

基于三维等距球体解析模型的俯冲段大斜视SAR成像算法

钟 华^{*①} 王梦圆^① 宋慧娜^① 白壬潮^② 李世平^① 曹佳熠^① 赵荣华^①

^①(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

^②(空军装备部 北京 100843)

摘 要: 当合成孔径雷达(SAR)工作在俯冲段大斜视模式时, 面临着斜视角沿距离向空变、距离-方位耦合严重以及3维速度与加速度带来扰动等问题, 导致回波存在着严重的距离徙动(RCM)和多普勒相位的2维空变。针对这些问题, 该文构建了一种用于精确描述俯冲段大斜视SAR回波距离-方位空变特性的3维等距球体解析模型。基于该模型, 提出一种去除方位空变残余高阶RCM的校正方法, 并重新推导了去除多普勒相位方位空变的频域拓展非线性变标(FENLCS)方法, 结合子孔径处理方式解决了SAR工作在俯冲段大斜视模式下所面临问题。理论分析和仿真结果证明, 该文构建的模型对于回波的距离-方位空变特性有着更精确的描述, 且所提算法具有更好的成像效果。

关键词: 合成孔径雷达; 俯冲段大斜视; 2维空变; 残余高阶距离徙动; 3维等距球体解析模型

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0657-08

DOI: 10.11999/JEIT200650

An Imaging Algorithm for Diving Highly Squinted SAR Based on Three-Dimensional Equidistant Sphere Analytical Model

ZHONG Hua^① WANG Mengyuan^① SONG Huina^① BAI Renchao^②

LI Shiping^① CAO Jiayi^① ZHAO Ronghua^①

^①(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

^②(Air Force Department of Equipment, Beijing 100843, China)

Abstract: In the case of diving highly squinted Synthetic Aperture Radar (SAR), the existence of range-dependent squint angle, severe range-azimuth coupling, three-Dimensional (3-D) velocity and acceleration produces two-Dimensional (2-D) spatial-variant Range Cell Migration (RCM) and Doppler phases. To accommodate these issues, this paper constructs a 3-D equidistant sphere analytical model to precisely reveal the range-azimuth variant property of the echo. Based on the model, an azimuth-variant residual high-order RCM correction is proposed, and the Frequency Extended NonLinear Chirp Scaling (FENLCS) is rederived to equalize the azimuth-variant Doppler phases. These two methods integrated with SubAperture (SA) processing are adopted to address the aforementioned issues faced by diving highly squinted SAR. Theoretical analysis and simulation results validate that the proposed model is capable of describing the range-azimuth spatial-variance property of echo more precisely, and better imaging performance can be acquired by this algorithm.

Key words: SAR; Diving highly squinted; Two-Dimensional (2-D) spatial-variance; Residual high-order Range Cell Migration (RCM); Three-Dimensional (3-D) equidistant sphere analytical model

收稿日期: 2020-08-03; 改回日期: 2020-12-10; 网络出版: 2021-02-22

*通信作者: 钟华 hzhong@hdu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61301248), 中国博士后科学基金(2018M630589), 浙江省基础公益项目(LGG18F010009), 声呐技术重点实验室开放基金(6142109KF201807), 浙江省教育厅一般科研项目(Y201942113)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61301248), China Postdoctoral Science Foundation(2018M630589), Zhejiang Province Science and Technology Plan Project(LGG18F010009), The Science and Technology on Sonar Laboratory(6142109KF201807), Zhejiang Provincial Department of Education Research Projects(Y201942113)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具备全天时、全天候、高分辨、多维度对地观测能力,在军事和民用领域均获得了极为广泛的应用^[1],其中将SAR与导弹等高速平台相结合,进行机动平台高分辨率成像已经成为当前的一个研究热点^[2,3]。为了满足导弹、战机等高速机动平台的观测需求,机动平台SAR常工作在俯冲段大斜视模式,并采用子孔径方式进行相干处理,以降低计算量,实现快速成像。在俯冲段大斜视模式下,3维速度与加速度的存在,使得回波存在着极为严重的距离方位耦合,同时空间斜视角沿距离向空变,导致距离包络和方位相位存在着剧烈的2维空变。上述原因,使得常规平飞模式的SAR成像算法不再适用。因此,对机动平台SAR的俯冲段大斜视子孔径成像算法的研究具有重要的意义。

针对上述俯冲段大斜视SAR成像处理中面临的问题,文献^[4]提出通过方位分块方式来校正距离徙动(Range Cell Migration, RCM)和多普勒参数的方位空变,得到曲线俯冲模式下的2维图像。但在俯冲段大斜视模式下,方位分块会造成SAR数据的不连续,导致在分块图像拼接时出现误差。文献^[5]提出一种基于俯冲模型的非线性变标(NonLinear Chirp Scaling, NLCS)方法以解决俯冲段成像中多普勒相位空变的问题,但该方法忽视了3维加速度对成像的影响。文献^[6]提出一种等效斜视斜距模型校正曲线运动轨迹下的SAR回波相位空变,考虑了沿航线方向的加速度,但该方法并不适用于存在3维加速度的俯冲斜视场景。文献^[7]提出一种处理俯冲段子孔径数据的频域成像算法,有效地补偿了3维加速度,但是该算法在校正线性RCM时所引起的方位相位空变会严重影响聚焦深度,不适合处理大斜视数据。文献^[8]提出一种俯冲段大斜视SAR子孔径成像的频域扩展非线性变标(Frequency Extend Non-Linear Chirp Scaling, FENLCS)算法,有效地解决了距离包络和多普勒相位的方位空变问题,但是该方法采用的是线性斜距模型,在方位幅宽较宽的情况下,存在较大的包络校正误差和相位均衡误差,进而降低了成像质量。

