

基于多普勒重采样的恒加速度大斜视SAR成像算法

李 宁* 别博文 邢孟道 孙光才

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

摘 要: 针对机动平台大斜视(HS) SAR存在的方位相位系数空变特性, 该文提出一种基于多普勒重采样的改进谱分析(SPECAN)成像方法。首先, 对于恒加速度HS SAR, 给出了一种正交坐标斜距模型, 可以处理传统方法中距离走动校正(RWC)引起的坐标旋转, 解决了斜距模型与信号之间的失配问题。在此基础上通过方位多普勒重采样校正相位系数的空变性, 并且结合SPECAN技术实现方位向聚焦。最后, 通过仿真数据验证了该文算法的有效性, 与参考算法相比该文方法聚焦质量有明显提升。

关键词: SAR成像; 恒加速; 正交坐标斜距模型; 相位空变; 多普勒重采样; 谱分析

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2873-08

DOI: 10.11999/JEIT180953

A Doppler Resampling Based Imaging Algorithm for High Squint SAR with Constant Acceleration

LI Ning BIE Bowen XING Mengdao SUN Guangcai

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

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

Abstract: A modified SPECTral ANALYSIS (SPECAN) algorithm based on Doppler resampling is proposed to deal with the azimuth Space-Variant (SV) phase coefficients of the High Squint (HS) SAR data acquired from maneuvering platform. Firstly, for HS SAR with constant acceleration, an orthogonal coordinate slant range model is presented, which can handle the coordinate rotation caused by the traditional method of Range Walk Correction (RWC), and solve the mismatch between the range model and the signal after RWC. Then azimuth Doppler resampling is used to correct the SV phase coefficients. The focused image is achieved by SPECAN technique. Finally, the proposed algorithm is validated by processing of simulated SAR data, and has significant improvement on focusing quality over the reference one.

Key words: SAR imaging; Constant acceleration; Orthogonal coordinate slant range model; Space-Variant (SV) phase; Doppler resampling; SPECTral ANALYSIS (SPECAN)

1 引言

由于雷达可以全天候、全天时、远距离对目标进行探测, 利用多普勒效应设计的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像技术^[1-3]被越

来越多的装配到各类平台上。随着SAR成像技术的发展, 出现了许多新型平台。比如将SAR与精确制导技术相结合的弹载SAR^[4]以及应用在航天探测过程中的着陆雷达^[5]等成为近些年来的研究热点。

这些新型平台SAR存在一些显著的特点。首先, 由于实时成像需求和天线长度的限制, 一般采用部分孔径数据成像^[4-8], 其时频分布线在时间轴的投影是相互重叠的^[9], 无法直接在时域引入滤波因子校正方位多普勒参数的空变。为了实现对侧前方区域的成像, SAR平台通常工作在大斜视(High Squint, HS)模式, 这会导致严重的距离方位耦合, 通过距离走动校正(Range Walk Correction, RWC)^[6,8,10]可以去除距离方位耦合中的线性项, 但

收稿日期: 2018-10-12; 改回日期: 2019-05-21; 网络出版: 2019-05-31

*通信作者: 李宁 ln2walker@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405600), 国家自然科学基金创新群体基金(61621005), 中央高校基本业务费(JB180213)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2017YFC1405600), The Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (61621005), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (JB180213)

同时会造成成像坐标系的旋转,引起成像模型与RWC后信号的失配。另一个显著的特点是平台飞行过程中轨迹并非传统的直线轨迹,而是具有恒定加速度的曲线轨迹,直线轨迹建模时的方位平移不变性假设^[6,8]不再成立。

为了应对雷达作恒加速度运动造成的方位相位系数空变,文献^[4,7,11]为曲线轨迹斜距建模与空变多普勒系数校正做出了探索,提出了4阶泰勒级数展开的斜距模型,通过走动校正去除了距离方位耦合中的线性项,分析了距离走动校正之后斜距模型和信号之间的失配。文献^[4]采用基于子区域分块处理与方位非线性调频变标(Nonlinear Chirp Scaling, NCS)的空变校正方法,但子区域分块处理与方位NCS的补零操作降低了处理效率。文献^[7]沿用文献^[6]的模型修正方法,在4阶斜距模型下仍采用变量代换方法修正斜距模型,会带来更大的方位剩余相位误差(Residual Phase Error, RPE),使模型精度下降。文献^[11]提出了一种中轨SAR全孔径成像方法,通过时域重采样可以校正多普勒系数空变性,但部分孔径信号时频分布线在时间轴投影的重叠特性^[9]导致该全孔径成像方法并不适用部分孔径的成像。

本文针对恒定加速度下曲线轨迹大斜视SAR,提出了一种基于多普勒重采样的改进谱分析(SPECTral ANalysis, SPECAN)成像方法。根据机动平台的飞行特点,给出了一种正交坐标斜距模型,本模型可以适应RWC带来的坐标旋转。在此基础上,利用多普勒重采样校正空变的方位相位系数,最终通过SPECAN得到聚焦的SAR图像。通过对仿真SAR数据的处理验证了本文算法的有效性,且聚焦质量与参考算法相比有显著提升。

