

俯冲段大斜视SAR子孔径成像二维空变校正方法

党彦锋^{①②} 梁毅^{*①②} 别博文^{①②} 丁金闪^{①②} 张玉洪^③

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

^③(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

摘要: 俯冲合成孔径雷达(SAR)常采用大斜视子孔径成像来满足平台机动性和处理实时性;而大斜视模式下距离方位的严重耦合、斜视角沿距离向的空变及3维速度和加速度的存在会导致距离包络和方位相位的2维空变,严重影响成像质量。针对这些问题,该文提出一种新的两级频域滤波算法,在预处理后,首先引入第1级频域滤波因子以校正距离包络沿方位位置的空变以实现距离徙动统一校正,然后采用第2级频域滤波校正方位多普勒参数的空变实现方位相位统一聚焦。仿真实验验证了该算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;子孔径;俯冲大斜视;两级频域滤波算法;2维空变校正

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2621-09

DOI: [10.11999/JEIT180021](https://doi.org/10.11999/JEIT180021)

Two-dimension Space-variance Correction Approach for Diving Highly Squinted SAR Imaging with Sub-aperture

DANG Yanfeng^{①②} LIANG Yi^{①②} BIE Bowen^{①②}

DING Jinshan^{①②} ZHANG Yuhong^③

^①(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Collaborative Innovation of Information Sensing and Understanding, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The diving SAR usually adopts the highly squinted mode and sub-aperture to satisfy the maneuvering and real-time processing. However, the existence of severe range-azimuth coupling, range-dependent squint angle and three-dimension velocity and acceleration leads to the space variance of range envelope and azimuth phase, which makes imagery unfocused seriously. To solve these problems, a Two-stage Frequency Filtering Algorithm (TsFFA) is proposed. After preprocessing, the First-stage Frequency Filtering (FsFF) factor is first introduced to correct azimuth-dependent Range Cell Migration (RCM) and realize the unified RCM correction. Furthermore, the Second-stage Frequency Filtering (SsFF) factor is adopted to equalize azimuth-dependent Doppler parameters and realize unified azimuth phase focused. Simulation results are presented to validate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: SAR; Sub-aperture; Diving highly squinted; Two-stage Frequency Filtering Algorithm (TsFFA); Two-Dimension (2-D) space-variance correction

1 引言

将合成孔径雷达(SAR)与高速平台结合并运用于制导技术已成为当前研究热点^[1]。为保证平台机动性,需以大斜视模式成像;为保证观测实时性,

需采用子孔径进行相干处理,以简化处理流程,减小存储量和计算量,实现快视成像^[2]。理想情况下的SAR平台是沿航迹方向匀速直线飞行,垂直方向无速度分量。但高速无人机SAR等高速机动平台具有灵活多样的飞行轨迹,如地形回避、战术规避及向下俯冲等,此时回波特要比一般的机载SAR复杂。本文就俯冲状态下的SAR信号进行研究,在俯冲大斜视模式下,垂向速度和3维加速度的存在导致距离方位严重耦合,传统的方位平移不变性假设不再成立;同时存在斜视角沿距离向的空变,这

收稿日期: 2018-01-05; 改回日期: 2018-06-13; 网络出版: 2018-07-20

*通信作者: 梁毅 yliang@xidian.edu.cn

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费(201405001)

Foundation Item: The Public Science and Technology Research Funds Projects of Ocean (201405001)

些因素最终导致距离包络和方位相位2维空变,严重影响成像质量^[3,4]。因此,对于俯冲段大斜视SAR子孔径成像两维空变校正方法的研究具有重要的意义。

针对俯冲SAR大斜视成像2维空变校正,文献^[5]提出一种曲线轨迹高分辨俯冲大斜视波数域成像算法,但是成像中需要复杂的插值操作,时间复杂度高,不适于实时处理。文献^[6]提出通过方位分块处理来实现沿方位空变的RCM和多普勒空变参数校正,得到曲线轨迹俯冲模式下的2维图像。但是在非线性轨迹下,方位分块可能会导致数据的不连续,在图像拼接中出现误差;同时分块处理也会增加运算量,不利于实时实现。文献^[7]提出基于方位非线性变标(Nonlinear Chirp Scaling, NCS)来校正多普勒调频率的空变,但未考虑到平台存在3维加速度的情况。文献^[8]也采用NCS来补偿空变的多普勒调频率,虽然考虑了加速度,但未考虑3次项系数的空变性,在方位幅宽较大的情况下,残留的3次空变相位限制了方位聚焦深度。对于高速机动平台SAR成像,采用子孔径处理更具优势。

针对俯冲SAR大斜视子孔径成像问题,本文首先建立俯冲段瞬时斜距模型,随后分析斜视角沿距离向的空变和3维加速度对2维频谱的影响;然后通过预处理来降低距离方位的耦合及补偿加速度对2维频谱的影响,在此基础上提出基于2级频域滤波(Two-stage Frequency Filtering, TsFF)的2维空变校正新方法以改善方位聚焦深度,适用于大斜视宽幅成像;最后通过点目标仿真验证了本文方法的有效性。

