

基于两步方位重采样的中轨SAR聚焦方法

刘文康^{*①②} 景国彬^③ 孙光才^{①②} 陈权^{①②} 邢孟道^{①②}

^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(上海卫星工程研究所毫米波遥感技术实验室 上海 201109)

摘要: 中轨轨道显著的弯曲特性导致中轨SAR信号存在2维空变, 因此大场景成像对于中轨SAR仍然是个难题。该文使用参数2维空变的4阶多项式模型对信号进行建模。同时提出一种基于两步方位插值的信号方位空变校正方法, 通过方位时域重采样可以校正参考距离上不同方位目标点的多普勒调频率的线性和2次空变, 距离向利用CS/RMA算法即可校正场景中所有点目标的距离徙动, 而第2步多普勒重采样则能够校正剩余的多普勒参数的空变特性, 包括剩余的距离方位耦合空变, 以及高阶多普勒参数空变。通过两步插值法能够完全校正整个场景目标信号的方位空变特性, 使得传统频域成像算法可以应用于中轨SAR的大场景聚焦。最后通过所提方法与参考方法的仿真结果对比, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 中轨SAR; 空变; 两步重采样

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0136-07

DOI: 10.11999/JEIT180238

Medium-earth-orbit SAR Data Focusing Method Based on Two-step Azimuth Resampling

LIU Wenkang^{①②} JING Guobin^③ SUN Guangcai^{①②}
CHEN Quan^{①②} XING Mengdao^{①②}

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

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

^③(Millimeter Wave Imaging Technology Laboratory, Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: The obvious orbit curvature of Medium Earth Orbit (MEO) results in severe two-dimensional space variance in the received signals. Thus, the focusing of MEO SAR data is still a problem to be solved. Fourth-order polynomial is used to model the range history. Also, an azimuth two-step resampling method is proposed to address the azimuth variance. The azimuth resampling in the time domain can adjust the azimuth chirp rate to be the same, then CS/RMA algorithm can be used to handle the space variance of the RCM. The second-step azimuth resampling can correct the left space variance of the Doppler parameters, including range-azimuth coupled space variance of the azimuth chirp rate, and the higher-order focusing parameters. The proposed method can well address the azimuth space variance of the whole scene, make the conventional frequency-domain focusing algorithms applicable to large scene focusing. Finally, the comparison results obtained by the proposed method and the reference method, validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Medium Earth Orbit (MEO) SAR; Space variance; Two-step resampling

收稿日期: 2018-03-14; 改回日期: 2018-09-19; 网络出版: 2018-10-08

*通信作者: 刘文康 wkliu@xidian.edu.cn

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)

1 引言

中轨合成孔径雷达(SAR)在对地观测的持续性与覆盖面两方面具有得天独厚的优势^[1-3]。然而由于轨道高度较低轨SAR轨道大大增加,中轨SAR成像也存在很多亟待解决的问题。例如,由于观测距离较远,雷达系统对功率的需求大大增加^[4];长合成孔径时间导致电离层背景非时变的假设不再成立,使得图像中存在畸变和位移^[5-7];另外,由于明显的轨迹弯曲,和大场景观测的需求,目标信号存在严重的2维空变特性,难以统一聚焦成像^[8]。

由于中轨轨道的弯曲以及信号2维空变特性的存在,传统的基于双曲距离模型的成像算法,如经典的CS算法、RMA算法将不再适用,需要建立更精确的距离模型以及相匹配的成像算法。关于距离模型,文献^[8]提出一种改进的双曲距离方程,该方程通过在原始的双曲距离模型上加上一个线性项,来减小模型的3阶误差。文献^[9]在此基础上考虑了斜距历程的4阶项,进一步提升了模型在长合成孔径时间下的近似精度。这些距离模型都是在双曲距离模型上进行改进,在推导信号的2维频谱时能够继承传统距离模型的简洁性。另外,多项式模型也被用于中高轨斜距历程的精确建模^[10,11]。基于这些新的距离模型的成像算法也逐步地发展起来,通常传统的频域算法要基于信号的方位平移不变性,这是将低轨算法移植到中轨成像的过程中最大的障碍。因此,在研究中轨频域算法时,首先需要考虑如何校正信号的方位空变特性。方位非线性变标(NCS)方法被广泛地应用于大斜视和曲线轨迹成像中,是最常用的校正方位空变的手段,通过对信号乘以扰动函数,不同方位目标的距离徙动能够在距离单元尺度上近似地校正成一致。在距离徙动一致化基础上,文献^[12-15]研究了曲线轨迹的距离CS和NCS类算法,文献^[16,17]则研究了基于方位NCS的波束域成像算法。扰动函数是一种有效的空变校正的手段,并且只引入了傅里叶变化和矩阵乘法运算,缺点是利用扰动函数在校正空变的同时,会引入新的空变项,难以完全消除,同时成像结果会存在2维畸变。奇异值分解(SVD)也是一种有效的空变分析手段^[18,19],能够将复杂的空变信号进行有效的分解,但是这类方法计算量比较大,而且如何消除多个特征分量的空变项的问题仍然需要解决。