2 信号模型

图1是恒定加速度大斜视SAR成像几何模型。在一段时间内,机动平台从A点运动到D点,B点($t_a = 0$)为方位时间的参考点,飞行过程中平台具有恒定加速度 \mathbf{a} (方向任意)。平台的偏航角(B点雷达波束地面投影与X轴夹角)为 θ_{yaw} , $P(X_{ref}, Y_{ref}, 0)$

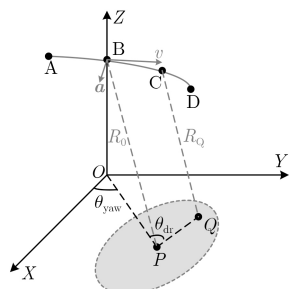


图1 机动平台SAR恒定加速度大斜视几何模型

为地面偏航方向上的任意一点,其距B点的斜距为 R_0 。定义方位角为 θ_{dr} ,对应的方向称为方位向。Q为P点方位向上的任意一点, $d_r = |\mathbf{PQ}|$ 为其方位位置。

雷达 t_a 时刻运动到C点,Q点的瞬时斜距可以展开为方位时间 t_a 的4阶泰勒级数

$$R_Q(t_a, R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a}) = |\mathbf{CQ}| \approx \sum_{i=0}^4 k_i(R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a}) t_a^i \quad (1)$$

其中, R_0 为方位0时刻目标Q的斜距, $k_i(R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a}) = (1/i!) d^i R_Q(t_a, R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a}) / dt_a^i |_{t_a=0}$, $i = 0, 1, \dots, 4$ 为泰勒展开式的系数,其与斜距 R_0 及横向距离 d_r 有关,可以表示场景中的任意位置。

定义方位角 θ_{dr} 的模型是一种通用大斜视SAR成像模型。当 \mathbf{PQ} 与Y轴平行(方位角 $\theta_{dr} = \pi/2 + \theta_{yaw}$)时就退化为文献^[6, 7]中的瞬时斜距模型。本文所提正交坐标斜距模型的方位角 $\theta_{dr} = \pi/2$,此时 \mathbf{OP} 与 \mathbf{PQ} 正交,仿真数据可以验证此时的方位剩余相位误差比参考成像算法^[7]更小。

式(1)中泰勒展开式的系数 $k_i(R_0, d_r, \theta_{dr})$ 与 R_0 和 d_r 有关,具有2维空变性,一般距离空变可以通过距离分块解决^[4],方位空变特性是本文要考虑的主要问题。为了分析方位相位系数的空变性,将其展开为 d_r 的泰勒级数为

$$k_i(R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a}) \approx k_i'(R_0, d_r, \theta_{dr}) = \sum_{j=0}^{4-i} k_{ij}(\mathbf{a}) d_r^j, \quad i = 1, 2, \dots, 4; \quad j = 0, 1, \dots, 4 - i \quad (2)$$

其中, $k_i'(R_0, d_r, \theta_{dr})$ 为 $k_i(R_0, d_r, \theta_{dr})$ 的泰勒展开式的近似,此时的剩余相位误差可以表示为式(3)

$$\Phi_{RPE}(R_0, d_r, \theta_{dr}) = \sum_{i=1}^4 4\pi [k_i(R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a}) - k_i'(R_0, d_r, \theta_{dr}; \mathbf{a})] \cdot t_a^i / \lambda \quad (3)$$

前述的斜距模型和一般曲线轨迹SAR的模型不同,由于式(2)系数的近似带来一定的剩余相位误差,影响方位向聚焦。通过仿真分析可以比较本文所提正交坐标斜距模型与文献^[6-8]模型的剩余相位误差。

表1为本文所用的仿真参数,仿真的剩余相位误差结果如图2所示。对比一般瞬时斜距模型^[7]与本文所提正交坐标斜距模型的方位剩余相位误差,可以看出,由于正交坐标斜距模型能更好地适应RWC引起的坐标旋转,可以解决信号与模型的失

表 1 仿真参数

中心频率 f_c	PRF	带宽 B_r	采样率 f_s	合成孔径时间 T_a
16 GHz	8 kHz	80 MHz	120 MHz	0.3 s
雷达高度 H	偏航角	雷达速度矢量 \mathbf{v}	雷达加速度矢量 \mathbf{a}	作用距离 R_s
10 km	46°	(100, 880, -300) m/s	(15, -10, -5) m/s ²	18 km