2 俯冲大斜视回波信号分析

2.1 俯冲段瞬时斜距模型

对SAR运动平台,通过惯导系统可得到其在地理坐标系(即图1中表示北天东方向的 $OX_n Y_e Z_s$ 坐标系)中的3维速度 $\mathbf{V}_g = (v_n, v_e, v_s)$ 和3维加速度 $\mathbf{a}_g = (a_n, a_e, a_s)$ 。在传统的SAR成像中,平台沿北向或偏离北向一定角度的方向水平飞行,天向速度 v_s 为零,此时数据录取平面为速度方向和波束射线在零多普勒面内的投影组成的平面。但在俯冲成像中,由于3维速度的存在,平台沿偏离正北方向 γ 的方向做俯冲运动;由于3维加速度的存在,平台偏离理想运动轨迹作曲线运动,如图1所示。此时,数据录取平面发生旋转。图1中,假设在子孔径时间内平台从 M 点以初速度 $\mathbf{V} = (v_x, 0, v_z)$ 和加速度 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ 运动到 N 点, Q 点为方位慢时间 $t_m = 0$ 时刻平台所在位置,原点 O 为 Q 点在地面的投影点。以 XOY 平面为成像平面,平台位于 Q 点

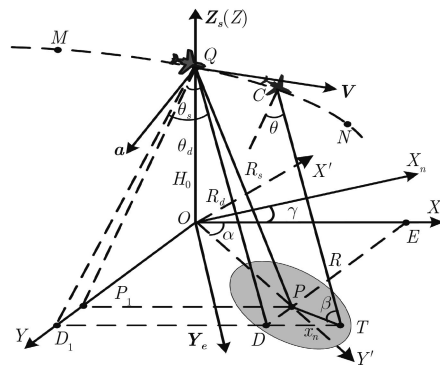


图1 俯冲SAR大斜视成像几何模型

时,波束中心射线(Line Of Sight, LOS)与地面交点为 P , D 为场景中与 P 有相同 X 轴坐标 E 的任意一点, P_1 和 D_1 为点 P 和 D 在零多普勒面内的投影点, T 为场景中与 D 点沿 X 轴相距 x_n 的任意一点。俯冲成像时,数据录取平面为速度方向和波束中心射线组成的平面,此时的成像坐标系可等效为图1中的 $X'Y'Z$ 坐标系,斜视角可等效为速度方向和波束中心射线方向夹角的余角。这种成像坐标系的旋转使传统的成像方法不再实用,因此需要研究基于该模型下的成像算法。

定义斜距 R 为平台运动至 MN 之间任意位置时到 T 点的斜距, θ 为对应的斜视角(LOS与 YOZ 平面的夹角), H 为雷达平台高度, α 为方位侧视角(LOS在 XOY 平面的投影与 X 轴正向的夹角)。假定平台位于 Q 点时到 P 点和 D 点的斜距分别为 R_s 和 R_d ,对应的斜视角分别为 θ_s 和 θ_d ,平台高度为 H_0 。以任意一点 C 为例,平台在该点到 T 点的斜距 R 可用泰勒级数展开到4阶项,即

$$R(t_m; R_d, x_n) = \left| \overrightarrow{CT} \right| = \sum_{j=0}^4 k_j(R_d, x_n) t_m^j \quad (1)$$

其中, $k_j(R_d, x_n) = (1/j!) \left(d^j R(t_m; R_d, x_n) / dt_m^j \right) \Big|_{t_m=0}$ 表示斜距在 $t_m = 0$ 处的第 j 项展开式系数。其中 k_1 为线性距离徙动项(Linear RCM, LRCM), k_2 为QRCM项, k_3 和 k_4 为高阶距离徙动项(High-order RCM, HRCM)。

假设发射信号为线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM)信号,将 T 点的回波信号解调后变换到距离频域为

$$\begin{aligned} S_s(f_r, t_m; R_d, x_n) &= W_r(f_r) w_a(t_m) \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right) \\ &\cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_m; R_d, x_n)\right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, c 为光速, K_r 为调频率, f_c 和 f_r 分别表示雷

达中心载频和距离频率， $W_r(\cdot)$ 为距离窗的频域形式， $w_a(\cdot)$ 方位窗函数。式(2)中第1个指数项表示距离调制项，第2个指数项表示距离方位耦合项。

2.2 距离向空变的斜视角对距离包络的影响分析

在图1中，定义擦地角 β 为LOS与XOY平面的夹角，从而平台位于C点时到成像平面中任意一点的斜视角可表示为

$$\sin \theta = \cos \beta \cos \alpha = \sqrt{R^2 - H^2} / R \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

在传统的大斜视成像中，通常先以场景中心为参考进行走动校正来降低2维耦合^[9]。但由于斜视角沿距离向的空变，导致走动校正后存在线性残留量，这个残留量对距离向包络会带来很大的影响，而现有文献常忽略了这部分的影响^[10]。下面对残余线性项对距离包络空变性影响进行分析，仿真参数如表1所示，线性残留量对距离包络的影响如图2所示。从图2中可看出，在距离向单边幅宽大于210 m的情况下，线性残留量会超过1/2距离分辨率，根据单边包络误差不可忽略的准则，此时的距离向幅宽不能大于420 m。此外，2阶项的残留量远小于分辨率，在后续处理中可将其忽略。因此，本文将在考虑斜视角线性空变的基础上研究俯冲SAR大斜视2维成像算法。

2.3 3维加速度对2维频谱影响分析

下面分析加速度的存在对2维频谱的影响。可将式(1)中各阶项系数分离成两部分： $k_j(R_d, x_n) = k_j(\mathbf{v}, R_d, x_n) - k_j(\mathbf{a}, R_d)$ ，其中第1部分可看作平