本文提出了一种新的基于两步方位重采样的方位空变校正方法。提出的方位时域重采样方法能够去除参考距离上的目标多普勒调频率的方位空变特性,然后利用传统的距离CS/RMA算法可以实现场景中目标点统一的距离徙动校正,对于多普勒参

数存在的剩余空变影响方位精确聚焦的问题,提出了在多普勒域进行第2步方位重采样的方法,能够将高阶多普勒空变以及距离方位的耦合空变统一地校正,即可消除大场景中不同目标的空变特性,实现大场景的统一聚焦成像。

2 信号模型与空变特性建模

准确的距离模型是研究成像方法的基础,基于双曲模型的距离方程在对信号的空变特性建模时缺少足够的精度和灵活性。本文采用4阶多项式距离模型,利用空变的多项式参数对整个场景中的信号历程建模,能够准确地表征信号的2维空变特性。

本文主要讨论条带模式正侧视下的成像方法,卫星与目标点间的斜距历程可以用最近斜距处的4阶泰勒展开式表示。

$$R(t_a) \approx R_0 + k_2(t_a - t_c)^2 + k_3(t_a - t_c)^3 + k_4(t_a - t_c)^4 \quad (1)$$

t_a 表示方位时间, t_a 的零时刻为录取数据的中心时刻, t_c 表示波束中心穿越时刻, R_0 表示卫星与目标点间的最近斜距, $k_i, i = 2, 3, 4$ 表示各阶系数,卫星通过偏航和俯仰控制^[20,21], k_1 保持在零附近。受轨道弯曲特性的影响,多项式系数不仅随目标的最近斜距变化,也随目标的方位位置变化。因此多项式系数需要建模成距离和方位的2维函数。

信号的2维空变主要体现在斜距历程的2阶和3阶项系数上,因此,这里将2阶和3阶项的系数表示成

$$k_2 = k_{20} + k_{21,r}r + k_{22,rr}r^2 + k_{21,t_c}t_c + k_{22,t_c}t_c^2 + k_{22,rt_c}rt_c \quad (2)$$

$$k_3 = k_{30} + k_{31,r}r + k_{31,t_c}t_c \quad (3)$$

其中, r 表示点目标最近斜距与参考斜距的差异, $k_{ij,xy}$ 表示系数 k_i 相对 x 和(或) y 的偏导数。

斜距模型中的高阶项空变不明显,在整个场景中可以看作是恒定的。

3 基于两步方位插值的中轨SAR成像方法

与传统基于NCS的空变校正方法不同,本文提出的基于两步方位插值的中轨SAR成像方法,通过在方位时域插值校正方位调频率的空变,将方位向的距离徙动(RCM)校正成一致,然后利用传统的距离空变处理方法,包括CS/NCS类算法^[10]或者RMA算法^[16]完成统一RCM校正,然后在聚焦之前,通过多普勒域进行第2次方位信号插值,完成剩余的多普勒参数的方位空变校正,即可实现统一的方位脉冲压缩,具体的处理流程图见图1。

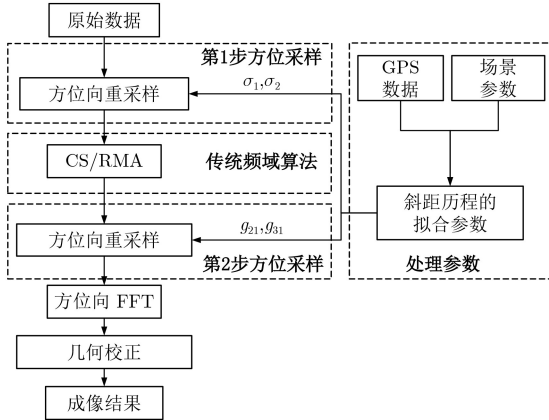


图1 基于两步方位重采样的中轨SAR成像处理流程图

3.1 调频率方位空变校正

图2表示了中轨回波信号方位调频率的空变特性, 3条线分别表示方位向均匀分布的3个目标点的时频图, 图2(a)表示3个目标点的时频线斜率(也即方位调频率)呈线性变化, 图2(c)表示时频线斜率呈2次变化。由于传统频域算法是基于信号方位平移不变性的假设建立的, 而不同目标回波信号方位调频率的空变导致无法对方位目标进行统一距离徙动校正和方位压缩, 传统频域算法难以直接应用。

