

基于成像坐标系优化的中轨星载SAR成像方法

李航 刘文康* 孙光才* 邢孟道 李光伟 费晓燕

^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)

摘要:在中轨合成孔径雷达(MEO SAR)成像中,大弯曲轨道以及长合成孔径时间会导致信号产生严重的两维空变。常规方法分别在距离和方位两个方向处理空变,计算复杂度通常比较高。该文研究了大场景中的多普勒调频率的空间分布,并提出将数据变换到一种非正交非线性成像坐标系中进行成像,使中轨SAR信号在该坐标系中满足方位平移不变性,由于不需要对方位空变做额外处理,该成像方法的运算量显著降低。最后通过多普勒线性化处理可以进一步补偿高阶多普勒参数的影响,以实现场景边缘更精确的聚焦,并校正由非线性坐标系变换引入的方位聚焦位置偏移。最后,在条带模式下仿真2 m分辨率的数据,可以验证所提出算法的有效性。

关键词:中轨SAR; 两维空变; 成像坐标系优化; 非正交非线性成像坐标系

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)05-0856-09

DOI: 10.12000/JR20098

引用格式:李航,刘文康,孙光才,等.基于成像坐标系优化的中轨星载SAR成像方法[J].雷达学报,2020,9(5):856-864. doi: 10.12000/JR20098.

Reference format: LI Hang, LIU Wenkang, SUN Guangcai, *et al.* MEO SAR imaging based on imaging coordinate system optimization[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(5): 856-864. doi: 10.12000/JR20098.

MEO SAR Imaging Based on Imaging Coordinate System Optimization

LI Hang LIU Wenkang* SUN Guangcai* XING Mengdao
LI Guangwei FEI Xiaoyan

^①(National 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)

Abstract: In the Medium-Earth-Orbit Synthetic Aperture Radar (MEO SAR), the curved trajectory and long synthetic aperture time lead to a two-dimensional spatial variation in the signals. Traditional methods usually process the range and azimuth variations separately, and the computational complexities are high. Herein, we study the Doppler rate distribution across a large scene and propose a non-orthogonal and nonlinear coordinate system wherein the MEO SAR signals satisfy the azimuth-shift-invariant property. Thus, the efficiency of the image formation processor can be significantly improved. The higher-order Doppler parameters are addressed by the Doppler linearization. Then, more precise focusing can be achieved, and the azimuth time-shift caused by the changes in signal distribution is addressed. Finally, the processing results of simulated stripmap-mode data with a 2-m resolution are presented to validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Medium-Earth-Orbit Synthetic Aperture Radar (MEO SAR); 2-D space variance; Imaging coordinate system optimize; Non-orthogonal and nonlinear coordinate system

收稿日期: 2020-07-08; 改回日期: 2020-09-15; 网络出版: 2020-10-09

*通信作者: 刘文康 wkliu@stu.xidian.edu.cn; 孙光才 rsandsgc@126.com

*Corresponding Author: LIU Wenkang, wkliu@stu.xidian.edu.cn; SUN Guangcai, rsandsgc@126.com

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61931025), 高等学校学科创新引智计划资助(B18039)

Foundation Items: The State Key Program of National Natural Science China (61931025), The 111 Project (B18039)

责任编辑: 李宁 Corresponding Editor: LI Ning

1 引言

与目前的低地球轨道星载合成孔径雷达(Low-Earth-Orbit Synthetic Aperture Radar, LEO SAR)相比,中地球轨道星载合成孔径雷达(Medium-Earth-Orbit Synthetic Aperture Radar, MEO SAR)具有更大的幅宽;它的广域覆盖范围长达数百公里,重访时间短,只有几分钟,在许多领域中显示出巨大应用潜力。MEO SAR长时间观测目标区域,提供连续的SAR图像,有助于实现动态监视。利用多级带宽设计和波束扫描,MEO SAR可以工作在不同的模式,并实现灵活的分辨率和场景覆盖。

由于MEO SAR所在的中轨卫星与地球之间的相对运动较慢,在满足分辨率要求的情况下,合成孔径时间变得 longer。而随着合成孔径时间的增加会出现一些问题,例如大气相位误差、斑点噪声等^[1-3]。中地球轨道的轨迹曲率也可能影响波束驻留时间和等效卫星速度,从而导致分辨率和信号特性随轨道时间改变,因此波束指向控制对于中高轨曲线轨迹SAR具有重要的意义——能够调整和保持系统标称分辨率,波束扫描速率需要根据轨道位置、视角等进行设计。另外,对于大场景成像,MEO SAR信号方位平移不变性失效,此时回波信号是两维空变的^[4,5]。

对于MEO SAR信号的两维空变问题,常规的成像算法将其分两维处理。一些成熟的距离空变校正方法,例如chirp scaling^[6-8]和omega-K^[9,10]算法,经过改进后,同样能用来有效处理弯曲轨迹的SAR数据。经过方位非线性变标^[11-13],重采样^[14,15]等一些方位向预处理方法处理之后,信号能够满足方位平移不变性,但是这些方位空变校正处理会引入多次傅里叶变换或者插值操作,明显增加了成像算法的运算量。一些时域算法也适用于弯曲轨迹的星载SAR成像,例如BPAs^[16,17]和FFBPAs^[18-20],这些基于时域插值的算法能够直接处理复杂的两维空变,是未来高分辨率、弯曲轨道星载SAR处理的一个潜在选择。通常,尽管频域算法需要一些额外的操作来获得方位平移不变性,但它们的计算复杂度通常小于时域算法。

