文献[10]将所提出的 NLCS 算法运用在匀速飞行但轨迹不平行的双基机载实验中,取得了良好的成像效果。文献[11]中对 NLCS 算法做进一步改进,对方位向调频率进行了补偿,完成了弹载单基 SAR 斜视成像。文献[12]提出了一种新型改进的 NLCS 算法,对固定发射站、弹载接收的双基前视模型进行仿真实验,方位向聚焦得到了改善。解决了距离-方位向耦合和方位空变问题。

本文针对星弹双基 SAR 俯冲阶段前视成像模型,对常规的 NLCS 算法进行改进,主要体现在二维频率域处理距离-方位耦合和对方位向多普勒调频率补偿操作。将改进的算法运用在新型星弹双基模型,方位向聚焦得到改善,解决了信号距离-方位向耦合和方位空变问题,实现了良好的成像效果。与其他算法进行成像结果和算法复杂度对比,结果验

证了该算法的可行性与有效性。

1 星弹双基 SAR 俯冲段信号模型

星弹双基 SAR 俯冲段系统构型如图 1 所示。根据右手定则建立坐标系,卫星的初始坐标位于在轨坐标系中,由轨道六根数决定,计算前需要将卫星坐标转换至与导弹相同的本地坐标系中^[13]。图中卫星坐标是已转换后的本地坐标,可直接参与计算。 (x_T, y_T, z_T) 为卫星的初始坐标, v_{Tx} 为卫星沿 x 轴方向的速度, v_{Ty} 为卫星沿 y 轴方向的速度。导弹的初始坐标为 $(0, y_R, z_R)$, v_y 为导弹沿 y 轴方向的初始速度, v_z 为导弹沿 z 轴方向的初始速度, a_y 为导弹沿 y 轴方向的加速度, a_z 为导弹沿 z 轴方向的加速度, R_{T0} 为卫星到目标点的初始距离, R_{R0} 为导弹到目标点的初始距离,目标点的坐标为 (x, y, z) 。不考虑系统同步和卫星导弹运行过程中所导致双基构型发生变化引起目标电磁散射系数改变的问题^[14],将其设为理想状态。

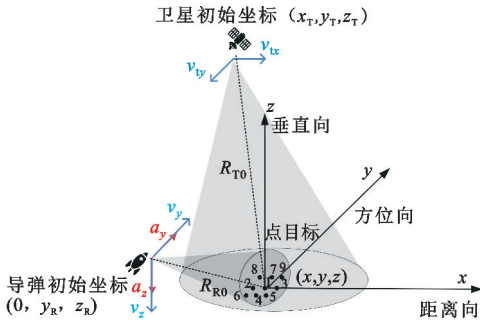


图 1 星弹双基俯冲前视构型
Fig. 1 Forward-looking geometry configuration of spaceborne missile bistatic SAR

发射源为低轨卫星,在合成孔径时间内 (设合成孔径时间为 5 s),由于速度变化量比较小,可将其视为匀速运动。在俯冲下降段,导弹沿曲线做匀加速运动。用符号 τ 表示系统距离向时间 (快时间),符号 η 表示方位向时间 (慢时间)。假定系统初始时刻方位时间 η 为零,对地面上任一点目标其收发斜距历程用 $R(\eta)$ 表示,将各个目标点信号回波的幅值设为理想情况,强度不随斜距大小变化,则地面上任一点星弹双基 SAR 回波信号可表示为

$$\begin{aligned} S(\tau, \eta) = & w_r(\tau - R(\eta)/c) w_a(\eta - \eta_c) \cdot \\ & \exp\{-j2\pi f_c R(\eta)/c\} \cdot \\ & \exp\{j\pi K_r(\tau - R(\eta)/c)^2\} \end{aligned} \tag{1}$$