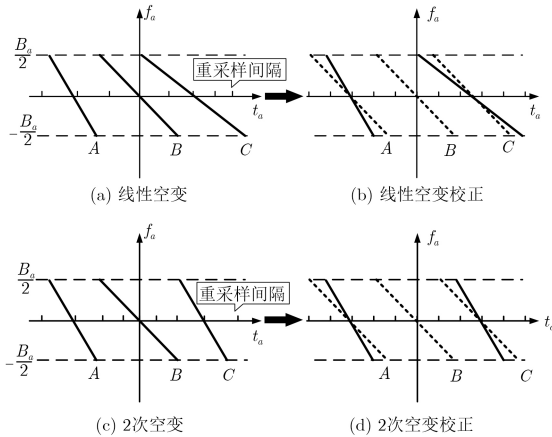


图2 调频率方位空变校正

由于不同方位目标点的方位信号在方位时域占据的时间宽度具有一定的差异性, 而且信号的方位空变特性随时间是缓变的, 因此本文提出了一种基于回波信号方位时域重采样的方法, 通过重新定义方位时间尺度, 改变原来信号的方位采样位置, 经过坐标轴的非线性伸缩, 可以将方位向不同目标的调频率校正成一致, 如图2(b), 图2(d)所示, 分别表示通过新的时间采样间隔设计, 将信号的方位调频率的线性空变和2次空变校正成一致。下面将推导方位时间重采样的表达式。

将新的时间变量表示为 t'_a , t'_a 与 t_a 的关系可以用多项式表示为

$$t'_a = t_a + \sigma_1 t_a^2 + \sigma_2 t_a^3 \quad (4)$$

其中, σ_1 和 σ_2 分别是2次项和3次项的系数。设在新的时间尺度下, 信号的斜距历程可以表示为

$$R'(t'_a) \approx R_0 + \kappa_2 (t'_a - t'_c)^2 + \kappa_3 (t'_a - t'_c)^3 + \kappa_4 (t'_a - t'_c)^4 \quad (5)$$

$\kappa_i, i = 2, 3, 4$ 表示新的多项式系数。最近时刻 t'_c 与 t_c 同样满足关系式(4)。

将式(4)的插值核代入式(5)的新的斜距历程中, 可以得到两个时间尺度上的2次项的变化, 由于 σ_1 和 σ_2 都很小, 这里忽略了插值产生的 σ_1 和 σ_2 的高阶项和耦合项

$$\begin{aligned} \kappa_2 (t'_a - t'_c)^2 &\approx \kappa_2 (1 + 4\sigma_1 t_c + 6\sigma_2 t_c^2) (t_a - t_c)^2 \\ &\quad + \kappa_2 (2\sigma_1 + 6\sigma_2 t_c) (t_a - t_c)^3 \\ &\quad + 2\kappa_2 \sigma_2 (t_a - t_c)^4 \end{aligned} \quad (6)$$

可以看出 σ_1 能够用来校正斜距历程2次项的线性空变, σ_2 可以校正2次项的2阶空变, 副作用是 σ_1 会产生一个新的3阶项, 而 σ_2 会导致3阶项的线性空变项, 同时也会产生一个恒定的4次项。新产生的高阶项比较小, 但是对方位聚焦产生影响。由于斜距历程中的3次, 4次项的大小远小于2次项的大小, 方位重采样对3次, 4次项的影响很小, 可以忽略。令

$$\left. \begin{aligned} 4\sigma_1 \kappa_2 &= k_{21, t_c} \\ 6\sigma_2 \kappa_2 &= k_{22, t_c} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

在中心斜距上满足 $\kappa_2 = k_{20}$, 据此可以求出时间插值核的系数

$$\sigma_1 = k_{21, t_c} / (4k_{20}), \sigma_2 = k_{22, t_c} / (6k_{20}) \quad (8)$$

