

## 基于运动补偿的弹载前斜视 SAR 成像算法

张延\* 张林让 唐世阳

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 曲线轨迹下的弹载合成孔径雷达(SAR)前视成像算法校正了方位时不变运动误差,忽略了时变运动误差,造成成像质量下降。针对这一问题,该文提出一种基于运动补偿的前斜视成像算法。首先将加速度分解成前向加速度和径向加速度,然后将径向加速度分解为成像平面内的加速度和垂直于成像平面的加速度,经过分析可知,对成像质量起决定作用的是成像平面内的加速度,该文通过矢量方法将其补偿。此外,对于加速度带来的较大的距离徙动,通过级数反演法求出信号的2维频谱,然后结合非线性频调变标(NCS)算法进行校正,取得了良好的效果。最后通过仿真实验证明了所提算法的有效性。

**关键词:** 运动补偿; 曲线轨迹; 弹载; 非线性频调变标算法; 级数反演法

**中图分类号:** TN957.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)12-3159-07

**DOI:** 10.11999/JEIT161006

## Novel Missile-borne Forward-looking SAR Algorithm Based on Motion Compensation

ZHANG Yan ZHANG Linrang TANG Shiyang

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** For missile-borne forward-looking SAR in curve trajectory, time-variant motion errors are ignored, leading to degradations in imaging result. This paper proposes a missile-borne forward-looking SAR algorithm based on motion compensation to solve the above problem. The acceleration is divided into forward-looking acceleration and cross-track acceleration, the second phase error and cubic phase error caused by these two accelerations are analyzed in detail. For the cross-track acceleration component, it can be divided into the acceleration vertical to the imaging plane and the one in imaging plane further. Via such dividing, the phase errors caused by acceleration are compensated by using vectorial methods. Moreover, for range migration, it is compensated through Nonlinear Chirp Scaling (NCS) approach based on the accurate 2-D spectrum acquired by the Method of Series Reversion (MSR). The simulated results are given to illustrate the validity of the proposed algorithm.

**Key words:** Motion compensation; Curve trajectory; Missile-borne; Nonlinear Chirp Scaling (NCS) algorithm; Method of Series Reversion (MSR)

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)由于其全天候、全天时、远距离、高精度等特点得到了广泛应用。常规 SAR 对两侧目标进行高分辨成像,广泛应用于对敌侦察、导弹制导等军事领域和地形测绘等民用领域<sup>[1-4]</sup>。随着战场环境的日益复杂,对前向目标更为关心,而前向目标的方位维与距离维重合,形成了严重的成像盲区,因此对于前视成像的研究具有重要意义。

对于雷达前视成像,文献[5-9]提出了一种双基前视系统,在这种双基构型下,通过令雷达平台引入的多普勒信息对前向目标成像。双基构型可以有效提高被动雷达的战场生存能力,但是需要解决双基时间同步、位置同步等问题,需要较大的系统投入。文献[10-12]利用长阵列天线在垂直航向方向形成实孔径进行前视成像,由于阵列天线长度有限,分辨率往往较差,且对于导弹这一特殊雷达载体而言,对其搭载的雷达系统体积和重量等指标均有较高要求,因此这种体制需要对现有系统进行比较大的改变。文献[13]通过设计特殊的弹道,将前斜视成像模式转化为斜视工作模式,采用扩展的线频调变标(Extended Chirp Scaling, ECS)算法较好地解决了该问题,但是只考虑了加速度带来的时不变误

收稿日期: 2016-09-30; 改回日期: 2016-11-24; 网络出版: 2016-12-14

\*通信作者: 张延 060222zhang@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61601343, 61671361)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61601343, 61671361)