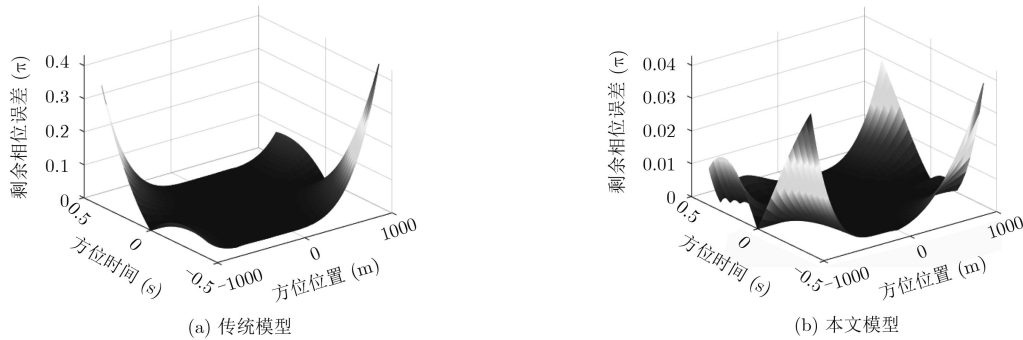


图 2 方位剩余相位误差

配问题。因此，正交坐标斜距模型的相位误差明显比一般模型小，足以表征图1中恒加速度大斜视SAR成像模型。

3 基于多普勒重采样的SPECAN聚焦

3.1 距离向处理

雷达发射信号为线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号，基频回波在距离频域可以表示为

$$S_s(f_r, t_a) = W_r(f_r) w_a(t_a) \exp\left(-j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R_Q\right) \quad (4)$$

其中， f_r 为距离频域， f_c 为回波载频， c 为光速， t_a 为方位时间， $W_r(\cdot)$ 为距离窗函数， $w_a(\cdot)$ 为方位窗函数。

在大斜视模式下，距离方位存在较大的耦合，首先可以通过RWC去除大部分的距离方位耦合，同时进行距离脉冲压缩，校正函数为

$$H_1(f_r, t_a) = \exp\left(j\pi \frac{f_r^2}{\gamma}\right) \exp\left(j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) k_{10} t_a\right) \quad (5)$$

其中， k_{10} 见于式(2)。采用驻定相位原理，将RWC之后的信号变换到2维频域得

$$SS(f_r, f_a) = W_r(f_r) W_a(f_a) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi (f_c + f_r)}{c} k_0\right) \cdot \exp(j\Phi(f_r, f_a)) \quad (6)$$

第2个指数项的相位为

$$\Phi(f_r, f_a) = \frac{\pi c (f_a - f_{dr})^2}{4k_2 (f_c + f_r)} + \frac{\pi c^2 k_3 (f_a - f_{dr})^3}{16k_2^3 (f_c + f_r)^2} - \frac{\pi c^3 k_4 (f_a - f_{dr})^4}{64k_2^4 (f_c + f_r)^3} \quad (7)$$

其中， f_a 为方位频率， f_{dr} 为多普勒中心，通过式(8)构造距离单元徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)和2次距离脉冲压缩项为

$$H_2(f_r, f_a) \approx \exp(j(Bf_r + Cf_r^2)) \quad (8)$$

式(8)中 Bf_r 代表距离徙动项， Cf_r^2 代表2次距离脉冲压缩项，其中 B 和 C 为 $\Phi(f_r, f_a)$ 在 $f_r = 0$ 处展开的1次项与2次项系数。将式(6)与式(8)相乘之后的信号变换到距离多普勒域可得

$$sS(t_r, f_a) = \text{sinc}(\Delta f_r (t_r - 2k_0/c)) \cdot W_a(f_a) \exp(j\pi\Psi(f_a)) \quad (9)$$

其中， k_0 为方位0时刻雷达与目标的距离。此时，对于参考斜距相同而方位位置不同的点目标(如图1中的点P和点Q)将位于不同的距离单元，这导致了方位相位系数的空变性。

经过距离向处理后，此时单个散射点的信号能量集中于同一个距离单元之内，因此多普勒参数空变可以逐距离单元进行。考虑1个距离单元中方位信号相位表达式为

$$\Psi(f_a) = \exp\left(j\pi\left(\phi_2 (f_a - f_{dr})^2 + \phi_3 (f_a - f_{dr})^3 + \phi_4 (f_a - f_{dr})^4\right)\right) \quad (10)$$

其中，

$$\phi_2 = \frac{\lambda}{4k_2}, \phi_3 = \frac{\lambda^2 k_3}{16k_2^3}, \phi_4 = -\frac{\lambda^3 k_4}{64k_2^4} \quad (11)$$

3.2 多普勒重采样校正方位空变性

从实际含义解释, 式(10)中 f_{dr} 为RWC之后目标残余的多普勒中心。从中可以看到, 与文献[10]不同的是, 点目标的信号在方位频域被相应地分离。相位系数 $\phi_i = \phi_{i0} + \hat{\phi}_i, i = 2, 3, 4$ 具有方位空变性, 其中 ϕ_{i0} 为非空变部分, $\hat{\phi}_i$ 为空变部分。在表1的参数下, 图3仿真分析了在单个点目标方位带宽