式中: w_r 表示为距离向信号包络; w_a 表示为方位向信号包络; c 代表光速; f_c 为信号载频; K_r 为发射信号调频率; $R(\eta) = R_T(\eta) + R_R(\eta)$, R_T 为卫星到目标点的瞬时距离, R_R 为导弹到目标点的瞬时距离,

$$R_T = \sqrt{(x_T + v_{lx}\eta - x)^2 + (y_T + v_{ly}\eta - y)^2 + z_T^2}$$

$$R_R = \sqrt{x^2 + (y_R + v_{ly}\eta + 0.5a_y\eta^2 - y)^2 + (z_R + v_{lz}\eta + 0.5a_z\eta^2)^2} \quad (2)$$

分别将 R_T 和 R_R 在 $\eta=0$ 处进行泰勒级数展开, 可得

$$\begin{cases} R_T \approx k_0 + k_1\eta + k_2\eta^2 + k_3\eta^3 + k_4\eta^4 \\ R_R \approx b_0 + b_1\eta + b_2\eta^2 + b_3\eta^3 + b_4\eta^4 \end{cases} \quad (3)$$

因为导弹处于俯冲阶段, 这不同于飞机的匀速直线运动, 具有二维加速度, 速度和方向变化很快^[15]。一阶到四阶项的距离徙动量很大, 为了保证高精度成像效果, 采用发射和接收斜距为四阶近似模型。

2 星弹双基 SAR 俯冲前视成像算法

假定卫星发射的是线性调频信号 (Linear Frequency Modulation, LFM):

$$S_1(\tau, \eta) = w_r(\tau) w_a(\eta) \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi k_r \tau^2) \quad (4)$$

则回波信号表达式如式 (1) 所示。根据驻定相位定理 (Principle of Stationary Phase, POSP) 及菲涅尔积分对式 (1) 做距离向快时间傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT), 可得

$$S_{20}(f_r, \eta) = w_r(f_r) w_a(\eta) \cdot \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{k_r}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{(f_r + f_c)}{c} \cdot R(\eta)\right) \quad (5)$$

由于导弹自身的加速度和前视成像等因素导致多普勒中心频率偏离, 为了在后面二维频谱计算中二维向一一对应, 需将频谱搬移到零频位置。根据式 (6) 可求得多普勒频率中心

$$f_d = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(\eta)}{d\eta} \bigg|_{\eta=0} = -\frac{2}{\lambda} \left(b_1 + k_1 - \frac{x_T v_{lx} + y_T v_{ly}}{R_{T0}} - \frac{v_y y_R + v_z z_R}{R_{R0}} \right) \quad (6)$$

由于导弹速度变化快, 前视角大所导致多普勒偏离项 $-\frac{x_T v_{lx} + y_T v_{ly}}{R_{T0}} - \frac{v_y y_R + v_z z_R}{R_{R0}}$, 需要对其进行校正, 即多普勒频率校正函数为

$$H_1 = \exp\left(-j2\pi \frac{(f_r + f_c)}{c} \left(-\frac{x_T v_{lx} + y_T v_{ly}}{R_{T0}} - \frac{v_y y_R + v_z z_R}{R_{R0}} \right) \eta \right) \quad (7)$$

在快时间频率和慢时间域内, 将 H_1 与式 (5) 相乘得到校正结果:

$$S_{21}(f_r, \eta) = w_r(f_r) w_a(\eta) \cdot \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{k_r}\right) \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{(f_r + f_c)}{c} \cdot \left(\frac{(k_0 + b_0) + (k_1 + b_1)\eta + (k_2 + b_2)\eta^2 + (k_3 + b_3)\eta^3 + (k_4 + b_4)\eta^4}{c} \right) \right] \quad (8)$$

然后对信号 S_{21} 在距离频域方位时域作方位向 FFT, 采用级数反演的方法^[16-17] 可得回波信号二维频谱表达式为

$$S_2(f_r, f_a) = w_r(f_r) w_a(f_a) \exp[j\varphi(f_r, f_a)] \quad (9)$$

将 $\varphi(f_r, f_a)$ 化简成在 $f_r=0$ 处的泰勒级数展开式如下:

$$\varphi(f_r, f_a) = \varphi_0(f_a) + \varphi_1(f_a) f_r + \varphi_2(f_a) f_r^2 + \varphi_3(f_a) f_r^3 \quad (10)$$