差,忽略了时变误差,当积累时间较小时,对特定的运动参数是可行的。当运动参数改变时,成像质量变差。

因此,在曲线轨迹雷达前视成像的基础上,本文提出了一种基于运动补偿的弹载前斜视成像算法。首先在成像段通过曲线轨迹使目标与雷达运动方向保持一定的夹角,将前斜视成像模式转化为斜视成像模式,这样在不改变现有系统的条件下,实现弹载 SAR 的前视成像。成像过程中,加速度带来的影响必须予以补偿,本文将加速度分解成前向加速度和径向加速度,详细分析了这两个加速度与等效斜视角的关系,指出当斜视角较小时,径向加速度对成像起主要影响;斜视角较大时,前向加速度对成像起主要影响。由于本文等效斜视角较小,因此前向加速度没有考虑,只考虑径向加速度,为了更好分析径向加速度对成像效果的影响,本文将进一步分解为成像平面内的加速度和垂直于成像平面的加速度,通过矢量分析可知,垂直于成像平面的加速度对相位误差的影响可以忽略,对成像影响起决定作用的是在成像平面内的加速度,本文通过矢量方法将其补偿。此外,对于加速度引起的较大的距离徙动,结合非线性频调变标(Nonlinear Chirp Scaling, NCS)算法对其精确校正,实现目标的精确成像。最后,通过与 ECS 算法的比较,验证了本文算法的有效性。

## 2 运动模型

本文假设导弹处于末制导阶段,已获得目标的大体方位,欲成像后选择打击位置。由于目标位于导弹航向的前下方,导引头雷达天线方位与导弹航向一致,回波的多普勒维与距离维重合,形成成像盲区,无法做合成孔径处理。也就是说,该轨迹下,仅仅利用导引头雷达无法 2 维分辨目标。

选择成像轨迹如图 1 中弧  $PMN$  所示。导弹在  $P$  处,开始对前向目标  $C$  进行成像处理;导弹到  $N$  处,成像过程结束,直接俯冲攻击目标。由于该轨迹下导引头天线指向不与弹轴重合,而是以一定的夹角持续指向目标,相当于将前视转化为斜视情况,因此可以对前向目标进行成像处理。设成像轨迹  $PMN$  在  $XOY$  面上的投影为弧  $P'ON'$ ,参考点  $M$  的坐标为  $(x_M, y_M, z_M)$ ,目标  $C$  坐标为  $(x_C, y_C, z_C)$ ,  $M$  到  $C$  的斜距矢量为  $\mathbf{R}_{0C} = (x_0, y_0, z_0)$ ,其中  $x_0 = x_C - x_M$ ,  $y_0 = y_C - y_M$ ,  $z_0 = z_C - z_M$ 。整个成像区间,导引头天线一直指向目标  $C$ 。由于预先仅确定照射的范围,并不能确定目标点  $C$  的精确位置,这需要对整个照射区域成像,即成像带为一直包含  $C$  点的弧线条带区。虽然本文选择了曲线轨迹将前视转化为特

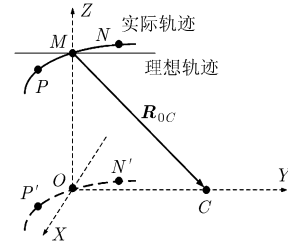


图1 导弹成像轨迹示意图

殊的斜视成像,然而成像过程中,由于加速度的影响,依然存在大的运动误差和距离徙动。因此,常规的 CS 算法已经不能解决该问题,本文进行运动补偿,然后引入 NCS 算法获得了良好的成像结果。设导弹  $X$  轴速度为  $v_x$ ,加速度为  $a_x$ ;  $Y$  轴速度为  $v_y$ ,加速度为  $a_y$ ;  $Z$  轴速度为  $v_z$ ,加速度为  $a_z$ 。把速度  $\mathbf{V}$ ,加速度  $\mathbf{A}$  写成矢量的形式,分别为:  $\mathbf{V} = (v_x, v_y, v_z)$ ,  $\mathbf{A} = (a_x, a_y, a_z)$ 。则导弹飞行轨迹  $PMN$  上任意时刻  $\eta$  到场景中任意点  $Q$  的距离表示为

$$R(\eta) = \left| \mathbf{R} + \mathbf{V}(\eta - \eta_{bca}) + \frac{1}{2} \mathbf{A}(\eta - \eta_{bca})^2 \right| \approx \mu_0 + \mu_1(\eta - \eta_{bca}) + \mu_2(\eta - \eta_{bca})^2 + \mu_3(\eta - \eta_{bca})^3 + \mu_4(\eta - \eta_{bca})^4 \quad (1)$$

