

## 基于斜距等效的弹载双基前视SAR相位空变校正方法

孟自强\* 李亚超 邢孟道 保铮

(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:** 作为一种特殊的新型双基合成孔径雷达(SAR)成像模式, 弹载双基前视 SAR (Missile-borne Bistatic Forward-Looking SAR, MBFL-SAR)可实现末端俯冲段前视 2 维成像。然而距离历程中双根号及高阶项的同时存在导致其 2 维频谱难以有效获得, 且收发平台高度的不断变化和运动方向的不同造成回波相位的空变特性。该文提出一种基于斜距等效的 MBFL-SAR 相位空变校正方法。该方法利用修正的双曲线斜距模型将具有双根号和高阶项的距离历程表达式等效并简化为单根号斜距表达形式, 进而利用驻定相位原理求得其高精度 2 维频谱; 随后通过多项式高阶拟合的方法精确补偿频谱中空变的相位项, 完成场景成像聚焦。该方法可高精度成像且相对于传统方法聚焦性能有显著提高。最后, 通过仿真验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 弹载合成孔径雷达; 双基前视; 双曲线斜距模型; 空变性校正; 驻定相位原理

**中图分类号:** TN957

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2016)03-0613-09

**DOI:** 10.11999/JEIT150782

## Phase Space-variance Correction Method for Missile-borne Bistatic Forward-looking SAR Based on Equivalent Range Equation

MENG Ziqiang LI Yachao XING Mengdao BAO Zheng

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

**Abstract:** As a new and special bistatic SAR imaging mode, Missile-borne Bistatic Forward-Looking SAR (MBFL-SAR) can perform Two-Dimensional (2D) imaging during the terminal diving period of missile. However, double square root and high order terms in range history make it difficult to obtain its 2D frequency spectrum effectively. The changing heights and different velocities of the transmitter and the receiver yield to the space variant characteristic of echo signal phase. This paper presents a phase space-variance correction method for MBFL-SAR based on the revised equivalent range equation. In this method, the range equation containing double square root and high order terms is equivalent and simplified to one only containing single square root, based on which 2D frequency spectrum with high precision is gained using the principle of stationary phase. Then, the space variant phase terms of 2D frequency spectrum are compensated accurately through high order polynomial fitting, followed by the focus of the imaging scene. This method can perform imaging with high precision and is more efficient than the traditional algorithm. Finally, the simulation experiments validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** Missile-borne SAR; Bistatic forward-looking; Hyperbolic range equation; Space variance correction; Principle of stationary phase

### 1 引言

双基前视合成孔径雷达(Bistatic Forward-looking Synthetic Aperture Radar, BF-SAR)成像是近年来SAR成像研究的热点之一<sup>[1-4]</sup>。结合双基平台分置、几何配置灵活等优势, 使其中一个平台

前视工作, 两平台协同飞行可为成像提供足够的多普勒带宽, 从而实现前视2维成像, 有效弥补了单基SAR无法对正前方目标2维成像的缺陷<sup>[5]</sup>。

弹载双基前视合成孔径雷达(Missile-borne Bistatic Forward-Looking Synthetic Aperture Radar, MBFL-SAR)是将双基前视SAR成像体制应用于弹载平台, 发射平台斜视、接收平台前视工作的双基地成像模式。MBFL-SAR可实现弹体正前方目标的2维高分辨成像, 在许多特定的场合下具有无可比拟的优势, 尤其在导弹处于末端俯冲下降段, 打击如舰母战斗群、近岸舰船编队等复杂背景目标时, 海岸环境中船舶密集、目标分布复杂, 同时岛

收稿日期: 2015-06-29; 改回日期: 2015-12-02; 网络出版: 2016-01-22

\*通信作者: 孟自强 mengziqiang@hotmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61001211, 61303035, 61471283), 中央高校基本科研业务费(K5051202016)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61001211, 61303035, 61471283), Fundamental Research Funds for the Central Universities (K5051202016)

岸林立、地形背景复杂, 现有单脉冲雷达测角和单基 SAR 成像制导手段难以对目标区域进行全程 2 维高分辨成像探测, 很难实现对目标的有效分离<sup>[6,7]</sup>, 而双基前视体制与弹载运动平台的有效结合可使 MBFL-SAR 实现弹载末端俯冲下降阶段全程 2 维成像、自主寻的精确制导, 在对地质探测、无人机协同作战、导弹主动寻的等方面具有潜在的体制优势。

与传统机载 SAR 相比, MBFL-SAR 在下降过程中收发平台均存在较大的速度和加速度, 在距离历程中同时存在双根号和高阶项表达形式, 更为复杂的距离历程使得传统机载平台下 2 维频谱求解方法<sup>[8-10]</sup>不再适用于 MBFL-SAR; 同时收发平台高度的不断变化和运动方向的不同导致回波相位的空变特性, 给后续成像带来困难<sup>[11]</sup>。由此可见, 双基前视与弹载平台的结合, 使得 MBFL-SAR 成像难度增大, 需要结合弹载 SAR 下降段<sup>[12,13]</sup>及双基前视 SAR<sup>[14,15]</sup>成像进行研究。然而目前现有文献均不是针对双基高阶项及相位空变问题进行的研究, 因此有必要在这些研究成果的基础上专门分析 MBFL-SAR 距离历程以及回波信号的特点, 以明确该构型下成像算法的必要性。

本文针对 MBFL-SAR 这种特殊的双基前视成像模式中距离历程双根号及高阶项的表达形式复杂以及频谱相位空变的问题, 提出了基于斜距等效的相位空变校正方法。首先结合 MBFL-SAR 空间几何构型, 建立 MBFL-SAR 的距离模型; 利用修正的双曲线斜距模型, 将 MBFL-SAR 距离历程等效并简化为单根号传统双曲函数形式; 随后利用驻定相位原理求解得到 MBFL-SAR 回波信号的高精度 2 维频谱; 针对频谱中空变的相位项, 通过多项式高阶拟合的方法进行精确补偿, 进而设计出高效的频域成像算法, 明显改善了成像场景的聚焦性能。最后, 与传统方法的对比仿真验证了本文算法的有效性和实用性。

$$R_{bf}(t_m) = R_R(t_m) + R_T(t_m)$$

$$= \sqrt{(x'_t - x'_p)^2 + (v_{ty'0}t_m + 0.5a_{ty'}t_m^2 - y'_p)^2 + (H_T + v_{tz0}t_m + 0.5a_{tz}t_m^2)^2} + \sqrt{x_p^2 + (v_{ry0}t_m + 0.5a_{ry}t_m^2 - y_p)^2 + (H_R + v_{rz0}t_m + 0.5a_{rz}t_m^2)^2} \quad (1)$$