本文为条带模式下的MEO SAR数据的两维空变处理提出了一种有效的处理方法。基于MEO SAR大场景中的多普勒调频率分布,通过非正交非线性坐标系变换将两维空变集中在一维。在推导出的非正交非线性坐标系中,新的方位向对应于多普勒调频率等高线,因此,在该方向上的多普勒调频率空变可以最小化,在获得方位平移不变性的同时

避免复杂的方位空变校正处理。然后,直接应用经典星载SAR成像算法来完成信号聚焦。为了实现更精确的方位压缩,采用多普勒重采样以抵消高阶多普勒参数的空变影响,并且消除由非线性坐标系变换引起的方位聚焦偏移。

2 信号建模

如图1描述了MEO SAR成像几何。 S 表示卫星位置, T 表示照射区域的目标, β 表示仰角, θ_a 表示斜视角, θ 表示入射角,在数据录取期间,轨道弯曲明显,MEO卫星与场景中目标的相对斜距历程很复杂。在本文中,相对斜距历程使用4阶泰勒展开模型表示,将斜距在多普勒中心时刻扩展为

$$R(t_a) = \|\mathbf{ST}\| \approx R_0 + \sum_{i=1}^4 q_i(t_a - t_c)^i \quad (1)$$

其中, \mathbf{ST} 是从卫星 S 到目标 T 的向量, R_0 表示波束中心时刻雷达到目标的中心斜距, t_a 表示方位慢时间, t_c 表示目标波束中心时刻, $q_i, i = 1, 2, 3, 4$ 表示第 i 项的多普勒系数。多普勒中心与线性分量直接相关,多普勒中心表示为: $f_{dc} = -2q_1/\lambda$, λ 是电磁波波长。多普勒调频率可以用二次项系数表示为 $f_{dr} = -4q_2/\lambda$,为了实现方位向聚焦,需要准确计算二次项。

用将距离模型的2阶系数展开为方位时间与距离的函数

$$q_2 = q_{20} + q_{21,r}r + q_{22,rr}r^2 + q_{21,t_c}t_c + q_{22,t_c t_c}t_c^2 + q_{22,rt_c}rt_c \quad (2)$$

类似地,3阶系数可以展开为

$$q_3 = q_{30} + q_{31,r}r + q_{31,t_c}t_c \quad (3)$$

其中, $r = R_0 - R_{ref}$ 是与场景中心相关的距离偏移, R_{ref} 是场景中心斜距, $q_{ij,xy}$ 是 q_i 关于 x 和 y 的第 j 阶泰勒展开式系数,高阶量一般忽略不计。

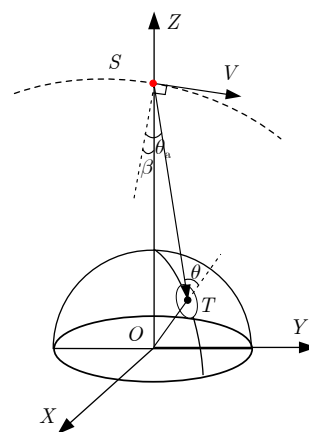


图1 MEO SAR成像几何示意图

Fig. 1 MEO SAR imaging geometry

3 最优成像坐标系聚焦算法

3.1 最优成像坐标系

图2给出了场景中不同目标多普勒调频率在不同成像坐标系中的分布情况,黑色曲线组表示等多普勒调频率线。图2(a)表示原始回波录取坐标系,横轴表示方位时间,纵轴表示距离,在该坐标系中由于卫星速度随时间变化以及轨道的弯曲,多普勒调频率存在沿方位向的非线性变化^[21]。本文通过调整场景中的多普勒调频率分布来解决方位空变的问题。图2(b)为非正交坐标系中将数据进行斜置后的多普勒调频率分布,对不同方位时间的脉冲信号进行了线性距离平移操作,此时多普勒调频率方位的方位线性变化量得到了消除,只剩余了二次变化。在图2(c)所示的非线性非正交坐标系,经过对不同时刻的信号进行了非线性的平移,可以使等多普勒调频率线沿水平向分布,信号在方位向上满足平移不变性。从图2(a)到图2(b)和图2(c)的成像坐标系变化能够利用类似距离徙动校正的距离偏移函数来实现,而不同方位时刻的距离徙动量根据多普勒调频率的分布得到。

为了最小化多普勒调频率方位向上的线性与非线性变化,距离移动量包含线性项与二次项

$$\Delta R_{\text{NONL}}(t_a) = a_1 t_a + a_2 t_a^2 \quad (4)$$

则最优成像坐标系变换函数可以表示为

$$H_{\text{NONL}} = \exp\left(-j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \Delta R_{\text{NONL}}(t_a)\right) \quad (5)$$