B_a 内方位相位的空变特性。可以看到, 在1 km幅宽内, 由 ϕ_2 引起的方位空变相位 $\text{phi2} = (\phi_2 - \phi_{20}) \cdot B_a^2$ 是影响聚焦质量的主要因素。 ϕ_3 与 ϕ_4 是方位相位的3次项与4次项, 由二者引起的方位空变相位 $\text{phi3} = (\phi_3 - \phi_{30}) \cdot B_a^3$ 与 $\text{phi4} = (\phi_4 - \phi_{40}) \cdot B_a^4$ 均小于 $\pi/4$, 所以其方位空变分量可以忽略, 用非空变分量 $\phi_3 = \phi_{30}$ 和 $\phi_4 = \phi_{40}$ 来代替。

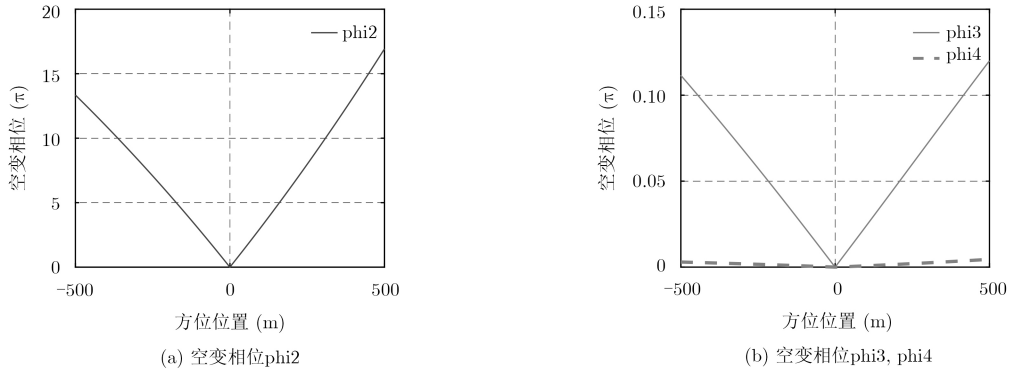


图3 方位相位空变性

下面主要讨论多普勒调频率 ϕ_2 空变性的校正, 将 ϕ_2 在 $f_{dr} = 0$ 处作泰勒级数展开为

$$\phi_2(f_{dr}) = \phi_{20} + \phi_{21}f_{dr} + \phi_{22}f_{dr}^2 \quad (12)$$

其中, ϕ_{20} 是多普勒频率的常数分量, ϕ_{21} 与 ϕ_{22} 是多普勒频率线性分量和2次分量的系数。空变的多普勒参数会导致不同 d_r 处的点目标具有不同的调频率, 从而无法进行统一的方位向聚焦。

文献[11-13]中提到, 方位时间重采样可以用来校正信号方位空变性。但与全孔径处理不同的是,

部分孔径数据在时域是重叠的, 无法通过时域重采样来校正多普勒参数。根据文献[14]所描述的部分孔径数据特性可知, 将部分孔径数据变到频域后, 时频轴翻转使得部分孔径频域数据支撑区(Data Support Region, DSR)的分离, 这时的时频分布等效于全孔径时频分布特性。基于此, 本文采用多普勒域重采样校正信号空变。

图4的相位变化曲线展示了不同位置目标的多普勒空变特性, 3个点目标具有相同的参考距离, 但是位于不同的方位位置。可以看到, 随着方位频

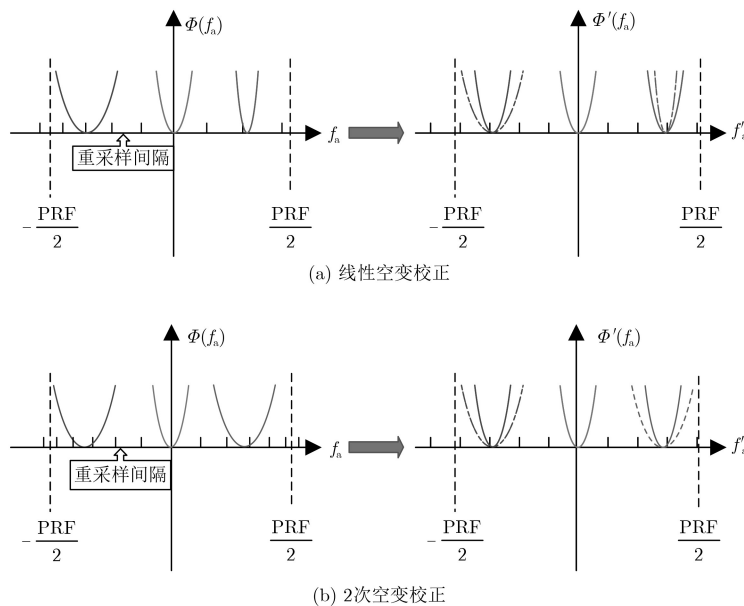


图4 重采样对方位相位的影响

率的变化, 3个不同散射点的相位曲线曲率也随之发生变化, 即方位相位系数存在空变。图4(a)展示了方位相位系数沿多普勒频率呈线性变化, 对应式(12)中的线性空变分量, 图4(b)展示了方位相位系数沿多普勒频率呈2次变化, 对应式(12)中的2次空变分量。通过改变方位频域采样间隔, 将相位进行非线性伸缩变换, 完成不同位置目标空变性的校正。