针对俯冲段大斜视子孔径成像所面临的问题,本文首先通过距离向预处理进行线性距离徙动校正和加速度补偿,随后分析了该回波的距离-方位2维空变特性,构建用于精确描述俯冲段大斜视SAR回波空变特性的3维等距球体解析模型。基于该模型,提出了一种方位空变的残余高阶RCM的校正方法,并重新推导了去除多普勒相位方位空变的

FENLCS算法,实现了较好的成像聚焦效果。最后通过仿真结果验证了本文所提模型与算法的有效性。

2 俯冲段大斜视回波信号和预处理分析

图1为SAR平台工作在俯冲段大斜视模式下的几何构型,其中平台进行加速曲线运动的轨迹为LMN,3维速度 $\mathbf{v}$ 和加速度 $\mathbf{a}$ 分别为 $\mathbf{v}=(v_x, v_y, v_z)$, $\mathbf{a}=(a_x, a_y, a_z)$ 。在方位慢时刻 $t_a=0$ 时,机动平台位于点L处,高度为 h_0 ,波束中心照射到场景中心点 P_0 ,空间斜视角为 θ_0 ,空间俯仰角为 α_0 ,波束中心斜距为 $r_{c0}=LP_0$ 。在方位慢时刻 $t_a=t_c$ 时,机动平台位于点M处,此时波束中心照射到点目标P,波束中心斜距为 $r_c=MP$,空间斜视角为 θ 。波束中心斜距在地面的投影与X轴的夹角 β 为固定的方位角。在该几何构型下,沿距离向空变的斜视角可表为

$$\sin \theta(r_c) = \sqrt{r_c^2 - h(r_c)^2} / r_c \cdot \cos \beta \quad (1)$$

以方位慢时刻 $t_a=t_c$ 处的点目标P为例,平台到该点的瞬时斜距为 $NP=R(t_a; r_c, t_c, \theta, \mathbf{v}, \mathbf{a})$,可在 $t_a=t_c$ 处展开至4阶泰勒级数

$$R(t_a; r_c, t_c, \theta, \mathbf{v}, \mathbf{a}) = \sum_{i=0}^4 k_i(r_c, t_c, \theta, \mathbf{v}, \mathbf{a})(t_a - t_c)^i \quad (2)$$

其中,

$$k_i(r_c, t_c, \theta, \mathbf{v}, \mathbf{a}) = \frac{1}{i!} \left(d^i R(t_a; r_c, t_c, \theta, \mathbf{v}, \mathbf{a}) / dt_a^i \right) |_{t_a=t_c}, \quad i=0, 1, \dots, 4 \quad (3)$$

式(2)中, k_i 表示斜距在 $t_a=t_c$ 处的第*i*项展开式系数,其中 $k_1(t_a-t_c)$ 为线性距离徙动(Linear Range Cell Migration, LRCM), $k_2(t_a-t_c)^2$ 为2阶距离徙动(Quadratic RCM, QRCM),其余的是高阶距离徙动(High-order RCM, HRCM),由于系数 k_i 与距离空变的斜视角 $\theta(r_c)$ 有关,因此各阶RCM是距离空变的。此外,加速度虽不会影响线性项系数 k_1 ,但会影响高次项系数,高次斜距展开系数 $k_i(i \geq 2)$ 同时

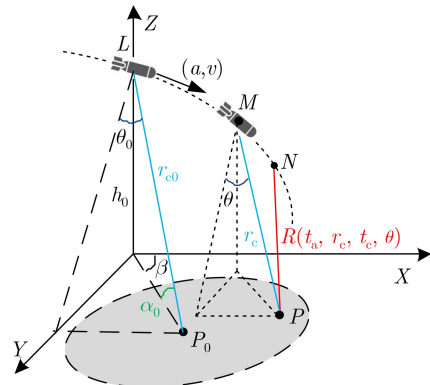


图1 俯冲段SAR成像几何构型

包含速度和加速度两个分量, 即 $k_i(r_c, t_c, \theta, v, a) = k_i(r_c, t_c, \theta, v) + k_i(r_c, t_c, \theta, a)$, 其中第1项代表SAR平台匀速运动时轨迹斜距历程, 第2项反映加速度对斜距的影响。

假设雷达的发射信号为线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号, 则解调至基带的回波信号经距离向傅里叶变换有

$$S(f_r, t_a; r_c, t_c) = W_r(f_r) w_a\left(\frac{t_a - t_c}{T_a}\right) \exp\left\{-j\pi \frac{f_r^2}{K_r}\right\} \cdot \exp\left\{-j4\pi \frac{f_c + f_r}{c}\right\} \cdot \left[\sum_0^4 k_i(r_c, t_c, \theta, v, a) (t_a - t_c)^i\right] \quad (4)$$