系数采用矢量表达式可以表示为

$$\mu_0 = |\mathbf{R}| \quad (2)$$

$$\mu_1 = \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle}{|\mathbf{R}|} \quad (3)$$

$$\mu_2 = -\frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle^2}{2|\mathbf{R}|^3} + \frac{\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} \rangle}{2|\mathbf{R}|} + \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}|} \quad (4)$$

$$\mu_3 = \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle^3}{2|\mathbf{R}|^5} - \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle \cdot \langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} \rangle}{2|\mathbf{R}|^3} + \left( -\frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle \cdot \langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}|^3} + \frac{\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}|} \right) \quad (5)$$

$$\mu_4 = -\frac{5\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle^4}{8|\mathbf{R}|^7} + \frac{3\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle^2 (\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} \rangle + \langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle)}{4|\mathbf{R}|^5} - \frac{(\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{V} \rangle + \langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle)^2}{8|\mathbf{R}|^3} - \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle \cdot \langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}|^3} + \frac{\langle \mathbf{A} \cdot \mathbf{A} \rangle}{8|\mathbf{R}|} \quad (6)$$

其中,  $\mu_0$  是中心斜距,  $\mu_1$  是线性走动项,  $\mu_2$  是线性调频率,  $\mu_3, \mu_4$  是高阶相位。

## 3 运动误差分析

运动误差是由导弹飞行中存在加速度造成的,从式(4)~式(6)可以看出,加速度分量存在  $\mu_2, \mu_3$  和  $\mu_4$  中。将加速度分量代入式(1)中,忽略四阶项,得

到加速度产生的运动误差在瞬时斜距中的表达式为

$$\Delta R(\eta) = \Delta R_2 + \Delta R_3 = \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_0|} (\eta - \eta_{bca})^2 + \left( \frac{\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_0|} - \frac{\langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{V} \rangle \cdot \langle \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_0|^3} \right) (\eta - \eta_{bca})^3 \quad (7)$$

其中，第1项是运动误差对方位调频率的影响，第2项是运动误差对于方位高阶项的影响。为了更好地分析加速度对运动误差的影响，首先将加速度矢量分解为前向加速度  $\mathbf{A}_f$  和径向加速度  $\mathbf{A}_c$ ，然后将径向加速度  $\mathbf{A}_c$  分解为成像平面内的加速度  $\mathbf{A}_1$  和垂直于成像平面的加速度  $\mathbf{A}_2$ ，如图2所示。则运动误差的各个系数采用标量表示为

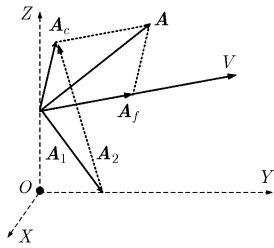


图2 加速度矢量分解示意图

$$\langle \mathbf{V} \cdot \mathbf{A} \rangle = va_f \quad (8)$$

$$\frac{\langle \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{V} \rangle}{|\mathbf{R}_0|} = v \sin \theta \quad (9)$$

$$\frac{\langle \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{A} \rangle}{|\mathbf{R}_0|} = a_1 \cos \theta + a_f \sin \theta \quad (10)$$

其中， $v$ ， $a_f$  和  $a_1$  分别是矢量  $\mathbf{V}$ ， $\mathbf{A}_f$  和  $\mathbf{A}_1$  的模值， $\theta$  是等效斜视角。将式(8)~式(10)代入式(7)，得

$$\Delta R_2 = \Delta R_{2f} + \Delta R_{21} = \frac{a_f}{2} \sin \theta (\eta - \eta_{bca})^2 + \frac{a_1}{2} \cos \theta (\eta - \eta_{bca})^2 \quad (11)$$

$$\Delta R_3 = \Delta R_{3f} + \Delta R_{31} = \frac{va_f}{2|\mathbf{R}_0|} \cos^2 \theta (\eta - \eta_{bca})^3 - \frac{va_1 \sin 2\theta}{4|\mathbf{R}_0|} (\eta - \eta_{bca})^3 \quad (12)$$