式中:  $(x'_p, y'_p, 0)$  为点目标  $(x_p, y_p, 0)$  在发射机坐标系中的位置, 可通过旋转因子  $\begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$  求得。

传统机载双基前视 SAR 由于不存在加速度, 其距离历程中仅包含方位时间的二次项; 而在 MBFL-SAR 中, 由于加速度的存在, 收发平台不再沿直线轨迹运动, 距离历程含有四次项形式, 如式

## 2 MBFL-SAR 空间几何模型

图 1 为 MBFL-SAR 俯冲下降段成像几何构型,  $O$  为直角坐标系原点, 为表述方便, 发、收平台的运动关系分别在坐标系  $xOyz$  和  $x'Oy'z$  中表示。发射机在与平面  $yOz$  成  $\psi$  夹角的平面内沿曲线  $\widehat{A_t B_t}$  做下降运动, 斜视照射成像区域, 瞬时速度为  $\mathbf{v}_t$ ,  $\mathbf{v}_t$  在  $y'$  方向和  $z$  方向的分量分别记为  $v_{ty'}$  与  $v_{tz}$ ; 接收机在  $yOz$  平面内沿曲线  $\widehat{A_r B_r}$  做下降运动, 前视接收目标区域回波, 其瞬时速度为  $\mathbf{v}_r$ ,  $\mathbf{v}_r$  在  $y$  方向和  $z$  方向的分量分别记为  $v_{ry}$  与  $v_{rz}$ 。  $P(x_p, y_p, 0)$  为测绘带内一个点目标, 假设场景平坦, 不存在高度起伏。

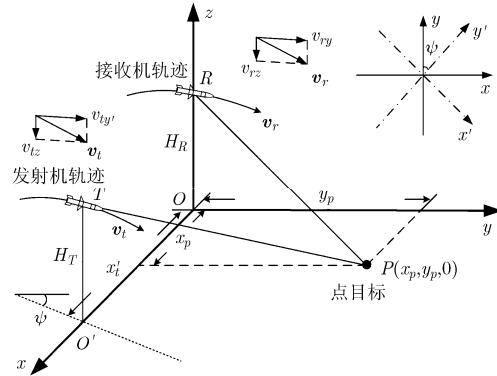


图 1 MBFL-SAR 运动几何构型

设慢时间  $t_m=0$  时  $H_R$  和  $H_T$  分别表示接收机和发射机的高度, 此时收、发平台在坐标系  $xOyz$  和  $x'Oy'z$  中的位置分别为  $R_0(0,0,H_R)$  和  $T_0(x'_t, 0, H_T)$ ,  $O'$  为  $T_0$  在水平面内的投影。  $(0, v_{ry0}, v_{rz0})$  和  $(0, v_{ty'0}, v_{tz0})$  为此时速度向量,  $(0, a_{ry}, a_{rz})$  和  $(0, a_{ty'}, a_{tz})$  为加速度向量。则在任意  $t_m$  时刻接收机在坐标系  $xOyz$  中的位置坐标可表示为  $(0, v_{ry0}t_m + 0.5a_{ry}t_m^2, H_R + v_{rz0}t_m + 0.5a_{rz}t_m^2)$ ; 发射机在坐标系  $x'Oy'z$  中的位置坐标可表示为  $(x'_t, v_{ty'0}t_m + 0.5a_{ty'}t_m^2, H_T + v_{tz0}t_m + 0.5a_{tz}t_m^2)$ , 则雷达与目标  $P(x_p, y_p, 0)$  之间的瞬时双基斜距可表示为

(1)所示, 更为复杂的距离历程使得传统机载平台下传统 2 维频谱求解方法<sup>[8-10]</sup>不再适用于 MBFL-SAR, 需要探寻新的方法。

## 3 MBFL-SAR 2 维频谱推导及精度分析

### 3.1 MBFL-SAR 斜距等效及 2 维频谱推导

根据文献<sup>[11]</sup>, MBFL-SAR 构型下较高速度和加速度的存在, 不仅引入了距离历程的高次项, 而

且带来了更为严重的距离走动量，增大了距离/方位向的耦合，给后续距离徙动校正带来了困难。为便于后续分析和成像处理，这里引入线性相位函数补偿距离走动分量以减少2维耦合量，然后基于修正的双曲线斜距模型，将MBFL-SAR的距离历程双根号形式进行等效并简化为单基传统单根号形式的斜距表达式，进而利用驻定相位原理求解得到回波信号的2维频谱。

设发射信号为线性调频信号，对于任意目标点 $P(x_p, y_p, 0)$ 的SAR回波信号可表示为

$$s(\hat{t}, t_m) = w_r \left[ \hat{t} - \frac{R_{bf}(t_m)}{c} \right] w_a(t_m) \cdot \exp \left\{ j\pi\gamma \left[ \hat{t} - \frac{R_{bf}(t_m)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[ -j\frac{2\pi}{\lambda} R_{bf}(t_m) \right] \quad (2)$$

式中， $w_r(\hat{t})$ ， $w_a(t_m)$ 分别为雷达线性调频信号的距离向窗函数和方位向窗函数， $\hat{t}$ 为快时间， $t_m$ 为慢时间， $c$ 为光速， $\lambda$ 为波长。

将回波信号 $s(\hat{t}, t_m)$ 进行距离向傅里叶变换，得到

$$s(f_r, t_m) = W_r(f_r) w_a(t_m) \cdot \exp \left[ -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] \cdot \exp \left[ -j\frac{2\pi}{c} (f_r + f_c) R_{bf}(t_m) \right] \quad (3)$$