假设重采样之后的方位频率为 f'_a , 则其与原始频率 f_a 的关系可以描述为

$$f'_a = f_a + \alpha f_a^2 + \beta f_a^3 \quad (13)$$

重采样之后的方位相位与式(12)应该有相同的形式, 假设在新的方位频率下, 方位相位为

$$\Phi'(f'_a) = \exp\left(j\pi\left(\phi'_2(f'_a - f'_{dr})^2 + \phi'_3(f'_a - f'_{dr})^3 + \phi'_4(f'_a - f'_{dr})^4\right)\right) \quad (14)$$

其中, $\phi'_i, i = 2, 3, 4$ 是重采样之后新的方位相位系数, $f'_{dr} = f_{dr} + \alpha f_{dr}^2 + \beta f_{dr}^3$ 为新的多普勒中心。

从图4中可以看到, 经过多普勒重采样, 相同距离单元不同方位位置的散射点的相位曲线具有相同的斜率, 即原先存在的方位相位空变得到了校正。

下面将推导多普勒重采样的表达式。由于对方位聚焦影响最大的是2次项, 所以将式(13)代入式(14)的2次项中得到

$$\begin{aligned} \phi'_2(f'_a - f'_{dr})^2 &= \phi'_2(1 + 4\alpha f_{dr} + 6\beta f_{dr}^2) \\ &\cdot (f_a - f_{dr})^2 + 2\phi'_2\alpha(f_a - f_{dr})^3 \\ &+ 2\phi'_2\beta(f_a - f_{dr})^4 \end{aligned} \quad (15)$$

文献[11]中提到, 由于重采样系数 α 和 β 非常小, 可以忽略式(15)中插值产生的 α 和 β 的高阶项和耦合项。

从式(15)中可以看出, 调整 α 可以校正多普勒调频率的线性空变, 调整 β 可以校正多普勒频率的2次空变。同时, 产生了剩余的相位3次项和4次项, 会对方位聚焦产生影响, 在后面方位匹配滤波中统一补偿。

将式(15)与式(12)相比较, 可以得到对应关系

$$4\alpha\phi'_2 = \phi_{21}, \quad 6\beta\phi'_2 = \phi_{22} \quad (16)$$

重采样之后的系数应为常数, 即 $\phi'_2 = \phi_{20}$, 由此可以求得采样系数为

$$\alpha = \frac{\phi_{21}}{4\phi_{20}}, \quad \beta = \frac{\phi_{22}}{6\phi_{20}} \quad (17)$$

除了多普勒调频率之外, 多普勒重采样还会对相位的3次项和4次项产生影响, 采用与上面多普勒调频率相同的分析方式并且忽略高次项系数

$\phi'_3(f'_a - f'_{dr})^3$ 和 $\phi'_4(f'_a - f'_{dr})^4$ 的空变性, 即可认为 $\phi_3 = \phi_{30}, \phi_4 = \phi_{40}$, 可以得到采样前后高次项系数的关系为

$$\phi'_3 + 2\phi_{20}\alpha = \phi_{30}, \quad \phi'_4 + 2\phi_{20}\beta = \phi_{40} \quad (18)$$

由此可求得

$$\phi'_3 = \phi_{30} - 2\phi_{20}\alpha, \quad \phi'_4 = \phi_{40} - 2\phi_{20}\beta \quad (19)$$

通过方位多普勒重采样, 多普勒调频率的线性和2次空变分量得到了校正。至此, 同一距离单元的散射点具有与参考点相同的多普勒调频率和高次相位, 可以通过方位解斜(Deramp)统一补偿。

前面的分析中已经提到, SAR大前斜成像适宜采用部分孔径进行成像处理, 此时如果采用时域匹配滤波算法进行聚焦成像, 则需要补1个合成孔径长度点数的0^[14], 在斜视角较大时, 会带来处理效率的极大降低。所以对于部分孔径数据, 频域聚焦更有优势, 所以本文结合SPECAN成像完成方位聚焦。

定义 t'_a 为新的方位时间变量, 对式(14)作IFFT变换到方位时域为

$$s(t'_a) = \exp\left(j\pi\left(\varphi_1 t'_a + \varphi_2 t'^2_a + \varphi_3 t'^3_a + \varphi_4 t'^4_a\right)\right) \quad (20)$$