其中,定义 f_c 为载频, c 为电磁波的传播速度, f_r 为距离向频率。参数 a_1 与 a_2 需要根据多普勒调频率的

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= q_1 + a_1 \\ k_2 &= q_{20} + a_2 + q_{21,r} r_{\text{new}} + q_{22,rr} r_{\text{new}}^2 \\ &\quad + \left(\frac{1}{a} q_{21,tc} - q_{21,r} \left(a_1 - \frac{q_1 a_2}{q_{20}}\right) - \frac{3a_2 q_{30}}{q_{20}} + \left(q_{22,tc} r - 2 \left(a_1 - \frac{q_1 a_2}{q_{20}}\right) q_{22,rr} - \frac{3q_{31,r}}{q_{20}} r_{\text{new}}\right) t'_c \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{\alpha^2} q_{22,tc} t_c - q_{21,r} a_2 - \frac{3a_2 q_{31,tc}}{q_{20}} + \frac{3q_{31,r} a_2}{q_{20}} \left(a_1 - \frac{a_2 q_1}{q_{20}}\right) - \frac{1}{\alpha} q_{22,tc} r \left(a_1 - \frac{q_1 a_2}{q_{20}}\right)\right) (t'_c)^2 \right\} \quad (12) \\ k_3 &= q_{30} + q_{31,r} r_{\text{new}} + \left(\frac{1}{\alpha} q_{31,tc} - q_{31,r} \left(a_1 - \frac{a_2 q_1}{q_{20}}\right)\right) t'_c \\ k_4 &= q_4 \end{aligned} \right.$$

新的方位空变的距离系数也在式(13)中给出

$$\left. \begin{aligned} k_{21,tc} &= \frac{1}{\alpha} q_{21,tc} - q_{21,r} \left(a_1 - \frac{a_2 q_1}{q_{20}}\right) - \frac{3a_2 q_{30}}{q_{20}} \\ k_{22,tc} t_c &= q_{22,tc} t_c + \left(\frac{2q_{22,tc} t_c}{k_{20}} - q_{21,r} - \frac{3q_{31,tc}}{q_{20}} + \frac{q_1 q_{22,tc} r}{q_{20}}\right) a_2 + \frac{(3q_{31,r} - q_{22,tc} r) a_1 a_2}{q_{20}} - q_{22,tc} r a_1 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

为了使距离单元偏移(Range Cell Migration, RCM)的方位空变最小,在参考距离处进行最优成像坐标系变换后,假设在方位向2阶系数 k_2 为常数,令 $k_{21,tc}$ 与 $k_{22,tc} t_c$ 为零,可以得到最优坐标系转换函数中的参数 a_1 与 a_2

空变特性求解。

在最优成像坐标系变换之后,斜距历程为

$$R'(t_a) \approx R_0 + \sum_{i=1}^4 q_i (t_a - t_c)^i + \Delta R_{\text{NONL}}(t_a) \quad (6)$$

在最优成像坐标系变换之后,多普勒如

$$f_{\text{dc}}(t_a) = -\frac{2}{\lambda} \left(q_1 + a_1 + 2a_2 t_c + 2(q_2 + a_2)(t_a - t_c) \right) + O(t_a) \quad (7)$$

其中 $O(t_a)$ 为 t_a 的高阶项。令 $f_{\text{dc}}(t'_c) = f_{\text{dc}}(0)$,得到新的方位聚焦时间, t_a 的高阶项影响较小可以忽略,那么有

$$t'_c = \frac{q_2 t_c}{q_2 + a_2} \approx \frac{q_{20} t_c}{q_{20} + a_2} = \alpha t_c \quad (8)$$

其中,用 $\alpha = q_{20}/(q_{20} + a_2)$ 表示方位时域尺度变化因子。

方位时移会引起目标聚焦位置的变化,可近似表示为

$$\Delta R_{\text{shift}} = -(1 - \alpha) [(q_1 + a_1) t_c - a_2 t_c^2] \quad (9)$$

那么,新的斜距历程变为

$$R'(t_a) = R'_0 + \sum_{i=1}^4 k_i (t_a - t'_c)^i \quad (10)$$

其中, R'_0 为新的聚焦距离,具体表达式为

$$R'_0 \approx R_0 + \left(a_1 - \frac{a_2 q_1}{q_{20}}\right) t'_c + \left(a_2 - \frac{a_2^2}{q_{20}}\right) (t'_c)^2 \quad (11)$$

$k_i, i = 1, 2, \dots, 4$ 是在新的方位聚焦时间 t'_c 下新的距离系数。具体表达式为

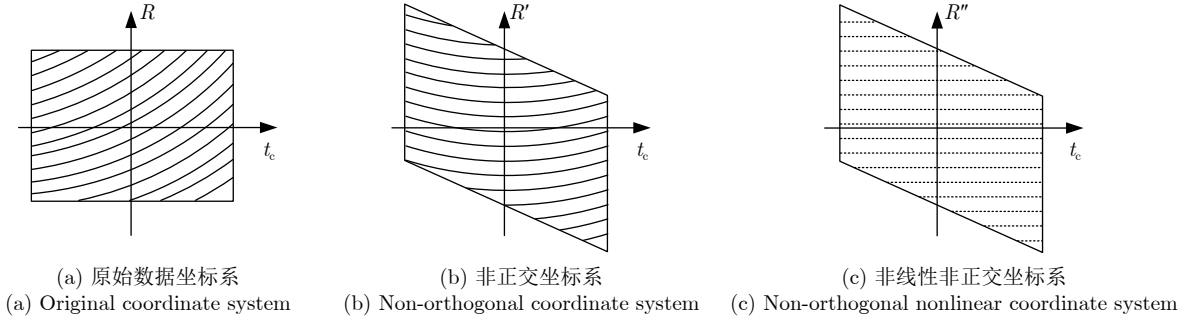


图 2 多普勒调频率平面坐标系

Fig. 2 Doppler rate plane

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= \frac{q_{20} (q_{22,t_c} q_{21,r} - q_{22,t_c r} q_{21,t_c})}{[(2q_{22,t_c} t_c - q_{20} q_{21,r} - 3q_{31,t_c} + q_1 q_{22,t_c r}) q_{21,r} + (3q_{31,r} - q_{22,t_c r}) q_{21,t_c}] } \\ a_1 &= \frac{q_{21,t_c}}{q_{21,r}} + \frac{q_{21,t_c} + q_{21,r} q_1 - 3q_{30}}{q_{21,r} q_{20}} a_2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