表1 仿真参数

载频	15 GHz	脉冲重复频率	2.5 kHz
距离带宽	200 MHz	高度	5 km
脉冲宽度	10 μ s	场景中心斜距	10 km
方位侧视角	28°	平台速度	(145, -38, -35) m/s
加速度	(1.2, 0.5, -0.8) m/s ²	合成孔径时间	0.6 s

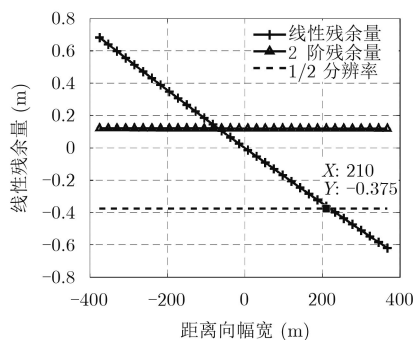


图2 距离幅宽与RCM残余量关系曲线图

台匀速运动时轨迹斜距历程，第2部分反映了加速度对斜距的影响。加速度不会影响线性项，但会直接影响高次项系数，尤其是方位带宽，具体地

$$B_a = 4T_a \cdot |k_2(\mathbf{v}, R_d, x_n) - k_2(\mathbf{a}, R_d)| / K_r \quad (4)$$

其中， T_a 为子孔径时间。从式(4)可以看出，若 $k_2(\mathbf{a}, R_d)$ 和 $k_2(\mathbf{v}, R_d, x_n)$ 取值相反，会导致方位带宽超过采样率，造成方位频谱混叠；若二者取值接近，会导致方位频谱位于零频处^[11]。因此，为了保证后续处理的有效性，需要考虑到加速度对频域的影响。

3 俯冲SAR子孔径两级频域滤波成像算法

在分析了斜视角沿距离向的空变对距离包络的影响和3维加速度对2维频谱的影响的基础上，本节研究了俯冲SAR子孔径成像算法。首先通过预处理进行走动校正及补偿加速度对2维频谱的影响；然后采用第1级频域滤波(First-stage Frequency Filtering, FsFF)校正距离包络沿方位向的空变来实现RCM统一校正；通过FsFF可消除大部分RCM的空变，最后再采用第2级频域滤波(Second-stage Frequency Filtering, SsFF)校正方位相位的空变来实现统一聚焦。

3.1 预处理

在俯冲大斜视SAR成像中，较大的线性走动造成了距离向和方位向严重的耦合，同时加速度的存在会影响2维频谱。首先以场景中心点P点为参考点构造走动校正函数和加速度补偿函数，可表示为

$$H_p(f_r, t_m) = \exp \left(j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \left[k_1(R_s, 0) t_m + \sum_{i=2}^4 k_i(\mathbf{a}, R_s) t_m^i \right] \right) \quad (5)$$

其中， $k_1(R_s, 0)$ 表示参考点P点的线性项系数。

将式(5)和 $S_s(f_r, t_m; R_d, x_n)$ 相乘，可得预处理后的信号相位表达式为

$$\begin{aligned} \phi(f_r, t_m; R_d, x_n) &= -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \left[A_0(R_d, x_n) \right. \\ &\quad \left. + A_1(R_d, x_n) t_m + \sum_{j=2}^4 A_j(R_d, x_n) t_m^j \right] \quad (6) \end{aligned}$$

其中， $A_0(R_d, x_n) = k_0(R_d, x_n)$ 为常数项系数， $A_1(R_d, x_n) = k_1(R_d, x_n) - k_1(R_s, \mathbf{v})$ 为残余线性项系数， $A_j(R_d, x_n) = k_j(R_d, x_n; \mathbf{v}) - k_j(R_s; \mathbf{a})$ ， $j=2$ ，

3, 4为弯曲项和高阶项系数。为方便后续处理, 将式(7)中各阶项系数在 $x_n = 0$ 处泰勒级数展开, 可得

$$\begin{aligned} A_i(R_d, x_n) &= A_i(R_d, 0) + \nabla A_i(R_d, x_n) x_n \\ &= A_{i0} + A_{i1} x_n, \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (7)$$

由于4阶项系数的空变性很小, 可将其忽略,

$$\begin{aligned} \Phi(f_r, f_a; R_d, x_n) &= -\frac{4\pi A_0(R_d, x_n)}{c} (f_c + f_r) + \frac{c\pi}{4A_2(R_d, x_n)(f_c + f_r)} \left[f_a + \frac{2A_1(R_d, x_n)}{c} (f_c + f_r) \right]^2 \\ &+ \frac{c^2\pi A_3(R_d, x_n)}{16A_2^3(R_d, x_n)(f_c + f_r)^2} \left[f_a + \frac{2A_1(R_d, x_n)}{c} (f_c + f_r) \right]^3 \\ &+ \frac{c^3\pi [9A_3^2(R_d, x_n) - 4A_2(R_d, x_n)A_4(R_d, x_n)]}{256A_2^5(R_d, x_n)(f_c + f_r)^3} \left[f_a + \frac{2A_1(R_d, x_n)}{c} (f_c + f_r) \right]^4 \end{aligned} \quad (8)$$

为实现距离包络空变校正, 同时防止引入多余的相位使后续的方向向处理复杂化, 本文引入FsFF因子, 可表示为

$$H_F(f_r, f_a) = \exp \left(j\pi \left(p_1 \frac{c^2}{2(f_c + f_r)^3} f_r f_a^3 + p_2 \frac{c^3}{4(f_c + f_r)^4} f_r f_a^4 \right) \right) \quad (9)$$