其中

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= 2f'_{dr}, \quad \varphi_2 = -\frac{1}{\phi_{20}}, \\ \varphi_3 &= -\frac{\phi_{30} - 2\phi_{20}\alpha}{\phi_{20}^3}, \quad \varphi_4 = \frac{\phi_{40} - 2\phi_{20}\beta}{\phi_{20}^4} \end{aligned} \quad (21)$$

可以看到, $\varphi_1 t'_a$ 为线性分量, 代表目标聚焦位置。高次分量系数为常数(不含空变量), 但影响方位聚焦, 通过方位乘以Deramp函数后作FFT, 即可完成聚焦。

方位匹配函数为

$$H_{\text{Deramp}}(t'_a) = \exp\left(-j\pi\left(\varphi_2 t'^2_a + \varphi_3 t'^3_a + \varphi_4 t'^4_a\right)\right) \quad (22)$$

将式(20)与式(22)相乘后作方位FFT得到聚焦后的信号

$$\begin{aligned} \text{sS}(t_r, f'_a) &= \sigma_0 \text{sinc}[\Delta f_r(t_r - 2k_0/c)] \\ &\cdot \text{sinc}(T_a(f'_a - f'_{dr})) \end{aligned} \quad (23)$$

图5是本文算法的流程图。整个算法包含两个部分: 距离向处理和方位向处理, 距离向处理包括RCMC和距离脉冲压缩, 方位向处理利用多普勒重采样校正方位相位系数空变, 结合SPECAN完成聚焦。