为减小距离和方位向的耦合量，在距离频域-方位时域进行线性走动量校正，相位补偿函数可表示为

$$H_{lc}(t_m) = \exp \left[ -j2\pi(f_r + f_c) k_{lm} t_m / c \right] \quad (4)$$

式中， $k_{lm}$ 为场景中心对应距离走动量系数。

将式(3)所示的信号 $s(f_r, t_m)$ 与式(4)相乘，得到

$$s_{ip}(f_r, t_m) = W_r(f_r) w_a(t_m) \exp \left[ -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right] \cdot \exp \left[ -j\frac{2\pi}{c} (f_r + f_c) R_{bf1}(t_m) \right] \quad (5)$$

式中，

$$R_{bf1}(t_m) = \sqrt{R_{rcen}^2 + \mu_{r1} t_m + \mu_{r2} t_m^2 + \mu_{r3} t_m^3 + \mu_{r4} t_m^4} + \sqrt{R_{rcen}^2 + \mu_{t1} t_m + \mu_{t2} t_m^2 + \mu_{t3} t_m^3 + \mu_{t4} t_m^4} - k_{lm} t_m \quad (6)$$

可以看出，式(1)和式(6)的斜距表示式均包含有双根号和高阶项表达式，根据该表达式很难有效获得其2维频谱。为此，这里利用修正的双曲线斜距模型对式(6)进行等效，将其简化为单根号斜距表达式形式。

在距离历程等效之前需要对其进行合理近似，为充分考虑收发平台中较高速度和加速度的影响并最终得到聚焦良好的SAR图像，距离历程中的高阶项需要考虑。而根据SAR性质可知<sup>[8]</sup>，斜距近似式引入的相位误差应远小于 $\pi/4$ ，因此对斜距 $R_{bf1}(t_m)$ 进行泰勒级数展开时需要保留至3次项方能满足成像要求<sup>[11]</sup>，即

$$R_{bf1}(t_m) \approx R_{bf0} + k_1 t_m + k_2 t_m^2 + k_3 t_m^3 \quad (7)$$

式中， $R_{bf0}$ 表示在合成孔径中心时刻的双基距离和， $k_1$ ， $k_2$ ， $k_3$ 为泰勒级数展开系数。

基于以上对斜距 $R_{bf1}(t_m)$ 的泰勒展开，下面利用修正的双曲线斜距模型对式(6)进行等效，其中双曲线形式的SAR斜距式可表示为

$$R_{bf1}(t_m) = \sqrt{R_{bf0}^2 \cos^2 \theta_{eq} + (V_{eq} t_m - R_{bf0} \sin \theta_{eq})^2} \quad (8)$$

式中， $V_{eq}$ 为等效速度， $\theta_{eq}$ 为等效斜视角。类比式(7)，将式(8)写成三阶泰勒级数的形式，得到

$$R_{bf1}(t_m) \approx R_{bf0} - V_{eq} \sin \theta_{eq} t_m + \frac{V_{eq}^2 \cos^2 \theta_{eq}}{2R_{bf0}} t_m^2 + \frac{V_{eq}^3 \sin \theta_{eq} \cos^2 \theta_{eq}}{2R_{bf0}^2} t_m^3 \quad (9)$$

将式(7)和式(9)进行比较可知，只有两个未知数 $V_{eq}$ 和 $\theta_{eq}$ 的式(9)，只能够对MBFL-SAR斜距历程实现二阶精确逼近，对于未补偿的3次项将会严重影响MBFL-SAR2维频谱的精度，一种有效的解决方法是通过引入线性分量来实现3次精确近似<sup>[16]</sup>，即

$$R_{bf1}(t_m) = \sqrt{R_{bf0}^2 \cos^2 \theta_{eq} + (V_{eq} t_m - R_{bf0} \sin \theta_{eq})^2} + p t_m \quad (10)$$

式中， $p$ 为引入的线性修正因子， $V_{eq}$ ， $\theta_{eq}$ 和 $p$ 为待定量。为确定 $V_{eq}$ ， $\theta_{eq}$ 和 $p$ 的值，将式(10)在 $t_m=0$ 处展开成泰勒级数形式，得

$$R_{bf1}(t_m) \approx R_{bf0} + (-V_{eq} \sin \theta_{eq} + p) t_m + \frac{V_{eq}^2 \cos^2 \theta_{eq}}{2R_{bf0}} t_m^2 + \frac{V_{eq}^3 \sin \theta_{eq} \cos^2 \theta_{eq}}{2R_{bf0}^2} t_m^3 \quad (11)$$

联立式(7)和式(11)，解得

$$\left. \begin{aligned} V_{eq} &= \sqrt{\left( \frac{k_3}{k_2} R_{bf0} \right)^2 + 2k_2 R_{bf0}} \\ \theta_{eq} &= \arcsin \frac{k_3 R_{bf0}}{k_2 V_{eq}} \\ p &= k_1 + \frac{k_3}{k_2} R_{bf0} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

在得到等效的斜距表达式后,对  $s_p(f_r, t_m)$  进行方位傅里叶变换并利用驻定相位原理即可得到回波信号的 2 维频谱表达式

$$S(f_r, f_a) = W_r(f_r) W_a(f_a) \exp[j\phi(f_r, f_a)] \quad (13)$$

式中,  $f_a$  表示多普勒频率,  $W_a(f_a)$  表示信号在多普勒域的包络, 式(13)中的相位项表示为

$$\begin{aligned} \phi(f_r, f_a) = & -\pi \frac{f_r^2}{\gamma} - 2\pi \frac{f_c + f_r}{c} \frac{R_{bf0} \sin \theta_{eq}}{V_{eq}} p \\ & - 2\pi \frac{R_{bf0} \sin \theta_{eq}}{V_{eq}} f_a - 2\pi \frac{R_{bf0} \cos \theta_{eq}}{\lambda} \\ & \cdot \sqrt{A^2(f_a, R_{bf0}) + 2B(f_a, R_{bf0}) \left(\frac{f_r}{f_c}\right) + C \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} A(f_a, R_{bf0}) &= \sqrt{1 - \left(\frac{cf_a}{V_{eq}f_c} + \frac{p}{V_{eq}}\right)^2} \\ B(f_a, R_{bf0}) &= 1 - \frac{p}{V_{eq}} \left(\frac{cf_a}{V_{eq}f_c} + \frac{p}{V_{eq}}\right) \\ C(f_a, R_{bf0}) &= 1 - \left(\frac{p}{V_{eq}}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