$\varphi_1(f_a) f_r$ 和 $\varphi_2(f_a) f_r^2$ 为距离-方位耦合项, 通过与其对应的共轭函数相乘来解决距离-方位的耦合问题。因此, 为了使得距离徙动误差在 1/4 距离采样点之内, 通过采用场景中心点为参考可以构造 $\varphi_1(f_a)$ 的共轭函数来消除距离徙动产生的影响, 即距离徙动校正函数为

$$H_{21} = \exp(-j\varphi_1(f_a) f_r) \quad (11)$$

距离压缩项为 $\exp(-j\varphi_2(f_a) f_r^2)$, 又因为接收端弹载运行处于高频段, 因此可将二次距离压缩项 (Second Range Compression, SRC) 进行忽略, 即只保留 $-\pi(f_r^2/K_r)$, 将其他距离频率的二次项忽略。所以距离脉冲压缩函数为

$$H_{22} = -\pi(f_r^2/K_r) \quad (12)$$

场景内任意点目标的回波信号经过距离徙动校正和距离脉冲压缩会变成方位向的一条竖直线。由于信号进行了距离徙动校正, 对 f_r 一次项进行了消除, 为了确定成像场景距离向位置, 乘以函数 H_{23} :

$$H_{23}(f_r) = \exp\left\{-j \frac{2\pi f_r}{c} \left[\frac{R_{T0} + R_{R0}}{4(b_2 + k_2)} \frac{(b_1 + k_1)^2 (b_1 + k_1)^3 (b_3 + k_3)}{8(b_2 + k_2)^3} - \frac{(9(b_3 + k_3)^2 - 4(b_2 + k_2)(b_4 + k_4))(b_1 + k_1)^4}{64(b_2 + k_2)^5} \right] \right\} \quad (13)$$

将式 (9) 与式 (11)、(12)、(13) 进行相乘再对

距离向做逆快速傅里叶变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), 可得信号 S_3 。

3 方位向聚焦处理

不同于收发匀速或静止的双基构型, 星弹双基系统信号回波经过距离脉冲压缩和距离徙动校正后, 位于同一距离单元不同方位向的目标其多普勒调频率 k_a 变化明显, 不能视为一个常量。如果直接命方位中心的多普勒调频率构造方位向匹配滤波函数, 对方位向进行脉冲压缩, 则成像场景的边缘目标点将很难聚焦。所以在进行方位向压缩之前, 必须对多普勒调频率沿方位向变化进行补偿。这里引入方位非线性变标算法, 以改善方位向聚焦的深度和效果。

在多普勒调频率补偿和非线性变标操作之前, 为了消除方位向 3 次、4 次项的影响, 需要在距离时间方位频率域中引入方位向 3 次、4 次相位滤波, 相位滤波函数 H_{31} 和 H_{32} 如下:

$$\begin{cases} H_{31}(f_a) = \exp(j2\pi A f_a^3) \\ H_{32}(f_a) = \exp(j2\pi B f_a^4) \end{cases} \tag{14}$$

式中: A 、 B 项为设定的未知参数, 将在后面计算求得。用式 (14) 与信号 S_3 相乘, 可得

$$S_4(\tau, f_a) = \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{R_{T0} + R_{R0}}{c}\right)/c\right] w_a(f_a) \cdot \exp(j\theta) \exp\left[j\left(\frac{2\pi\Delta\eta f_a - \pi f_a^2/K_a}{2\pi A f_a^3 + 2\pi B f_a^4}\right)\right] \tag{15}$$

$$A_1 = A + \frac{(b_3 + k_3)c^2}{32(b_2 + k_2)^3 f_c^2} + \frac{(9(b_3 + k_3)^2 - 4(b_2 + k_2)(b_4 + k_4))(b_1 + k_1)c^2}{64(b_2 + k_2)^5 f_c^2}$$
$$B_1 = B + \frac{(9(b_3 + k_3)^2 - 4(b_2 + k_2)(b_4 + k_4))c^3}{512(b_2 + k_2)^5 f_c^3}$$