其中, $W_r(\cdot)$ 为距离包络的频域形式, $w_a(\cdot)$ 为方位包络的时域函数, f_r 为距离向频率, f_c 为载频, K_r 为距离向调频率, T_a 代表合成孔径时间, c 为光速。第1个指数项为距离调制项, 第2个指数项表示距离-方位耦合项。

在俯冲段大斜视SAR成像中, LRCM是造成距离-方位耦合的主要因素, 同时加速度会影响2维频谱^[9-11]。通常利用场景中心构造LRCM校正(LRCM Correction, LRCMC)函数和加速度校正(Accelerate Correction, AC)函数, 以降低距离-方位耦合并进行加速度补偿。紧接着, 采用梯形变换(Keystone Transform, KT)进行处理, 以完全去除残余LRCM, 进一步弱化距离-方位耦合。最后, 进行距离向统一的RCM校正(Bulk Range Cell Migration Correction, BRCMC)和二次距离压缩(Second Range Compression, SRC)^[12,13], 得到距离延迟项为

$$S_{\text{delay}}(f_r, t_m; r_c, t_c) = \exp\left\{-j\frac{4\pi f_r}{c} [\mu_0 + \Delta\mu(t_m; r_c, t_c)]\right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_0 &= k_0 - k_1 t_c + k_2 t_c^2 - k_3 t_c^3 + k_4 t_c^4 \\ &= R(0; r_c, t_c, v, a) \\ \Delta\mu(t_m; r_c, t_c) &= (k_2 - k_{20} - 3k_3 t_c + 6k_{4v} t_c^2) t_m^2 \\ &\quad + (2k_3 - 2k_{30} - 8k_{4v} t_c) t_m^3 + 3(k_{4v} - k_{40v}) t_m^4 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于空间斜视角沿距离向空变, 前述常规的距离向处理将导致残余的高阶RCM, 即 $\Delta\mu(t_m; r_c, t_c)$, 严重影响高分辨大斜视场景下的成像性能。因此, 为实现后续的高质量聚焦, 必须校正方位空变的残

余高阶RCM, 并均衡多普勒相位。

3 基于3维等距球体解析模型的残余高阶RCM校正和改进的方位FENLCS

为矫正预处理后的残余高阶RCM和均衡方位空变的多普勒相位, 本节构建一种用于精确描述俯冲段大斜视SAR回波距离-方位空变特性的3维等距球体解析模型。基于该模型, 提出一种残余高阶RCM校正办法, 并重新推导了去除剩余多普勒中心频率和多普勒高次调频率方位空变的方位FENLCS方法。

3.1 3维等距球体解析模型的提出

式(6)中, μ_0 表示在距离向预处理后点目标的距离向位置, 即点目标的距离位置由 k_0 处偏移到 $\mu_0 = R(0; r_c, t_c, \theta, v, a)$ 处, 其中 $R(0; r_c, t_c, \theta, v, a)$ 表示在方位慢时刻 $t_a = 0$ 时, 点目标到机动平台的距离。若 $\Delta\mu(t_m; r_c, t_c)$ 可以被校正, 则具有相同 $R(0; r_c, t_c, \theta, v, a)$ 的点目标将位于同一距离单元内。假设点目标 P_0 与 P 经距离向预处理后, 位于同一距离单元内, 则具有相同的 $R(0; r_c, t_c, \theta, v, a)$ 。

基于以上的分析, 本文构建3维等距球体解析模型, 如图2所示。点目标 P_0 与 P 在方位向零时刻到SAR平台的距离相同, 即 $LP_0 = LP = R(0; r_c, t_c, \theta, v, a) = r_{c0}$ 。可见 P_0 和 P 在同一个球面上, 球体半径为 r_{c0} , 球心位于 L 点。在图2中, 点 M 为方位慢时间 $t_a = t_c$ 时刻波束中心照射到点 P 时SAR平台的位置, M 点的高度为

$$h(r_c) = h_0 - v_z t_c - a_z t_c^2 / 2 \quad (7)$$

设点目标 P_0 和 P 的坐标分别为 $P_0(x_0, y_0, 0)$ 和 $P(x, y, 0)$, 根据SAR平台的运动状态, P_0 和 P 的坐标分别表示为

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= r_{c0} \cos \alpha_0 \cos \beta \\ y_0 &= r_{c0} \cos \alpha_0 \sin \beta \\ x &= v_x t_c + a_x t_c^2 / 2 + r_c \sin \theta \\ y &= v_y t_c + a_y t_c^2 / 2 + r_c \sin \theta \tan \beta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据球体内的几何关系 $|LP_0| = |LP|$, 有

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + h_0^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + h_0^2} \quad (9)$$

将式(1)、式(7)和式(8)代入式(9), 可得到 r_{c0} 与 r_c 之间的解析关系为

$$r_c \approx r_{c0} + X_1 t_c + X_2 t_c^2 \quad (10)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} X_1 &= -(v_z \sin \beta + v_y \sin \theta_0 + v_z \sin \alpha_0) \\ X_2 &= -\frac{(v_x r_{c0} \sin \theta_0 + v_z h_0)^2 + r_{c0}^2 (a_z h_0 + a_x r_{c0} \sin \theta_0 + v_x^2 - 2v_x^2 \cos^2 \beta - v_z^2)}{2r_{c0}^3} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