4 仿真实验

为了验证本文算法的有效性, 下面通过仿真数据来进行说明。

机动平台SAR系统仿真参数采用表1中的参数，分辨率为1 m。在同一个距离单元中放置3个

点目标(如图6所示)，方位中心点为 p_2 ，两个边缘点分别为-500 m (p_1)和500 m (p_3)，图7给出了未校

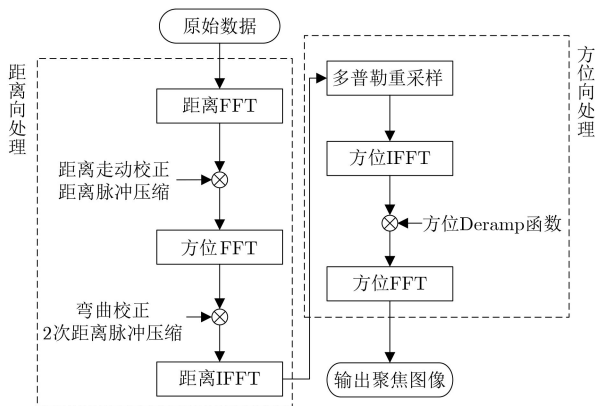


图5 成像算法流程图

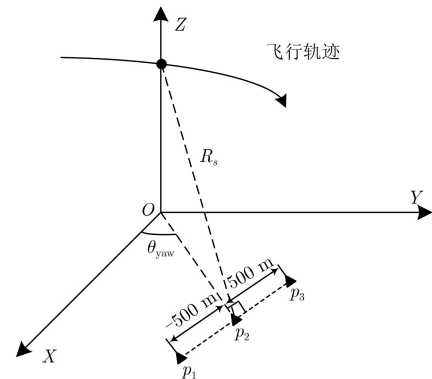


图6 点目标布置示意图

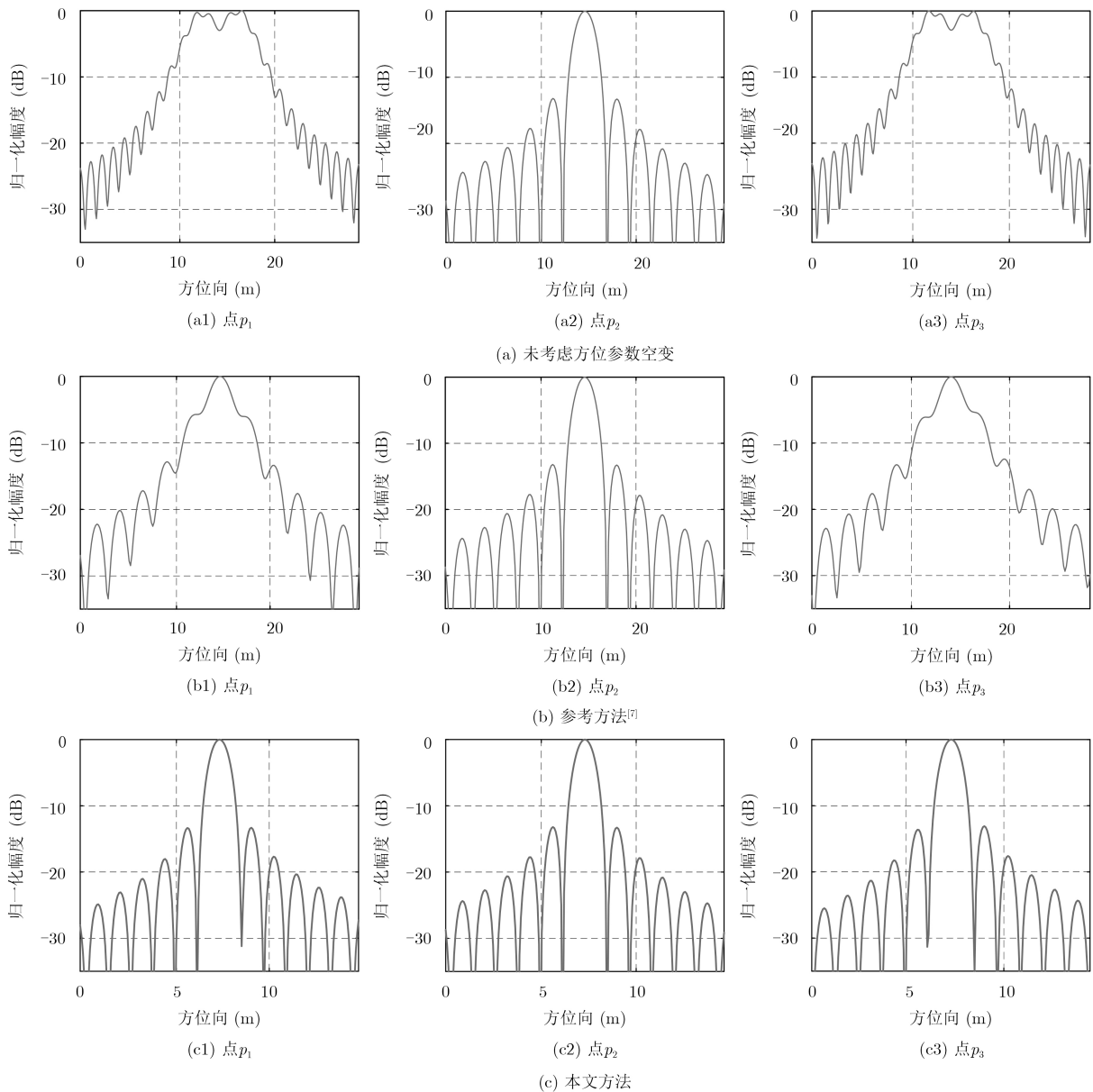


图7 点目标方位脉冲压缩剖面图

正方位相位空变、参考算法^[7]以及本文所提方法的方位聚焦结果对比图，由左至右为 p_1 、 p_2 、 p_3 3个点的方位脉冲压缩剖面图。

图7(a)为未考虑多普勒空变的成像结果，可以看到边缘点存在严重的散焦。图7(b)为参考算法^[7]的聚焦结果，由于信号模型的失配以及残余的空变分量导致边缘点存在较严重的散焦，第1零点和第1旁瓣的抬高影响了方位聚焦质量。图7(c)为本文所提模型与算法下的成像效果，由于通过方位多普

勒重采样校正了空变量，两个点的聚焦质量显著提升。

图8给出了采用本文方法的成像结果的两维等高线图，可以看出，主瓣副瓣分离明显，聚焦效果良好。为了评估本文算法的聚焦性能，计算所得3个点的峰值旁瓣比、积分旁瓣比指标参数如表2所示。可以看到，对边缘点而言，参考方法所得峰值旁瓣比、积分旁瓣比较差，而本文方法不论是中心点还是边缘点的性能指标都更为理想，成像性能明显更好。

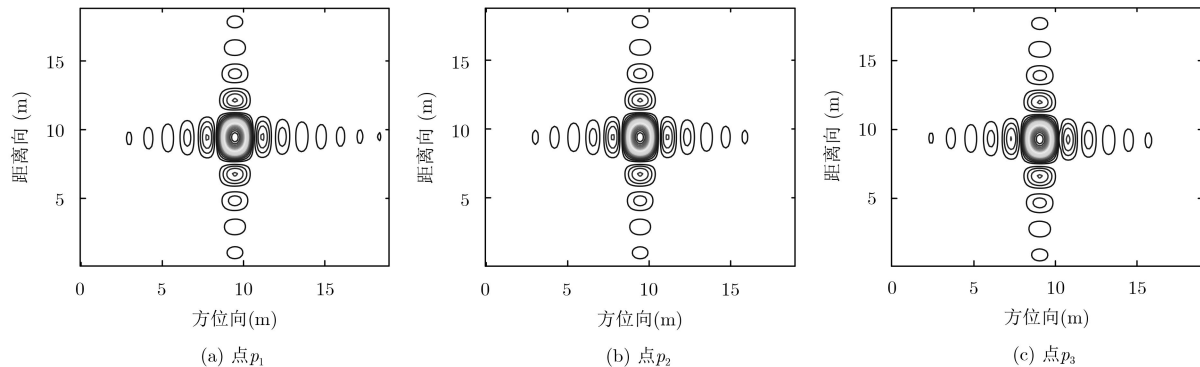


图8 本文算法点目标等高线图

表2 性能评估指标(dB)