从式(11)和式(12)可以看到，加速度对调频率的运动误差  $\Delta R_2$  由前向加速度误差分量和径向加速度误差

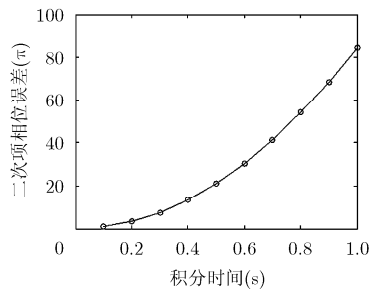


图3 二次项引起的运动误差

分量组成，与加速度和等效斜视角有关；加速度对方位高阶项的误差  $\Delta R_3$  也由前向加速度误差分量和径向加速度误差分量组成，与速度、加速度、斜距和斜视角有关。由于  $\mathbf{A}_2$  垂直于成像平面，所以对相位不会产生影响，没有出现在表达式中。前向加速度  $\mathbf{A}_f$  对成像的影响在小斜视角情况下可以忽略，因此本文主要分析径向加速度  $\mathbf{A}_c$  在成像平面的分量  $\mathbf{A}_1$  对成像的影响。由于  $\Delta R_{21}$  与  $\cos \theta$  成正比， $\Delta R_{31}$  与  $\sin 2\theta$  成正比，因此在正侧视或者小斜视情况下， $\Delta R_{21}$  产生较大的运动误差， $\Delta R_{31}$  产生的运动误差可以忽略。也就是说，在一定的积分时间内，式(7)中的第2项在正侧视或者小斜视情况下可以忽略。为验证这个结论，选择相距中心点 1000 m 的  $B$ ，来仿真这两项运动误差引起的运动误差，仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

载频	10 GHz
脉冲宽度	10 $\mu$ s
信号带宽	50 MHz
PRF	2000 Hz
导弹速度	(500, 500, 200) m/s
导弹加速度	(10, -9, -10) m/s <sup>2</sup>
导弹参考点坐标	(0, 0, 9000) m
场景中心坐标	(0, 10000, 0) m
积分时间	0.4 s
等效斜视角	8.9°

通过图3和图4可以看到，在表1的参数下，随着积分时间的增加，二次项和三次项带来的运动误差都是增加的，当积分时间小于0.4s时，三次项引起的相位误差小于  $\pi/2$ ，对于成像的影响可以忽略，验证了上述分析；从图5和图6可以看到，在小斜视角情况下(约10°以下)，前向加速度对成像的影响可以忽略，对成像结果起决定作用的是径向加速度，验证了上文的结论，而径向加速度的补偿也是本文算法研究的重点。

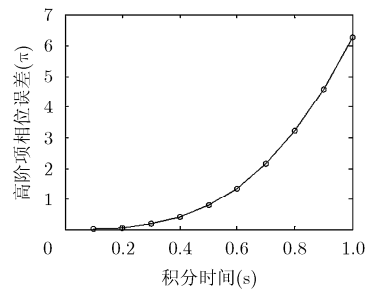


图4 高阶项引起的运动误差

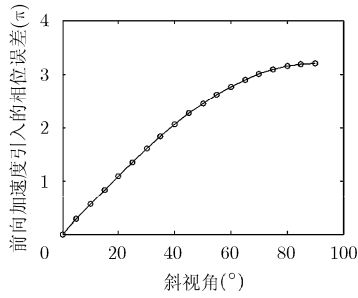


图5 二次项中前向加速度引起的运动误差

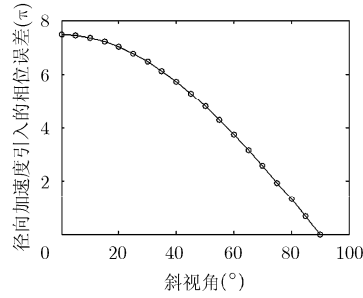


图6 二次项中径向加速度引起的运动误差

由式(10)可知,运动误差其中,  $\langle \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{A} \rangle / |\mathbf{R}_0|$  为加速度在雷达与目标上的投影,即  $\mathbf{A}$  参考斜距矢量  $\mathbf{R}_0$  上的投影。当目标区域是场景目标时,不同的目标  $\mathbf{R}_0$  也不相同,即运动误差具有空变性。目标的运动误差一般为加速度在参考斜距上的二重积分,而运动误差的空变性则是二重积分随距离的变化量,因此在运动误差校正时,校正因子为