在新的时间轴 t'_a 上, 回波信号在方位向上是均匀采样的, 与新的时间轴上的采样位置对应的旧的时间轴上的采样位置可以通过求解方程式(4)中的 t_a 得到。

新的2次项系数可以表示为

$$\begin{aligned} \kappa_2 &= k_{20} + k_{21, r} r + k_{22, r} r^2 + k_{21, t_c} t_c + k_{22, r t_c} r t_c + k_{22, t_c} t_c^2 \\ &\quad - 4\sigma_1 k_{2, t_c=0} t_c - 6\sigma_2 k_{2, t_c=0} t_c^2 \\ &= k_{20} + k_{21, r} r + k_{22, r} r^2 + k'_{2, r t_c} r t_c \end{aligned} \quad (9)$$

新的斜距历程可以表示为

$$R'(t'_a) = R_0 + \kappa_2 (t'_a - t'_c)^2 + (\kappa_{31, t_c} t'_c + \kappa_{30}) \cdot (t'_a - t'_c)^3 + \kappa_{40} (t'_a - t'_c)^4 \quad (10)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \kappa_{30} &= k_{30} - k_{21,t_c}/2 \\ \kappa_{31,t_c} &= k_{31,t_c} - k_{22,t_c} \\ \kappa_{40} &= k_{40} - k_{22,t_c}/3 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

经过方位时域插值之后，调频率沿方位的线性和2次空变被完全地校正，信号的距离徙动的方位空变已经可以忽略。剩余的调频率中的距离方位耦合项，以及距离方程3次项的线性空变，都只影响方位聚焦参数，将在方位聚焦之前进行处理。此时可以利用传统的距离空变的RCM校正方法完成整个场景的RCM校正。

3.2 剩余多普勒参数空变校正

经过RCM校正后，单个散射点的信号能量只存在于单个距离单元内，因此多普勒参数空变校正可以在距离向逐单元处理，对于剩余的多普勒参数空变，本文通过多普勒域对方位信号进行第2次重采样来校正，方位调频率中的耦合空变项可以与高阶多普勒参数的方位空变一同校正。

经过RCM校正的方位相位可以表示为

$$\begin{aligned} \Phi_d(r, f_a) &= -2\pi t'_c f_a + 2\pi \left(\frac{c}{8\kappa_2 f_c} f_a^2 + \frac{\kappa_3 c^2}{32\kappa_2^3 f_c^2} f_a^3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(9\kappa_3^2 - 4\kappa_2 \kappa_4) c^3}{512\kappa_2^5 f_c^3} f_a^4 \right) \\ &= -2\pi [t'_c f_a + g_2 f_a^2 + g_3 f_a^3 + g_4 f_a^4] \end{aligned} \quad (12)$$

将 g_i 展开为方位时间的线性函数，得到 $g_i = g_{i1} t'_c + g_{i0}$, $i = 2, 3$ ，表示方位线性空变的多普勒系数。将信号的方位相位分离成不空变的项和线性空变的项之后，可以重写为

$$\begin{aligned} \Phi_d(r, f_a) &= -2\pi [g_{20} f_a^2 + g_{30} f_a^3 + g_{40} f_a^4 \\ &\quad + t'_c (f_a + g_{21} f_a^2 + g_{31} f_a^3)] \end{aligned} \quad (13)$$

其中，不空变的项可以通过方位匹配滤波函数实现统一的校正。

$$H_{\text{mat},a}(r, f_a) = \exp(j2\pi (g_{20} f_a^2 + g_{30} f_a^3 + g_{40} f_a^4)) \quad (14)$$

匹配滤波中的多普勒参数可以表示为

$$\left. \begin{aligned} g_{20} &= -\lambda / (8\kappa_{2,t_c=0}) \\ g_{30} &= -\lambda^2 \kappa_{30} / (32\kappa_{2,t_c=0}^3) \\ g_{40} &= -\lambda^3 (9\kappa_{30}^2 - 4\kappa_{20} \kappa_{40}) / (512\kappa_{20}^5) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中， $\kappa_{2,t_c=0} = \kappa_{20} + \kappa_{21,r} r + \kappa_{22,rr} r^2$ ，表示随距离单元变化的方位调频率，可以逐个距离单元进行更新。

经过方位统一滤波之后，剩余的空变的方位相位可以表示为

$$\Phi_d(r, f_a) = -2\pi t'_c (f_a + g_{21} f_a^2 + g_{31} f_a^3) \quad (16)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} g_{21} &= \lambda \kappa_{22,rt_c} r / (8\kappa_{2,t_c=0}^2) \\ g_{31} &= -\lambda^2 \kappa_{31,t_c} / (32\kappa_{20}^3) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