### 3.2 2维频谱精度分析

以上利用斜距等效和驻定相位原理得到了 MBFL-SAR 的 2 维频谱表达式,然而在斜距等效过程中存在近似,因此有必要分析修正的双曲线斜距模型在 MBFL-SAR 构型下等效所引入的误差以及所得到的 2 维频谱的精度,以确保 MBFL-SAR 的精确成像。

首先在斜距等效过程中存在式(7)和式(11)的近似,由于两式在推导过程中完全等价,故只需要分析式(7)的近似精度即可。另外,所得到的 2 维频谱必须高度精确方能保证后续设计成像算法的有效性,以确保在 MBFL-SAR 这个特殊构型下的有效成像。根据文献[17],利用级数反演法可得到高度精确的 2 维频谱,因此这里选取级数反演法得到的频谱进行对比分析。

根据式(7)中的斜距表达式,利用级数反演法<sup>[17]</sup>可得到如式(16)的高度精确的 2 维频谱表达式:

$$\begin{aligned} \phi_{MSR}(f_r, f_a) = & -2\pi \frac{f_c + f_r}{c} R_{bf0} - \pi \frac{f_r^2}{\gamma} \\ & + 2\pi \frac{c}{4k_2(f_c + f_r)} \left(f_a + (f_c + f_r) \frac{k_1}{c}\right)^2 \\ & + 2\pi \frac{k_3 c^2}{8k_2^3(f_c + f_r)^2} \left(f_a + (f_c + f_r) \frac{k_1}{c}\right)^3 \end{aligned} \quad (16)$$

则在 2 维频率域的相位误差可表示为

$$\Delta E(f_r, f_a) = |\phi_{MSR}(f_r, f_a) - \phi(f_r, f_a)| \quad (17)$$

需要注意的是,由式(12)可知,在 MBFL-SAR 运动构型下,等效参量  $V_{eq}$ ,  $\theta_{eq}$  和  $p$  均与斜距  $R_{bf0}$  相关,即场景中不同位置处的目标点对应的  $V_{eq}$ ,  $\theta_{eq}$  和  $p$  均不相同,表现为位置的空变性(第 4 节将对该空变性做定量分析)。因此,2 维频率域的相位误差  $\Delta E(f_r, f_a)$  也会随着目标点的位置发生变化。为避免场景边缘点严重散焦,需要对可用场景范围加以限制,要求 2 维频率域相位误差不大于  $\pi/4$ , 即  $\Delta E(f_r, f_a) \leq \pi/4$ 。由上述限制可确定满足成像要求的场景大小。但是在 MBFL-SAR 构型下各运动参量之间存在非线性耦合关系(参照式(12)和式(14)),很难根据上述限制条件求得满足要求的场景大小的理论解析式。而根据仿真参数和运动几何关系,可确定弹载双基前视 SAR 的场景测绘带宽,如果测绘带宽内的每个目标点的频谱相位误差均能满足  $\Delta E(f_r, f_a) \leq \pi/4$  的要求,即可说明本文方法得到的 2 维频谱满足精度要求。

这里借助第 5 节中仿真参数,首先计算得到 MBFL-SAR 构型下的测绘带宽,然后分别对场景中心点和边缘点目标进行仿真实验,以验证斜距等效误差和频谱精度。其中对频谱精度的仿真中,距离频率在 -75 MHz 到 75 MHz 范围内变化,方位频率在 -3 kHz~3 kHz 内变化。由于通常用  $\pi/4$  作为限定相位近似误差的门限,这里以  $\pi/4$  的倍数作为输出,仿真结果如图 2 和图 3 所示。

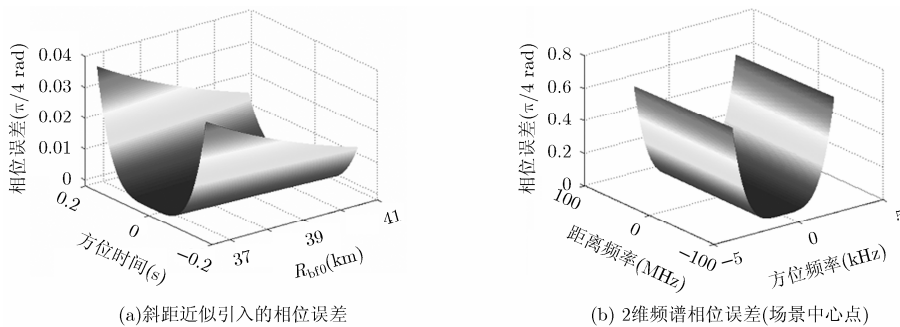


图 2 斜距等效随距离变化及场景中心点 2 维频谱相位误差仿真结果

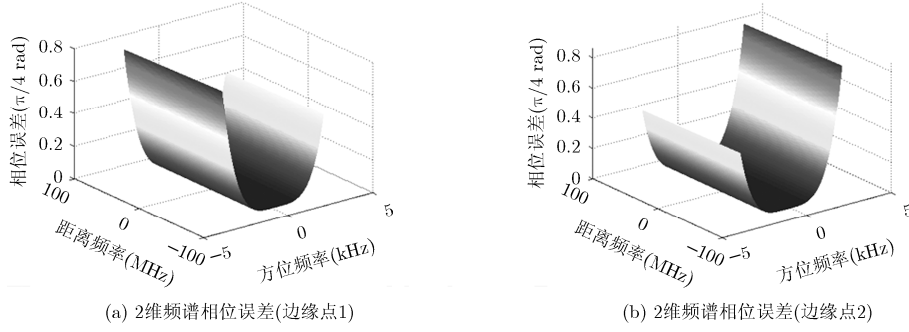


图3 场景边缘点2维频谱相位误差仿真结果

图2(a)表示斜距等效引入的相位误差随斜距的变化,可以看到,最大相位误差分别约为 $\pi/4$ 的0.038倍,远小于 $\pi/4$ 。图2(b)表示场景中心点的2维频谱相位误差,最大相位误差约为 $\pi/4$ 的0.59倍;图3分别为两个场景边缘点2维频谱相位误差,最大相位误差分别约为 $\pi/4$ 的0.76倍和0.81倍,均小于限定相位误差的门限。根据以上分析可知,该文方法得到的等效斜距以及2维频谱可满足后续高精度成像处理。