$$\Delta r_I = \int_0^{\eta-\eta_{bca}} \int_0^{\xi} \frac{\langle \mathbf{R}_{0C} \cdot \mathbf{A} \rangle}{|\mathbf{R}_{0C}|} d\kappa d\xi \quad (13)$$

$$\Delta r_{II} = \int_0^{\eta-\eta_{bca}} \int_0^{\xi} \left( \frac{\langle \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{A} \rangle}{|\mathbf{R}_0|} - \frac{\langle \mathbf{R}_{0C} \cdot \mathbf{A} \rangle}{|\mathbf{R}_{0C}|} \right) d\kappa d\xi \quad (14)$$

#### 4 算法分析

本文算法流程如图7所示。距离走动补偿详见文献[13],本文在此基础上,增加距离维粗补偿:

$$H_{1MOCO}(f_r, \eta) = \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\langle \mathbf{R}_{0C} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_{0C}|} (1 + A_s) \eta^2 \right] \quad (15)$$

去走动和距离维粗补偿后,信号表示为  $Ss(f_r, \eta)$

$$= a_r(f_r/\gamma) a_a(\eta) \cdot \exp \left[ -j\pi(f_r^2/\gamma) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} (\mu_0 + \mu_{2new}\eta^2 + \mu_3\eta^3 + \mu_4\eta^4) (1 + A_s) \right] \quad (16)$$

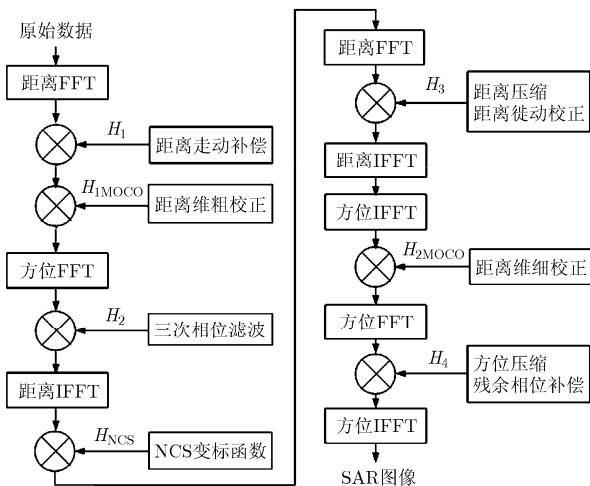


图7 算法流程

其中,  $\mu_{2new} = \mu_2 - \frac{\langle \mathbf{R}_{0C} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_{0C}|}$ 。通过级数反演法<sup>[14]</sup>,

可以得到2维频域的信号形式为

$$SS(f_r, f_\eta) = \rho_r \left( \frac{f_r}{\gamma} \right) \rho_a(f_\eta) \cdot \exp \left[ -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[ \varphi_0(f_\eta) + \varphi_1(f_\eta) A_s + \varphi_2(f_\eta) A_s^2 + \varphi_3(f_\eta) A_s^3 \right] \right\} \quad (17)$$

其中,  $\varphi_0(f_\eta, \mu_{0C})$  是方位维调频项,影响目标在方位维的位置;  $\varphi_1(f_\eta, \mu_{0C})$  为距离线性项,影响目标在距离维的位置;  $\varphi_2(f_\eta, \mu_{0C})$  为线性调频率项;  $\varphi_3(f_\eta, \mu_{0C})$ ,  $\varphi_4(f_\eta, \mu_{0C})$  为非线性调频率项。

如上所述,由于雷达预先仅确定照射的范围,并不能确定目标点的确切位置。这需要对整个照射区域成像,就涉及大场景成像问题。而上述推导是针对中心点  $C$  的,对于场景中偏离中心点  $C$  的点  $B$ ,如果用上述2维频谱直接2维成像,不能完全压缩,成像质量下降,也就是没有考虑空变性,因此需要变标。在变标前,首先求出  $B$  点2维谱和  $C$  点2维谱之间的关系。设它们的斜距差为  $\Delta R = \mu_{0B} - \mu_{0C} = |\mathbf{R}_{0B}| - |\mathbf{R}_{0C}|$ ,则