可以看出，多普勒高阶项的存在影响了方位聚焦的最终效果，而多普勒高阶项可以通过方位向上插值实现校正，如图3所示，插值核可以表示为

$$f'_a = f_a + g_{21} f_a^2 + g_{31} f_a^3$$

经过方位第2次插值之后，方位信号相位可以表示为

$$\Phi_d(r, f'_a) = -2\pi t'_c f'_a \quad (18)$$

此时可以看出方位相位只剩下了与目标的位置 t'_c 有关的线性项，经过方位逆傅里叶变换，即可得到最终的聚焦图像。

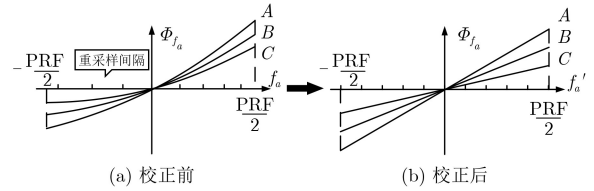


图3 多普勒域重采样校正多普勒参数空变示意图

4 方法适用性分析

本文方法的准确性主要受两个方面的影响，一个是斜距模型的误差，一个是所提算法的误差。针对所提出的斜距模型，这里分析了整个场景中的斜距最大误差跟场景大小、以及分辨率的关系。图4所示，图4(a)分析了2 m分辨率条件下斜距模型误差与场景大小的关系，图4(b)分析了对于100 km × 100 km场景下斜距模型误差与分辨率之间的关系。虚线表示 $\pi/4$ 的误差限制，可以看出本文采用的斜距模型在2 m分辨率下能够实现420 km的场景目标斜距准确表示，对于100 km × 100 km场景，能够实现0.25 m分辨率下的斜距历程准确表示。

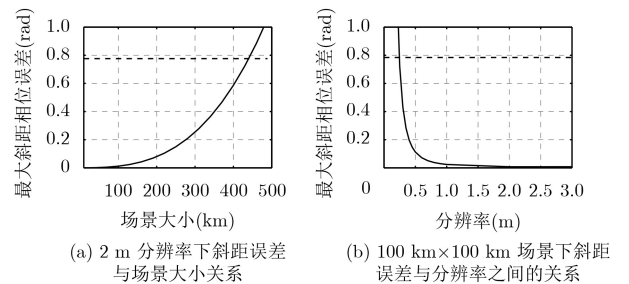


图4 斜距模型误差分析

本文方法在处理上的误差主要来自于频域算法的处理误差，以CS算法为例，能够处理的场景大小范围受到CS算法本身近似条件的限制，对于中轨成像来说，忽略距离向调频率的空变产生的影响

较大，对处理场景的限制为

$$W_r < \frac{16f_c^3 \kappa_{20}^2}{cB_a^2 B^2 |\kappa_{21}| \sin \theta_{inc}} \quad (19)$$

使用表1的仿真参数计算得到，此近似限制处理场景不超过376 km。

表 1 仿真参数

参数类型	参数名称	数值
轨道参数	轨道高度(km)	15000
	离心率	0
	倾角(°)	90
	近地点幅角(°)	0
雷达参数	频率(GHz)	5.4
	带宽(MHz)	103.4
	PRF(Hz)	4000
	入射角(°)	40
	合成孔径时间(s)	43.1
	地表距离分辨率(m)	2
场景参数	地表方位分辨率(m)	2
	场景方位宽度(km)	100
	场景距离宽度(km)	100

本文方法与常规采用非线性变标的方法相比，优点在于推导简单，缺点在于需要两次方位重采样的操作运算量较大，但是时域重采样可以通过变PRF技术来取代，两次方位插值操作也可以通过NUFFT实现，来提升运算效率。

5 仿真分析

为了验证本文方法的有效性，本节给出了仿真实验结果。采用的仿真参数如表1所示，轨道高度15000 km，轨道倾角为90°，雷达的中心频率为S波段5.4 GHz，带宽为103.4 MHz，地表距离分辨率和方位分辨率均为2 m，仿真场景大小为100 km×100 km，点阵目标的布置见图5。

