

基于改进等效单基的MEO星机BiSAR成像算法

任 航¹, 张 云^{1*}, 吕 争², 李高鹏¹, 杨雪莹¹, 任 媛³, 化青龙¹

(1. 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094;
3. 华北水利水电大学电子工程学院, 河南郑州 450046)

摘 要: 中轨(Medium Earth Orbit, MEO)合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有中等分辨率、宽幅观测、短重访周期等优势, 结合机载SAR接收机构成双基系统, 可突破传统低轨(Low Earth Orbit, LEO)星机双基地SAR的覆盖限制, 具有广阔的应用前景。然而, MEO SAR因轨道曲率显著、回波传播时延较长, 其成像几何构型更为复杂, 导致传统LEO星机双基地SAR成像算法失效; 相比之下, 尽管地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)SAR也面临“走停”假设和轨迹曲率引起的偏差, 但由于其平台高度高、运行速度缓慢、加速度极小, 引起的非线性误差通常可通过二阶多项式近似模型予以补偿。MEO SAR平台运动速度与加速度均大得多, 引发的高阶非线性相位误差更为严重, 使得GEO斜距模型在MEO场景下难以满足精度要求。针对这些挑战, 本文提出了一种基于改进等效单基的频域成像算法。首先结合MEO的轨道特性, 创新性地引入轨道弯曲补偿因子, 提出改进的非“走停”等效单基斜距模型, 突破传统等效单基方法对高机动非线性轨迹的建模局限。在此基础上, 本文利用级数反演的方法推导信号精确的频域形式, 并考虑了场景的方位空变效应, 精确补偿了MEO曲线轨迹及长传播时延引起的相位误差, 且具有低计算复杂度。实验表明: 相比传统方法, 所提算法的点目标峰值旁瓣比、积分旁瓣比和分辨率均接近理论值, 在扩展面目标仿真中, 图像熵降低约30%, 对比度提升约20%, 可有效抑制MEO SAR复杂轨迹导致的散焦现象。

关键词: 中轨SAR; 改进等效单基算法; 双基地SAR; 非“走停”模型; 曲线轨迹

基金项目: 国家自然科学基金(No.62371170, No.62401183); 中国博士后科学基金(No.2024M754185, No.GZB20240967)

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)07-2513-19

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250194

An Improved Monostatic Equivalent Imaging Algorithm for MEO-Airborne Bistatic SAR

REN Hang¹, ZHANG Yun^{1*}, LÜ Zheng², LI Gao-peng¹, YANG Xue-ying¹, REN Yuan³, HUA Qing-long¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

2. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

3. School of Electronic Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: Medium Earth orbit synthetic aperture radar (MEO SAR) can achieve medium spatial resolution with a wide observable swath and short revisit time. The combination of MEO SAR illuminator and airborne SAR receiver could overcome the coverage limitations of traditional low Earth orbit (LEO) airborne BiSAR systems, demonstrating broad application prospects. However, due to the high orbital altitude, long propagation delay, and significant trajectory curvature of the MEO platform, the imaging geometry becomes more complex, and the conventional LEO-airborne bistatic SAR imaging algorithms become invalid. Although Geosynchronous Orbit (GEO) SAR systems also suffer from the phase errors induced by the “stop-go” assumption and trajectory curvature, their high altitude, low speed, and minimal acceleration allow the slant range variation to be approximated by second-order models. In contrast, MEO SAR has much higher velocity and acceleration, which aggravates high-order nonlinear phase errors, making conventional GEO slant range models inadequate for MEO scenarios. To address these challenges, this paper proposes an improved monostatic equivalent imaging algorithm for MEO-airborne bistatic SAR. This method establishes an MEO-airborne bistatic geometric model based on the orbit char-

acteristics of MEO SAR, innovatively introduces an orbital curvature compensation factor, and proposes an improved “non-stop-go” equivalent slant range model. It overcomes the modelling limitations of traditional equivalent monostatic methods for high-maneuverability and curved trajectories. Furthermore, this paper employs series inversion to derive two-dimensional spectra while considering azimuth space-variant effects in the scene, ultimately developing an imaging algorithm suitable for MEO-airborne bistatic SAR. Experimental results demonstrate that compared with traditional methods, the proposed algorithm achieves peak sidelobe ratio, integrated sidelobe ratio, and resolution close to theoretical values for point targets. In extended target imaging of the proposed algorithm, the image entropy is reduced by 30% and contrast improved by 20% than the traditional equivalent monostatic method, effectively suppressing defocusing caused by MEO SAR’s complex orbital characteristics.

Key words: medium-Earth-Orbit synthetic aperture radar (MEO SAR); improved monostatic equivalent algorithm; bistatic SAR; “non-stop-go” model; curved trajectory

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62371170, No.62401183); China Postdoctoral Science Foundation (No.2024M754185, No.GZB20240967)

1 引言

星机双基地合成孔径雷达(Bistatic Synthetic Aperture Radar, BiSAR)是一种新体制雷达,借助卫星-机载平台的收发分置架构,兼具隐蔽性强、抗干扰性优等特点,已成为对地观测领域的前沿方向^[1-5].其核心原理是以星载平台作为发射机,机载SAR被动接收目标反射回波,进而实现高分辨率成像.星载SAR可按轨道高度分为低轨(Low Earth Orbit, LEO)SAR、中轨(Medium Earth Orbit, MEO)SAR和高轨(GEOsynchronous orbit, GEO)SAR三种类型.LEO SAR具备高分辨率成像能力,但覆盖窄、重访周期长;GEO SAR具备高时间分辨率成像能力,但是空间分辨率相对较低;而MEO介于二者轨道之间,可以兼具GEO和LEO高时间分辨率以和中等的时间分辨率,适用于广域持续监测^[6-8].

由于MEO SAR具有独特的轨道特性,MEO星机BiSAR系统具有诸多优势.首先,MEO SAR作为照射源,其波束覆盖范围广且重访周期短,为接收机提供了大范围的观测区域以及更高的飞行轨迹自由度^[9].其次,机载接收机的回波信号源自目标对MEO SAR照射源的反射,无需额外配备发射设备,从而显著降低了接收机的体积和质量^[10,11].此外,该系统采用被动接收模式,使得接收机具备较强的隐蔽性和抗干扰能力^[12-15].这些特性使MEO星机BiSAR在军事侦察、高精度地理测绘等领域具有显著应用潜力.

然而,MEO SAR轨道存在弯曲特性,且信号在传播过程中时延增加及收发平台是分布式结构,这些因素共同带来了MEO星机BiSAR系统在斜距建模与成像处理上的多重挑战.相较于单基SAR系统,BiSAR系统的总斜距模型由两个平方根项构成,呈现“双平方根”结构,导致信号建模与二维频谱解析的复杂度显著提升^[16,17].为提高双基地系统的建模精度,丁金闪等人^[18]提出了基于加权Loffeld的BiSAR斜距模型.Wang等人^[19]提出了BiSAR的扩展Loffeld斜距方程.Li等人^[20]

引入了勒让德多项式的概念来近似斜距.Xiong等人^[21]提出将等效斜距、速度、斜视角及双站补偿分量结合以构建斜距逼近模型.尽管上述方法在一定程度上提升了建模精度,但这些研究的斜距模型均假设发射与接收平台做匀速直线运动,难以适用于运动轨迹复杂的MEO星机BiSAR系统.此外,在LEO星机BiSAR方向,杨悦等人^[22]提出了非等间隔校正的成像算法,支持距离向800 m的大场景高分辨率重建;Zhang等人^[23]则基于高分三号SAR平台,开展了星机BiSAR系统成像实验与算法验证.然而,这些研究同样建立在平台线性运动及低轨道动态假设之上,虽在低轨BiSAR系统中成效显著,但难以推广至MEO场景下需同时考虑轨迹曲率、传播时延和非匀速运动的成像任务.为突破平台运动限制,部分研究也对复杂轨迹下高机动BiSAR成像模型进行了探索^[24-26],但其核心仍基于“走停”近似,在MEO SAR长传播时延的条件下难以保证聚焦精度,易导致严重散焦.上述这些方法均无法同时解决MEO星机BiSAR成像所具有的弯曲轨迹与走停假设失效的问题.

需要指出的是,尽管GEO SAR与MEO SAR在轨道特性、平台速度等方面存在显著差异,但两者均面临“走停”假设失效和轨迹弯曲引起的相位误差的问题,已有研究多集中于以GEO SAR为照射源的BiSAR系统补偿方法.Sun等人^[27]建立了倾斜轨道下的曲线轨迹模型,并进一步提出了等效圆轨道斜距模型以补偿GEO-LEO BiSAR中的轨迹弯曲与“走停”近似失效带来的相位误差^[28].Zhang等人^[29,30]分别提出了运动目标建模与多通道谱重建算法,适用于以GEO SAR为照射源的BiSAR系统的动目标成像任务.尽管上述方法在GEO场景中获得良好成效,但多数未考虑加速度引起的高阶斜距非线性,在更高动态条件下适应性不足.考虑GEO轨道速度非恒定的特性,Sun等人^[31]提出了适用于GEO平台轨道变化的单平稳等效距离模型;An等

人^[32]则在建模中引入加速度参数,对斜距方程进行二阶近似,联合补偿轨道弯曲与传播误差.以上方法在 GEO 星机 BiSAR 场景下成像效果良好,这是由于 GEO SAR 照射源轨道高度高、速度较慢、加速度较低,斜距变化缓慢,二阶近似模型即可满足精度需求.其中部分针对“走停”失效的误差补偿方法在思路对 MEO 场景具有一定相似性,然而尚需结合 MEO SAR 的高机动性复杂轨迹进行具体研究.相较而言,MEO 星机 BiSAR 平台运动速度和加速度显著提高,同时轨迹曲率更加剧烈,导致斜距非线性与相位误差显著增强,进一步加剧了频域建模与相位补偿的复杂性,使传统 GEO BiSAR 中基于二阶多项式的低阶建模方法难以适用.在此背景下,以 GEO SAR 为照射源的 BiSAR 系统中针对轨迹弯曲的补偿方法已难以适用于 MEO 星机 BiSAR 场景.因此,由于中轨平台的复杂运动特性,MEO 星机 BiSAR 系统的斜距建模应在继承以 GEO SAR 为照射源的 BiSAR 系统的基础上,进一步引入高阶非线性建模与相应的“走停”误差校正.

综上所述,无论是 LEO BiSAR 中基于匀速线性假设的处理方法,还是 GEO BiSAR 中以低阶模型为主的补偿手段,均难以有效应对 MEO BiSAR 系统在轨迹非线性、高加速度与长时延等因素耦合作用下产生的相位误差.因此,亟需针对 MEO 星机 BiSAR 建立更精确的回波模型及成像算法,以解决 MEO 星机 BiSAR 高精度成像的问题.

针对 MEO 星机 BiSAR 在长传播时延与高加速度曲线轨迹条件下难以精确建模与成像聚焦的问题,本文提出了一种基于改进等效单基的频域成像算法.该方法首先分析 MEO SAR 非“走停”的信号传播特性,引入轨道曲率补偿因子,建立了高精度等效单基斜距模型,并结合发射平台的特性修正斜距误差.基于该模型,采用级数反演求解出精确的二维频谱的表达式,提出适用于 MEO 星机 BiSAR 的高精度频域成像算法.该方法不仅有效解决了 MEO 星机 BiSAR 的成像散焦问题,还具有高计算效率的特性.最后,基于点目标和扩展面目标的不同仿真场景,本文所提算法展现出良好的目标聚焦效果,证明了其可行性与有效性.

2 高精度 MEO 星机 BiSAR 斜距模型建立

本节系统分析了 MEO 星机 SAR 的几何构型与成像原理.首先,将 MEO SAR 轨道参数转换至统一坐标系,使其与接收机保持一致.同时,针对 MEO SAR 轨道的复杂运动特性,引入一阶相位补偿项,提出了基于非“走停”的 MEO 星机 BiSAR 改进等效单基模型.