对式 (15) 采用驻定相位法, 对方位向进行 IFFT 可得

$$S_5(\tau, \eta) = \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{R_{T0} + R_{R0}}{c}\right)\right] w_a(\eta) \cdot \exp[j\pi K_a(\eta - \Delta\eta)^2 + j2\pi A_1 K_a^3(\eta - \Delta\eta)^3] \cdot \exp[j2\pi B_1 K_a^4(\eta - \Delta\eta)^4] \tag{16}$$

接下来对方位向多普勒调频率进行补偿, 使得方位向每个目标点的多普勒调频率与场景中心多普勒调频率相等。根据非线性调频变标的思想, 先构造一个函数 H_4 与上式相乘, 使其满足上述要求:

$$H_4(\eta) = \exp(j\pi l_2 \eta^2 + j2\pi l_3 \eta^3 + j2\pi l_4 \eta^4) \tag{17}$$

将式 (16) 乘以式 (17), 接着再对其进行方位向 FFT 可得

$$S_6(\tau, f_a) = w_a(f_a) \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{R_{T0} + R_{R0}}{c}\right)\right] \exp[j\phi(f_a)] \tag{18}$$

$\phi(f_a)$ 按照 f_a 和 $\Delta\eta$ 的阶数项进行合并, 可化简为

$$\phi(f_a) = c_1(f_a^2 f_a^3 f_a^4) + c_2 f_a \Delta\eta + c_3 f_a \Delta\eta^2 + c_4 f_a^2 \Delta\eta + c_5 f_a^2 \Delta\eta^2 + c_6 f_a^3 \Delta\eta + c_7(f_a^m \Delta\eta^m) \tag{19}$$

从式 (19) 中可以看出, 第一项只包含方位向频率, 在方位压缩时可直接构造共轭匹配滤波函数将其去除; 第二项为方位频率一次项, 包含目标成像方位向的位置信息, 不能去除; 其余项均包含方位频率和方位时间耦合项, 若要对多普勒调频率 k_a 进行补偿校正, 使其值不随方位向位置变化而改变, 则命 c_3, c_4, c_5, c_6, c_7 这些项的系数为 0。将所求的结果代回式 (18), 可得

$$S_7(\tau, f_a) = w_a(f_a) \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{R_{T0} + R_{R0}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{\Delta\eta}{\alpha} f_a - j\pi \frac{1}{K_{a0} + l_2} f_a^2\right) \cdot \exp\left[j2\pi \frac{A_1 K_{a0}^3 + l_3}{(K_{a0} + l_2)^3} f_a^3 + j2\pi \frac{B_1 K_{a0}^4 + l_4}{(K_{a0} + l_2)^4} f_a^4\right] \tag{20}$$

式中: B_r 为信号脉冲带宽。从式 (20) 中可以看出, 方位向频率 f_a 的 2 次、3 次、4 次项系数均为常数, 不再随方位向变化而变化, 已完成补偿校正。所以, 方位向可以直接进行压缩, 即方位向匹配滤波函数为

$$H_5(f_a) = \exp\left[j\pi \frac{1}{K_{a0} + l_2} f_a^2 - j2\pi \frac{A_1 K_{a0}^3 + l_3}{(K_{a0} + l_2)^3} f_a^3 - j2\pi \frac{B_1 K_{a0}^4 + l_4}{(K_{a0} + l_2)^4} f_a^4\right] \tag{21}$$

将式 (20) 与式 (21) 相乘, 可得

$$S_9(\tau, f_a) = \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{R_{T0} + R_{R0}}{c}\right)\right] w_a(f_a) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{\Delta\eta}{\alpha} f_a\right) \tag{22}$$