## 4 MBFL-SAR相位空变校正及成像算法设计

### 4.1 相位空变性分析

由式(14)可知,回波信号的2维频谱存在 $f_r$ 和 $f_a$ 的耦合,不便于后续成像处理。因此将式(14)在 $f_r = 0$ 处进行泰勒级数展开(这里保留到3次项),整理得到

$$\begin{aligned} \phi(f_r, f_a) = & \phi_{rg}(f_r) + \phi_a(f_a) \\ & + \phi_{rcm}(f_r, f_a) + \phi_{src}(f_r, f_a) + \phi_{res} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $\phi_{res}$ 为残余相位项,对成像的影响可以忽略,式(18)中的其余4项可表示为

$$\phi_{rg}(f_r) = -\pi f_r^2 / \gamma \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \phi_a(f_a, R_{bf0}) = & -2\pi \frac{R_{bf0} \sin \theta_{eq}}{V_{eq}} f_a \\ & - \frac{2\pi R_{bf0} \cos \theta_{eq}}{\lambda} A(f_a, R_{bf0}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \phi_{rcm}(f_r, f_a, R_{bf0}) = & -2\pi p \frac{R_{bf0} \sin \theta_{eq}}{c V_{eq}} f_r \\ & - 2\pi \frac{R_{bf0} \cos \theta_{eq} B(f_a, R_{bf0})}{\lambda f_c A(f_a, R_{bf0})} f_r \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \phi_{src}(f_r, f_a, R_{bf0}) = & \pi \frac{R_{bf0} \cos \theta_{eq}}{V_{eq}^2 f_c^3 A^3(f_a, R_{bf0})} c f_a^2 f_r^2 \\ & - \pi \frac{R_{bf0} \cos \theta_{eq}}{V_{eq}^2 A^5(f_a, R_{bf0}) f_c^4} \\ & \cdot B(f_a, R_{bf0}) c f_a^2 f_r^3 \end{aligned} \quad (22)$$

式(19)和式(20)中所示分别为距离和方位调制项;式(21)和式(22)分别表示距离徙动和二次距离压缩项,这两项的校正精度直接影响到图像聚焦性能的优劣。由前文所述,等效参量 $V_{eq}$ ,  $\theta_{eq}$ 和 $p$ 均与斜距 $R_{bf0}$ 相关,而表现出位置的空变性。为获取聚焦良好的SAR图像,需要对每个相位项的空变性进行分析并校正。需要指出的是,相对于一般双基地SAR,由于较高速度和加速度的同时存在,MBFL-SAR构型下的相位表现出更为剧烈的空变特性<sup>[1]</sup>,下面针对该空变性进行定量分析并给出校正方法。

式(20)~式(22)中相位项均具有随 $R_{bf0}$ 的空变性,由于在2维频域内同时无法对 $f_r$ ,  $f_a$ 和 $R_{bf0}$ 3个变量进行分析,因此这里借鉴文献[18]中的近似方法。假设发射信号带宽和方位多普勒带宽分别为 $B$ 和 $B_a$ ,由式(20)~式(22)可得到相对场景中心处空变的相位误差为<sup>[18]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \Delta \phi_a &= \left| \phi_a(B_a/2, R_{bf0}) - \phi_a(B_a/2, R_{bf0}) \right| \\ \Delta \phi_{rcm} &= \left| \phi_{rcm}(B/2, B_a/2, R_{bf0}) \right. \\ & \quad \left. - \phi_{rcm}(B/2, B_a/2, R_{bf0}) \right| \\ \Delta \phi_{src} &= \left| \phi_{src}(B/2, B_a/2, R_{bf0}) \right. \\ & \quad \left. - \phi_{src}(B/2, B_a/2, R_{bf0}) \right| \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

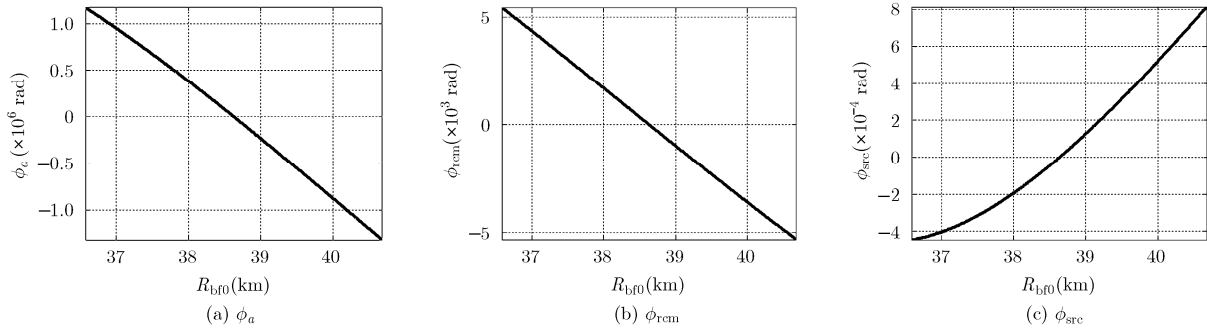
式中, $R_{bf0}$ 为场景中心处所对应的双基斜距。

按照表1中参数,可得到以上相位项随 $R_{bf0}$ 的变化曲线,结果如图4所示。

由以上仿真结果可知, $\phi_a$ 和 $\phi_{rcm}$ 的空变性严重;而对于 $\phi_{src}$ ,空变性很小,在成像处理时可以忽略。因此,在后续空变性校正过程中,可考虑 $\phi_a$ 和 $\phi_{rcm}$ 的空变,而忽略 $\phi_{src}$ 的空变。

### 4.2 空变性校正及成像处理

由上述分析可知相位项 $\phi_a$ 和 $\phi_{rcm}$ 的空变性不可忽略,而综观式(12),式(15)以及式(20)~式(22),以上相位项的空变是由等效运动参量 $V_{eq}$ ,  $\theta_{eq}$ 和 $p$ 随 $R_{bf0}$ 的空变所致。因此,为消除MBFL-SAR构