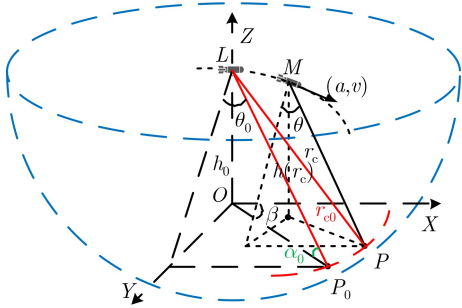


图2 3维等距球体解析模型图

相比于文献[8]中的线性斜距模型 $r_c \approx r_{c0} - vt_c \sin \theta$, 式(10)更为准确地描述了俯冲段大斜视SAR的距离方位空变关系, 两种斜距模型的精确性可通过斜距误差来评估, 斜距误差的表达式为

$$\Delta r_c = r_c - r_{c\text{-appro}} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} k_1(r_c, t_c, \theta) &\approx k_{10}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) + k_{11}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) t_c \\ k_2(r_c, t_c, \theta) &\approx k_{20}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) + k_{21}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) t_c + k_{22}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) t_c^2 \\ k_3(r_c, t_c, \theta) &\approx k_{30}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) + k_{31}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) t_c \\ k_4(r_c, t_c, \theta) &\approx k_{40}(r_{c0}, 0, \theta_0, \mathbf{v}, \mathbf{a}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中, k_4 的方位空变可以忽略, 可由参考点处的 k_{40} 替代。高次项系数 $k_i (i \geq 2)$ 的各阶分量可分解为

$$\left. \begin{aligned} k_{20} &= k_{20v}(\mathbf{v}) + k_{20a}(\mathbf{a}), \quad k_{21} = k_{21v}(\mathbf{v}) + k_{21a}(\mathbf{a}), \quad k_{22} = k_{22v}(\mathbf{v}) + k_{22a}(\mathbf{a}) \\ k_{30} &= k_{30v}(\mathbf{v}) + k_{30a}(\mathbf{a}), \quad k_{31} = k_{31v}(\mathbf{v}) + k_{31a}(\mathbf{a}), \quad k_{40} = k_{40v}(\mathbf{v}) + k_{40a}(\mathbf{a}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3.2 方位空变的残余高阶RCM校正方法

将3维等距球体解析模型得出的斜距展开系数

$$\begin{aligned} S_{\text{delay-1}}(f_r, t_m; t_c) &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} \mu_0 \right\} \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} \left[(k_{21a} + k_{21v} - k_{30a} - k_{30v}) t_c \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (k_{22a} + k_{22v} - k_{30a} - k_{30v}) t_c^2 \right] t_m^2 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} (2k_{31a} t_c + 2k_{31v} t_c - 8k_{40v} t_c) t_m^3 \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

为校正方位空变的残余高阶RCM, 引入方位扰动函数

$$H_{\text{pert}}(f_r, t_m) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} (q_3 t_m^3 + q_4 t_m^4) \right\} \quad (16)$$

其中, q_3, q_4 为待定系数。式(16)与式(15)相乘后的结果在 $t_m = t_c$ 处进行泰勒级数展开后得

$$\begin{aligned} S_{\text{delay-2}}(f_r, t_m; t_c) &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} \mu_0 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} \sum_{i=0}^4 A_i(r_{c0}, q_3, q_4) (t_m - t_c)^i \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)的第2个指数项中, $A_i(t_m - t_c)^i$ 表示各阶残余RCM分量, 其中线性分量 $A_1(t_m - t_c)$ 在残余高阶RCM中占主要的部分, 则令线性分量系数 $A_1 = 0$, 可得

$$\begin{aligned} q_3 &= -\frac{2}{3} (k_{21v} + k_{21a} - 3k_{30a} - 3k_{30v}), \\ q_4 &= -\frac{1}{2} (k_{20a} + k_{20v} - 6k_{40v}) \end{aligned} \quad (18)$$

其中, r_c 为点目标 P 的波束中心斜距, $r_{c\text{-appro}}$ 表示分别采用本文和文献[8]的斜距模型得到的波束中心斜距的近似值。

根据表1中的仿真参数, 两种建模方式的斜距误差如图3所示。可见, 3维等距球体解析模型的斜距误差优于文献[8]的结果。此外, 由于方位向处理对斜距比较敏感, 采用文献[8]中的斜距模型会引起严重的RCM误差和相位误差, 进而影响距离向和方位向处理结果。而采用本文所提出的3维等距球体解析模型, 可以获得更好的高阶残余RCM校正与多普勒相位均衡的效果。

为了便于后续处理, 将波束中心斜距的方位空变解析式(10)代入到式(3)中得到斜距展开系数 k_i 的方位空变解析式为

包含速度和加速度的部分, 具体可表为

式(14)代入式(5)中, 距离延迟信号 $S_{\text{delay-1}}$ 可表为

将式(18)代入式(17), 可得

$$\begin{aligned} S_{\text{delay-3}}(f_r, t_m; t_c) &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} \mu_0 \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_r}{c} \left[A_0(r_{c0}) + \sum_{i=2}^4 A_i(r_{c0}) (t_m - t_c)^i \right] \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