另外，由 k_{22,rt_c} 和 k_{31,t_c} 造成的空变相位误差相对较小，可以利用3.2节提出的多普勒重采样将其处理。

3.2 聚焦算法

在上述最优成像坐标系转换的基础上，本文提出了一种新的MEO SAR聚焦算法，如图3所示。

该算法首先利用最优成像坐标系转换函数处理多普勒调频率空变的问题；接着，利用距离非线性频调变标算法(Nonlinear Chirp Scaling Algorithm, NCSA)^[22]或距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)^[23]补偿距离徙动；然后，用多普勒重采样补偿多普勒参数且校正最优成像坐标系转换造成的聚焦时移；最后利用几何形变校正来处理算法带来的聚焦位置偏移，从而获得最终的聚焦图像。

在最优成像坐标系变换步骤中，没有考虑高阶距离系数的变化。三次距离系数的方位空变可能会导致非中心目标的旁瓣不对称，二次距离系数中的交叉项可能会导致场景角落的目标聚焦深度下降。为了实现更精确的方位聚焦，在最优成像坐标系变换之后，数据变换到方位时域之前，需要校正高阶

多普勒参数和距离-方位耦合的空变分量。文献[21]提出使用与距离相关的多普勒重采样实现精确的方位聚焦。本文提出使用基于文献[21]的改进多普勒重采样方法实现多普勒线性化与方位时移校正。此改进的多普勒重采样方法仅多普勒重采样函数与文献[21]不同，其余多普勒重采样步骤请参考文献[21]。

在多普勒域，方位匹配滤波器可以被表达为

$$H_{ac}(r, f_a) = \exp(-j2\pi\varphi) \quad (15)$$

其中， φ 在式(16)中给出

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \left(\frac{\lambda}{8k_{2,t_c=0}} \left(f_a + \frac{2a_1}{\lambda} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda^2 k_{30}}{32k_{2,t_c=0}^3} \left(f_a + \frac{2a_1}{\lambda} \right)^3 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\lambda^3 (9k_{30}^2 - 4k_{20}k_{40})}{512k_{20}^5} \left(f_a + \frac{2a_1}{\lambda} \right)^4 \right) \\ k_{2,t_c=0} &= k_{20} + k_{21,r}r + k_{22,rr}r^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据式(14)中的剩余空变和式(8)中目标的方位偏移因子，构造一个改进的多普勒重采样函数

$$f_{an} = \alpha (f_a + p_{21}(r_{new}) f_a^2 + p_{31} f_a^3) \quad (17)$$

其中， $p_{21}(r_{new})$ 与 p_{31} 是多普勒参数关于时间的导数，其表达式在式(18)中给出。

$$p_{21}(r_{new}) = \frac{\lambda k_{22,rt'_c} r_{new}}{8k_{2,t_c=0}^2(r_{new}, 0)}, \quad p_{31} = -\frac{\lambda^2 k_{31,t'_c}}{32k_{20}^3} \quad (18)$$

根据式(18)在多普勒域中对数据进行重采样，能够消除残余的多普勒调制项，并校正方位聚焦偏移。

成像坐标系变换引入的几何畸变，可以在方位压缩后通过在距离频域乘以线性校正函数式(19)来校正

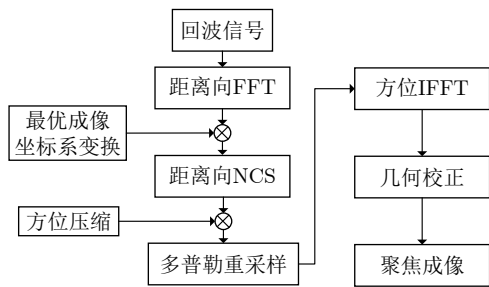


图 3 聚焦算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the proposed imaging algorithm

$$\begin{aligned}
 H_{\text{GDC}} &= \exp\left(\frac{j4\pi f_r (R_{0,\text{new}} - R_0)}{c}\right) \\
 &= \exp\left(\frac{j4\pi f_r}{c} \left(\left(\alpha - \frac{\beta k_1}{k_{20}}\right) t_c \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \left(\beta - \frac{\beta^2}{k_{20}}\right) t_c^2 \right)\right) \quad (19)
 \end{aligned}$$

完成几何校正后, 即可获得良好的聚焦图像。

4 仿真分析

在本节中, 将使用表1中的MEO SAR参数进行仿真实验, 以验证所提出的方法。轨道高度为13000 km, 在100 km的场景中布置了11 × 11个点目标(如图4所示), 能够实现2 m方位分辨率。为了评估本文所提方法对场景中不同点目标的聚焦效果, 挑选3个典型的点目标A, B, C进行了分析, 并且将本文方法与文献[21]中联合时间多普勒重采样算法(Joint Time-Doppler Resampling, JTDR)、