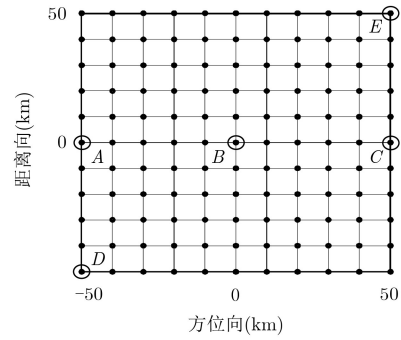


图 5 仿真场景中点目标布置

为了说明本文所提出的两步重采样方法每一步的有效性，这里给出有无各步骤的处理结果对比，图6(a), 6(b), 6(c)分别是目标C只采用CS算法处理、CS算法结合时域重采样、CS算法结合两步重采样的处理结果。图6(d), 6(e), 6(f)是目标E相应的处理结果。可以看出不采用两步重采样方法的处理结果点C, E都存在严重的方位散焦，采用时域重采样后，能够校正大部分的方位空变，C点聚焦良

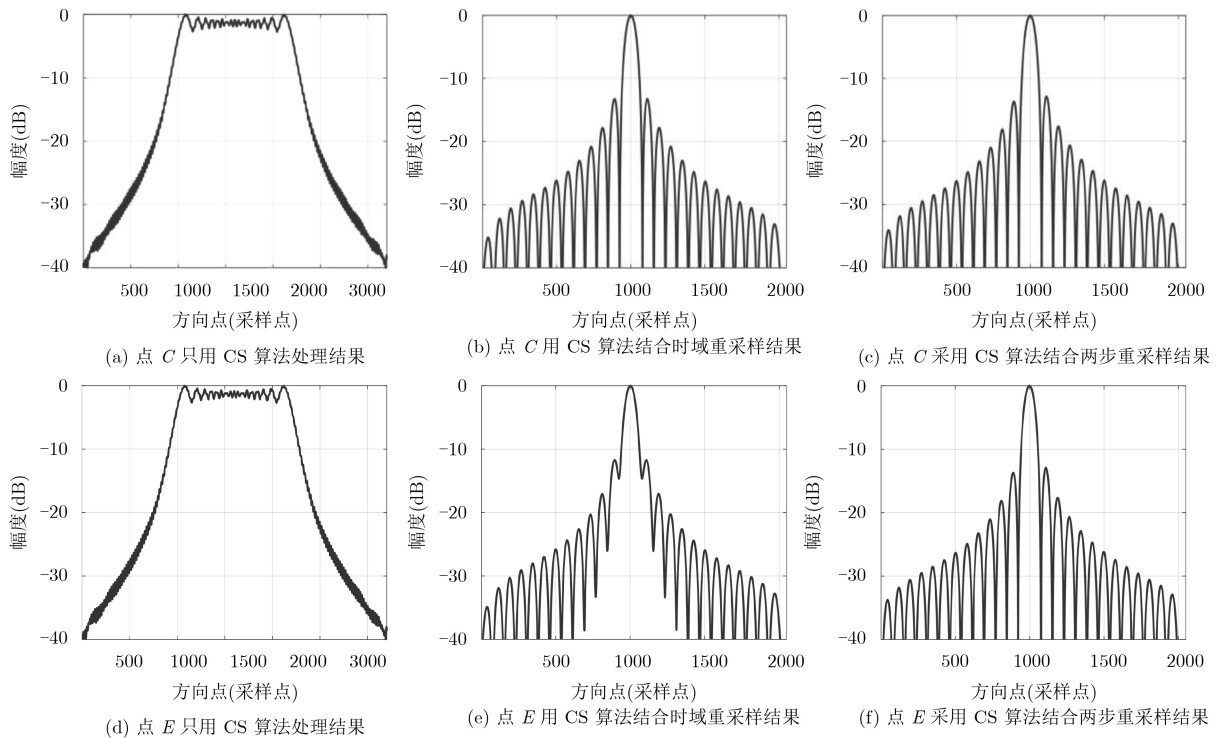


图 6 点C, E有无各步骤的处理结果对比

好，但是角落点 E 仍然存在散焦，经过两步重采样之后，场景中的每个点都能够实现良好聚焦。

采用参考文献[8]进行成像的结果和本文成像结果的对比见图7，图7(a), 7(b), 7(c)是采用文献[8]方法得到的目标点 D , B , E 的成像结果，可以看出由于文献[8]只处理了信号的距离空变，场景边缘点存在较为严重的方位散焦。图7(d), 7(e), 7(f)是