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0(f_\eta, \mu_{0B}) &= \varphi_0(f_\eta, \mu_{0C}) + \varphi_{01}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R \\ &\quad + \varphi_{02}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R^2 \\ \varphi_1(f_\eta, \mu_{0B}) &= \varphi_1(f_\eta, \mu_{0C}) + \varphi_{11}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R \\ &\quad + \varphi_{12}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R^2 \\ \varphi_2(f_\eta, \mu_{0B}) &= \varphi_2(f_\eta, \mu_{0C}) + \varphi_{21}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R \\ &\quad + \varphi_{22}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R^2 \\ \varphi_3(f_\eta, \mu_{0B}) &= \varphi_3(f_\eta, \mu_{0C}) + \varphi_{31}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R \\ &\quad + \varphi_{32}(f_\eta, \mu_{0C}) \Delta R^2 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

由式(18)可以得到非线性变标因子和调频率随距离的变化率:

$$\alpha_v = \frac{a}{a_{ref}}, \quad \beta = \frac{1}{a^2} \left( b_{ref} - \frac{a_{ref}}{a} b \right) \quad (19)$$

其中,  $a = 2\varphi_{11}/c$ ,  $b = 2\varphi_{12}/c$ 。

$$k_s = -\frac{4}{\lambda f_c^2} k_{mref}^2 (f_\eta, \mu_{0C}) \cdot \left[ \frac{\mu_{21}}{16\mu_{2Cnew}^2} (\lambda f_\eta)^2 + \left( \frac{9\mu_{3C}\mu_{21} - \mu_{31}\mu_{2Cnew}}{64\mu_{2Cnew}^4} \right) (\lambda f_\eta)^3 \right] \quad (20)$$

后续的处理步骤和常规 NCS 方法类似<sup>[15]</sup>, 只是在方位维处理之前需要校正运动补偿因子  $\Delta\tau_{II}$ 。

$$H_{2MOCO}(\tau, \eta) = \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} (1 + A_s) \left( \frac{\langle \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_0|} - \frac{\langle \mathbf{R}_{0C} \cdot \mathbf{A} \rangle}{2|\mathbf{R}_{0C}|} \right) \eta^2 \right] \quad (21)$$

本文算法流程如图 7 所示。

从图 7 可以看到, 相对于文献[13]提出的 ECS 算法, 本文提出的 NCS 算法由于增加了三次相位滤波和运动补偿函数, 因此需要 8 次傅里叶变换和 7 次相位函数相乘, 需要的复乘次数为  $N_{NCS} = 7N_a N_r + 2N_a N_r \log_2(N_a N_r)$ , 其中  $N_a$  是方位维采样点数,  $N_r$  是距离维采样点数; ECS 算法需要 6 次傅里叶变换和 4 次相位函数相乘, 总的复乘次数为  $N_{ECS} = 4N_a N_r + 1.5N_a N_r \log_2(N_a N_r)$ , 两者运算量之比为  $N_{NCS} / N_{ECS} = [7 + 2\log_2(N_a N_r)] / [4 + 1.5\log_2(N_a N_r)]$ , 因此本文算法的运算量和 ECS 算法运算量在同一个数量级, 差别不大, 可实时成像。

### 5 算法仿真

为了验证该算法的有效性, 将该算法与文献[13]中算法的成像结果比较。场景中心点  $C$  坐标为  $(0, 10000, 0)$ , 边缘点  $A$  和  $B$  坐标分别为  $(0, 9000, 0)$ ,  $(0, 11000, 0)$ , 两者选用同样的参数, 仿真参数如表 1 所示。

图 8 和图 9 分别给出了基于运动补偿的 NCS 算法成像结果和文献[13]提出的 ECS 算法的成像结果。为进一步说明成像质量, 选择分辨率、峰值旁瓣比(Peak Side-Lobe Ratio, PSLR)和积分旁瓣比(Integrated Side-Lobe Ratio, ISLR)作为衡量成像结果的指标, 如表 2 所示。由于本文算法校正了加速度带来的时变误差, 因此场景中的点目标几乎没有出现方位维散焦的状况, 且方位维分辨率、PSLR 和 ISLR 都接近理论值; ECS 算法只校正了方位时不变误差, 忽略了时变误差, 因此场景中边缘点目标方位维主瓣展宽, 旁瓣升高, 主、副瓣之间耦合严重, 成像效果变差。