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

类型	名称	值
轨道参数	轨道高度(km)	13000
	偏心率	0
	倾角(°)	90
	近地点幅角(°)	0
雷达参数	载频(GHz)	5.2
	带宽(MHz)	105
	PRF(Hz)	830
	斜视角(°)	0
	入射角(°)	40
	合成孔径时间(s)	40.1
	地面距离/方位分辨率(m)	2/2
场景参数	方位场景幅宽(km)	100
	距离场景幅宽(km)	100

常规的文献[22]中非线性频调变标算法(NCSA)进行对比分析。

图5给出了在坐标系变换前和变换后, 目标斜距与多普勒调频率的关系。通过对坐标系变换前后的斜距系数进行拟合, 可以对比多普勒调频率的变化情况。在坐标系变换之前, 相同斜距但具有不同波束中心时间的目标的多普勒调频率分布在较宽的范围内。在坐标系变换之后, 所有目标在多普勒调频率-距离平面内严格分布在一条线上, 说明此时方位向上多普勒调频率是恒定的。

图6给出了文献[22]中NCSA算法得到的仿真结果, 只有中心目标聚焦良好。

图7给出了文献[21]中JTDR算法得到的仿真结果, 选定的3个目标都聚焦良好, 方位峰值旁瓣比(Peak SideLobe Ratio, PSLR)低于-13.26 dB, 方位积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Ratio, ISLR)低于-10.14 dB(具体数值见表2), 因此, 文献[21]中的算法对于MEO SAR聚焦是有效的。

图8给出了本文所提算法得到的仿真结果, 选

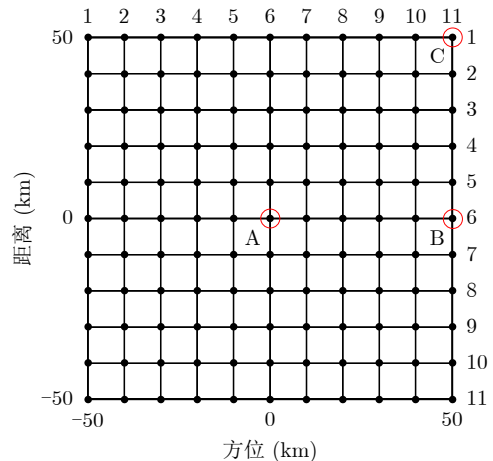
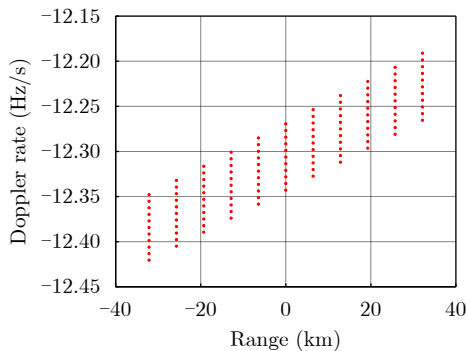