其中, p_1 和 p_2 为待定量。将式(8)与式(9)中的相位部分相加, 并变换到方位时域, 将方位时域相位信号整理后可表示为

$$\begin{aligned} \phi(f_r, t_a; R_d, x_n) &= -\frac{4\pi f_c}{c} \sum_{i=0}^4 A_i(R_d, x_n) t_m^i \\ &- \frac{4\pi f_r}{c} \sum_{i=0}^4 B_i(R_d, x_n, p_1, p_2) t_m^i \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 第1项为空变的方位相位, 第2项中 $B_i(R_d, x_n, p_1, p_2)$ 为各阶RCM项系数。为消除包络空变, 将第2项中各阶项系数按照式(7)展开, 可得一系列关于 x_n 和 t_m 的各阶耦合量。一般地, $x_n t_m^2$ 和 $x_n^2 t_m^2$ 的存在对包络空变性影响最大。令这两项的系数满足 $C_1(p_1, p_2; R_d) = 0$ 和 $C_2(p_1, p_2; R_d) = 0$, 联立方程式, 可得

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -\frac{(A_{11}^2 A_{20}^2 + 4A_{10} A_{11} A_{20} A_{21} + A_{10}^2 A_{21}^2)}{12A_{10} A_{20}^7 A_{11}^3 (3A_{10} A_{11} A_{21} + 2A_{11}^2 A_{20})} \\ p_2 &= -\frac{(A_{10} A_{21}^2 + 2A_{11} A_{20} A_{21})}{24A_{10} A_{20}^7 A_{11}^3 (3A_{10} A_{11} A_{21} + 2A_{11}^2 A_{20})} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 然后将式(9)中的相位部分与式(8)相加, 就可在2维频域消除包络的空变性。然后将频域信号在 $f_r = 0$ 处泰勒级数展开, 可得

$$\begin{aligned} \Phi(f_r, f_a) &= j[\phi_{az}(f_a; R_d, x_n) + \varphi_{\text{rc}}(f_a; R_d) f_r \\ &+ \varphi_{\text{src}}(f_a; R_d) f_r^2] \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\phi_{az}(f_a; R_d, x_n)$ 为空变的方位相位, $\varphi_{\text{rc}}(f_a; R_d)$

即 $A_4(R_d, x_n) = A_{40}$ 。下面采用FsFF抑制距离包络的空变来实现RCM统一校正。

3.2 基于FsFF的距离包络空变校正

采用级数反演法(Method of Series Reverse, MSR)将信号变换到2维频域^[12], 其相位表达式为

和 $\varphi_{\text{src}}(f_a; R_d)$ 分别为距离弯曲项和2次脉冲压缩项相位。由于其不存在方位空变, 可以统一校正, 以场景中心点 P 点为参考RCC和SRC因子, 可表示为

$$\begin{aligned} H_c(f_r, f_a) &= \exp[-j(\varphi_{\text{rcc}}(f_a; R_s) f_r \\ &+ \varphi_{\text{src}}(f_a; R_s) f_r^2)] \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)中相位部分与式(12)相加就可实现距离包络空变校正。经FsFF处理已经极大地弱化了多普勒参数随方位位置的空变, 但是由于相位对空变的敏感性高于包络, 尤其是在高频段。为保证聚焦质量, 本文提出SsFF来校正方位相位的空变以实现方位统一聚焦。

3.3 基于SsFF的方位相位空变校正

在时域走动校正后, 距离单元相同方位位置不同的点目标将出现在不同的距离单元内, 且其位置满足 $R_d' = R_d + x_n \sin \theta$, 这导致多普勒调频率和方位向高次项的空变, 方位向平移不变性不再满足^[2]。根据之前的分析, 距离向处理后的方位相位可表示为

$$\phi(t_m; R_d', x_n) = -\frac{4\pi}{\lambda} \sum_{i=0}^4 A_i(R_d', x_n) t_m^i \quad (14)$$

可以看出式(14)中各阶方位相位系数均具有方位空变性。特别地, $A_1(R_d', x_n)$ 表示残留多普勒中心项, 该项对于小斜视窄波束成像影响较小, 但在大斜视宽幅成像中(残留多普勒中心项远大于 $\pi/4$), 它的存在将会严重影响方位聚焦深度, 因此在后续处理中需要考虑。具体地, 各阶空变的方位相位误差为

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_m &= [\Phi_m(R_d', x_n) - \Phi_m(R_d', 0)] [(\Delta f_a + B_{\text{sub}}/2)^m \\ &- (\Delta f_a - B_{\text{sub}}/2)^m], \quad m = 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\Phi_m(R_d', x_n)$ 为各阶相位频域表达式, B_{sub} 为

子孔径成像时的方位向多普勒带宽， Δf_a 为任意方位位置处点目标的多普勒频率与多普勒中心频率之差。以第2节中参数为例，可得方位相位误差如图3所示。可以看出，2阶相位和3阶相位误差随方位

位置的增大而逐渐大于 $\pi/4$ ，而4阶相位误差小于 $\pi/4$ ，因此进行方位相位空变校正时需考虑残留多普勒中心项、2阶和3阶相位空变，忽略4次相位的空变。