再对方位向做 IFFT 可得最终 SAR 成像图像。整个算法流程如图 2 所示。

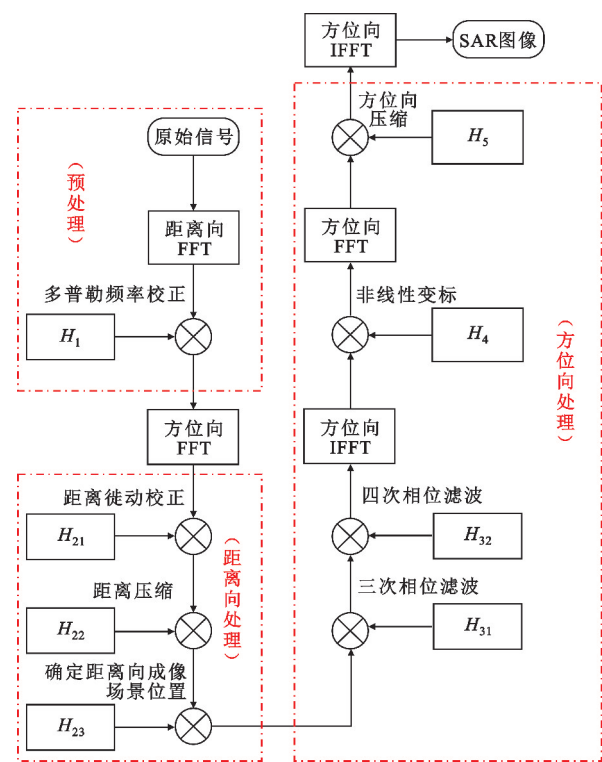


图 2 算法流程
Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

4 算法计算量分析

从图 2 中可以看出,该算法运算量的增加主要来自方位向非线性变标操作,包括一次 FFT、一次 IFFT 和 4 次相位点乘(流程图方位向处理部分所示)。根据文献[18]可得,一次复数相位相乘的计算量为 6 次浮点运算量(Floating Point Operations per Second,FLOPS),一次 N 点 FFT 或一次 N 点 IFFT 的计算量为 $5N \lg(N)$ 次 FLOPS,仿真实验中距离向采样点数为 $N_{\text{fast}}=2\,048$,方位向采样点数为 $N_{\text{slow}}=512$,距离压缩后选择的输出点数为 $N_r=1\,856$,可计算出在方位非线性操作后所增加的浮点运算量为

$$\Delta Q=2\times 5N_rN_{\text{slow}}\lg(N_{\text{slow}})+4\times 6N_rN_{\text{slow}}=1.083\times 10^8\text{ FLOPS}$$

虽然该算法运算量相比常规算法略有增加,但是方位向聚焦有明显的改善,图像效果更好。下面对文献[6]中改进的 RD 算法和文献[10]中改进的 NLCS 算法进行计算量分析对比,设定插值核值为 6。文献[6]中算法的复杂度计算量为

$$Q_1=20N_{\text{slow}}N_r\lg^{(N_r)}+20N_{\text{slow}}N_r\lg^{(N_{\text{slow}})}+30N_aN_r+2(2N_k-1)N_aN_r=4.268\,241\,71\times 10^8\text{ FLOPS}$$

文献[10]中算法复杂度计算量为

$$Q_2=10N_aN_r\lg^{(N_r)}+10N_aN_r\lg^{(N_{\text{slow}})}+$$

$$\begin{aligned} &12N_aN_r+2(2N_k-1)N_aN_r= \\ &2.210\,142\,62\times 10^8\text{ FLOPS} \end{aligned}$$

本文所提算法复杂度计算量为

$$\begin{aligned} Q &=2\times 5N_rN_{\text{slow}}\lg(N_r)+ \\ &4\times 5N_rN_{\text{slow}}\lg(N_{\text{slow}})+8\times 6N_rN_{\text{slow}}= \\ &3.198\times 10^8\text{ FLOPS} \end{aligned}$$

可以看出,本文所提算法计算量比文献[10]中 NLCS 算法略复杂,比文献[6]中的 RD 算法更高效,而且本文算法没有耗时的插值操作,其处理效率更高。

5 仿真结果分析

成像区域如图 3 所示,成像目标点为 9 个,相邻点之间沿 x 轴方向间距 100 m,沿 y 轴方向间距 150 m, T_1 为场景中心目标点, T_5 为方位空变最严重的边缘点。仿真采用的系统参数如表 1 所示。