2.1 MEO SAR 卫星建模及坐标系转换

如图 1(a)所示,在进行卫星建模时,采用地心直角

坐标系描述 MEO SAR 相对于地球的轨道运动特性.坐标系原点设置为地球质心 O ,以格林尼治子午线方向设为 X 轴的正方向,地球自转轴指向北极的方向设为 Z 轴的正方向, Y 轴由右手定则确定. φ 为下视角, ϕ 为雷达的入射角, α 为地心角, $r(t)$ 为卫星和地心之间的距离, \mathbf{R}_{st} 为卫星到目标的斜距矢量.如图 1(a)所示,为对 MEO 卫星进行建模,我们建立了卫星局部坐标系.该坐标系的原点是卫星所在位置,以卫星的运动方向为 X_s 轴, Y_s 轴垂直于轨道平面, Z_s 轴由右手定则给出, θ 为雷达方位角.在该坐标系下,卫星到目标的斜距矢量的模 R_{st} 为

$$R_{st} = r(t) \cos(\varphi) - \sqrt{R_e^2 - r^2(t) \sin^2(\varphi)} \quad (1)$$

其中, t 表示时间变量,用于表示卫星在不同时间点的位置和运动状态.根据图 1(b),斜距矢量 \mathbf{R}_{st} 为

$$\mathbf{R}_{st} = \begin{bmatrix} R_{st} \sin \varphi \cos \theta & -R_{st} \sin \varphi \sin \theta & R_{st} \cos \varphi \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

卫星的轨道形状及其相对位置通常由轨道参数确定.假设升交点赤经为 Ω ,轨道倾角为 i ,近地点幅角为 ω ,地球自转角速度为 $\omega_e = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$,根据以上两个坐标系的转换关系,目标在地心直角坐标系中的坐标矢量为

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} X_{es} \\ Y_{es} \\ Z_{es} \end{bmatrix} = \mathbf{H}_1(t) \cdot \mathbf{H}_2 \cdot \mathbf{H}_3(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}_{st} + \begin{bmatrix} r(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{H}_1(t) = \begin{bmatrix} \cos \omega_e t & \sin \omega_e t & 0 \\ -\sin \omega_e t & \cos \omega_e t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{bmatrix} \cdot \mathbf{H}_3(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta_f(t) & -\sin \theta_f(t) & 0 \\ \sin \theta_f(t) & \cos \theta_f(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, θ_f 为 MEO SAR 的真近点角.为了将 MEO SAR 与机载接收机建立在同一个坐标系,本研究采用坐标转换方法将地心直角坐标系映射至地面直角坐标系.如图 2 所示, $O-XYZ$ 表示地心直角坐标系, $P-X_g Y_g Z_g$ 表示地面直角坐标系.地面参考点 P 为地面直角坐标系原点,卫星位置设为点 M . Z_g 轴沿 \overrightarrow{OP} 方向, Y_g 轴方向为 P 点沿着地表方向, X_g 遵循右手法则. $P-X_g Y_g Z_g$ 中三维

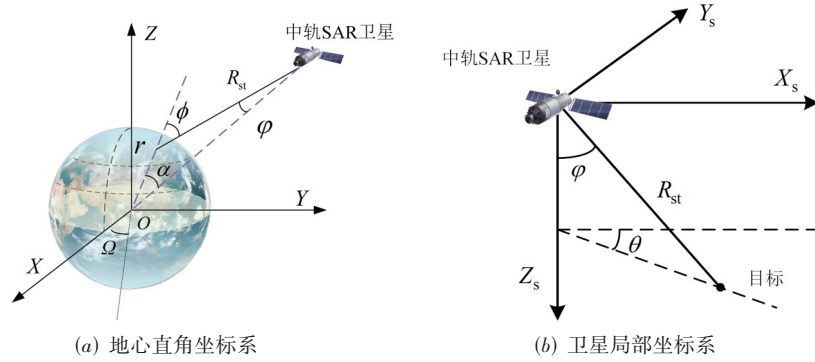


图1 MEO SAR卫星坐标系

坐标矢量在 $O-XYZ$ 中表达式为

$$\begin{cases} z = \overline{OP} / |\overline{OP}| \\ y = (\overline{OM} - (\overline{OM} \cdot z) \cdot z) / |\overline{OM} - (\overline{OM} \cdot z) \cdot z| \\ x = (z \times y) / |z \times y| \end{cases} \quad (7)$$

通过将地心直角坐标系 $O-XYZ$ 中各点的三维坐标矢量沿 $P-X_g Y_g Z_g$ 进行投影变换, 可完成向地面直角坐标系的转换. 该转换过程使得 MEO SAR 成像模型能够采用具有直观物理意义的航向、距离向与高程参数进行建模分析, 此时形成的坐标系即被定义为地面直角坐标系.

2.2 基于非“走停”的 MEO 星机 BiSAR 改进等效单基模型

由于 MEO SAR 的高轨道特性和机载接收机的高机动性, 其信号传播时间显著长于低轨道 BiSAR 平台, 基于“走停”假设建立的传统回波模型无法直接应用于 MEO 星机 BiSAR 系统. 这是因为在信号传播过程中必须考虑接收机的运动影响. 图 3 展示了 MEO 星机 BiSAR 信号实际传播路径与基于“走停”近似所建立的

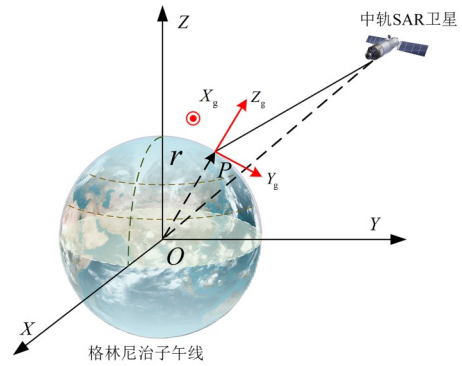


图2 MEO SAR地面直角坐标系

传播路径之间的差异. 在 MEO SAR 坐标系的转换之后, 坐标原点为场景中心 P , 在方位基准时刻 $t_a=0$ 时, 发射机位置为 (x_t, y_t, z_t) , 速度与加速度为 (v_t, a_t) . 接收机位置为 (x_r, y_r, z_r) , 速度为 v_r . Y 轴为接收机的飞行方向所在直线, N 为成像场景内任意点目标. 其中 τ 为精确传播延迟, $R_R(t_a + \tau)$ 是接收机的实际斜距.

考虑到 MEO SAR 发射机的轨道弯曲特性, 发射机到任意点目标 N 的斜距方程 $R_T(t_a)$ 的表达式为

$$R_T(t_a) = \sqrt{\left(x_t + v_{tx}t_a + \frac{1}{2}a_{tx}t_a^2 - x_n\right)^2 + \left(y_t + v_{ty}t_a + \frac{1}{2}a_{ty}t_a^2 - y_n\right)^2 + \left(z_t + v_{tz}t_a + \frac{1}{2}a_{tz}t_a^2\right)^2} \quad (8)$$

其中, v_{tx} 、 v_{ty} 和 v_{tz} 分别为发射机的速度在坐标轴 X_g 、 Y_g 、 Z_g 轴的分量; a_{tx} 、 a_{ty} 和 a_{tz} 分别为发射机的加速度在坐标轴 X_g 、 Y_g 、 Z_g 轴的分量.

$$R_T(t_a) = \sqrt{R_{t0}^2 + \mu_{t1}t_a + \mu_{t2}t_a^2 + \mu_{t3}t_a^3} \quad (9)$$

其中, R_{t0} 及各阶方位时间的系数的表达式如下:

$$R_{t0} = \sqrt{(x_t - x_n)^2 + (y_t - y_n)^2 + z_t^2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mu_{t1} = 2(v_{tx}(x_t - x_n) + v_{ty}(y_t - y_n) + v_{tz}z_t) \\ \mu_{t2} = v_{tx}^2 + v_{ty}^2 + v_{tz}^2 + a_{tx}(x_t - x_n) + a_{ty}(y_t - y_n) + a_{tz}z_t \\ \mu_{t3} = v_{tx}a_{tx} + v_{ty}a_{ty} + v_{tz}a_{tz} \end{cases} \quad (11)$$

之后进行三阶 Taylor 展开后获得:

$$R_T(t_a) = R_{t0} + k_{t1}t_a + k_{t2}t_a^2 + k_{t3}t_a^3 + \dots \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} k_{t1} = \frac{\mu_{t1}}{2R_{t0}} \\ k_{t2} = \frac{\mu_{t2}}{2R_{t0}} - \frac{\mu_{t1}^2}{8R_{t0}^3} \\ k_{t3} = \frac{\mu_{t3}}{2R_{t0}} - \frac{\mu_{t1}\mu_{t2}}{4R_{t0}^3} + \frac{\mu_{t1}^3}{16R_{t0}^5} \end{cases} \quad (13)$$

为了验证三阶展开模型的精度, 下文基于表 1 的仿真参数, 对不同真近点角下 MEO SAR 斜距的二阶展开与三阶展开精度进行分析, 其结果如图 4 所示.

根据图 4 的分析, 随着方位时间的增加, 斜距模型的相位误差呈现逐渐增大的趋势. 如图 4(a) 所示, 二阶

展开的相位误差量级达到数弧度,当真近点角在 100° 左右时,其最大相位误差可达 1.7 rad ,这一误差将对成像质量产生显著影响.

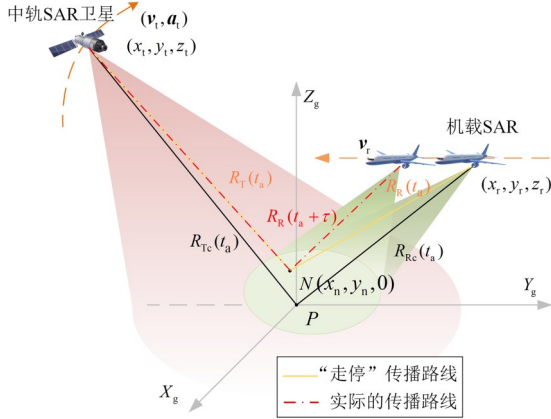
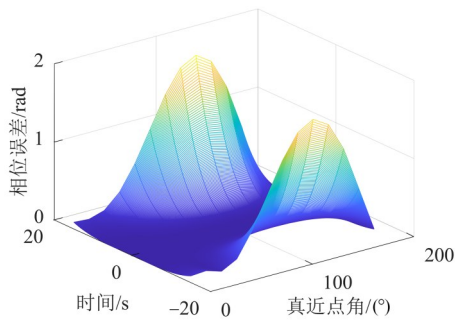
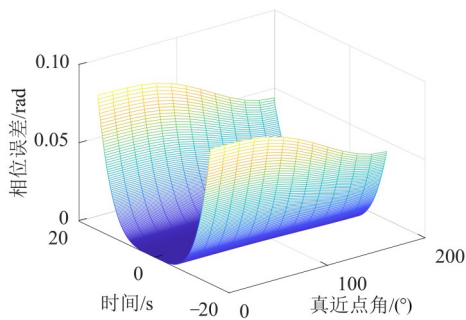


图3 MEO星机BiSAR几何模型



(a) 二阶展开



(b) 三阶展开

图4 MEO SAR的斜距误差

因此,在表1所给的MEO SAR参数条件下,采用二阶展开的精度明显不足.相反,图4(b)显示斜距三阶展开的相位误差在飞行时间和真近点角范围内均小于 0.1 rad ,其精度完全满足成像要求.因此,在表1参数条件下,MEO SAR斜距展开应至少采用三阶展开.对机载接收机而言,其瞬时斜距 $R_R(t_a)$ 可表示为