### 6 结束语

本文通过曲线运动轨迹, 将前斜视成像模式转化成斜视成像模式, 然后分析了斜视模式下加速度的各个分量带来的运动误差对成像的影响, 经分析可知, 对成像效果起决定作用的是成像平面内的加速度分量, 本文采用矢量方法对其进行补偿。此外, 对于加

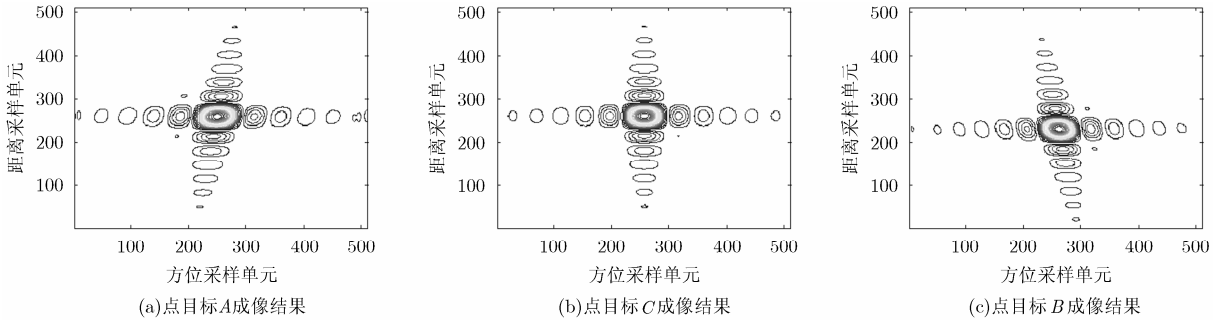


图 8 本文算法成像结果

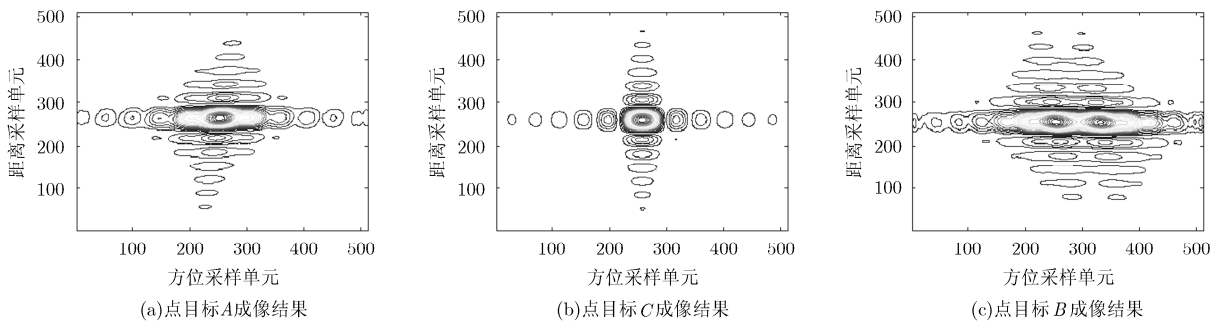


图 9 ECS 算法成像结果

表2 成像评估结果

		距离维			方位维		
		分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
理论值		3.32	-13.26	-9.80	1.80	-13.26	-9.80
ECS 算法	A	3.34	-13.16	-10.15	2.05	-7.70	-5.54
	B	3.35	-13.19	-10.13	2.46	-3.55	-6.12
	C	3.33	-13.17	-10.05	1.83	-13.17	-9.99
本文算法	A	3.34	-13.16	-10.08	1.86	-13.15	-9.98
	B	3.34	-13.19	-10.11	1.86	-13.18	-9.97
	C	3.33	-13.17	-9.99	1.83	-13.17	-9.95