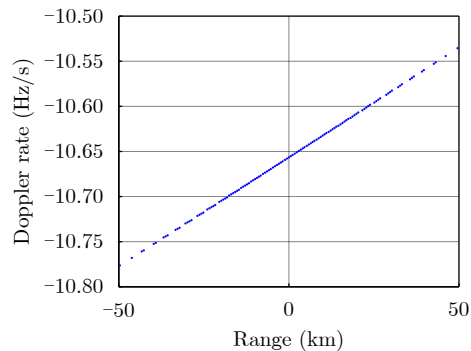
图 4 仿真场景目标分布

Fig. 4 Arrangement of simulated targets



(a) 坐标系变换之前

(a) Before coordinate system transformation



(b) 坐标系变换之后

(b) After coordinate system transformation

图 5 目标斜距与多普勒调频率的关系

Fig. 5 Relationships between Doppler rates and ranges of the simulated targets

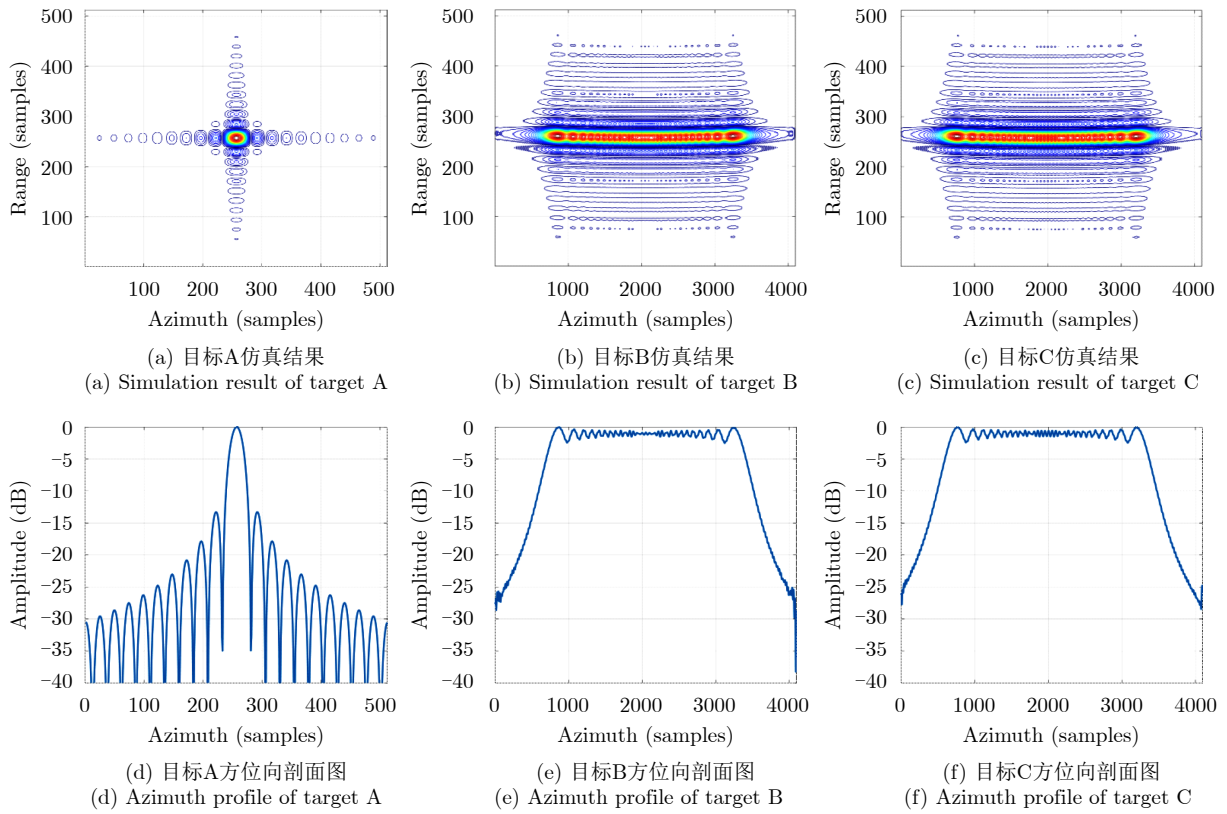


图 6 文献[22]中NCS算法的点目标仿真结果

Fig. 6 Simulation results using the NCS algorithm in Ref. [22]

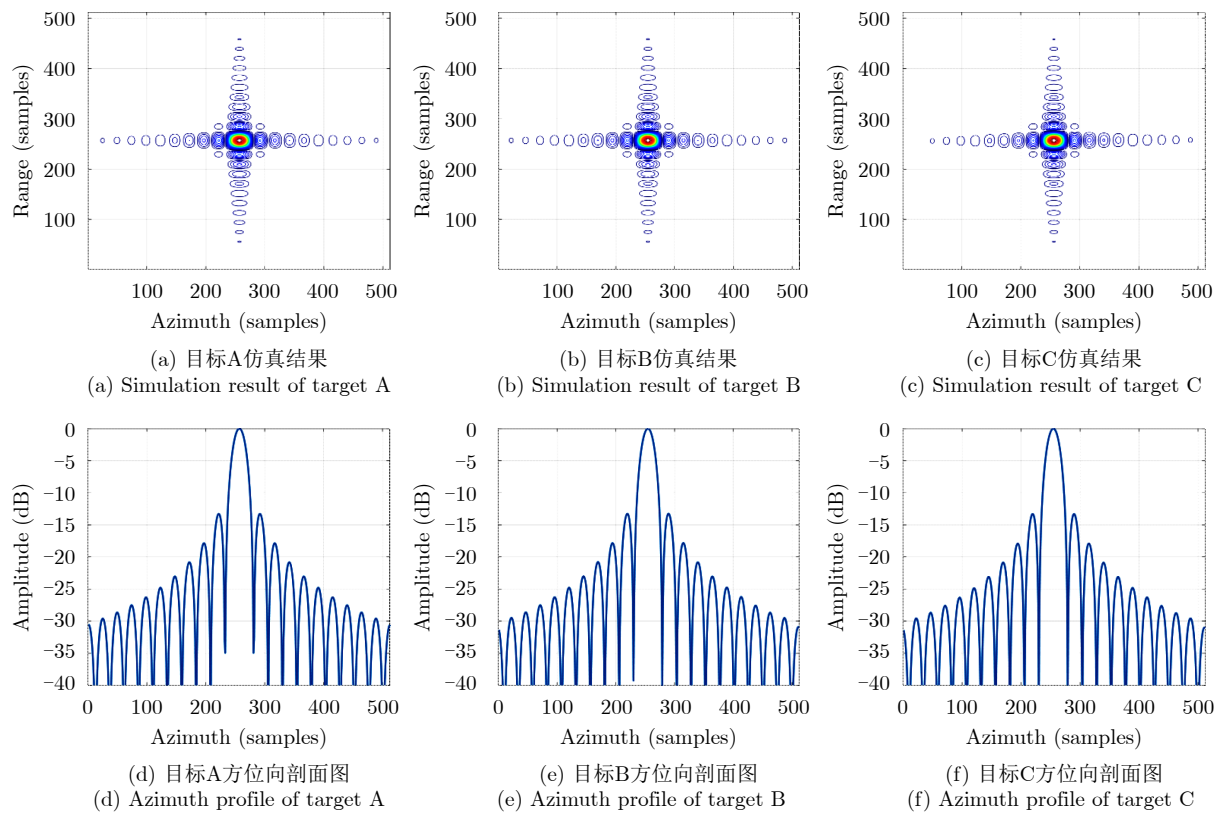


图 7 文献[21]中的JTDR算法的点目标仿真结果

Fig. 7 Simulation results using the JTDR algorithm in Ref. [21]

表 2 文献[21]中JTDR算法与本文所提算法仿真PSLR及ISLR数值

Tab. 2 Compare of simulated values of PSLR and ISLR using the JTDR algorithm in Ref. [21] and the proposed method