表1 MEO星机BiSAR成像参数

参数	数值
中轨SAR轨道高度/km	10 000
偏心率	0.003
近地点幅角/ $^\circ$	90
升交点赤经/ $^\circ$	98
轨道倾角/ $^\circ$	60
天线下视角/ $^\circ$	10
卫星位置/km	(0,-200 010 000)
卫星速度/(m/s)	(4 319,150,-20)
卫星加速度/(m/s^2)	(2,-0.7,-1)
接收机位置/km	(-1,-4,15)
接收机速度/(m/s)	1 000
接收机斜视角/ $^\circ$	3.685
等效斜距/km	5 106.8
等效速度/(m/s)	24 502
等效斜视角/ $^\circ$	58.3
轨道弯曲补偿项系数	20 784.8
信号载频/GHz	5.4
带宽/MHz	300
系统采样率/MHz	320
脉冲重复频率/Hz	3 000
脉宽/ μs	2
合成孔径时间/s	1

$$R_R(t_a) = \sqrt{R_{r0}^2 + v_r^2 t_a^2 - 2R_{r0} v_r t_a \sin \theta_r} \quad (14)$$

其中, θ_r 是接收机斜视角, R_{r0} 为接收机在波束中心时刻到目标的斜距,其表达式为

$$R_{r0} = \sqrt{(x_r - x_n)^2 + (y_r - y_n)^2 + z_r^2} \quad (15)$$

如图3所示,在星机双基SAR的信号传播建模需同时考虑两类运动.第一类是收发平台在各个脉冲重复周期内的运动,第二类是机载平台在脉冲传播期内的运动.传统星机BiSAR建模通常仅基于“走停”假设处理第一类运动^[33,34],其双基斜距历程可表述为收发平台到目标点的瞬时距离之和,即

$$R_{\text{sag}}(t_a) = R_T(t_a) + R_R(t_a) \quad (16)$$

因此,基于“走停”的传播延迟为 $\tau_{\text{sag}} = R_{\text{sag}}(t_a)/c$, c 为光速.而MEO SAR的轨道高度较高,而机载SAR的飞行速度通常较快,需考虑接收机第二类运动即在信号传播期间的运动对脉冲传播时延的影响,这种运动会导实际斜距发生变化^[35].根据以上分析,MEO星机BiSAR的任意目标 P 的实际双基地瞬时斜距可以写为

$$R(t_a + \tau) = R_T(t_a) + R_R(t_a + \tau) \quad (17)$$

其中, τ 是回波信号的真实时延,可通过下式计算:

$$\tau = \frac{R_T(t_a) + R_R(t_a + \tau)}{c} \quad (18)$$

然而,通过观察式(18)可知,由于方程两边均含 τ ,且收发平台的斜距方程具有高阶次,难以求得回波的真实时延的精确闭合形式解.而考虑到MEO星机BiSAR中机载平台在脉冲传播期速度不变,我们将对接收机斜距函数的脉冲传播时延 τ 近似为 τ_{sag} ,近似的过程如下:

$$\begin{aligned} R_R(t_a + \tau) &\approx R_R(t_a + \tau_{\text{sag}}) \\ &= \sqrt{R_{r0}^2 + v_r^2(t_a + \tau_{\text{sag}})^2 - 2R_{r0}v_r(t_a + \tau_{\text{sag}})\sin\theta_r} \end{aligned} \quad (19)$$

结合式(17)和式(19),求得MEO星机BiSAR的实际双基地瞬时斜距,如下:

$$\begin{aligned} R(t_a + \tau) &= R_{i0} + k_{i1}t_a + k_{i2}t_a^2 + k_{i3}t_a^3 \\ &+ \sqrt{R_{r0}^2 + v_r^2(t_a + \tau_{\text{sag}})^2 - 2R_{r0}v_r(t_a + \tau_{\text{sag}})\sin\theta_r} \end{aligned} \quad (20)$$

等效单基思想的核心思路是将双基SAR斜距模型等效为单基平飞斜视结构,基于单基SAR技术成熟的理论体系,使双基SAR系统能够直接沿用单基SAR成像算法.但由于MEO星机双基SAR平台的复杂性,传统的等效单基算法的等效斜距无法精确描述其双基斜距.针对该问题,本文设计了一种改进的等效单基算法,通过新增补偿因子提升补偿精度.相较于传统双曲近似仅考虑泰勒展开的二阶项,该方法通过引入额外的变量实现了更高精度的误差补偿.所提改进等效单基模型如图5所示,其思想为将MEO星机BiSAR的双基地模型等效为所提改进的等效单基斜距模型,其中 R_{M0} 是波束中心时刻的等效斜距, v_M 是等效速度, θ_M 是等效斜视角, β 为轨道弯曲补偿项系数,皆为待定系数需要进行求解.所提改进算法克服了传统方法忽略高阶项导致的近似误差,改进的等效斜距表达式如下:

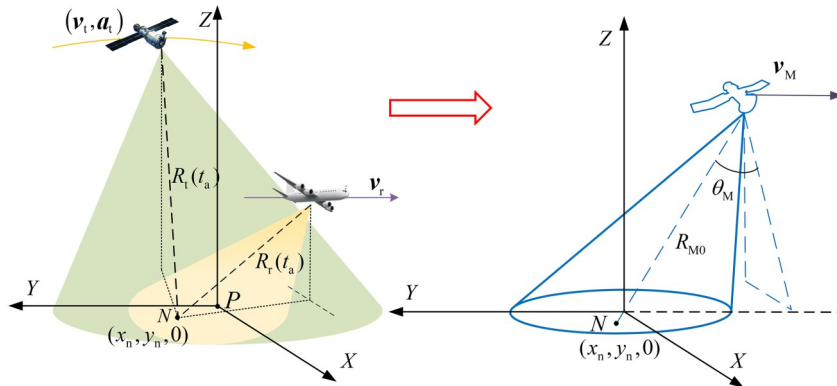


图5 改进的等效单基斜距模型原理图

2.3 改进等效单基模型精度分析

为了验证改进等效单基模型的精度,本节采用MEO星机双基SAR参数开展斜距误差与相位误差的仿真分析,具体参数如表1所示.对比研究中纳入了传统

$$R_M(t_a) = \sqrt{R_{M0}^2 + (v_M t_a)^2 - 2R_{M0}v_M t_a \sin\theta_M} + \beta t_a \quad (21)$$

对式(21)进行三阶泰勒展开可得:

$$\begin{aligned} R_M(t_a) &= R_{M0} + (\beta - v_M \sin\theta_M)t_a + \frac{\cos^2\theta_M}{2R_{M0}}v_M^2 t_a^2 \\ &+ \frac{\sin\theta_M \cos^2\theta_M}{2R_{M0}^2}v_M^3 t_a^3 + o(t_a^4) \end{aligned} \quad (22)$$

由于MEO星机BiSAR的实际双基地瞬时斜距含有根式,难以直接对其进行等效,我们对式(20)进行三阶泰勒展开如下:

$$R(t_a) = K_0 + K_1 t_a + K_2 t_a^2 + K_3 t_a^3 + o(t_a^4) \quad (23)$$

$$K_i = \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n R(t_a)}{dt_a^n} \right|_{t_a=0}, \quad i=0, 1, 2, 3 \quad (24)$$

其中, K_i 的具体表达式见附录.根据等效单基的思想,我们将MEO星机BiSAR的实际斜距等效为单基SAR,列方程如下:

$$R(t_a) = 2R_M(t_a) \quad (25)$$

继而可以求得四个待定系数分别为

$$\begin{cases} R_{M0} = \frac{K_0}{2} \\ v_M = \sqrt{\frac{K_2 K_0}{2} + \left(\frac{K_3 K_0}{2K_2}\right)^2} \\ \theta_M = \arccos\left(\frac{\sqrt{K_0 K_2}}{2v_M}\right) \\ \beta = \frac{K_1}{2} + \frac{K_3 K_0}{2K_2} \end{cases} \quad (26)$$

至此,我们已得到所提适用于MEO星机BiSAR的改进等效单基斜距模型.

双基“走停”模型^[36],忽略高阶运动的非“走停”模型^[37].

图6(a)展示了不同模型的斜距误差分布.

仿真结果表明,在中轨星机双基SAR成像的成像参数下,“走停”假设模型的斜距误差可达3.25 m,其斜距误

差较忽略高阶运动的非“走停”模型和所提模型的误差显著增大,该误差源于“走停”模型未能充分考虑MEO SAR系统特有的长时延信号传播特性.本文模型通过联合补偿信号传播时延效应与中轨卫星的曲线轨迹,获得了最优的斜距精度.相位误差分析结果如图6(b)所示,可知“走停”假设引入的最大相位误差可达365.4 rad,远远大于 $\pi/4$ 的相位容限.虽然忽略高阶运动的非“走停”模型将相位误差降低至2 rad量级,但仍高于可接受阈值 $\pi/4$,这种残余误差主要来源于未建模的高阶轨道运动分量.相比之下,本文提出的模型将相位误差严格控制 $\pi/4$ 阈值之下,满足MEO星机BiSAR系统的成像精度要求.

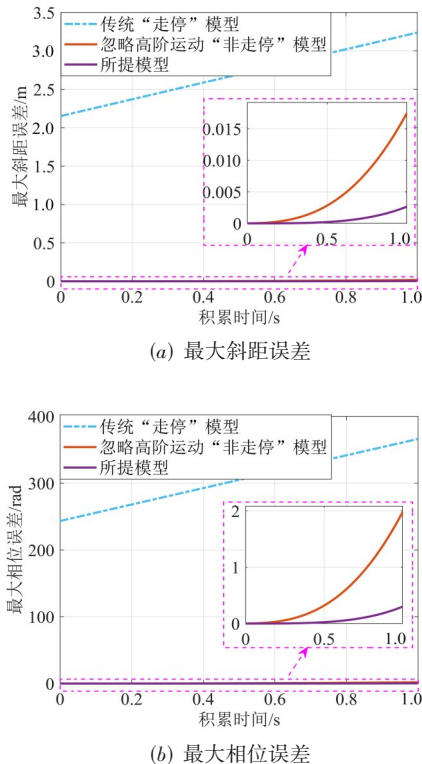


图6 不同模型的精度分析

为系统验证改进型等效单基模型的精度优势,图7(a)进一步对比分析了传统等效单基模型与本文所提模型的斜距误差特性.需特别说明的是,为量化轨道曲率补偿因子的作用,我们对传统等效单基模型同步引入了非“走停”校正思想进行对比.定量分析表明,在相同校正条件下,改进模型的最大斜距误差较传统模型降低一个数量级,充分证了所提改进等效单基方法的理论优越性.图7(b)的相位误差分析更明显地展示了模型改进的必要性.

传统等效单基模型产生的最大相位误差达7.1 rad,远超相位容限阈值 $\pi/4$,这将导致合成孔径雷达图像出

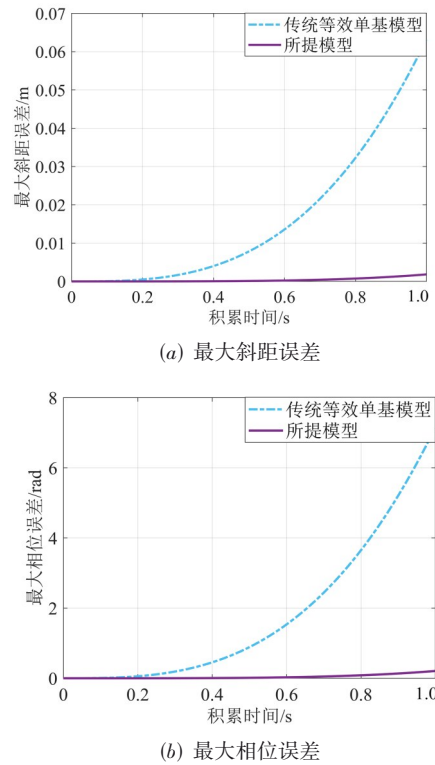


图7 传统等效单基与改进等效单基模型精度分析

现严重散焦现象.相比之下,本算法通过引入轨道弯曲补偿因子,将最大相位误差严格控制在0.2 rad范围内,较传统模型降低97%,满足MEO星机BiSAR系统对相位精度的要求.