图4 各相位项随  $R_{bf0}$  的变化曲线

型下场景的空变性, 须充分考虑这 3 个等效运动参量随  $R_{bf0}$  的空变。这里将等效运动参量  $V_{eq}$ ,  $\theta_{eq}$  和  $p$  表示成斜距  $R_{bf0}$  的多项式高阶拟合形式, 以体现随  $R_{bf0}$  的变化规律, 即

$$\left. \begin{aligned} V_{eq}(\Delta r) &= V_{eqs} + \sum_{i=1}^N a_i(\Delta r)^i \\ \theta_{eq}(\Delta r) &= \theta_{eqs} + \sum_{i=1}^N b_i(\Delta r)^i \\ p(\Delta r) &= p_s + \sum_{i=1}^N c_i(\Delta r)^i \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

其中,  $V_{eqs}$ ,  $\theta_{eqs}$  和  $p_s$  为场景中心对应的等效运动参数;  $V_{eq}(\Delta r)$ ,  $\theta_{eq}(\Delta r)$  和  $p(\Delta r)$  是根据变化的  $R_{bf0}$  拟合之后的运动参数;  $a_i$ ,  $b_i$  和  $c_i$  为拟合系数;  $N$  为拟合阶数;  $\Delta r$  为场景中其他目标点相对中心点的斜距差异。

基于以上等效运动参量的高阶拟合, 在得到回波信号的 2 维频谱后, 可在 2 维频率域设计随距离变化的匹配滤波器  $H_{rc}(f_r, f_a)$  和  $H_{rcm}(f_r, f_a)$ , 完成距离脉冲压缩和空变的距离徙动校正; 距离 IFFT 后在距离-多普勒域设计匹配滤波器  $H_a(f_a)$  完成方位脉冲压缩, 得到聚焦后 SAR 图像。其中, 匹配滤波器分别为

$$H_{rc}(f_r, f_a) = \exp \left[ \begin{aligned} &j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} - j\pi \frac{R_{bfs} \cos(\theta_{eq}(R_{bfs}))}{(V_{eq}(R_{bfs}))^2 f_c^3 A^3(f_a, R_{bfs})} c f_a^2 f_r^2 \\ &+ j\pi \frac{R_{bfs} \cos(\theta_{eq}(R_{bfs}))}{(V_{eq}(R_{bfs}))^2 A^5(f_a, R_{bfs}) f_c^4} B(f_a, R_{bfs}) c f_a^2 f_r^3 \end{aligned} \right] \quad (25)$$

$$H_{rcm}(f_r, f_a) = \exp \left[ j2\pi \frac{R_{bf0} \cos(\theta_{eq}(\Delta r)) B(f_a, R_{bf0})}{\lambda f_c A(f_a, R_{bf0})} f_r \right] \quad (26)$$

$$H_a(f_a) = \exp \left[ j2\pi \frac{R_{bf0} \cos(\theta_{eq}(\Delta r))}{\lambda} A(f_a, R_{bf0}) \right] \quad (27)$$

由前文所述,  $\phi_{src}$  的空变性可忽略, 式(25)用括号中包含  $R_{bfs}$  的参量来表示场景中心处所对应参量, 而其他包含有  $\Delta r$  的则表示随距离变化的运动参量。

在具体实现过程中, 可对数据进行方位向分块处理, 针对每块数据进行聚焦处理, 最后对图像拼接得到整个场景的 SAR 图像, 其算法流程如图 5 所示。

## 5 仿真成像结果与分析

为验证分析的正确性和算法的有效性, 本节通过计算机仿真成像。仿真参数如表 1 所示, 场景中心  $A$  位于  $(0, 4500, 0)$ , 关于目标场景的布置, 采用 25 个点目标构成的点阵, 仿真尺寸为  $800 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ , 如图 6 所示, 聚焦处理中未加窗抑制旁瓣。

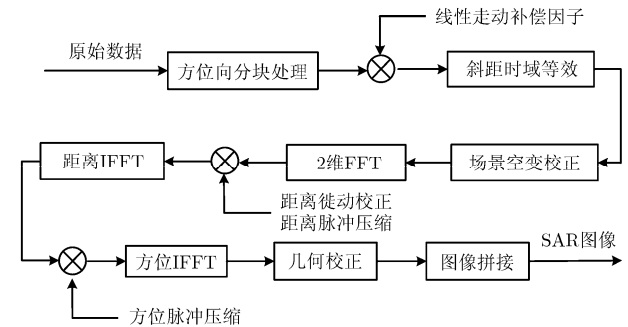


图5 算法流程图

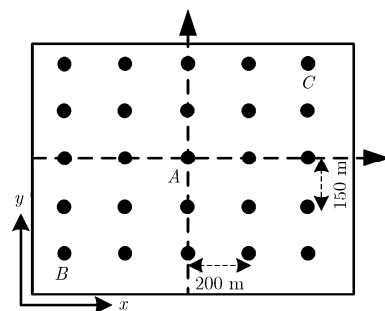


图6 目标场景布置

图7给出了不进行空变校正情况下场景目标点的方位脉冲响应，很明显可以看出由于采用场景中心处统一设计的匹配滤波器，两个边缘点沿方位向散焦严重；为充分验证本文算法在MBFL-SAR构型下的有效性，利用文献[2]中方法进行对比仿真，结果如图8所示，由于该方法在MBFL-SAR构型下对距离历程的近似误差较大，边缘点旁瓣仍然较高，质量较差；图9为采用本文方法得到的结果，可看出边缘点旁瓣得到了有效抑制。图10给出了利

用本文方法对场景目标A、B和C成像的2维剖面图，可看出边缘点均得到了很好聚焦，呈现出良好的“十字”，从而验证了本文算法的有效性。

为评估本文方法成像的聚焦性能，表2给出了场景目标A、B和C的成像质量参数，利用峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)对成像质量进行评估，虽然场景边缘点相对中心点聚焦性能略微下降，但与理论值相差不大，说明了本文算法的正确性和可行性。

表1 MBFL-SAR 仿真实验参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
波长(m)	0.02	PRF(kHz)	6	$v_{t0}$ (m/s)	(0,1050,-350)
信号带宽(MHz)	100	$\psi$ (°)	20	$a_r$ (m/s <sup>2</sup> )	(0, -20,10)
采样频率(MHz)	150	$H_T$ (km)	16	$v_0$ (m/s)	(0,1750, -500)
脉冲宽度( $\mu$ s)	2	$H_R$ (km)	15	$a_r$ (m/s <sup>2</sup> )	(0, -30,10)