采用本文基于两步方位重采样的方法得到的成像结果。可以看出无论是场景中心点还是边缘点，都能够取得良好的聚焦效果，结果显示本文方法能够实现整个大场景的良好的聚焦。表2给出了本文方法成像结果的性能评估，可以看出场景中无论中心点还是边缘点的峰值旁瓣比和积分旁瓣比都很理想。

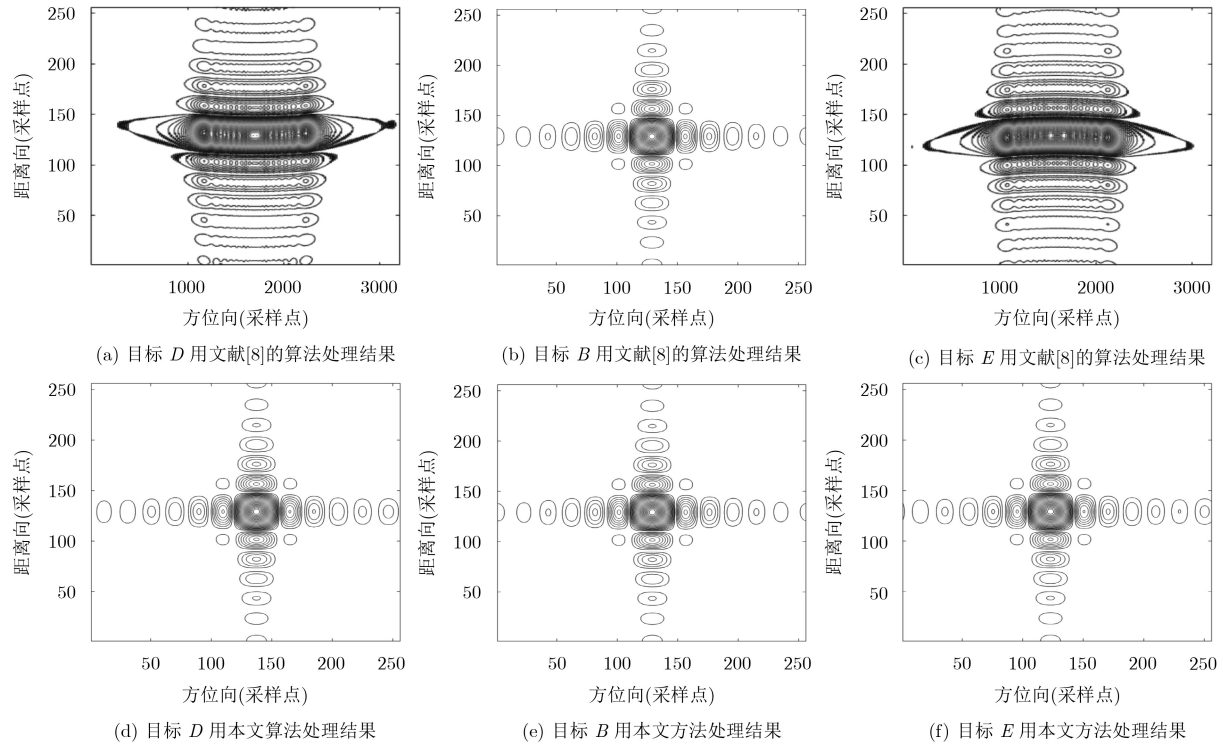


图7 纬度幅角为 180° 时的成像仿真结果

表2 成像质量评估(dB)

目标(行, 列)	PSLR		ISLR	
	距离向	方位向	距离向	方位向
$D(11,1)$	-13.27	-13.27	-10.06	-10.06
$B(6,6)$	-13.24	-13.26	-10.04	-10.06
$E(1,11)$	-13.27	-13.27	-10.06	-10.05

6 结论

本文研究了中轨大场景SAR成像中存在的2维空变的问题，针对中轨SAR数据存在的方位1阶、2阶空变，距离空变，距离-方位耦合的空变，提出了一种基于方位两步重采样的空变校正方法，结合方位信号时域与多普勒域两次采样重排，能够完成复杂方位空变的校正，本文算法能够使信号仍然满足平移不变性，使得传统频域算法能够应用于中轨SAR数据处理。另外本文的空变校正方法同样能够适用于高轨平台和弹载平台等曲线轨迹SAR的空变校正。