其中, 第2个指数项包含方位空变的残余高阶RCM校正后的距离偏移和剩余RCM误差。

基于表1中的仿真参数, 以场景中心点 P_0 与方位边缘点 P_1, P_2 为例, 对残余高阶RCM校正后的RCM轨迹进行了仿真分析, 并与文献[8]中基于线性斜距模型的距离包络空变校正方法的结果进行了对比, 如图4所示。可以看出, 若采用文献[8]的方法, 方位边缘点的RCM误差大于1/2个距离分辨单元; 而采用本文的方法, 方位边缘点的RCM误差远小于1/2个距离分辨单元, 满足进行后续方位向处理的要求。

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
平台速度	(130, 50, -50) m/s	加速度	(1.5, 0.5, -0.5) m/s ²
场景中心斜距	10 km	合成孔径时间	1.49 s
距离带宽	150 MHz	采样频率	378 MHz
参考斜视角	52°	脉冲重复频率	1.4 kHz
载频	10 GHz	脉冲宽度	5.8 μs

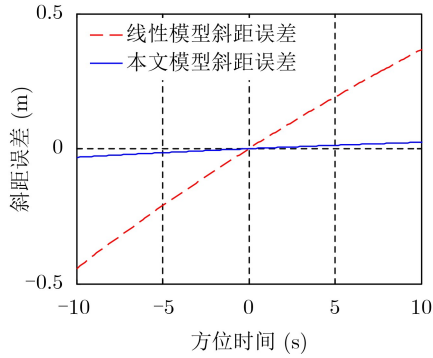


图 3 斜距建模误差

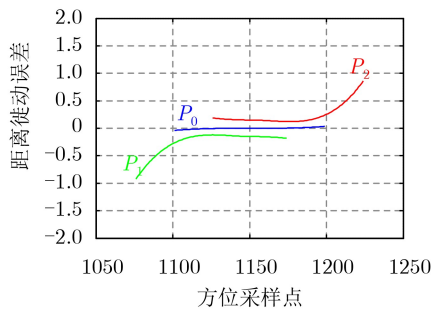
3.3 基于3维等距球体解析模型的改进方位向FEN-LCS

距离向处理后, 方位时域调制信号忽略常数项

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(\Delta f_{dc}, r_{c0}, t_c) &\approx \varphi_{10}(r_{c0}) + \varphi_{11}(\Delta f_{dc}, r_{c0}) t_c + \varphi_{12}(\Delta f_{dc}, r_{c0}) t_c^2 \\ \varphi_2(\Delta f_{dc}, r_{c0}, t_c) &\approx \varphi_{20}(r_{c0}) + \varphi_{21}(\Delta f_{dc}, r_{c0}) t_c + \varphi_{22}(\Delta f_{dc}, r_{c0}) t_c^2 \\ \varphi_3(\Delta f_{dc}, r_{c0}, t_c) &\approx \varphi_{30}(r_{c0}) + \varphi_{31}(\Delta f_{dc}, r_{c0}) t_c \\ \varphi_4(\Delta f_{dc}, r_{c0}, t_c) &\approx \varphi_{40}(r_{c0}) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

其中, 4次相位系数的空变可以忽略, 高次非空变相位 $\pi(\phi_{30}f_a^3 + \phi_{40}f_a^4)$ 可通过构造共轭函数补偿。文献[8]采用线性斜距模型 $r_c \approx r_{c0} - vt_c \sin \theta$ 对多普勒相位系数进行建模, 但是该方法在俯冲段大斜视宽幅成像条件下会有较大的相位误差, 其中2阶相位误差(Quadratic Phase Error, QPE)和3阶相位误差(Cubic Phase Error, CPE)可表示为

$$\Delta \psi_i = \pi(\varphi_i - \varphi_{\text{real}}) \left(\frac{B_{\text{sub}}}{2} \right)^i, i = 2, 3 \quad (23)$$



(a) 文献[8]结果

后可以写成如下形式

$$s_{az-1}(t_m; r_c, t_c) = \exp \{ j2\pi \Delta f_{dc}(r_c, t_c, \theta)(t_m - t_c) + j\pi f_{d2}(r_c, t_c, \theta)(t_m - t_c)^2 \} \cdot \exp \{ j\pi f_{d3}(r_c, t_c, \theta)(t_m - t_c)^3 + j\pi f_{d4}(r_c, t_c, \theta)(t_m - t_c)^4 \} \quad (20)$$

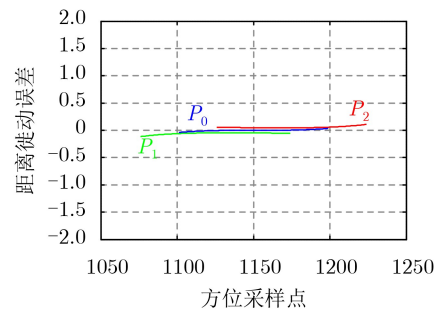
其中

$$\left. \begin{aligned} \Delta f_{dc} &= -\frac{2(k_1 - k_{10} - 2k_{20a}t_c - 3k_{30a}t_c^2)}{\lambda} \\ f_{d2} &= -\frac{4(k_2 - k_{20a} - 3k_{30a}t_c)}{\lambda} \\ f_{d3} &= -\frac{4(k_3 - k_{30a})}{\lambda}, f_{d4} = -\frac{4k_{40}}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