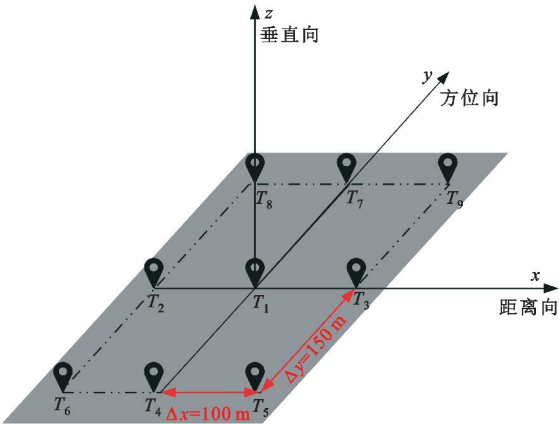


图 3 场景区域目标点
Fig. 3 The target points of scene area

表 1 星弹双基 SAR 系统参数
Tab. 1 Simulation experimental parameters of spaceborne missile bistatic SAR

参数	数值/单位
信号带宽/MHz	80
脉冲时宽/ μs	10
载频/GHz	5.4
方位向采样间隔/s	0.001
卫星初始坐标/km	(280,280,755)
合成孔径时间/s	5
距离向采样频率/MHz	160
导弹初始时刻速度矢量/(m/s)	(0,100,-50)
导弹加速度矢量/(m/s^2)	(0,10,-10)
卫星速度矢量/(m/s)	(5\,200,-5\,200,0)
导弹初始坐标/km	(0,-10,5)

点目标成像仿真结果如图 4(a) 所示。由于导弹前视成像的影响,距离向和方位向存在一定的几何畸变,与真实目标位置不一致。对其进行畸变校正后的结果如图 4(b) 所示。

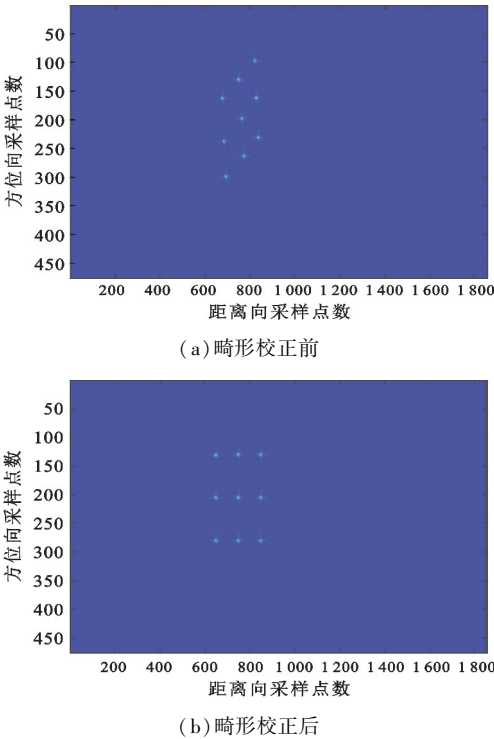


图 4 点目标仿真结果
Fig. 4 Simulation results of point targets

下面通过边缘点 T_5 在使用算法前后的仿真结果进行分析。边缘点 T_5 在未考虑方位向空变性之前,方位向聚焦效果较差,引入算法后方位向压缩虽然没有特别完美,但比之前有很大的改善,如图 5 所示。