速度带来的较大的距离徙动,通过级数反演法求出信号的2维频谱,然后结合NCS算法对目标进行成像,取得了良好的结果。

### 参考文献

- [1] 庞礴,代大海,邢世其,等.前视SAR成像技术的发展和展望[J].系统工程与电子技术,2013,35(11):2283-2290. doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.11.09.  
PANG Bo, DAI Dahai, XING Shiqi, et al. Development and perspective of forward-looking SAR imaging technique[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(11): 2283-2290. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.11.09.
- [2] 黎剑兵,张双喜,苏大亮,等.一种多普勒域走动校正的斜视SAR成像算法[J].宇航学报,2016,37(1):118-126. doi:10.3873/j.issn.1000-1328.2016.01.015.  
LI Jianbing, ZHANG Shuangxi, SU Daliang et al. A squint SAR imaging algorithm for linear range cell migration correction in Doppler domain[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(1): 118-126. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.01.015.
- [3] 梁颖,张群,杨秋,等.基于改进NCS算法的弹载FMCW SAR大斜视成像方法[J].系统工程与电子技术,2016,38(8):1764-1770. doi:10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.09.  
LIANG Ying, ZHANG Qun, YANG Qiu, et al. Study on the high squint imaging method for missile-borne FMCW SAR based on extended NCS algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(8): 1764-1770. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.09.
- [4] CUMMING I G and WONG F. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005, Chapters 1-4.
- [5] YI Yusheng, ZHANG Linrang, LI Yan, et al. Range Doppler algorithm for bistatic missile-borne forward-looking SAR[C]. 2nd Asian-pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings, Xi'an, China, 2009, 4: 960-963. doi: 10.1109/APSAR.2009.5374268.
- [6] 孟自强,李亚超,邢孟道,等.基于斜距等效的弹载双基前视SAR相位空变校正方法[J].电子与信息学报,2016,38(3):613-621. doi:10.11999/JEIT150782.  
MENG Ziqiang, LI Yachao, XING Mengdao, et al. Phase space-variance correction method for missile-borne bistatic forward-looking SAR based on equivalent range equation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 613-621. doi: 10.11999/JEIT150782.
- [7] HEE S S and JONG T L. Omega-K algorithm for airborne forward-looking spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 312-316. doi: 10.1109/LGRS.2008.2011924.
- [8] LI Wenchao, YANG Jianyu, HUANG Yulin, et al. A geometry-based Doppler centroid estimator for bistatic forward-looking SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 388-392. doi: 10.1109/LGRS.2011.2170151.
- [9] 孟自强,李亚超,邢孟道,等.弹载双基前视SAR扩展场景成像算法设计[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2016,43(3):31-37. doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.006.  
MENG Ziqiang, LI Yachao, XING Mengdao, et al. Imaging method for the extended scene of missile-borne bistatic forward-looking SAR[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2016, 43(3): 31-37. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.006.
- [10] REN Xiaozhen, SUN Jiantao, YANG Ruliang, et al. A new three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 153-157. doi: 10.1109/LGRS.2010.2055035.
- [11] 包敏,周鹏,史林.双天线前视弹载SAR解模糊算法研究[J].电子与信息学报,2013,35(12):2857-2862. doi:10.3724/SP.J.1146.2013.00083.  
BAO Min, ZHOU Peng, and SHI Lin. Study on deambiguity algorithm for double antenna forward looking missile borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2857-2862. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00083.
- [12] 陈琦,杨汝良.机载前视合成孔径雷达Chirp Scaling成像算

- 法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 228-232. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00747.
- CHEN Qi and YANG Ruliang. Research of chirp scaling algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(1): 228-232. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.00747.
- [13] 刘高高, 张林让, 刘昕, 等. 一种曲线轨迹下的大场景前斜视成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 628-633. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00575.
- LIU Gaogao, ZHANG Linrang, LIU Xin, *et al.* Missile-borne large region squint SAR algorithm based on a curve trajectory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 628-633. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00575.
- [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.
- [15] DAVIDSON G W, CUMMING I G, and ITO M R. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133. doi: 10.1109/7.481254.
- 张 延: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为机载/弹载SAR成像.
- 张林让: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、雷达系统仿真、雷达成像等.
- 唐世阳: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为曲线轨迹SAR成像.