在式(21)中, $\lambda = c/f_c$ 表示波长。 Δf_{dc} 表示LRMC和AC后的残余多普勒质心, f_{d2} 表示多普勒调频率, f_{d3} 和 f_{d4} 表示高阶多普勒参数, 其中 f_{d4} 的方位空变可以被忽略。

为消除多普勒中心以及方位调频率空变对成像处理的影响, 首先需要对多普勒相位系数 ϕ_i 的空变特性进行建模。采用3维等距球模型推导的斜距空变解析式(13), 各阶多普勒相位系数 ϕ_i 的空变解析式可表示为

其中, B_{sub} 表示子孔径方位多普勒带宽, ϕ_{real} 表示理论多普勒相位系数。根据式(23)和表1中的参数, QPE和CPE的仿真结果如图5所示。在方位单边幅宽 >750 m时, 文献[8]算法的QPE超过了门限值 $\pi/4$, 而本文方法的有效方位向单边幅宽为1300 m。CPE的对比结果类似于QPE。所以, 与文献[8]算法中的线性斜距模型相比, 本文的3维等距球解析模型具有更高的精度, 且能够处理的方位向有效宽度更广。



(b) 本文结果

图 4 残余高阶RCM校正结果

基于本文所提3维等距球体解析模型所推导的斜距空变解析式(13)、式(14)和多普勒相位系数 ϕ_i 的空变解析式(22),重新推导了FENLCS算法^[14]以消除剩余多普勒中心频率和多普勒高次调频率的方位空变,算法处理流程如图6所示。

4 仿真结果及分析

为验证本文所提模型及算法的有效性,本节进行了仿真验证,仿真参数如表1所示。成像场景的距离向和方位向宽度分别为2.0 km和2.4 km。在该场景下的目标点阵 P_0-P_4 中, P_0 为场景中心, P_1 , P_0 和 P_2 位于同一距离单元,方位向间隔为1.2 km; P_3 , P_0 , P_4 位于同一方位位置,距离向间隔为1 km。

选取点 P_1 , P_0 和 P_2 的方位空变RCM校正结果进行分析,以证明本文所提出的残余高阶RCM校正方法的有效性。在采用文献[8]的距离包络空变校正方法处理后,方位边缘点的能量分散到数个距离单元,如图7(a1)、图7(a3)所示。而采用本文方法校正后,所有的RCM轨迹均位于同一距离单元内,如图7(b)所示,残余高阶RCM被有效校正。

为了更清晰地反映成像效果,图8给出了采用文献[8]和本文算法处理后各点目标的聚焦结果以及方位边缘点 P_1 的方位剖面图,两种算法均未采用加窗或者旁瓣抑制处理。采用文献[8]处理后,方位边缘点目标聚焦效果较差,主副瓣未分离,存在严重耦合,且 P_1 点的方位剖面图也出现较明显的畸变,如图8(a), 8(b)所示。这是由于在方位向大幅宽条件下,使用基于线性斜距模型的多普勒相位空变校正方法^[8]未能完全消除残余多普勒质心、调频率和3阶项系数的方位向空变,从而导致峰值旁瓣比损失。而采用本文基于3维等距球体解析模型改进的FENLCS算法处理后,边缘点的聚焦质量与中心点相近,其主副瓣明显分开,且 P_1 点的方位剖面无畸变现象,如图8(c), 8(d)所示,表明本文所提的算法具有较好的成像聚焦效果。

为了定量的对比两种算法的聚焦性能,本文给出了点目标 P_0 , P_1 和 P_4 的峰值旁瓣比、积分旁瓣比和方位分辨率,结果如表2所示。可以看到文献[8]得到的方位边缘点 P_1 的聚焦性能指标和理论值(峰值旁瓣比-13.3 dB、积分旁瓣比-9.9 dB)偏差较大,而