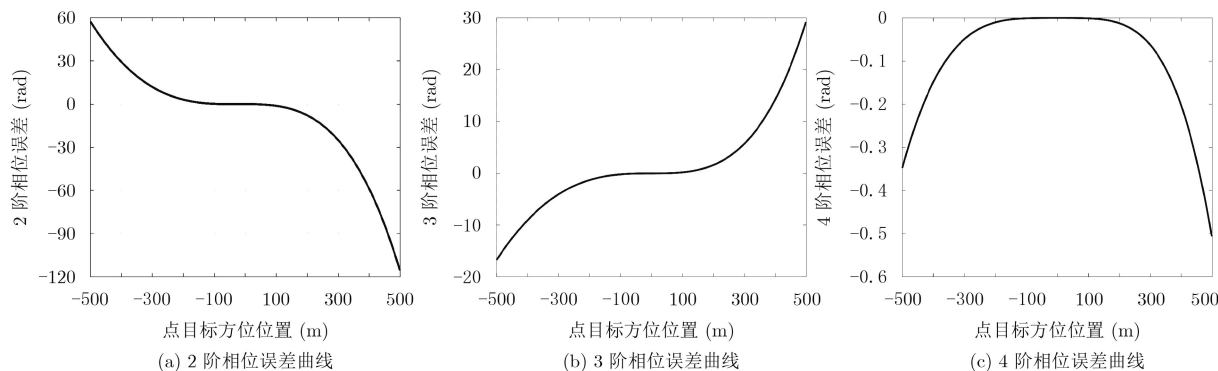


图 3 方位空变相位误差随方位位置变化曲线

同样地，在具体公式推导前，首先用图4所示的时频分布线对方位相位补偿过程进行说明。在采用子孔径成像时，场景中各点数据支撑区在时域是重叠的，在频域是分开的；如图4(a)所示，假设场景中心和两侧等距处各有一个点目标，由于各点方位位置不同，对应的相位曲率也不同，且满足 $|k(x_n)| < |k(x_0)| < |k(x_{-n})|$ ，图中 T_{sub} 为子孔径录取时间，亦等于时频分布线在时间轴的投影。通过分析发现，首先进行高次非空变相位补偿可缩短数据支撑区的宽度，进而减少补零点数(后续会进行分析)，提高实时性；因此，构造如图4(b)所示的高阶项补偿函数，在方位时域对高次相位进行补偿。对补偿后的经FFT后，相频分布线具有不同的

曲率(为时域曲率的倒数)，且其在频率轴上的投影是错开的，如图4(c)所示，图中 T'_{sub} 为补偿高阶非空变相位后的数据支撑区(小于原数据支撑区)。为了实现方位相位统一聚焦，在方位多普勒域引入SsFF因子(如图4(d)所示)，该因子可将相频分布线校正至相同的曲率。如图4(e)所示，将校正后的信号经IFFT后，不同点的时频分布线具有相同的斜率 $|k(x_0)|$ ，但此时时频分布线在时间轴的投影超出原数据支撑区，这种位置的偏移会在聚焦是产生虚假点，因此需要将支撑区扩展来消除这些虚假点，图中 T_{sub_ext} 为扩展后的数据支撑区；最后构造Deramp因子实现方位统一聚焦。下面进行具体的公式推导。

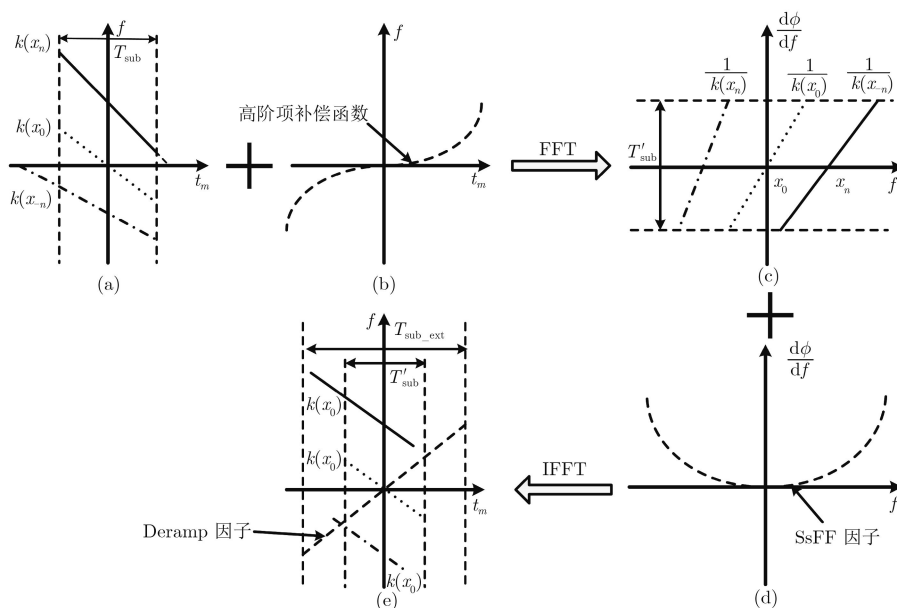


图 4 方位相位空变统一校正示意图

按照前面分析, 首先进行高阶非空变相位项补偿, 构造高阶项补偿函数为

$$H_h(t_m; R'_d) = \exp \left[j \frac{4\pi}{\lambda} (A_{30}(R'_d) t_m^3 + A_{40}(R'_d) t_m^4) \right] \quad (16)$$