目标坐标	文献[21]中JTDR算法				本文所提算法			
	PSLR		ISLR		PSLR		ISLR	
	方位	距离	方位	距离	方位	距离	方位	距离
A(6,6)	-13.26	-13.28	-10.17	-10.06	-13.25	-13.28	-10.08	-10.02
B(6,11)	-13.26	-13.29	-10.14	-10.07	-13.26	-13.28	-10.06	-10.03
C(1,11)	-13.32	-13.28	-10.21	-10.06	-13.27	-13.28	-10.09	-10.02

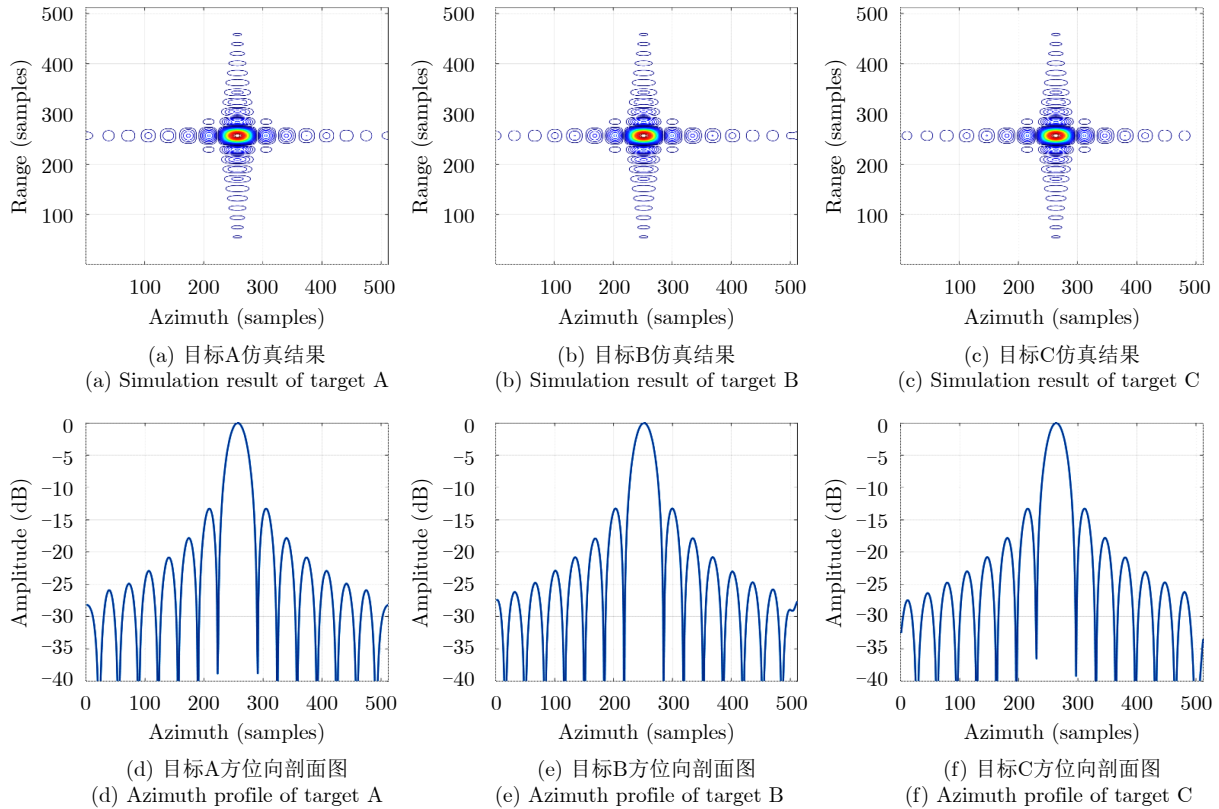


图 8 本文所提算法的点目标仿真结果

Fig. 8 Simulation results using the proposed method

定的3个目标都聚焦良好,方位PSLR低于-13.25 dB,方位ISLR低于-10.06 dB(具体数值见表2)。

因此,本文所提算法对于MEO SAR聚焦是有效的,并且聚焦效果与文献[21]中的JTDR算法基本一致。

下面针对本文算法的计算复杂度进行仿真分析。假设信号距离向有 M 个采样点,方位向有 N 个采样点。用距离向的非线性频调变标(NCSA)实现距离单元徙动校正。所提方法包括4个距离向的FFT/IFFT,两个方位向的FFT/IFFT,4个相位乘法,1个方位向插值。sinc插值核的长度是 K 。总的计算复杂度是

$$\begin{aligned}
 & 4N \frac{M}{2} \log_2 M + 2M \frac{N}{2} \log_2 N + 4MN + KMN \\
 & = (2\log_2 M + \log_2 N + K + 4) MN \quad (20)
 \end{aligned}$$

图9给出了3种算法运算量随场景大小的变化关系,可以看出本文算法的运算量介于改进的NCS算法和JTDR算法之间。这主要是多普勒重采样操作引入了较大的运算量,事实上如果适当放宽对场景角落点的聚焦深度要求,不进行重采样操作,那么本文算法的运算量将接近改进的NCS算法。

可见,本文所提算法实现良好聚焦效果的同时,运算量比参考算法低。

5 结论

本文提出一种基于最优成像坐标系变换的MEO SAR数据处理算法。相对于分别处理二维空变的常规处理算法,本文提出一种非正交非线性坐标系转换,在该坐标系中信号满足方位平移不变性,因此可以采用类似LEO SAR的处理算法进行MEO