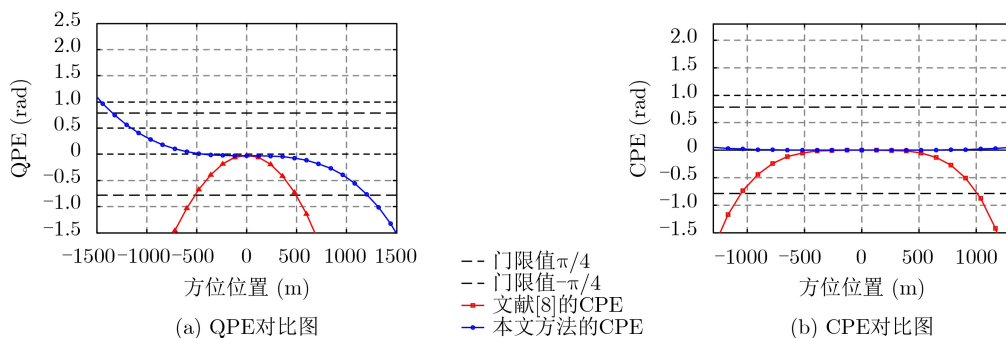


图5 线性距离模型和球模型的相位误差

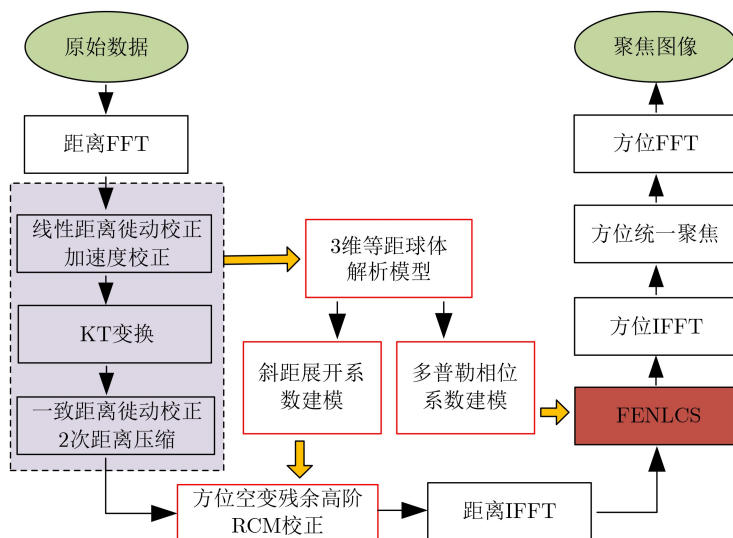


图6 算法处理流程

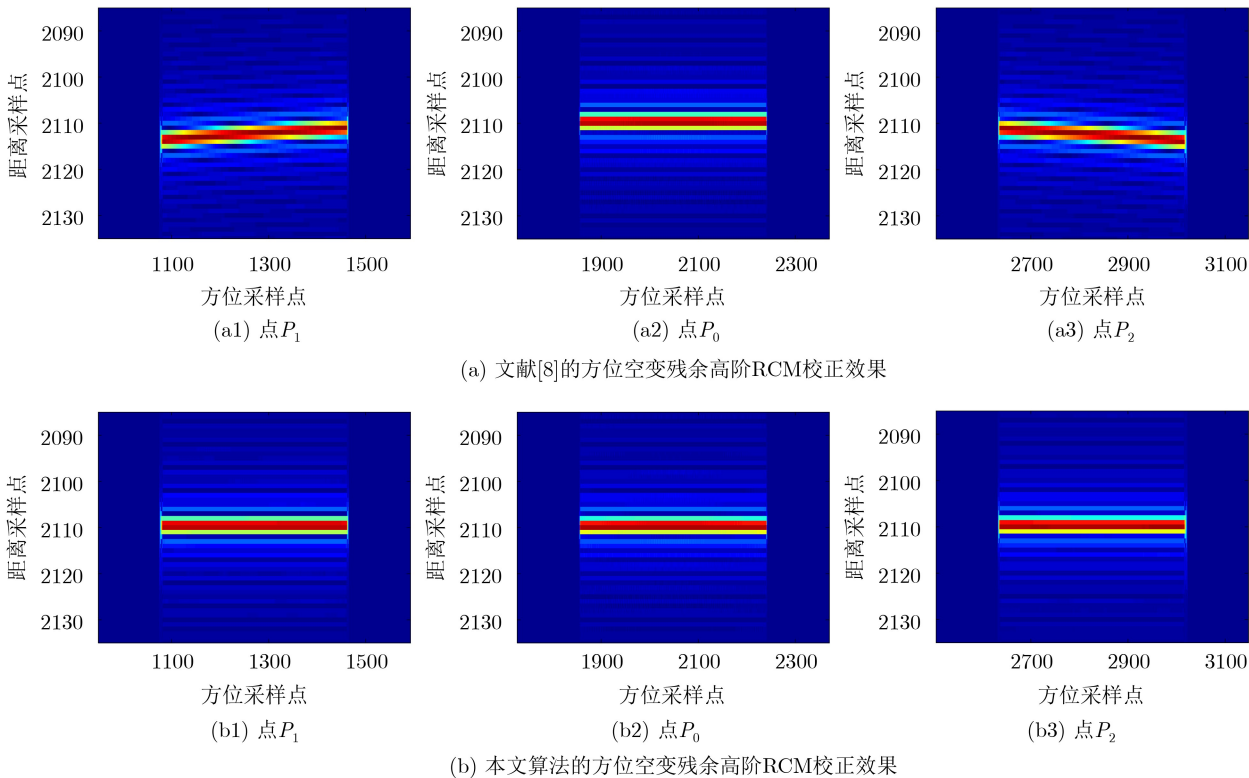


图 7 方位空变的残余高阶RCM校正结果

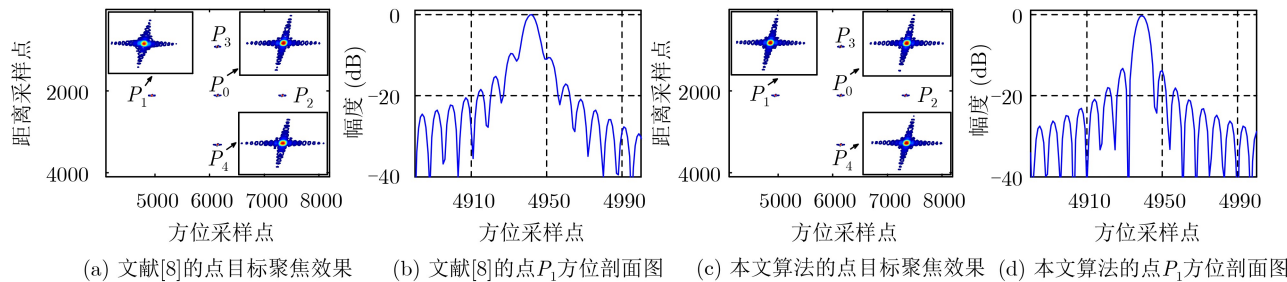


图 8 参考算法与本文的点目标聚焦效果对比

表 2 聚焦性能指标测量结果

点目标	点目标 P_1	点目标 P_0	点目标 P_4
文献[8]的峰值旁瓣比(dB)	-9.14	-13.22	-13.18
文献[8]的积分旁瓣比(dB)	-5.26	-9.85	-9.76
文献[8]的方位分辨率(m)	1.07	1.04	1.06
本文算法的峰值旁瓣比(dB)	-13.21	-13.26	-13.22
本文算法的积分旁瓣比(dB)	-9.79	-9.87	-9.83
本文算法的方位分辨率(m)	1.05	1.04	1.05

采用本文算法所获得的性能指标逼近理论值，进一步验证了本文所提算法可以获得良好的点目标聚焦效果。

5 结束语

本文针对俯冲段大斜视SAR子孔径成像所面临的问题，通过对预处理后回波的距离-方位2维空变特性的分析，建立用于精确描述回波空变特性的

3维等距球体解析模型。基于该模型，本文提出一种方位空变残余高阶RCM的校正方法，并重新推导了去除多普勒相位方位空变的FENLCS方法。理论分析与仿真结果表明，与传统俯冲段大斜视子孔径成像算法相比，在2维空变RCM的校正和方位空变多普勒调频率的均衡等方面都取得了明显的改进，并获得了较好的成像效果。此外，本文所提出的3维等距球体解析模型及成像处理方法，也为俯冲段前视SAR、圆轨SAR等新体制SAR的成像算法研究提供了新的思路。

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.
BAO Zheng, XING Mengdao and WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 123-182.

- [2] 马彦恒, 侯建强. 机动合成孔径雷达成像研究现状与发展趋势[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 111–115. doi: [10.11809/bqzbgcxb2019.11.023](https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2019.11.023).
MA Yanheng and HOU Jianqiang. Research status and development trend of maneuvering synthetic aperture radar imaging[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(11): 111–115. doi: [10.11809/bqzbgcxb2019.11.023](https://doi.org/10.11809/bqzbgcxb2019.11.023).
 - [3] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11999/JEIT180953).
 - [4] 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, 53(12): 6718–6734. doi: [10.1109/TGRS.2015.2447393](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2447393).
 - [5] 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](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).
 - [6] WANG Pengbo, LIU Wei, CHEN Jie, et al. A high-order imaging algorithm for high-resolution spaceborne SAR based on a modified equivalent squint range model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1225–1235. doi: [10.1109/TGRS.2014.2336241](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2336241).