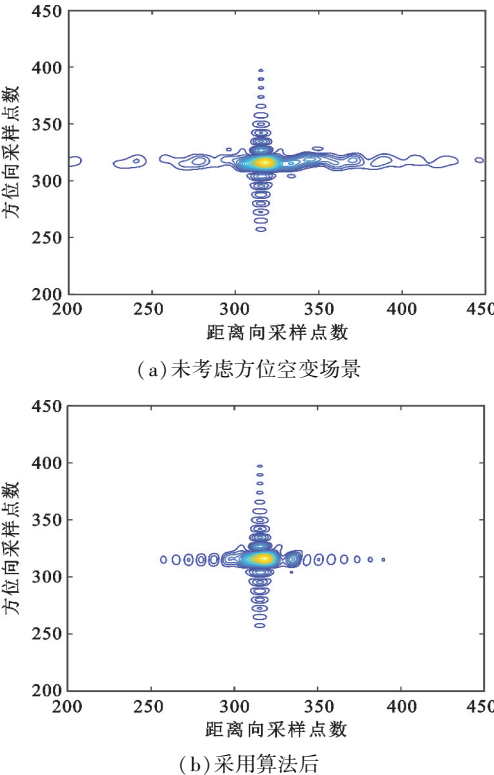


图 5 场景边缘点 T_5 成像结果

Fig. 5 Imaging results of scene edge point T_5

对相同的星弹双基系统构型,采用表 1 所示的参数,分别用文献[6]和文献[10]中所述算法对 T_5 点进行成像,成像结果如图 6 所示。根据结果图对比可知, T_5 点方位向聚焦效果比未考虑方位空变性前有一定的改善,但是比本文所提算法成像效果差。因为文献[6]中没有对方位向多普勒调频进行补偿,而文献[10]中距离-方位耦合没有完全消除。通过三种方法对 T_5 点方位向聚焦效果之间的对比,证明了本文所提算法的有效性。

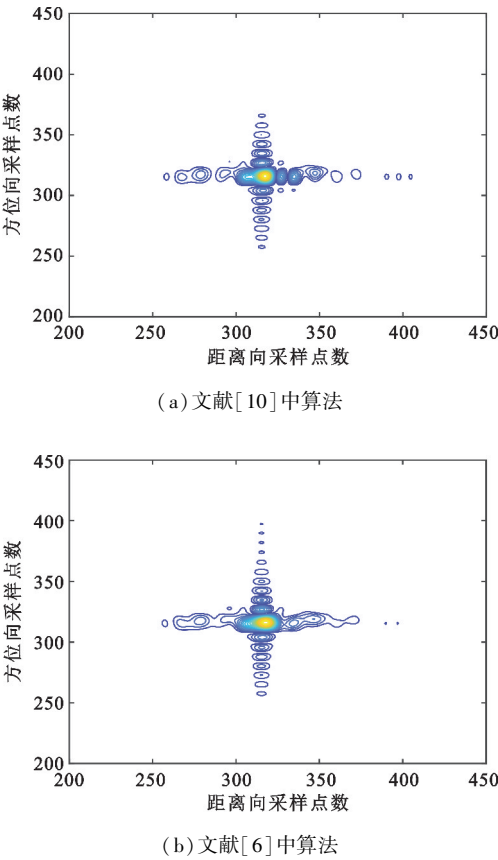


图 6 T_5 点成像结果

Fig. 6 Imaging results of point T_5

表 2 给出了使用算法前场景内目标点 T_1 和 T_5 的各项成像性能指标。

表 2 算法使用前成像质量分析						
Tab. 2 Image quality analysis without using the algorithm						
目标点	PSLR/dB		ISLR/dB		分辨率/m	
	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向
T_1	-13.26	-15.26	-9.48	-9.86	0.92	1.91
T_5	-10.87	-15.30	-7.69	-9.42	2.08	1.92

表 3 给出了使用算法后场景内目标点 T_1 和 T_5 的各项成像性能指标。

表 3 算法使用后成像质量分析						
Tab. 3 Image quality analysis with using the algorithm						
目标点	PSLR/dB		ISLR/dB		分辨率/m	
	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向
T_1	-13.55	-15.17	-9.55	-9.56	0.83	1.88
T_5	-13.28	-15.18	-8.98	-9.48	0.92	1.90

经对比可知,使用算法后边缘点 T_5 方位向 PSLR、ISLR、分辨率分别提升了 2.41 dB,1.29 dB,1.16 m。结合成像结果和各项指标,该方法对加速度所引起的方位空变性问题起到了一定的改善作用,方位向得以压缩聚焦,获得了良好的成像结果。