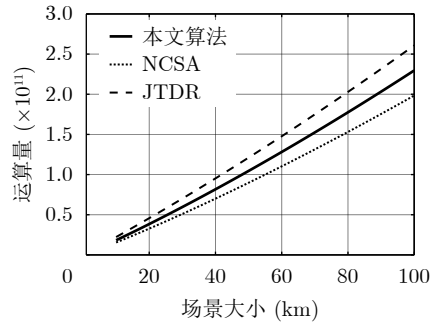


图9 不同算法运算量对比

Fig. 9 Computation comparison using different methods

SAR的数据处理。与常规方法相比,由于简化方位空变的校正处理,因此能够显著降低算法的运算量。另外,针对波束扫描模式(如滑动聚束/TOPS模式等),需要采用子孔径处理、或者两步法方位解模糊处理,本文提出的新的空变处理方法,经过改进后结合预处理,也能够应用于其他模式的数据处理中。

参 考 文 献

- [1] 李春升, 于泽, 陈杰. 高分辨率星载SAR成像与图像质量提升方法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 717–731. doi: [10.12000/JR19085](https://doi.org/10.12000/JR19085).
LI Chunsheng, YU Ze, and CHEN Jie. Overview of techniques for improving high-resolution spaceborne SAR imaging and image quality[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 717–731. doi: [10.12000/JR19085](https://doi.org/10.12000/JR19085).
- [2] SUN Guangcai, XING Mengdao, WANG Yong, *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).
- [3] 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).
- [4] HU Bin, JIANG Yicheng, ZHANG Shunsheng, *et al.* Generalized omega-k algorithm for geosynchronous SAR image formation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(11): 2286–2290. doi: [10.1109/LGRS.2015.2470516](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2470516).
- [5] 李春升, 杨威, 王鹏波. 星载SAR成像处理算法综述[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 111–122. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20071](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20071).
LI Chunsheng, YANG Wei, and WANG Pengbo. A review of spaceborne SAR algorithm for image formation[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 111–122. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20071](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20071).
- [6] WONG F W and YEO T S. New applications of nonlinear chirp scaling in SAR data processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(5): 946–953. doi: [10.1109/36.921412](https://doi.org/10.1109/36.921412).
- [7] RANEY R K, RUNGE H, BAMLER R, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786–799. doi: [10.1109/36.298008](https://doi.org/10.1109/36.298008).
- [8] SUN Guangcai, XING Mengdao, LIU Yan, *et al.* Extended NCS based on method of series reversion for imaging of highly squinted SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 446–450. doi: [10.1109/LGRS.2010.2084562](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2084562).
- [9] SHIN H S and LIM J T. Omega-K algorithm for spaceborne spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 343–347. doi: [10.1109/LGRS.2011.2168380](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2168380).
- [10] SHIN H S and LIM L T. Omega-k algorithm for airborne spatial invariant bistatic spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 238–250. doi: [10.1109/TGRS.2008.2002954](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002954).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 汪丙南, 向茂生. 地球同步轨道圆迹SAR三维分辨特性分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 314–322. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20044](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20044).
WANG Bingnan and XIANG Maosheng. Three-dimensional resolution analysis for geosynchronous circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 314–322. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20044](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20044).

- [16] CHEN Jianlai, SUN Guangcai, WANG Yong, *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.
- [17] 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, 56(2): 888–904. doi: [10.1109/TGRS.2017.2756109](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2756109).
- [18] LI Zhuo, LI Chunsheng, YU Ze, *et al.* Back projection algorithm for high resolution GEO-SAR image formation[C]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 336–339.
- [19] RAN Lei, LIU Zheng, LI Tao, *et al.* An adaptive fast factorized back-projection algorithm with integrated target detection technique for high-resolution and high-squint spotlight SAR imagery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1): 171–183. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2771503](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2771503).
- [20] ZHANG Lei, LI Haolin, QIAO Zhijun, *et al.* A fast BP algorithm with wavenumber spectrum fusion for high-resolution spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1460–1464.
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] LIU Wenkang, SUN Guangcai, XIA Xianggen, *et al.* Highly squinted MEO SAR focusing based on extended Omega-K algorithm and modified joint time and Doppler resampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(11): 9188–9200. doi: [10.1109/TGRS.2019.2925385](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2925385).

作者简介



李航(1996–), 女, 山西吕梁人, 西安电子科技大学电子工程学院博士生。主要研究方向为星载合成孔径雷达成像、海洋微波遥感观测等。

E-mail: hli_xidian@163.com



刘文康(1994–), 男, 河南周口人, 西安电子科技大学电子工程学院博士生。主要研究方向为中轨星载合成孔径雷达成像、高轨星载合成孔径雷达成像、动目标成像处理等。

E-mail: wkliu@stu.xidian.edu.cn

孙光才(1984–), 男, 湖北孝感人, 博士, 华山特聘教授。2012年在西安电子科技大学电子工程学院获得博士学位, 现担任西安电子科技大学电子工程学院副教授。主要研究方向为新体制雷达成像、运动目标检测成像。

E-mail: rsandsgc@126.com

邢孟道(1975–), 男, 浙江嵊州人, 博士, 教授, 2002年在西安电子科技大学电子工程学院获得博士学位, 现担任西安电子科技大学电子工程学院教授。研究方向为雷达探测、雷达成像、运动目标检测成像。

E-mail: xmd@xidian.edu.cn