将补偿完高阶非空变相位的信号经FFT到方位频域, 根据之前分析, 要消除调频率和3阶项系数的空变, 需要构建SsFF因子, 表示为

$$H_S(f_a) = \exp [j\pi (q_1 f_a^3 + q_2 f_a^4)] \quad (17)$$

其中 q_1 和 q_2 为未知量。将式(17)与方位频域信号相乘, 然后经IFFT到方位时域, 得

$$s_s(t_r, t_m; R'_d, x_n) = \text{sinc} \left[B_r \left(t_r - \frac{2R'_d}{c} \right) \right] w_a(t_m) \cdot \exp(-j\phi(t_m; R'_d, x_n)) \quad (18)$$

其中, t_r 为距离快时间, B_r 为距离向带宽, $\phi(t_m; R'_d, x_n)$ 为方位时域相位。将方位相位按照式(7)展开, 同样可得一系列关于 x_n 和 t_m 的各阶耦合量, 由于 $x_n t_m^2$ 和 $x_n^2 t_m^2$ 的存在对方位相位的空变性影响最大^[11]。令这两项的系数满足 $D_1(q_1, q_2; R'_d) = 0$ 和 $D_2(q_1, q_2; R'_d) = 0$, 联立方程组, 可得

$$q_1 = -\frac{2C_{21}}{3C_{20}^2 C_{11}}, \quad q_2 = -\frac{4C_{21}^2}{3C_{11}^2 C_{20}^3} \quad (19)$$

其中, $A_i(R'_d, 0) + \nabla A_i(R'_d, x_n) x_n = C_{i0} + C_{i1} x_n$ ($i = 1, 2$), 将式(19)代入式(17), 然后与信号方位频域表达式相乘就可消除方位相位的空变性。最后构造方位统一聚焦因子实现方位相位空变校正, 具体地可表示为

$$H_d(t_m; R'_d) = \exp [j\pi A (t_m^2, t_m^3, t_m^4, q_1, q_2)] \quad (20)$$

其中, $A(t_m^2, t_m^3, t_m^4, q_1, q_2)$ 表示与方位位置无关, 可统一补偿的方位调制项。从而聚焦后的图像为

$$sS(t_r, f_a; R'_d) = \text{sinc} \left[B_r \left(t_r - \frac{2R'_d}{c} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left[\frac{1}{B_{\text{sub}}} (f_a - b_1 x_n - b_2 x_n^2) \right] \quad (21)$$

其中, b_1 反映点目标的方位位置, b_2 会造成目标方位位置的偏差, 需要进行几何校正来得到正确的点目标位置。整个处理流程如图5所示。

下面分析本文方法的浮点运算量。假设距离与方位采样点数为 $N_r \times N_a$ 。对于每次的FFT/IFFT运算来说, 其浮点运算量为 $5N_r N_a \log_2 [N_r/a]$; 复乘运算量为 $6N_r N_a$ 。从流程图5可知, 所提方法共有2次距离向的FFT/IFFT操作, 5次方位向的

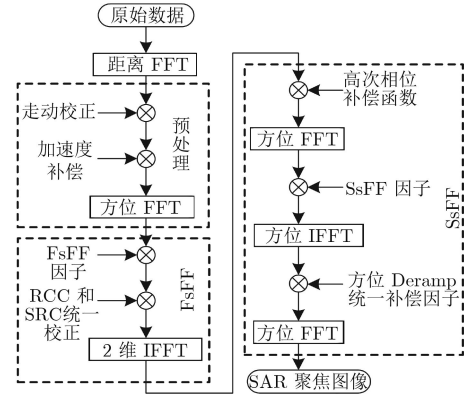


图5 俯冲大斜视子孔径成像算法流程图

FFT/IFFT操作, 5次复乘。因此, 总的运算量为 $C = N_r N_a \times [10 \times \log_2 N_r + 25 \times \log_2 N_a + 30]$ (22)

4 仿真数据结果及分析

为验证本文所提2维空变校正方法的有效性, 这里通过仿真数据来说明, 仿真参数如表1所示。在地面场景中沿雷达波束视线方向和垂直于波束视线方向放置一大大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 3×3 矩形点阵, 如图6所示, 图中点1和点5为方位空变最剧烈的点, 点2和点4位于同一距离单元, 以场景中心点3为参考点。

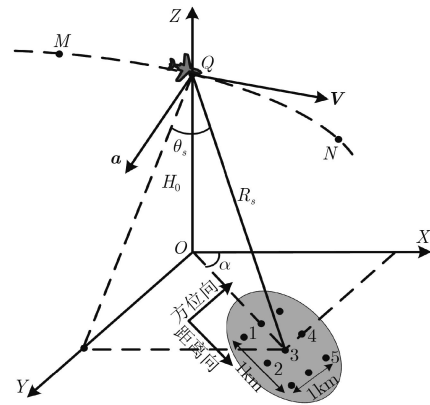


图6 点目标位置示意图

首先验证FsFF校正包络空变的有效性, 选取点2、点3和点4的校正结果进行分析。图7(a1)–7(a3)为采用参考算法^[11]进行包络空变校正结果, 图7(b1)–7(b3)为本文算法校正结果。可以看出, 采用参考算法校正后的边界点存在包络线越距离单元的现象, 会直接影响最终的方位聚焦效果; 而采用本文方法进行统一RCM校正后, 包络线不存在越距离单元的现象, 验证了本文方法的有效性。