表2 本文算法的成像质量参数

参数	理论值		目标点A		目标点B		目标点C	
	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向
PSLR (dB)	-13.26		-13.25	-13.26	-13.23	-13.27	-13.23	-13.32
ISLR (dB)	-9.8		-10.07	-9.87	-10.13	-10.10	-10.08	-10.02

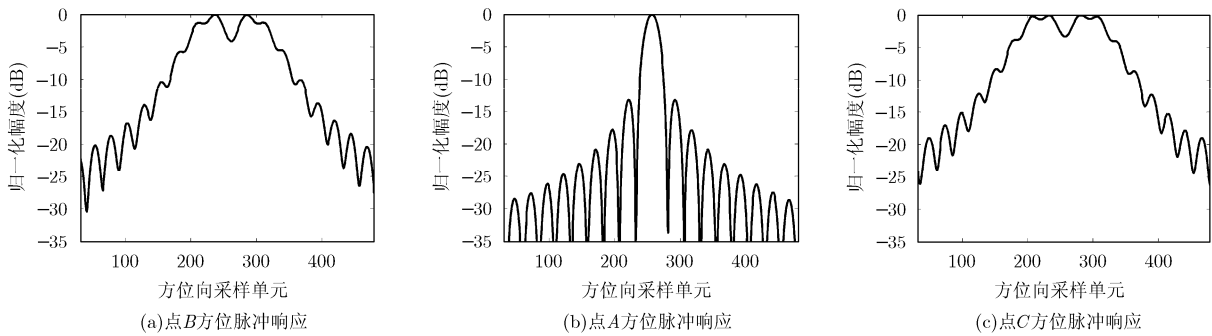


图7 不进行空变校正时的方位脉冲响应

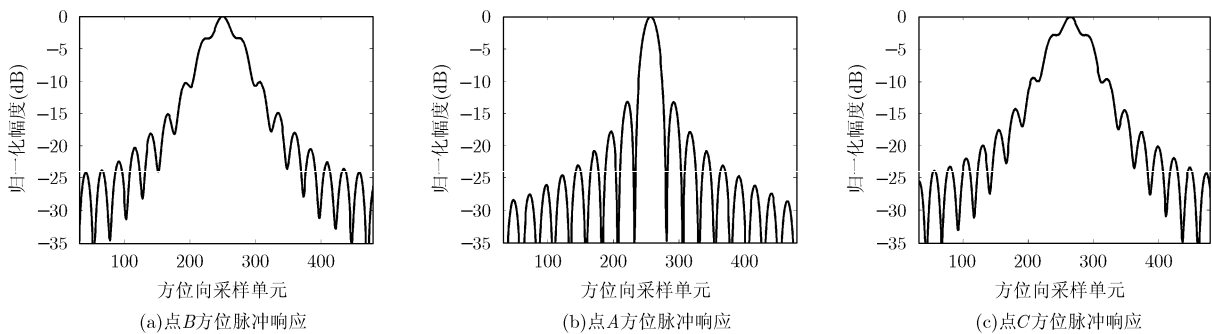


图8 文献[2]中方法校正的方位脉冲响应

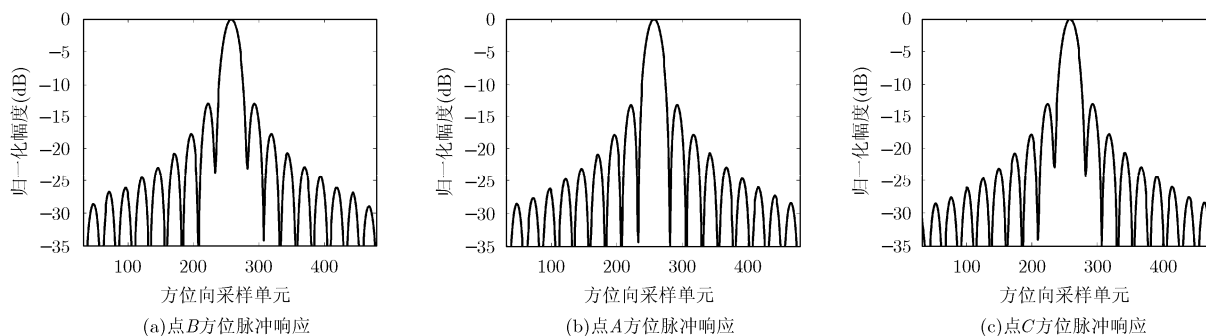


图9 本文方法校正的方位脉冲响应

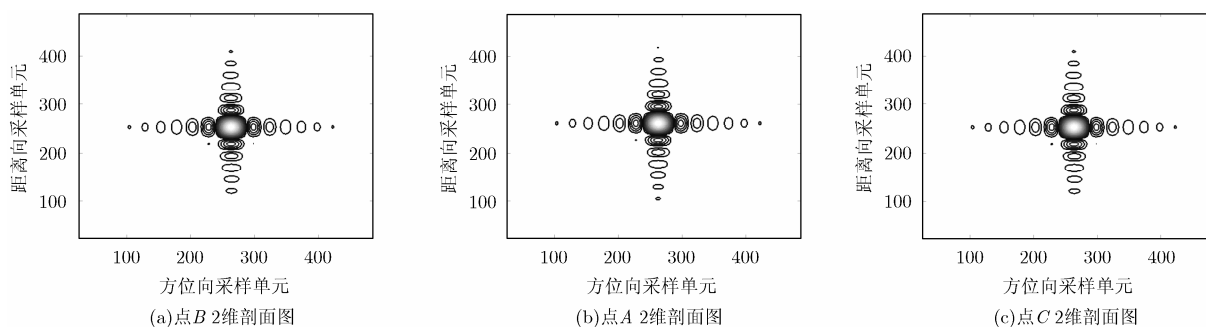


图10 本文方法成像2维剖面图

图11进一步给出了场景目标的成像结果(场景大小与前文一致),选取场景边缘区域(图中白色椭圆区域)进行比较,可看出:不进行校正情况下场景目标在方位向散焦严重,图像整体模糊;采用文献(2)中方法进行校正时边缘点聚焦效果得到明显提高,但聚焦效果仍然较差;利用本文方法处理时,边缘点聚焦性能得到进一步提高,该结果与点目标仿真结果相符。可见,本文方法一定程度上有效解决了由于弹载双基前视SAR运动构型所引入的空变特性,获得了良好的成像结果。