参考文献

- [1] ROLF W and STEFAN B. The TerraSAR-X mission and system design[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 606–615. doi: [10.1109/TGRS.2009.2031062](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031062).
- [2] ZHANG Tianyi, DING Zegang, TIAN Weiming, et al. A 2-D nonlinear chirp scaling algorithm for high squint GEO SAR imaging based on optimal azimuth polynomial compensation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5724–5735. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2765353](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2765353).
- [3] STEPHEN H. System design for geosynchronous synthetic aperture radar missions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7750–7763. doi: [10.1109/TGRS.2014.2318171](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2318171).
- [4] JALAL M, PACO L D, and GERHARD K. Potentials and limitations of MEO SAR[C]. *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Hamburg, Germany, 2016: 1–5.
- [5] TIAN Ye, HU Cheng, DONG Xichao, et al. Theoretical

- analysis and verification of time variation of background ionosphere on geosynchronous SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(4): 721–725. doi: [10.1109/LGRS.2014.2360235](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2360235).
- [6] LI Liang, HONG Jun, and MING Feng. Study about ionospheric effects on medium-earth-orbit SAR imaging[C]. 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, USA, 2014: 27–31. doi: [10.1109/RADAR.2014.6875549](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.6875549).
- [7] 温雪娇, 仇晓兰, 尤红建, 等. 高分辨率星载SAR起伏运动目标精聚焦与参数估计方法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(2): 213–220. doi: [10.12000/JR17005](https://doi.org/10.12000/JR17005).
WEN Xuejiao, QIU Xiaolan, YOU Hongjian, et al. Focusing and parameter estimation of fluctuating targets in high resolution space-borne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(2): 213–220. doi: [10.12000/JR17005](https://doi.org/10.12000/JR17005).
- [8] 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. doi: [10.1109/TGRS.2010.2053211](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2053211).
- [9] BAO Ming, XING Mengdao, LI Yachao, et al. Two-dimensional spectrum for MEO SAR processing using a modified advanced hyperbolic range equation[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(18): 1043–1045. doi: [10.1049/el.2011.1322](https://doi.org/10.1049/el.2011.1322).
- [10] TANG Shiyang, LIN Chunhui, ZHOU Yu, et al. Processing of long integration time spaceborne SAR data with curved orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 52(2): 888–904. doi: [10.1109/TGRS.2017.2756109](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2756109).
- [11] CHEN Jie, KUANG Hui, YANG Wei, et al. A novel imaging algorithm for focusing high-resolution spaceborne SAR data in squinted sliding-spotlight mode[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1577–1581. doi: [10.1109/LGRS.2016.2598066](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2598066).
- [12] RICHARD B. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706–713. doi: [10.1109/36.158864](https://doi.org/10.1109/36.158864).
- [13] HUANG Lijia, QIU Xiaolan, HU Donghui, et al. Medium-Earth-Orbit SAR focusing using range Doppler algorithm with integrated two-step azimuth perturbation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 626–630. doi: [10.1109/LGRS.2014.2353674](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2353674).
- [14] WANG Yan, LI Jingwen, XU Feng, et al. A new nonlinear chirp scaling algorithm for high-squint high-resolution SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(12): 2225–2229. doi: [10.1109/LGRS.2017.2758386](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2758386).
- [15] 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).
- [16] LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, et al. An improved range model and omega-k-based imaging algorithm for high-squint SAR with curved trajectory and constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(5): 656–660. doi: [10.1109/LGRS.2016.2533631](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2533631).
- [17] LI Dexin, WU Manqing, SUN Zaoyu, et al. Modeling and processing of two-dimensional spatial-variant geosynchronous SAR data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3999–4009. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2418814](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2418814).
- [18] DAVIDE D and ANDREA M G. High-resolution spaceborne SAR focusing by SVD-Stolt[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(4): 639–643. doi: [10.1109/LGRS.2007.903081](https://doi.org/10.1109/LGRS.2007.903081).
- [19] CHEN Jianlai, SUN Guangcai, YANG Jun, et al. A TSVD-NCS algorithm in range-Doppler domain for geosynchronous synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(11): 1631–1635. doi: [10.1109/LGRS.2016.2599224](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2599224).
- [20] HAUKE F, ELKE B, and JOSEF M. Total zero Doppler steering—A new method for minimizing the Doppler centroid[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 141–145. doi: [10.1109/LGRS.2005.844591](https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.844591).
- [21] DANIEL P S. Analytic yaw-pitch steering for side-looking SAR with numerical roll algorithm for incidence angle[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3587–3594. doi: [10.1109/TGRS.2012.2183375](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2183375).
- 刘文康: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像。
景国彬: 男, 1990年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达成像。
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。
陈 权: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为星载合成孔径雷达成像。
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。