3 基于改进等效单基的MEO星机BiSAR成像算法

3.1 成像算法推导

为了解决MEO星机BiSAR精确成像的问题,本节提出了一种基于改进等效单基的BiSAR成像算法,下面对信号频谱进行分析及算法推导.假设MEO SAR发射线性调频信号,其反射回波的数学模型可由下列表达式描述:

$$s(\hat{t}, t_a) = \omega_r \left[\hat{t} - \frac{R_M(t_a)}{c} \right] \omega_a(t_a) \cdot \exp \left\{ j\pi\gamma \left[\hat{t} - \frac{2R_M(t_a)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi R_M(t_a)}{\lambda} \right] \quad (27)$$

其中, \hat{t} 是快时间, γ 是距离向调频斜率, ω_r 和 ω_a 是距离和方位窗, λ 是信号的波长.对回波信号做距离向FFT(Fast Fourier Transform)可得:

$$S(f_r, t_a) = W_r(f_r) \cdot \omega_a(t_a) \cdot \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{\gamma}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi(f_r + f_0)}{c} R_M(t_a)\right) \quad (28)$$

其中, f_r 为距离频率, f_0 为信号载频. 回波信号处理的第一步是对距离维实施脉冲压缩, 压缩函数为

$$H_{rc} = \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{\gamma}\right) \quad (29)$$

将式(28)和式(29)进行相位相乘, 对 SAR 信号进行距离压缩, 回波变为

$$S(f_r, t_a) = W_r(f_r) \cdot \omega_a(t_a) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi(f_r + f_0)}{c} R_M(t_a)\right) \quad (30)$$

再对其进行方位 FFT 变换, 信号在二维频域的表达式如下:

$$S(f_r, f_a) = W_r(f_r) \cdot W_a(f_a) \cdot \exp[j\phi(f_r, f_a)] \quad (31)$$

在引入一次相位后, 直接对上述方程求解较为复杂. 我们假设未引入一次相位的回波信号表示为 $S_1(f_r, t_a)$, 将式(30)整理得:

$$S(f_r, t_a) = S_1(f_r, t_a) \exp\left(-j \frac{4\pi(f_r + f_0)}{c} \beta t_a\right) \quad (32)$$

根据傅里叶变换的性质可得

$$\begin{cases} S(f_r, f_a) = S_1(f_r, f_a + \rho) \\ \rho = \frac{2(f_r + f_0)}{c} \beta \end{cases} \quad (33)$$

已知经过距离压缩之后得 $S_1(f_r, t_a)$ 的二维频谱相位表达式为

$$\begin{aligned} \phi_1(f_r, f_a) = & -2\pi f_a \frac{R_{M0} \sin \theta_M}{v_M} \\ & - \frac{4\pi R_{M0} \cos \theta_M}{c} \sqrt{(f_r + f_0)^2 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_M^2}} \end{aligned} \quad (34)$$

根据式(32)和式(33)可得

$$\begin{aligned} \phi(f_r, f_a) = & -2\pi(f_a + \rho) \frac{R_{M0} \sin \theta_M}{v_M} \\ & - \frac{4\pi R_{M0} \cos \theta_M}{c} \sqrt{(f_r + f_0)^2 - \frac{c^2 (f_a + \rho)^2}{4v_M^2}} \end{aligned} \quad (35)$$

在得到二维频谱的表达式后, 我们在 $f_r = 0$ 处进行三阶泰勒展开:

$$\phi(f_r, f_a) \approx \phi_0(f_a) + \phi_1(f_r, f_a) + \phi_2(f_r, f_a) + \phi_3(f_r, f_a) \quad (36)$$

其中, 相位系数 $\phi_0(f_a)$ 表示方位调制项; ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 分别表示距离为一次、二次及三次补偿项, 具体表达式如下:

$$\begin{cases} \phi_0(f_a) = -2\pi R_{M0} \left(\frac{\sin \theta_M}{v_M} f_a - \frac{2\cos \theta_M Y(f_a)}{\lambda} \right) \\ \phi_1(f_r, f_a) = -\frac{4\pi R_{M0}}{c} \left[\frac{\cos \theta_M v(f_a)}{Y(f_a)} + \frac{\beta \sin \theta_M}{v} \left(1 + \frac{f_0}{f_r} \right) \right] f_r \\ \phi_2(f_r, f_a) = \frac{2\pi R_{M0} \cos \theta_M}{c f_0 Y(f_a)} \left(\frac{v^2(f_a)}{Y^2(f_a)} - \zeta \right) f_r^2 \\ \phi_3(f_r, f_a) = -\frac{2\pi R_{M0} \cos \theta_M v(f_a)}{c f_0^2 Y^3(f_a)} \left(\frac{v^2(f_a)}{Y^2(f_a)} - \zeta \right) f_r^3 \end{cases} \quad (37)$$

其中:

$$\begin{cases} Y(f_a) = \sqrt{1 - \frac{1}{4v_M^2} (\lambda f_a + 2\beta)^2} \\ v(f_a) = \zeta - \frac{\lambda}{2\beta} (1 - \zeta) f_a \\ \zeta = 1 - \frac{2\beta^2}{v_M^2} \end{cases} \quad (38)$$

基于以上分析, 我们对回波进行距离徙动和高阶误差校正, 补偿函数如下:

$$\begin{aligned} H_{COM}(f_a, f_r, R_{Mc0}) = & \exp\left(-j\phi_1(f_a, f_r, R_{Mc0})\right) \\ & -j\phi_2(f_a, f_r, R_{Mc0}) - j\phi_3(f_a, f_r, R_{Mc0}) \end{aligned} \quad (39)$$

其中, R_{Mc0} 是波束中心点的最近斜距. 将式(39)和式(31)进行相位相乘, 对其进行距离徙动和高阶距离误差校正, 则信号的表达式为

$$S(f_r, f_a) = W_r(f_r) \cdot W_a(f_a) \cdot \exp(j\phi_0) \quad (40)$$

所提算法针对方位调制项随距离变化的特性, 设计自适应的参考函数来实现方位向匹配滤波, 其表达式为

$$H_{ac}(f_a, \Delta r) = \exp\left[-j2\pi\Delta r \left(\frac{\sin \theta_M}{v_M} f_a - \frac{2\cos \theta_M Y(f_a)}{\lambda} \right)\right] \quad (41)$$

其中, $\Delta r = R_{M0} - R_{Mc0}$ 为任意目标与场景中心点目标在波束穿越时刻的斜距之差. 我们对式(40)距离向做快速逆傅立叶变换处理 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), 再与方位压缩的参考函数式(41)相位相乘, 然后作方位向 IFFT, 即可获得精确聚焦的 SAR 图像. 所提算法的流程图如图 8 所示.

3.2 算法约束条件与积累时间分析

为明确所提改进等效单基频域成像算法在 MEO 星机 BiSAR 场景下的约束条件, 本文主要从等效斜距误差引起的相位误差与二维频谱近似残余误差约束这两个方面进行定量分析. 随后, 基于表 1 中所列的雷达

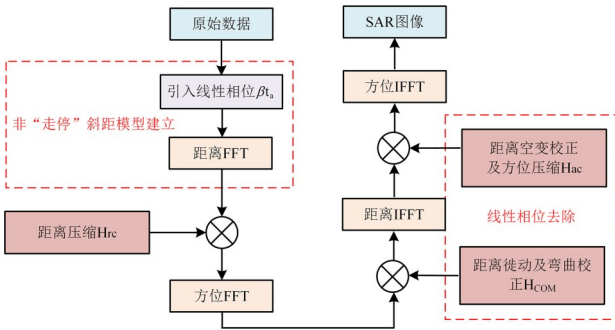


图8 MEO星机双基地SAR算法流程图

参数与系统参数,以及选取典型的两组星机BiSAR的接收机参数,分别仿真两类误差的影响,并据此得到所提算法在不同参数下可接受的积累时间.

3.2.1 所提算法的两类误差约束条件的定量分析

所提算法将MEO星机BiSAR的斜距历程等效为单基模型,所提等效单基模型与实际斜距历程的误差为

$$\Delta R(t_a) = R_M(t_a) - R_{re}(t_a) \quad (42)$$

其中, R_{re} 为MEO星机BiSAR的真实双程斜距. 该斜距差值将引入相位误差,其表达式为

$$\Delta\phi(f_r, t_a) = -\frac{2\pi(f_r + f_0)}{c} \Delta R(t_a) \quad (43)$$

可见, $\Delta\phi(f_r, t_a)$ 将影响回波距离向和方位向的聚焦精度. 为保证成像质量,该相位误差在整个积累时间内的最大值应控制在相位容限内,通常选取 $\pi/4$ 为可接受上限,即

$$\frac{2\pi(f_r + f_c)}{c} \max \left\{ \left| R_M(t_a) - R_{re}(t_a) \right| \right\} < \frac{\pi}{4} \quad (44)$$

式(44)即为所提算法的第一个约束条件.

所提算法的第二类误差来自推导频谱 $\phi(f_r, f_a)$ 与实际频谱 $\phi_{re}(f_r, f_a)$ 的差值,其残余相位误差为

$$\Delta\phi(f_r, f_a) = \phi(f_r, f_a) - \phi_{re}(f_r, f_a) \quad (45)$$

为保证频域补偿精度,该残余相位误差在频率范围内的最大值亦应控制在 $\pi/4$ 阈值以内:

$$\max \left\{ \left| \phi(f_r, f_a) - \phi_{re}(f_r, f_a) \right| \right\} < \frac{\pi}{4} \quad (46)$$

式(46)即为所提算法的第二个误差约束条件. 需要注意的是,该约束条件只和收发平台的构型与运动参数,采样频率和脉冲重复频率相关,与积累时间无关. 通过以上分析,本文所提方法需满足以下约束条件:

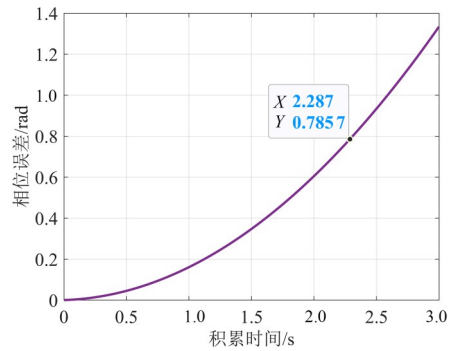
$$\begin{cases} \frac{2\pi(f_r + f_c)}{c} \max \left\{ \left| R_M(t_a) - R_{re}(t_a) \right| \right\} < \frac{\pi}{4} \\ \max \left\{ \left| \phi(f_r, f_a) - \phi_{re}(f_r, f_a) \right| \right\} < \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (47)$$

式(47)为本文所提方法的约束条件. 在此基础上,

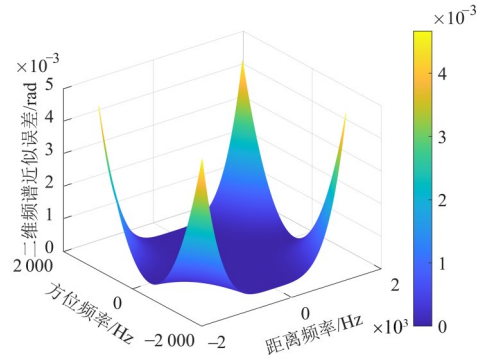
本文进一步基于表1的参数对两类误差进行仿真,分析不同积累时间下误差项的影响,并确定所提方法所能适用的积累时间.