然后在FsFF的基础上验证SsFF校正相位空变

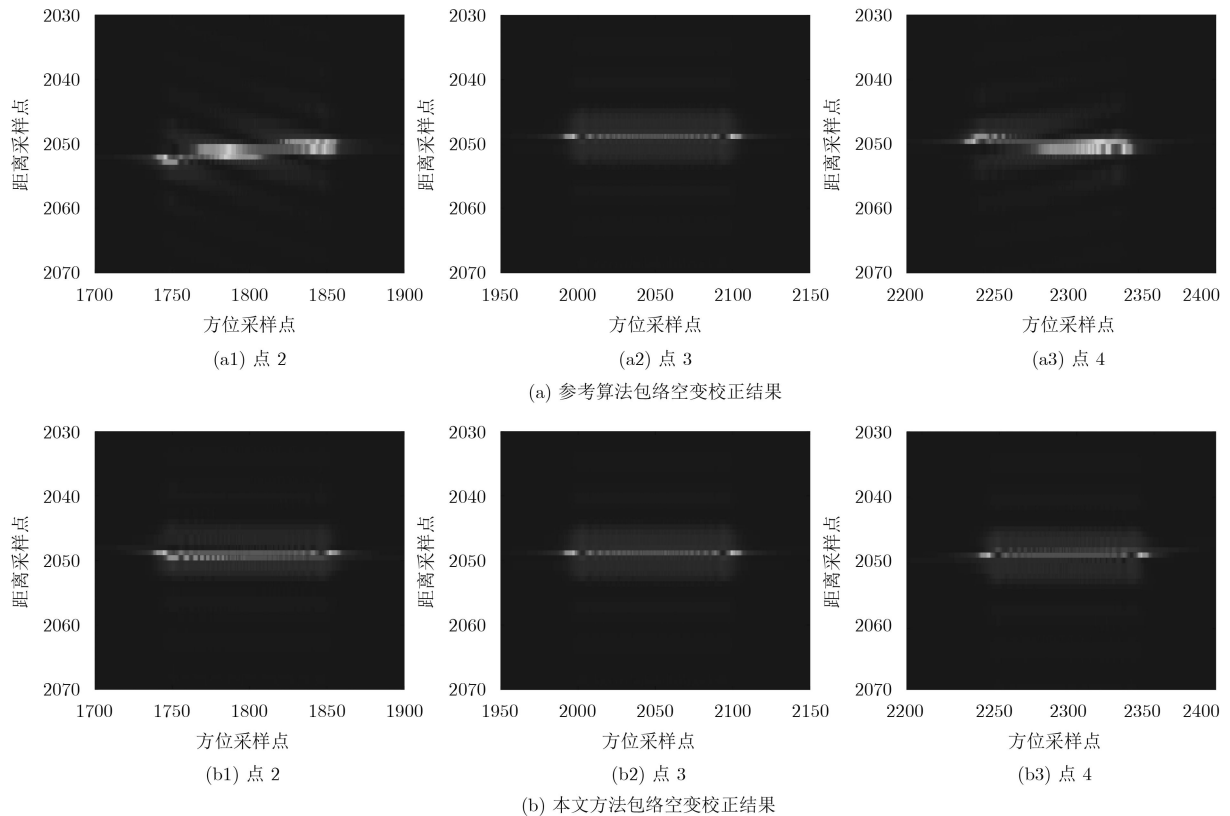


图 7 包络空变校正结果图

的有效性，选取点1、点3和点5的校正结果进行分析。为了更清晰地反映边缘点成像效果，图8(a1)—8(a3)给出了采用参考算法^[8]方位聚焦结果剖面图，可以看出，对于边缘点1和5，由于忽略了残留多普勒中心和3次相位系数随方位位置的空变性，造成第1旁瓣的抬高，进而使峰值旁瓣比损失，最终影响方位分辨率。图8(b1)—8(b3)给出了采用本文方法方位聚焦结果剖面图，可以看出，在考虑了残留

多普勒中心项和3次相位系数随方位位置的空变的基础上，可得到聚焦效果良好的成像结果。

进一步地，计算点1、点3和点5的峰值旁瓣比、积分旁瓣比和方位分辨率，结果如表2所示。可以看出参考算法所得指标相比理论值(峰值旁瓣比-13.26 dB，积分旁瓣比-9.8 dB，方位分辨率1 m)偏差较大，而本文方法所得指标与理论指标基本吻合，从而进一步证明本文方法有效性。

表 2 性能指标测量结果(未加窗)

性能指标	参考方法			本文方法		
	点1	点3	点5	点1	点3	点5
峰值旁瓣比(dB)	-3.46	-13.23	-5.63	-13.23	-13.25	-13.21
积分旁瓣比(dB)	-4.24	-9.77	-5.92	-9.77	-9.83	-9.76
方位分辨率(m)	1.58	1.05	1.46	1.03	1.01	1.04

5 结束语

本文针对俯冲段大斜视SAR子孔径成像中存在的2维空变问题，提出一种两级频域滤波校正空变的方法。根据平台的实际运动状态，建立了俯冲大斜视SAR成像几何模型，并分析了斜视角沿距离向的空变对距离包络的影响及3维加速度对2维频谱的影响。在预处理实现线性走动校正和加速度补偿后，针对距离包络空变，在2维频域引入第1级滤波

因子来校正其空变性，从而实现距离徙动统一校正；针对方位相位空变，考虑了残留多普勒中心项，并详细分析了多普勒调频率和3次项系数的空变性，然后根据子孔径数据特征在方位频域引入第2级滤波因子来校正其空变性，最后基于谱分析实现方位统一聚焦。整个算法只包含FFT和复乘运算，不涉及插值处理，易于工程实时实现。仿真数据处理验证了本文方法的有效性。