性能指标	点 p_1		点 p_2		点 p_3	
	参考方法	本文方法	参考方法	本文方法	参考方法	本文方法
峰值旁瓣比	-6.08	-13.32	-12.84	-13.21	-6.33	-13.09
积分旁瓣比	-7.74	-10.02	-11.38	-10.19	-7.82	-10.38

5 结束语

本文主要研究了机动平台大斜视SAR成像中方位相位空变的校正问题。针对恒加速度大斜视SAR的几何模型，提出了一种正交坐标斜距建模方法，可以适应RWC引起的坐标旋转，与参考方法相比具有更高的斜距精度。针对方位向处理，详细分析了方位相位系数随方位位置的空变性。提出了一种基于多普勒重采样的恒加速大斜视SAR成像算法，利用部分孔径信号支撑区的时域重叠频域分离特性，在方位频域通过多普勒重采样来校正方位相位系数的空变性，然后结合SPECAN技术，完成方位信号的聚焦。最后，对点目标仿真数据的处理验证了本文算法的有效性，且聚焦质量与参考算法相比有显著提升。

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: 1-18.
BAO Zheng, XING Mengdao, and WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2005: 1-18.
- [2] CUMMING I G and WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data[M]. Boston, MA: Artech House, 2005: 1-30.
- [3] 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.
- [4] 别博文, 孙路, 邢孟道, 等. 基于局部直角坐标和子区域处理的弹载SAR频域成像算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(8): 1779-1786. doi: 10.11999/JEIT171107.
BIE Bowen, SUN Lu, XING Mengdao, et al. A frequency-domain algorithm based on local Cartesian coordinate and Subregion processing for missile-borne SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(8): 1779-1786. doi: 10.11999/JEIT171107.
- [5] 郭语, 李一楠, 武晓鹏. 一种深空探测雷达信号处理精度校准方法[J]. 空间电子技术, 2018, 15(3): 65-69. doi: 10.3969/j.issn.1674-7135.2018.03.014.
GUO Yu, LI Yinan, and WU Xiaopeng. A calibrating

- method of radar signal processing precision for deep space exploration[J]. *Space Electronic Technology*, 2018, 15(3): 65–69. doi: [10.3969/j.issn.1674-7135.2018.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-7135.2018.03.014).
- [6] LIANG Yi, LI Zhenyu, ZENG Letian, *et al.* A high-order phase correction approach for focusing HS-SAR small-aperture data of high-speed moving platforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(9): 4551–4561. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2459765](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2459765).
- [7] 别博文, 梁毅, 党彦锋, 等. 曲线轨迹SAR大斜视子孔径成像算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(3): 500–505. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07).
BIE Bowen, LIANG Yi, DANG Yanfeng, *et al.* Sub-aperture imaging algorithm for high squint SAR with curvilinear flight tracks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(3): 500–505. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.03.07).
- [8] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 弹载合成孔径雷达大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 squint 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).
- [9] SUN Guangcai, XING Mengdao, WANG Tong, *et al.* A 2-D space-variant chirp scaling algorithm based on the RCM equalization and subband synthesis to process geosynchronous SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4868–4880. doi: [10.1109/TGRS.2013.2285721](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2285721).
- [10] 游冬, 孙光才, 李亚超, 等. 地球同步轨道SAR两维奇异值分解成像方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(10): 2200–2206. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.10.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.10.07).
YOU Dong, SUN Guangcai, LI Yachao, *et al.* Two-dimension SVD imaging method for GEO SAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(10): 2200–2206. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.10.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.10.07).
- [11] LIU Wenkang, SUN Guangcai, XIA Xianggen, *et al.* A modified CSA based on joint time-Doppler resampling for MEO SAR stripmap mode[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(6): 3573–3586. doi: [10.1109/TGRS.2018.2802545](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2802545).
- [12] YANG Lei, XING Mengdao, WANG Yong, *et al.* Compensation for the NsRCM and phase error after polar format resampling for airborne spotlight SAR raw data of high resolution[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(1): 165–169. doi: [10.1109/LGRS.2012.2196676](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2196676).
- [13] XING Mengdao, WU Yufeng, ZHANG Y D, *et al.* Azimuth resampling processing for highly squinted synthetic aperture radar imaging with several modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4339–4352. doi: [10.1109/TGRS.2013.2281454](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2281454).
- [14] 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).
- 李 宁: 男, 1994年生, 博士, 研究方向为机动平台合成孔径雷达成像.
- 别博文: 男, 1991年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达成像.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为雷达探测、雷达成像、运动目标检测成像.
- 孙光才: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为新体制雷达成像、运动目标检测成像.