3.2.2 积累时间仿真分析

为了分析所提算法可支持的积累时间,本文基于表1所示MEO星机BiSAR参数,分别对等效单基模型斜距误差引起的相位误差 $\Delta\phi$ 与二维频谱近似残余误差 $\Delta\phi$ 进行仿真分析,如图9所示.



(a) 等效斜距误差引起的相位误差



(b) 二维频谱近似误差

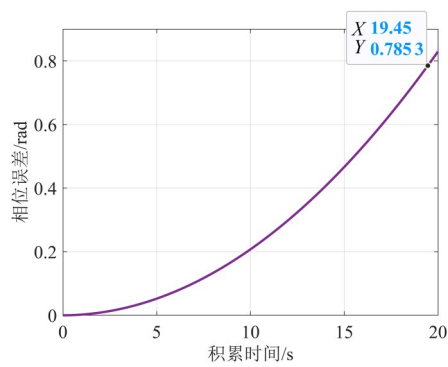
图9 所提算法的两类误差约束条件的仿真分析

首先,图9(a)显示了随着积累时间增加,由等效斜距误差引入的最大相位误差逐渐增加,当积累时间在2.2 s附近时,相位误差 $\Delta\phi$ 接近阈值 $\pi/4$,此时将会对成像质量造成影响. 因此,该时间点可视为所提等效单基方法在当前系统参数下的积累时间上限. 随后分析二维频谱近似残余误差 $\Delta\phi$. 如图9(b)所示,整个距离频率与方位频率范围内的二维频谱近似残余误差始终远小 $\pi/4$,基本不会影响成像质量. 因此,在当前参数条件下,限制所提算法适用性的主要因素为第一类约束条件,即由斜距建模误差引起的相位误差.

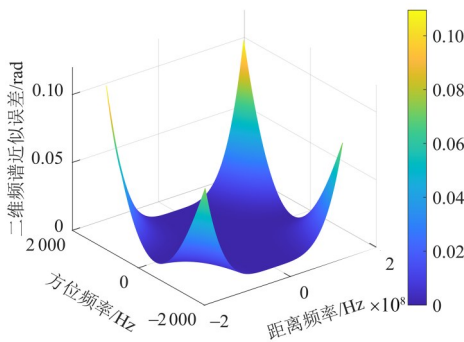
综上所述,在表1所示条件下,所提方法在积累时间不超过约2.2 s时可保持良好成像精度. 需指出的是,为验证算法在极端高机动条件下的适用性,本文在

仿真中采用了飞行高度 15 km、速度 1 000 m/s 的接收机平台参数,属于条件较为苛刻的工况设定,该工况压缩了实际积累时间上限。

为进一步评估所提方法在工程应用中的有效性,我们参照国内首次公开的星机 BiSAR 飞行试验^[37],构建了符合实际任务场景的接收平台参数:飞行高度约 800 m,速度约 50 m/s,试验积累时间为 3 s。为了进一步评估算法的时间适应上限,分别对等效单基模型斜距误差引起的相位误差 $\Delta\phi$ 与二维频谱近似残余误差 $\Delta\phi$ 进行仿真分析,结果如图 10 所示(接收机参数为文献[38])。



(a) 等效斜距误差引起的相位误差



(b) 二维频谱近似误差

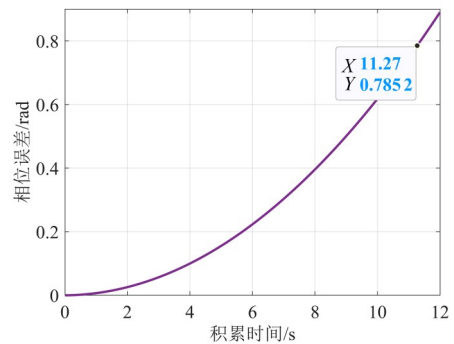
图 10 所提算法的两类误差约束条件的仿真分析

如图 10(a)所示,当积累时间在 19 s 左右时,由等效斜距误差引起的最大相位误差达到设定的相位容限 $\pi/4$ 。随后我们仿真二维频谱近似残余误差 $\Delta\phi$,如图 10(b)所示。我们可知, $\Delta\phi$ 在整个距离频率和方位频率范围内远低于 $\pi/4$,始终处于可忽略范围内。因此,在该工程参数下,所提方法可稳定支持近 20 s 的积累时间,显著长于实际试验中使用的 3 s 积累时间,进一步验证了所提算法在长积累时间下的有效性。

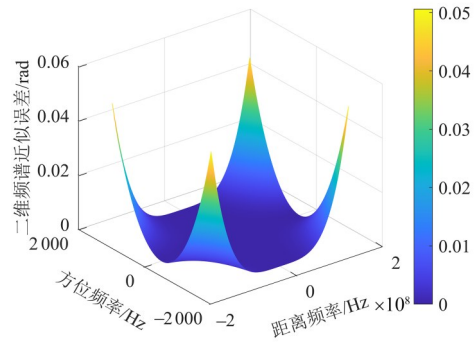
此外,为进一步分析所提算法在不同接收平台配置下的可适用积累时间,我们基于文献[31]提供的 GEO 星机 BiSAR 典型接收平台参数(飞行高度 8 km,速

度 200 m/s)开展仿真,分别对等效单基模型斜距误差引起的相位误差 $\Delta\phi$ 与二维频谱近似残余误差 $\Delta\phi$ 进行仿真分析。

如图 11 所示(接收机参数为文献[31]),当积累时间达到 11~12 s 时,相位误差达到容限,频谱误差依然远低于容差范围,表明算法可支撑 11~12 s 的积累时间,远高于 GEO 轨道星机 BiSAR 试验中常见的 4 s 积累长度。



(a) 等效斜距误差引起的相位误差



(b) 二维频谱近似误差

图 11 所提算法的两类误差约束条件的仿真分析

综合以上三组仿真结果可知,所提算法在 MEO 星机 BiSAR 的应用中具有高精度与长积累时间适应性。在极端工况下的接收机平台,算法可稳定支持约 2.2 s 的积累时间,在更贴近实际应用的机载接收平台参数下,积累时间上限可扩展至十几秒量级,覆盖当前已公开星机 BiSAR 成像任务中常见的时域范围(3~3.6 s)^[38-40]。同时,在上述三类不同平台配置下,二维频谱近似残余相位误差始终远低于设定容限,对成像质量影响可忽略。因此,所提方法具备较高的精度与实用性,能够满足 MEO 星机 BiSAR 系统在不同任务条件下的工程应用需求。未来工作中,可进一步通过引入更高阶斜距补偿项,拓展方法在极长积累时间条件下的可用性,这也将作为后续研究的重要方向。

3.3 算法复杂度分析

在星机 BiSAR 系统的实际工程应用中,高计算效率和实时成像处理能力是必不可少的.因此,有必要对所提算法的计算复杂度进行讨论.众所周知,执行 N 点 FFT/IFFT 运算需要大约 $5N \log_2 N$ 个浮点运算(Floating Point operations, FLOPs);同样, N 点的复乘运算需要 $6N$ 个 FLOPs. 假设 N_a 和 N_r 分别表示方位采样点和距离采样点. 从图 8 可以看出,所提算法包含 2 次距离 FFT/IFFT 运算, 2 次方位 FFT/IFFT 运算, 3 次复乘运算. 因此,所提算法的总计算复杂度为

$$C_1 = 10N_a N_r \log_2 N_r + 10N_a N_r \log_2 N_a + 18N_a N_r \quad (48)$$

为了对所提算法的计算复杂度进行评估,我们将其他 BiSAR 算法的复杂度与所提算法进行对比. 文献[41]适用于复杂轨迹机载双基 SAR 的频域成像算法,其计算复杂度如下:

$$C_2 = 10N_a N_r \log_2 N_r + 10N_a N_r \log_2 N_a + 24N_a N_r \quad (49)$$

对比式(48)和式(49)可以明显看出,所提算法与文献[41]的成像算法在计算复杂度上处于同一量级,均为 $O(N^2 \log_2 N)$,但所提算法在常数项上减少了 $6N_a N_r$ 的计算量,从而在保持高精度成像能力的同时,进一步提升了运算效率. 此外,所提算法不仅能够实现在非线性轨迹下的 BiSAR 成像,还能有效校正 MEO SAR 的长时延回波引起的相位误差,而无需增加额外的计算负担. 进一步对比快速分解后向投影算法(Fast Factorized Back Projection, FFBP)^[42,43],设其子孔径的个数为 n ,该算法的 FLOPs 为

$$C_3 = \frac{8N_a N_r L_a}{n} + 10N_a N_r \log_2 N_a + 24N_a N_r \quad (50)$$

其中, L_a 代表方位向合成孔径长度. 对比式(48)和式(50),可以发现所提算法的计算复杂度更低. 尽管 FFBP 算法通过在极坐标系下进行子孔径成像,显著降低了原始后向投影算法的计算复杂度,但在图像域进行大量插值操作会降低成像效率. 相比之下,所提算法在保证高精度成像的同时,避免了插值操作带来的额外计算开销,在计算复杂度和成像效率上均表现出显著优势.

基于以上分析,所提算法不仅具备高精度的成像能力,还拥有较低的计算复杂度,适用于 MEO 星机 BiSAR 的实际应用,具有重要的工程应用价值.

4 实验结果与分析

4.1 MEO 星机 BiSAR 的点目标仿真实验

为验证所提算法的有效性,本文基于表 1 中 MEO 星机 BiSAR 系统的参数开展成像处理,并采用点目标仿真实验对所提算法进行验证,同时与传统单基等效方法对比^[44]. 为了测试所提改进等效单基算法对轨道弯曲带来的误差校正性能,应用传统等效单基模型时

考虑了非“走停”思想,成像场景如图 12 所示.

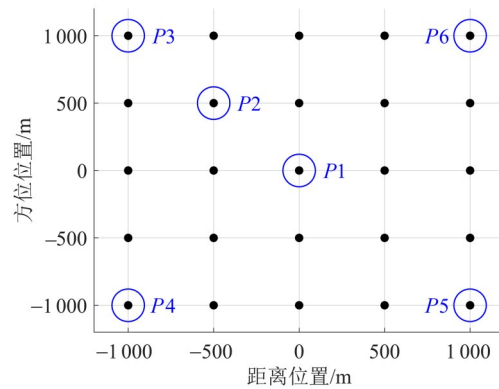
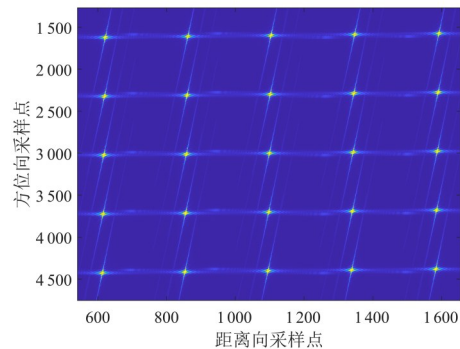
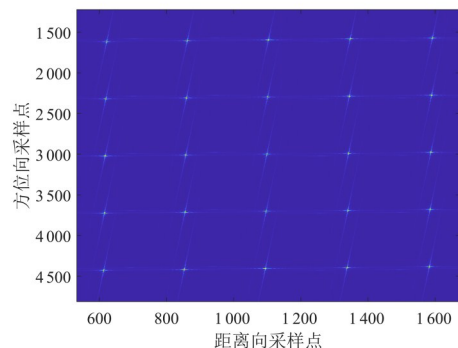


图 12 点目标的分布图

使用所提算法和传统等效单基算法对图 12 的聚焦结果如图 13(a)和图 13(b)所示. 对比两图可知,使用所提算法对点目标进行聚焦的效果相较于传统等效单基算法更理想. 这是因为所提算法已经消除了由 MEO SAR 的轨道弯曲及场景空变引入的相位误差.