## 6 结论

本文方法可有效解决弹载双基前视SAR距离历程中双根号和高阶项表达形式复杂以及回波相位空变的问题。通过修正的双曲线斜距模型可将包含有双根号及高阶项的MBFL-SAR距离历程等效并简化为单根号表达形式,后续可直接利用注定相位原理推导求得其2维频谱;利用等效运动参量的多项式高阶拟合形式来设计匹配滤波器可实现对空变相位的精确校正。针对点目标及场景目标的仿真实验不仅验证了本文方法的有效性,并且突出了本方法在成像聚焦性能方面的优势。

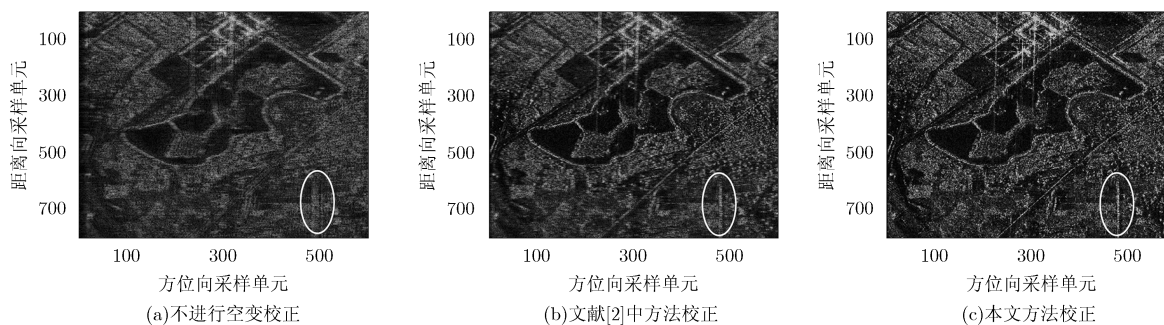


图11 场景目标仿真结果

## 参考文献

- [1] YANG Jianyu, HUANG Yulin, YANG Haiguang, *et al.* A first experiment of airborne bistatic forward-looking SAR -

Preliminary results[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Melbourne, 2013: 4202-4204.



- [2] QI C D, SHI X M, BIAN M M, *et al.* Focusing forward-looking bistatic SAR data with chirp scaling[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(3): 206-207.
- [3] LI Yachao, MENG Ziqiang, XING Mengdao, *et al.* Configuration study of missile-borne bistatic forward-looking SAR[C]. Proceedings of IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP), Xi'an, 2014: 184-188.
- [4] WU Junjie, LI Zhongyu, HUANG Yulin, *et al.* Focusing bistatic forward-looking SAR with stationary transmitter based on keystone transform and nonlinear chirp scaling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 148-152.
- [5] WALTERSCHEID I, ESPETER T, KLARE J, *et al.* Potential and limitations of forward-looking bistatic SAR[C]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '10), Honolulu, 2010: 216-219.
- [6] 毕开波, 杨兴宝, 陆永红. 导弹武器及其制导技术[M]. 国防工业出版社, 2013, 第2章.  
BI Kaibo, YANG Xingbao, and Lu Yonghong. Missile Weapon and Guidance Technology [M]. National Defence Industry Press, 2013. Chapter 2.
- [7] 杨立波, 任笑真, 杨汝良. 末制导合成孔径雷达信号分析及成像处理[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(6): 1176-1181.  
YANG Libo, REN Xiaozhen, and YANG Ruliang. Signal analysis and imaging processing of terminal guidance synthetic aperture radar[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2010, 32(6): 1176-1181.
- [8] CUMMING I G and WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA, Artech House: 2005, Chapters 3-5.
- [9] RAN Jinhe, CAO Lei, JIANG Hairong, *et al.* A modified bistatic point target reference spectrum for bistatic highly squint SAR processing[C]. Proceedings of Third International Conference on Information Science and Technology, Yangzhou, 2013: 1490-1493.
- [10] WANG R, LOFFELD O, NEO YL, *et al.* Extending Loffeld's bistatic formula for the general bistatic SAR configuration[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2010, 4(1): 74-84.
- [11] LI Yachao, MENG Ziqiang, ZHU Shengqi, *et al.* Property analysis of MIMO-based missile-borne forward-looking SAR[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014(578792): 1-9. doi: 10.1155/2014/578792.
- [12] 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.
- [13] 肖忠源, 徐华平, 李春升. 基于俯冲模型的频域距离走动校正 NLCS-SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1090-1096. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01207.  
XIAO Zhongyuan, XU Huaping, and LI Chunsheng. NLCS-SAR imaging algorithm with range-walk correction in frequency domain based on dive model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 1090-1096. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01207.
- [14] WANG Haocheng, YANG Jianyu, HUANG Yulin, *et al.* Extended SIFFT algorithm for bistatic forward-looking SAR[C]. Proceedings of 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR 2009), Xi'an, 2009: 955-959.
- [15] ZANG Hairong, WANG Yan, and LI Jingwen. New applications of parameter-adjusting polar format algorithm in spotlight forward-looking bistatic SAR processing[C]. Proceedings of Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Tsukuba, 2013: 384-387.
- [16] HUANG Lijia, QIU Xiaolan, HU Donghui, *et al.* Focusing of medium-earth-orbit SAR with advanced nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 500-508.
- [17] 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.
- [18] 周鹏, 周松, 熊涛, 等. 基于级数反演的弹载SAR下降段CZT成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2861-2867. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00452.  
ZHOU Peng, ZHOU Song, XIONG Tao, *et al.* A chirp-Z transform imaging algorithm for missile-borne SAR with diving maneuver based on the method of series reversion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2861-2867. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00452.
- 孟自强: 男, 1988年生, 博士, 主要研究方向为双基前视 SAR 成像.
- 李亚超: 男, 1981年生, 副教授, 博士, 主要研究方向为雷达成像和实时信号处理.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士, 主要研究方向为雷达成像和目标识别.
- 保 铮: 男, 1927年生, 教授, 中国科学院院士, 主要研究方向为数字信号处理、阵列信号处理、自适应信号处理和雷达成像.