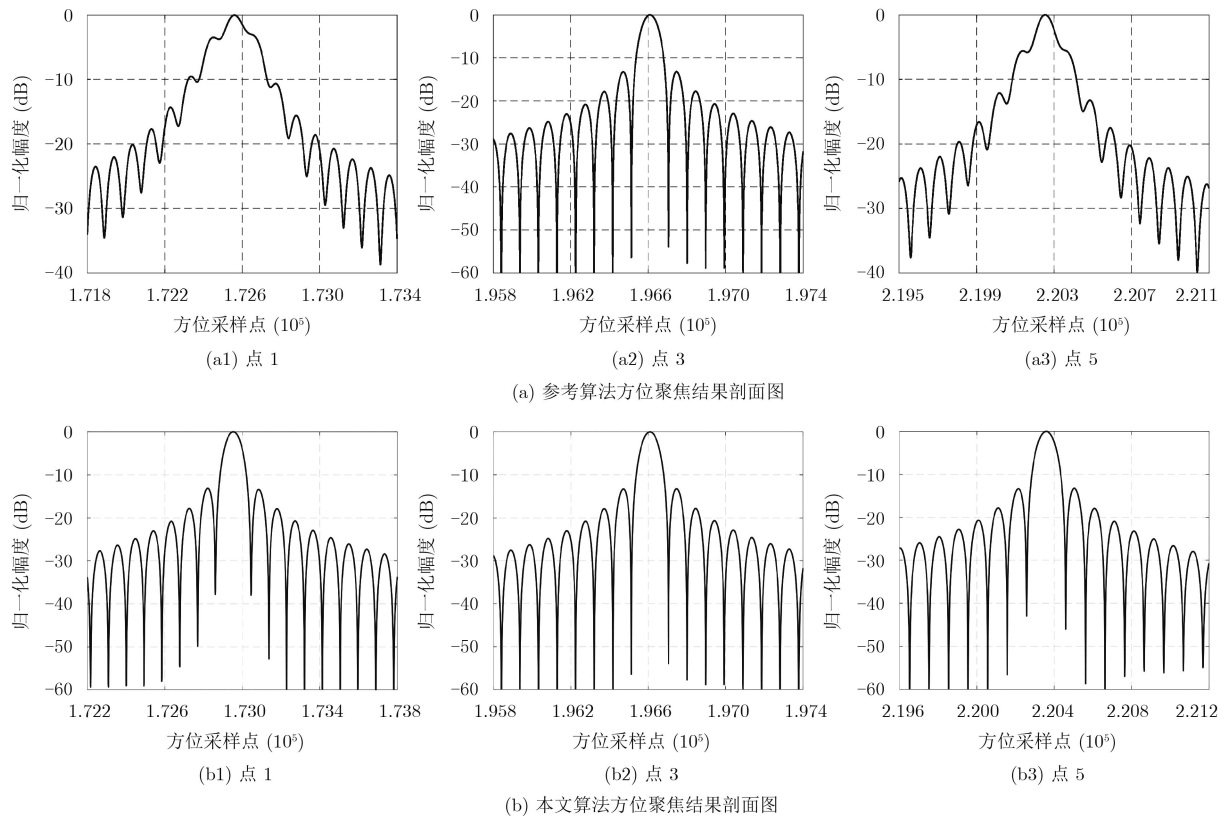


图8 点目标方位聚焦结果剖面图

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 123–182.
- [2] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 弹载合成孔径雷达成斜视子孔径频域相位滤波成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 953–960. doi: [10.11999/JEIT140618](https://doi.org/10.11999/JEIT140618).
LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* A frequency phase filtering imaging algorithm for highly squinted missile-borne Synthetic Aperture Radar with subaperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 953–960. doi: [10.11999/JEIT140618](https://doi.org/10.11999/JEIT140618).
- [3] 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).
- [4] 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](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2548240).
- [5] LI Zhenyu, XING Mengdao, XIONG Tao, *et al.* A modified equivalent range model and wavenumber-domain imaging approach for high-resolution high-squint SAR with curved trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3271–3734. doi: [10.1109/TGRS.2017.2678763](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2678763).
- [6] 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, 52(12): 6718–6734. doi: [10.1109/TGRS.2015.2447393](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2447393).
- [7] 肖忠源, 徐华平, 李春生. 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01207).
- [8] 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. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01124](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01124).
ZHOU Song, BAO Min, ZHOU Peng, *et al.* An imaging algorithm for missile-borne SAR with downward movement based on azimuth nonlinear chirp scaling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6):

- 1420–1426. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01124](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01124).
- [9] 吴勇, 宋红军, 彭靳. 基于时域去走动的SAR大斜视CS成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 593–598. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00472](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00472).
- WU Yong, SONG Hongjun, and PENG Jin. Chirp scaling imaging algorithm of SAR in high squint mode based on range walk removal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 593–598. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00472](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00472).
- [10] SUN Guangcai, JIANG Xiuwei, XING Mengdao, *et al.* Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2308–2322. doi: [10.1109/TGRS.2010.2102040](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2102040).
- [11] 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).
- [12] 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).
- 党彦锋: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为SAR成像及实时信号处理.
- 梁毅: 男, 1981年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为弹载SAR成像、实时处理系统设计等.
- 别博文: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为SAR成像.
- 丁金闪: 男, 1979年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为毫米波、亚毫米波成像及应用.
- 张玉洪: 男, 1958年生, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达系统、空时处理等.