 - [7] LIANG Yi, DANG Yanfeng, LI Guofei, et al. A two-step processing method for diving-mode squint SAR imaging with subaperture data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(2): 811–825. doi: [10.1109/TGRS.2019.2940774](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2940774).
 - [8] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.11999/JEIT180021).
 - [9] 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).
 - [10] LI Zhenyu, CHEN Jianlai, DU Wentao, et al. Focusing of maneuvering high-squint-mode SAR data based on equivalent range model and wavenumber-domain imaging algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2419–2433. doi: [10.1109/JSTARS.2020.2993466](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2993466).
 - [11] HUANG Bang, ZHANG Shunsheng, WANG Wenqin, et al. High-precision imaging algorithm for highly squinted SAR with 3D acceleration[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 130399–130409. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2940283](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940283).
 - [12] SUN Guangcai, JIANG Xiwei, 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).
 - [13] LI Gen, MA Yanheng, SHI Lin, et al. KT and Azimuth sub-region deramp-based high-squint SAR imaging algorithm mounted on manoeuvring platforms[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2020, 14(3): 388–398. doi: [10.1049/iet-rsn.2019.0251](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0251).
 - [14] LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. Focusing of highly squinted SAR data with frequency nonlinear chirp scaling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(1): 23–27. doi: [10.1109/LGRS.2015.2492681](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2492681).
- 钟 华: 男, 1978年生, 博士, 副教授, 研究方向为信号与信息处理。
王梦圆: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。
宋慧娜: 女, 1987年生, 博士, 讲师, 研究方向为信号与信息处理。
白壬潮: 男, 1980年生, 硕士生, 高级工程师, 研究方向为飞行器总体设计与载荷研制。
李世平: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。
曹佳熠: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。
赵荣华: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。

责任编辑: 马秀强