(a) 传统等效单基算法



(b) 改进等效单基算法

图 13 MEO 星机 BiSAR 成像结果对比

此外,为了证明改进的等效单基算法的优越性,我们选取图 12 中标记的点进行成像质量的详细评价,用于对比实验. 如图 14 所示,采用传统等效单基算法生成的

等高线分布图在方位向呈现散焦现象,这表明等效斜距误差的存在导致方位向补偿存在偏差. 该实验结果证实了在MEO星机双基SAR系统中,卫星轨道曲率效应对成像质量具有不可忽视的影响. 改进等效单基算法所得的标记点等高图如图15所示,可知,6个标记点的聚焦效果均理想,其耦合相位残余误差已经完全校正. 此外,我们还对两个算法的脉冲响应曲线进行了比较. 图16

显示了传统等效单基算法的各个点的方位剖面图,可以看到,使用传统算法聚焦会出现方位向主瓣展宽的现象. 所提改进单基等效算法的各个点的方位剖面图如图17所示,对比可知,通过所提算法,MEO SAR的复杂运动引起的方位向的散焦已经完全得到校正. 在所提算法下,点目标的脉冲响应曲线均为标准的sinc函数. 通过使用所提算法,点目标得到了良好的聚焦.

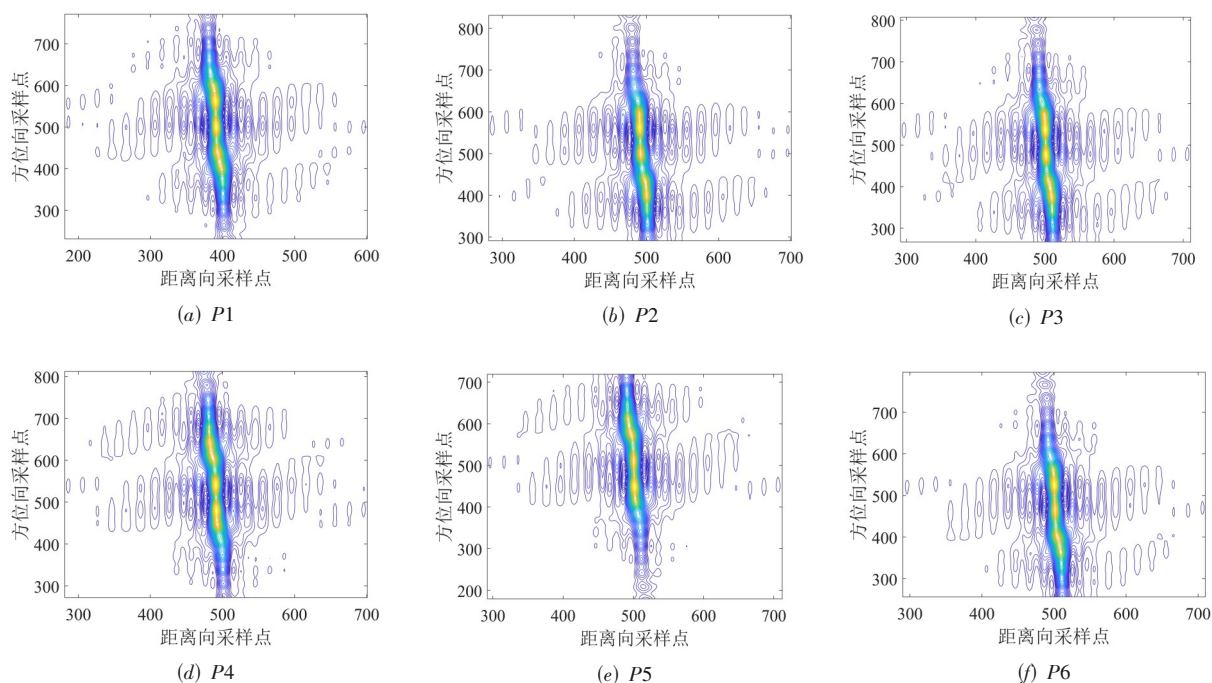


图14 传统等效单基算法的标记点等高图

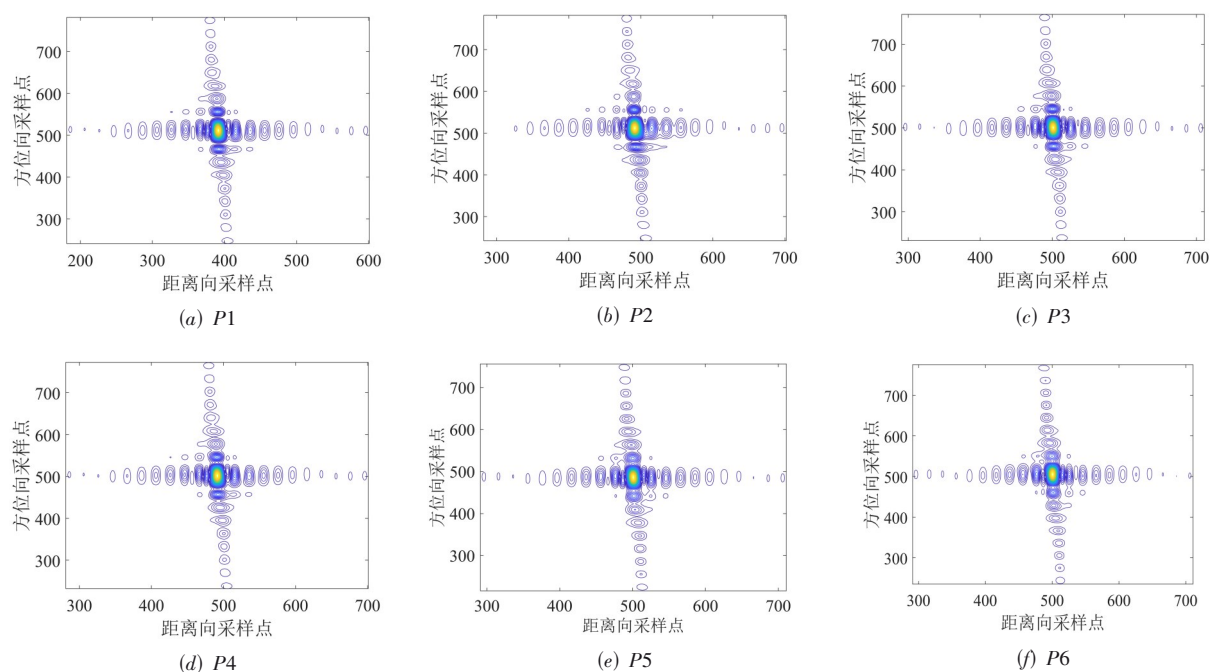


图15 所提算法的标记点等高图

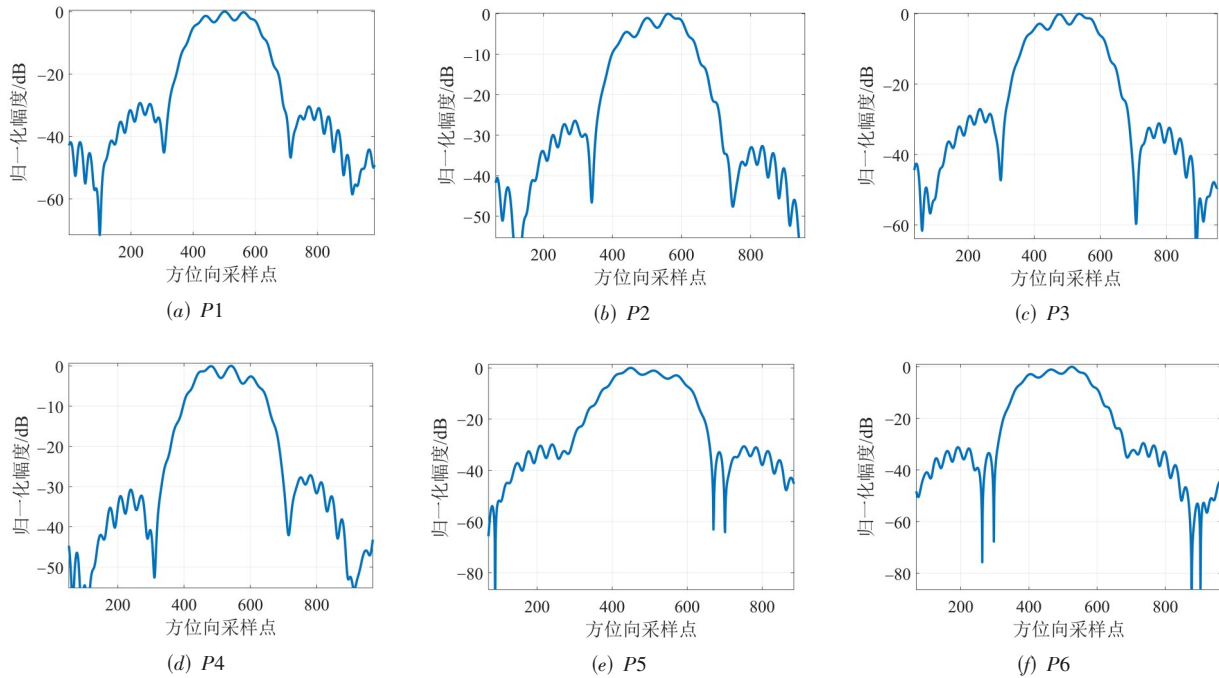


图 16 基于传统等效单基算法的特征点脉冲响应曲线

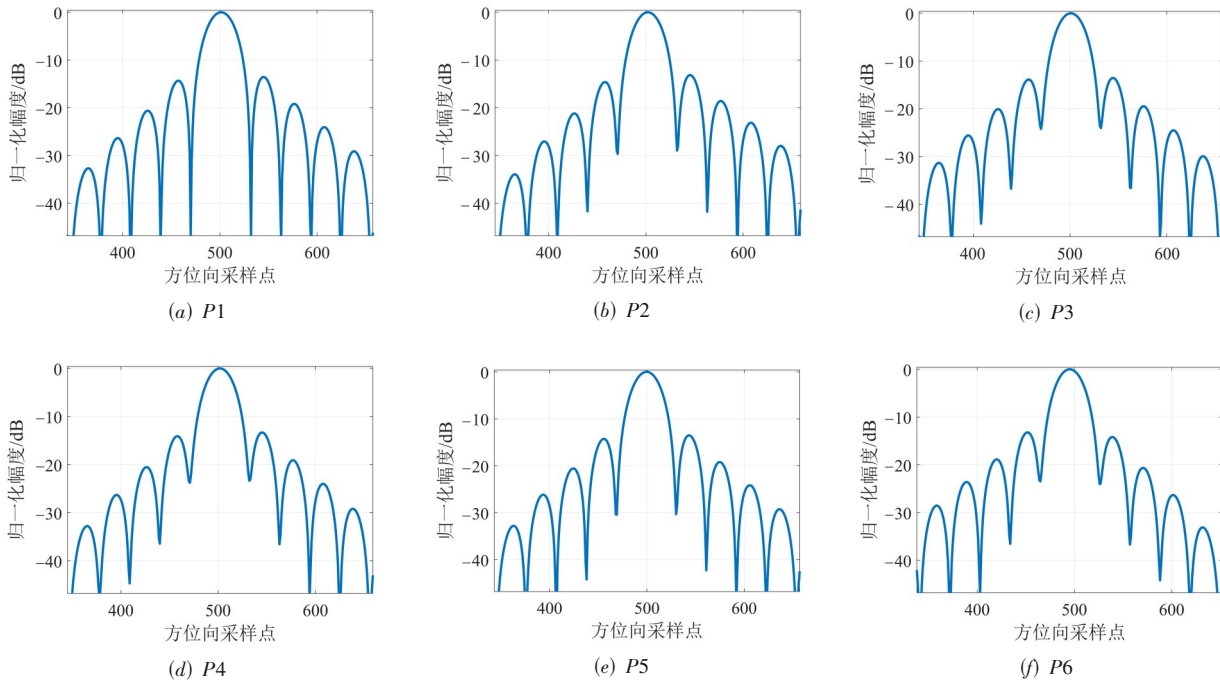


图 17 基于所提算法的特征点脉冲响应曲线

为了定量评估所提算法的优越性,我们计算了两种算法对图 12 中标记点的峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integration Side Lobe Ratio, ISLR),与二维分辨率进行对比,如表 2 所示. 其中在表 1 参数下的理论分辨率如图 18 所示.