6 结束语

本文首先搭建了星弹俯冲双基构型,首先在距离频率方位时域上进行多普勒中心校正,接着利用级数反演法推导了信号二维频谱,然后完成了距离压缩和徙动校正。针对方位向多普勒调频率空变性问题,采用非线性变标的算法,使得方位向聚焦得到很大改善,成像质量有所提高,但对完美的点目标图像形成还有所差距,需要未来更深入研究。

参考文献:

[1] 陈婕,潘洁,杨小英,等.一种多视角 SAR 图像目标识别方法[J]. 电讯技术,2021,61(12):1547-1553.

[2] 陈娟.弹载俯冲大前斜 SAR 成像几何校正参数误差影响分析[J]. 电讯技术,2022,62(7):892-897.

[3] 郭苹,焦晓阳,王安义,等.星-弹双基 SAR 建模及成像特性分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2020,21(4):29-35.

[4] SHIN H S, LIM J T. Omega-k algorithm for airborne forward-looking bistatic spotlight SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2):312-316.

[5] WU J J, YANG J Y, HUANG Y L, et al. Focusing bistatic forward-looking SAR using chirp scaling algorithm [C]//Proceedings of 2011 IEEE Radar Conference. Kansas City:IEEE,2011:1036-1039.

[6] JOSHI S K, BAUMGARTNER S V, KRIEGER G. Tracking and track management of extended targets in range-Doppler using range-compressed airborne radar data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60:1-20.

[7] YU M, ZHANG X L, LIU Z, et al. Acceleration of fast factorized back projection algorithm for bistatic SAR [C]//Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne: IEEE,2013:2493-2496.

[8] FENG D, AN D, HUANG X. An extended fast factorized

back projection algorithm for missile-borne bistatic forward-looking SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,2018,54(6):2724-2734.

[9] QIU X L, HU D H, DING C B. An improved NLCS algorithm with capability analysis for one-stationary BiSAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(10):3179-3186.

[10] WONG F H, CUMMING I G, NEO Y L. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(9):2493-2505.

[11] CHEN S, ZHANG S N, ZHAO H C, et al. Improved nonlinear chirp scaling algorithm for dechirped missile-borne synthetic aperture radar [J]. Journal of Applied Remote Sensing,2014,8(1):3505-3517.

[12] CHEN S, YUAN Y, ZHANG S N, et al. A new imaging algorithm for forward-looking missile-borne bistatic SAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2016,9(4):1543-1552.

[13] 赵秉吉. 地球同步轨道 SAR 关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.

[14] SUN Z C, WU J J, PEI J F, et al. Inclined geosynchronous spaceborne-airborne bistatic SAR: performance analysis and mission design [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2016,54(1):343-357.

[15] 赵军,吴迪,沈明威,等.一种指数形式时变加权的机载双基雷达 STAP 算法[J]. 电讯技术,2021,61(1):63-68.

[16] NEO Y L, WONG F, CUMMING I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience Remote Sensor Letters, 2007,4(1):93-96.

[17] NEO Y L, WONG F H, CUMMING I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2008,46(1):14-21.

[18] 周松,包敏,周鹏,等.基于方位非线性变标的弹载 SAR 下降段成像算法[J]. 电子与信息学报,2011,33(6):1420-1426.

作者简介:

席子瑞 男,1997 年生于江西高安,硕士研究生,主要研究方向为星弹双基成像算法。

段崇棣 男,1972 年生于陕西西安,研究员、硕士生导师,主要研究方向为微波遥感技术。

左伟华 男,1980 年生于湖南衡阳,博士,高级工程师,主要研究方向为双基和高分宽幅 SAR 成像模式与算法。

李财品 男,1984 年生于福建泉州,研究员,主要研究方向为微波遥感技术。

李东涛 男,1982 年生于吉林公主岭,博士,高级工程师,主要研究方向为双多基地 SAR 系统设计与成像处理。