通过观察图 18 和表 2,我们可知,使用改进的等效

单基算法的所有标记的 PSLR、ISLR 和二维分辨率与理论值相近,这说明了所提算法对在 MEO 星机双基 SAR 可完成高精度的成像,消除了曲线轨迹带来的误差. 相反,传统算法的 PSLR、ISLR 和方位分辨率表现较差,在 P5 点的分辨率甚至可达 14.00 m. 所提算法的优越性在仿真实验中得到了充分的体现.

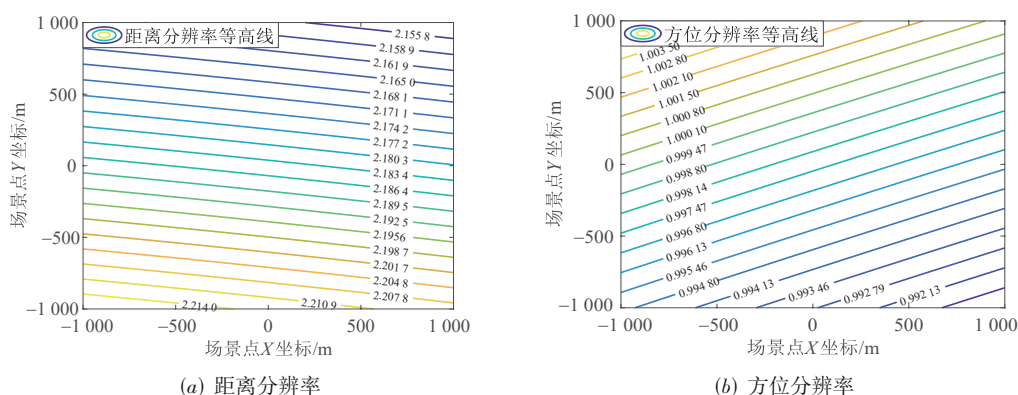


图 18 表 1 参数下的 MEO 星机 BiSAR 的理论二维分辨率

表 2 两种算法的特特点成像评价指标

	传统等效单基算法				所提算法			
	距离分辨率/m	方位分辨率/m	PSLR/dB	ISLR/dB	距离分辨率/m	方位分辨率/m	PSLR/dB	ISLR/dB
P1	2.21	11.60	-1.40	-0.17	2.21	1.00	-13.55	-9.64
P2	2.20	11.07	-1.06	-0.64	2.20	1.00	-13.15	-9.83
P3	2.20	6.67	-2.84	-3.99	2.20	1.00	-13.56	-9.56
P4	2.22	3.87	-2.61	-6.97	2.22	1.00	-13.32	-9.80
P5	2.21	14.00	-1.08	0.80	2.21	1.00	-13.53	-9.72
P6	2.19	6.67	-3.99	-0.12	2.19	1.00	-13.36	-9.84

此外,为进一步评估所提算法在表 1 参数下可达到的最高分辨率,我们在表 1 参数配置下,于 2.1 s 积累时间进行仿真分析. 其理论与实际的二维分辨率结果如表 3 所示. 从表 3 可见,即使在接近建模误差临界的积

累时间下,所提算法仍保持与理论极限值高度一致的分辨性能. 在表 1 参数配置下,所提方法的最高可实现分辨率为:距离向约 2.15 m,方位向约 0.49 m,充分体现出所提算法的高精度特性及工程可行性.

表 3 所提算法与理论二维分辨率对比结果(积累时间 2.1 s)

	理论分辨率		所提算法成像实际分辨率	
	距离分辨率/m	方位分辨率/m	距离分辨率/m	方位分辨率/m
P1	2.20	0.48	2.21	0.49
P2	2.17	0.48	2.20	0.49
P3	2.16	0.48	2.20	0.49
P4	2.21	0.47	2.22	0.49
P5	2.20	0.47	2.21	0.49
P6	2.15	0.47	2.19	0.49

4.2 MEO 星机 BiSAR 的扩展面目标仿真实验

为了进一步证明改进等效单基算法的有效性,我们实施了扩展面目标的仿真实验,仿真参数与表 1 一致,发射机为 MEO SAR,接收机为高机动机载平台. 其中扩展面目标如图 19(a)所示,该船长 197 m,宽 33 m. 我们使用双基地射线跟踪的方法生成了扩展舰船目标数据的原始数据^[45],然后在 MEO 星机 BiSAR 的情况下对其进行成像. 传统等效单基算法的成像结果如图 19(b)所示, SAR 图像中的扩展面目标散焦严重. 这是由于 MEO SAR 的弯曲轨道特性导致,传统等效单基算法无

法校正 MEO 弯曲轨道带来的相位误差. 而我们所提改进的等效单基算法的成像如图 19(c)所示,我们可知,所提算法能使扩展目标很好地聚焦,其目标的轮廓和细节是清晰的,细节可以很容易识别,如桅杆和上层建筑.

为了定量评价改进的等效单基算法,我们计算了图 19(b)和图 19(c)的熵和图像对比度,结果如表 4 所示. 表 4 的结果表明,相较于传统的等效单基算法,所提算法聚焦的 SAR 扩展目标图像具有更低的图像熵和更高的图像对比度,表明所提算法的聚焦图像质量优

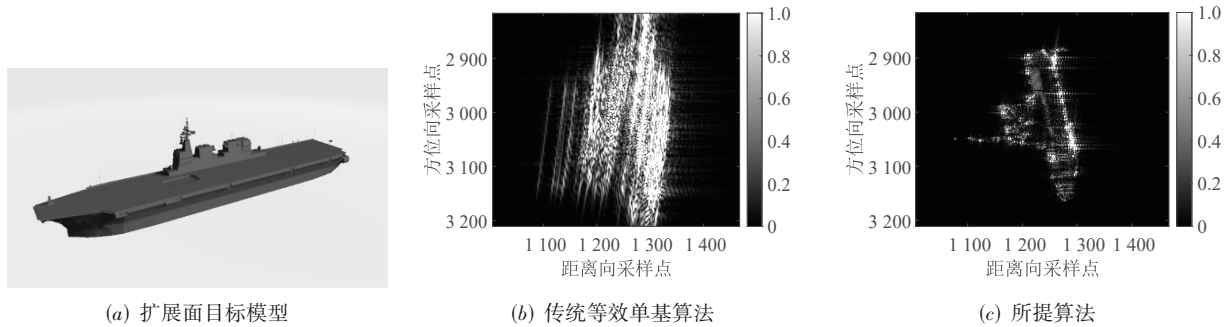


图 19 扩展面目标成像结果

越. 以上面目标的仿真实验结果表明, 所提算法可很好地去掉 MEO SAR 的轨道弯曲带来的相位误差. 对扩展面目标的实验进一步验证了所提算法的可行性.

表 4 扩展目标的成像评价对比

评价指标	图像熵	图像对比度
传统等效单基算法	3.650	0.754
所提算法	2.456	0.922

5 结论

针对中轨道星机双基 SAR 在高机动非线性轨迹、长传播时延及异构收发构型下所面临的成像聚焦性能下降问题, 本文提出一种基于改进等效单站模型的频域成像方法. 该方法结合 MEO 轨道平台, 具有运动速度快、加速度大、轨迹曲率强的动态特征, 并通过引入轨道弯曲补偿因子, 构建了改进的非“走停”等效斜距模型, 从而突破了传统等效单基方法在高机动性曲线轨迹建模上的局限性. 在此基础上, 本文进一步推导出更精确的 MEO 星机双基 SAR 二维频谱表达式, 对各分量进行了分析, 并针对相位误差进行了有效补偿. 仿真实验结果表明: 在点目标仿真中, 所提算法的峰值旁瓣比、积分旁瓣比及分辨率指标均与理论预期高度吻合; 在扩展面目标仿真中, 图像熵降低约 30%, 对比度提升约 20%, 显著抑制了 MEO SAR 复杂轨迹引起的散焦现象, 成像质量得到了明显改善.

参考文献

- [1] 武俊杰, 孙稚超, 吕争, 等. 星源照射双/多基地 SAR 成像[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 13-35.
WU J J, SUN Z C, LÜ Z, et al. Bi/multi-static synthetic aperture radar using spaceborne illuminator[J]. Journal of Radars, 2023, 12(1): 13-35. (in Chinese)
- [2] 孙文磊, 顾荣军, 王永海, 等. 非合作星机双基地 SAR 的回波检测方法研究[J]. 现代防御技术, 2025, 53(1): 140-146.
SUN W L, GU R J, WANG Y H, et al. Research on echo detection method of non-cooperative hybrid bistatic SAR[J]. Modern Defence Technology, 2025, 53(1): 140-146. (in Chinese)
- [3] 左伟华, 李东涛, 李财品, 等. 基于高分三号卫星的星载无人机双基前视 SAR 系统设计[J]. 空间电子技术, 2019, 16(2): 26-32.
ZUO W H, LI D T, LI C P, et al. System design for bistatic forward-looking SAR based on Gaofen-3 satellite as transmitter and unmanned aerial vehicle as receiver[J]. Space Electronic Technology, 2019, 16(2): 26-32. (in Chinese)
- [4] 崔畅, 董锡超, 胡程, 等. GEO 星机双基 SAR 时间同步误差对运动目标检测的影响建模与分析[J]. 信号处理, 2022, 38(1): 74-82.
CUI C, DONG X C, HU C, et al. The impact modeling and analysis of time synchronization error on moving target indication for GEO spaceborne-airborne bistatic SAR system[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(1): 74-82. (in Chinese)
- [5] 张博丰, 李雯雯, 刘霖. 星机双基 SAR 波束空间同步误差及性能分析[J]. 电子设计工程, 2024, 32(15): 50-55, 60.
ZHANG B F, LI W W, LIU L. Beam space synchronization error and performance analysis of spaceborne-airborne bistatic SAR[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(15): 50-55, 60. (in Chinese)
- [6] MATAR J, RODRIGUEZ-CASSOLA M, KRIEGER G, et al. MEO SAR: System concepts and analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 1313-1324.
- [7] HUANG L J, QIU X L, HU D H, 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.
- [8] 张永胜, 于春锐, 计一飞, 等. 一种基于频域解模糊的星载 P 波段全极化 SAR 法拉第旋转效应校正方法[J]. 电子学报, 2023, 51(3): 585-592.

- ZHANG Y S, YU C R, JI Y F, et al. A correction method of the faraday rotation effect based on the frequency-domain ambiguity-resolving in spaceborne P-band full-polarimetric SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(3): 585-592. (in Chinese)
- [9] MATAR J, RODRIGUEZ-CASSOLA M, KRIEGER G, et al. On the equivalence of LEO-SAR constellations and complex high-orbit SAR systems for the monitoring of large-scale processes[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 8500205.
- [10] ZHANG Y, REN H, LU Z, et al. Focusing of highly squinted bistatic SAR with MEO transmitter and high maneuvering platform receiver in curved trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, 62: 5227522.
- [11] REN H, LU Z, LI G P, et al. A high-resolution spotlight imaging algorithm via modified second-order space-variant wavefront curvature correction for MEO/HM-BiSAR[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(24): 4768.
- [12] XIE H T, YI S L, HE J F, et al. Low-frequency ultrawideband synthetic aperture radar foliage-concealed target change detection strategy based on image stacks[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 19817-19830.
- [13] XIE H T, ZHANG Y J, HE J F, et al. Foliage-concealed target change detection scheme based on convolutional neural network in low-frequency ultrawideband SAR images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 19302-19316.
- [14] XIE H T, HE J F, LU Z, et al. Two-level feature-fusion ship recognition strategy combining HOG features with dual-polarized data in SAR images[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4393.
- [15] ZHAO B, BAI X R, ZHOU F, et al. Analysis of the azimuth resolution of bistatic SAR[C]//2013 International Conference on Radar. Piscataway: IEEE, 2013: 407-411.
- [16] LIANG Y J, LIANG Y, ZHAO Y Y, et al. An extended time scaling algorithm based on the spatial inverse mapping for bistatic SAR imaging with complex trajectory[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 7216-7232.
- [17] ZHANG J J, JIN Z F, SONG Y F, et al. Backprojection operator-based one-stationary bistatic SAR sparse imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 4012405.
- [18] 丁金闪, Loffeld Otmar, Nies Holger, 等. 异构平台双基 SAR 成像的 RD 算法[J]. *电子学报*, 2009, 37(6): 1170-1174.
- DING J S, LOFFELD O, NIES H, et al. Focusing bistatic SAR data from heterogeneous platforms using the range Doppler algorithm[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(6): 1170-1174. (in Chinese)
- [19] WANG R, LOFFELD O, NEO Y L, et al. Extending Loffeld's bistatic formula for the general bistatic SAR configuration[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 74-84.
- [20] LI M H, TAN G W. 2-D frequency domain imaging of bistatic SAR based on Legendre polynomial expansion[C]//2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology. Piscataway: IEEE, 2019: 1653-1658.
- [21] XIONG T, LI Y C, LI Q, et al. Using an equivalence-based approach to derive 2-D spectrum of BiSAR data and implementation into an RDA processor[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(6): 4765-4774.
- [22] 杨悦, 张晓玲, 师君. 基于非等间隔校正的 SIFFT 星机联合 SAR 成像算法[J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2791-2796.
- YANG Y, ZHANG X L, SHI J. An imaging algorithm for spaceborne-airborne hybrid bistatic SAR based on non-uniformly-spaced correction of SIFFT[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2791-2796. (in Chinese)
- [23] ZHANG S Y, LIU F F, WANG Z Z, et al. A LEO spaceborne-airborne bistatic SAR imaging experiment[C]//2022 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Piscataway: IEEE, 2022: 1-5.
- [24] DING J B, LI Y C, LI M, et al. Focusing high maneuvering bistatic forward-looking SAR with stationary transmitter using extended keystone transform and modified frequency nonlinear chirp scaling[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 2476-2492.
- [25] SONG X, LI Y C, ZHANG T H, et al. Focusing high-maneuverability bistatic forward-looking SAR using extended azimuth nonlinear chirp scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5240814.
- [26] ZHONG H, ZHAO R H, SONG H N, et al. An improved

- imaging algorithm for high-resolution and highly squinted one-stationary bistatic SAR using extended nonlinear chirp scaling based on equi-sum of bistatic ranges[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(7): 1244-1248.
- [27] SUN Z C, WU J J, PEI J F, et al. Inclined geosynchronous spaceborne-airborne bistatic SAR: Performance analysis and mission design[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(1): 343-357.
- [28] SUN Z C, CHEN T F, SUN H R, et al. A novel frequency-domain focusing method for geosynchronous low-earth-orbit bistatic SAR in sliding-spotlight mode[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3178.
- [29] ZHANG S X, GAO Y X, XING M D, et al. Ground moving target indication for the geosynchronous-low earth orbit bistatic multichannel SAR system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 5072-5090.
- [30] ZHANG Y, XIONG W, DONG X C, et al. A novel azimuth spectrum reconstruction and imaging method for moving targets in geosynchronous spaceborne-airborne bistatic multichannel SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(8): 5976-5991.
- [31] SUN Z C, WU J J, LI Z Y, et al. Geosynchronous spaceborne-airborne bistatic SAR data focusing using a novel range model based on one-stationary equivalence[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(2): 1214-1230.
- [32] AN H Y, WU J J, TEH K C, et al. Nonambiguous image formation for low-earth-orbit SAR with geosynchronous illumination based on multireceiving and CAMP[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(1): 348-362.
- [33] TANG W R, HUANG B, ZHANG S S, et al. Focusing of spaceborne SAR data using the improved nonlinear chirp scaling algorithm[C]//IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 2020: 6555-6558.
- [34] WU Y F, HUANG L J, ZHANG B C, et al. A two-step nonstop-and-go phase compensation method for spaceborne SAR with high-resolution high-squint-angle and wide-swath[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 865-879.
- [35] BAI X R, ZHOU F, WANG Q, et al. Sparse subband imaging of space targets in high-speed motion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4144-4154.
- [36] ZHOU F, HU X X, JIAO Z K, et al. Frequency-domain imaging algorithm for SA-BiSAR based on azimuth de-aliasing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 4819-4828.
- [37] ZHANG Q H, WU J J, SONG Y, et al. Bistatic-range-Doppler-aperture wavenumber algorithm for forward-looking spotlight SAR with stationary transmitter and maneuvering receiver[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(3): 2080-2094.
- [38] 武俊杰, 孙稚超, 杨建宇, 等. 基于GF-3照射的星机双基SAR成像及试验验证[J]. *雷达科学与技术*, 2021, 19(3): 241-247.
- WU J J, SUN Z C, YANG J Y, et al. Spaceborne-airborne bistatic SAR using GF-3 illumination: Technology and experiment[J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(3): 241-247. (in Chinese)
- [39] GOLDSTEIN R, ROSEN P, and WERNER C. ERS-1bistatic radar images[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Pasadena: NASA, 1994: 1-7.
- [40] WALTERSCHEID I, ESPETER T, BRENNER A R, et al. Bistatic SAR experiments with PAMIR and TerraSAR-X: Setup, processing, and image results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(8): 3268-3279.
- [41] 李梦慧, 谭鸽伟, 杨晶晶, 等. 基于运动补偿和正交解耦合的双基SAR成像算法[J]. *信号处理*, 2021, 37(1): 75-85.
- LI M H, TAN G W, YANG J J, et al. An imaging algorithm for bistatic SAR based on the motion compensation and orthogonal decoupling[J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(1): 75-85. (in Chinese)
- [42] CHEN X X, SUN G C, XING M D, et al. Ground Cartesian back-projection algorithm for high squint diving TOPS SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(7): 5812-5827.
- [43] HU X, XIE H T, ZHANG L, et al. Fast factorized back-projection algorithm in orthogonal elliptical coordinate system for ocean scenes imaging using geosynchronous spaceborne-airborne VHF UWB bistatic SAR[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2215.

- [44] QIAN G Z, WANG Y. Monostatic-equivalent algorithm via Taylor expansion for BiSAR ship target imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 5200919.
- [45] 王成浩, 廖桂生, 许京伟. FDA-SAR 高分辨宽测绘带成像

- 距离解模糊方法[J]. 电子学报, 2017, 45(9): 2085-2091.
- WANG C H, LIAO G S, XU J W. Range ambiguity resolving method for high-resolution and wide-swath imaging with FDA-SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(9): 2085-2091. (in Chinese)

附录 A

所提改进等效单基模型 K 的具体表达式如下:

$$\begin{aligned}
 K_0 &= R_{r0} + R_{t0} - v_r \sin \theta_r (R_{r0} + R_{t0})/c + \frac{v_r^2 \cos^2 \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c)^2}{2R_{r0}} \\
 &\quad + \frac{v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c)^3}{2R_{r0}^2} \\
 K_1 &= k_{t1} - v_r \sin \theta_r (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1) \\
 &\quad + \frac{v_r^2 \cos^2 \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c) (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1)}{R_{r0}} \\
 &\quad + \frac{3v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c)^2 (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1)}{2R_{r0}^2} \\
 K_2 &= k_{t2} - \frac{v_r \sin \theta_r (2k_{t2} + v_r^2 \cos^2 \theta_r/R_{r0})}{2c} \\
 &\quad + \frac{v_r^2 \cos^2 \theta_r (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1)^2}{2R_{r0}} \\
 &\quad + \frac{2k_{t2} v_r^2 \cos^2 \theta_r (R_{r0} + R_{t0})/c + v_r^2 \cos^2 \theta_r/R_{r0}}{2cR_{r0}} \\
 &\quad + \frac{3v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (R_{r0} + R_{t0}) [k_{t1}/c - (v_r \sin \theta_r/c + 1)^2]}{2cR_{r0}^2} \\
 &\quad + \frac{3v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c)^2 (2k_{t2} + v_r^2 \cos^2 \theta_r/R_{r0})}{4cR_{r0}^2} \\
 K_3 &= k_{t3} - \frac{v_r \sin \theta_r (2k_{t3} + v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r/R_{r0}^2)}{2c} \\
 &\quad + \frac{v_r^2 \cos^2 \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c) (2k_{t3} + v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r/R_{r0}^2)}{2cR_{r0}} \\
 &\quad + \frac{v_r^2 \cos^2 \theta_r (2k_{t2} + v_r^2 \cos^2 \theta_r/R_{r0}) (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1)}{2cR_{r0}} \\
 &\quad + \frac{v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c)^2 (6k_{t3} + 3v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r/R_{r0}^2)}{4cR_{r0}^2} \\
 &\quad + \frac{3v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (R_{r0}/c + R_{t0}/c) (2k_{t2} + v_r^2 \cos^2 \theta_r/R_{r0}) (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1)}{4cR_{r0}^2} \\
 &\quad + \frac{v_r^3 \cos^2 \theta_r \sin \theta_r (k_{t1}/c - v_r \sin \theta_r/c + 1)^3}{4R_{r0}^2}
 \end{aligned}$$

作者简介



任 航 男,2000年3月出生于河南省新乡市.现为哈尔滨工业大学博士研究生.主要研究方向为星载照射源下双基地SAR成像算法及其运动补偿.中国电子学会会员编号:E190185699A.
E-mail: hangren@stu.hit.edu.cn



杨雪莹 女,2001年7月出生于黑龙江省齐齐哈尔市.现为哈尔滨工业大学硕士研究生.主要研究方向为星载/机载SAR成像与三维重构.
E-mail: xueyingang@stu.hit.edu.cn



张 云 女,1975年出生于黑龙江省虎林市.现为哈尔滨工业大学教授、博士生导师.主要研究方向为雷达信号处理、SAR成像、机器学习和遥感模式分析.
E-mail: zhangyunhit@hit.edu.cn



任 媛 女,2005年9月出生于河南省新乡市.现为华北水利水电大学电子工程学院本科生.主要研究方向为信号处理和SAR成像.
E-mail: 16638192761@163.com



吕 争 男,1985年10月出生于辽宁省阜新市.现为中国空间技术研究院遥感卫星总体部高级工程师.主要研究方向为微波遥感卫星总体设计和遥感图像应用.
E-mail: lvzheng_irss@spacechina.com



化青龙 男,1995年出生于安徽省阜阳市.现为哈尔滨工业大学副研究员.主要研究方向为雷达图像处理和深度学习网络框架.中国电子学会会员编号:E190031354M.
E-mail: huaqinglong@hit.edu.cn



李高鹏 男,1976年11月出生于湖北省荆州市.现为哈尔滨工业大学研究员、硕士生导师.主要研究方向为新体制雷达、阵列信号处理、智能信息融合与识别等.
E-mail: ligaopeng@hit.edu.cn