天基逆合成孔径雷达脉内脉间运动补偿及高分辨成像

江利中[1,2],罗怡宁[3],张邦杰[3],徐 刚[3],肖 磊[2]

(1.华中科技大学 人工智能与自动化学院,湖北 武汉 430074; 2.上海无线电设备研究所,上海 200090;
3.东南大学 毫米波全国重点实验室,江苏 南京 210096)

摘 要: 近年来,太空态势感知在军用和民用领域都得到了越来越多的关注。天基逆合成孔径雷达(SBISAR)能够实现对空间目标的高分辨成像,支撑部件提取、姿态估计、类型识别等后续任务,是太空态势感知的重要工具。然而,在SBISAR成像场景下,平台与空间机动目标间存在复杂的相对高速运动,传统距离-多普勒成像方法不再适用,必须进行运动补偿。本文针对高速径向速度下传统"停—走—停"模型失效、长相干积累时间内目标转速不一致的两个典型误差来源,分别设计了脉内运动及脉间运动补偿算法。首先,建立SBISAR成像的信号模型。然后,基于最小熵准则构建参数估计代价函数,通过估计目标对应回波信号的调频率,构造补偿项进而实现脉内补偿。同时,建立图像熵代价函数,在估计转动参数后,完成对目标转动的空变相位补偿。所提算法有效解决了天基高速机动背景下传统距离-多普勒成像方法的距离像展宽、方位散焦问题,实现了SBISAR对空间目标的高分辨成像。通过基于仿真数据的实验分析,验证了所提算法的有效性。

关键词: 天基逆合成孔径雷达(SBISAR); 脉内运动; 机动目标; 运动补偿; 最小熵

中图分类号: TN 958.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.03.019

引用格式: 江利中,罗怡宁,张邦杰,等.天基逆合成孔径雷达脉内脉间运动补偿及高分辨成像[J].上海航天(中英文),2024,41(3):176-186.

Intra-pulse and Inter-pulse Motion Compensation for High-resolution Space-borne Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging

JIANG Lizhong[1,2], LUO Yining[3], ZHANG Bangjie[3], XU Gang[3], XIAO Lei[2]

(1.School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China; 3.State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In recent years, space situation awareness has garnered increasing attention in both military and civilian fields. Space-borne inverse synthetic aperture radar (SBISAR) is an important tool for space situational awareness. It enables high-resolution imaging of space targets, and supports subsequent tasks such as component extraction, posture estimation, and type identification. However, in SBISAR imaging scenarios, complex and non-uniform high-speed relative motion exists between the platform and the space maneuvering targets, rendering traditional range-Doppler (RD) imaging methods ineffective. Therefore, motion compensation should be considered. In this paper, two typical motion errors are discussed, i.e., the failure of the traditional "stop-go-stop" model under high radial velocities and the inconsistent target rotation speeds within long coherent processing intervals (CPIs), and a specific algorithm is designed for intra-pulse and inter-pulse motion compensation. First, a signal model for SBISAR imaging is established. Then, based on the minimum entropy criterion, a parameter estimation cost function is constructed to estimate the chirp rate of

收稿日期: 2024-03-25; **修回日期:** 2024-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(62071113)

作者简介: 江利中(1986—),男,研究员,硕士,主要研究方向为目标探测技术。

通信作者: 徐 刚(1987—),男,教授,博士,主要研究方向为雷达成像技术。

the echo signal, and the obtained estimation is used to construct a compensation term for intra-pulse motion compensation. Similarly, an image entropy cost function is established to estimate the rotational parameters, achieving spatial-variant phase compensation for rotational motion. The proposed algorithm can effectively address the range extension and azimuth defocusing issues by traditional RD imaging algorithms in the case of high-speed maneuvering, and enables the high-resolution imaging of space targets by SBISAR. Through the experimental analysis based on the simulation data, the effectiveness of the proposed algorithm is validated.

Key words: space-borne inverse synthetic aperture radar (SBISAR); intra-pulse translation; maneuvering target; motion compensation; minimum entropy

0　引言

随着航天技术地不断发展和对空间资源地深入探索，太空领域的重要性在国家安全战略中日益凸显。太空态势感知(Space Situation Awareness, SSA)作为一种关键技术，通过监测、跟踪和识别空间中的物体(如人造卫星、各种天体和绕地球轨道运行的太空碎片)，获取空间事件基本信息，从而保障在轨卫星安全，获取潜在敌方信息，对维护国家安全具有不可忽视的重要意义[1-7]。太空探测任务的关键在于获取可用于后续处理的高分辨率图像。逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)具有提供高分辨率的运动目标图像的能力，且凭借其全天候、远距离、高精度的优点，在空间目标侦测识别、态势感知等领域具有显著优势[8-13]。然而，常见的地基ISAR平台固定，成像时间段受地球曲率及目标卫星重访时间限制。同时，受到大气层影响，雷达信号会发生强度衰减、信噪比减小的情况[9]。相比之下，天基逆合成孔径雷达(Space-Borne Inverse Synthetic Aperture Radar, SBISAR)利用运动的卫星或航天器作为平台，能够根据需要使雷达运动到有利的观测位置，实现对目标卫星的全天时跟踪和监视。同时，天基成像场景避免了大气层的干扰，雷达更容易实现高质量成像。此外，位于不同轨道的雷达可以从多个视角观测目标，有效突破地球曲率限制。因此，开展SBISAR高分辨成像技术研究具有重要的现实意义。

天基应用背景下的高分辨ISAR成像主要面临以下挑战。首先，空间目标与天基雷达的径向速度能高达数十马赫，回波模型不再符合“一步一停”假设[14-15]。由于目标速度非恒定，各脉冲回波将具有不同的调频率，其带来的相位误差需要在脉压前进行相关补偿。其次，由于方位分辨率由相对视角变化决定，为了提高方位分辨率往往需要增加相干积累时间。然而，空间目标的高机动和非合作特征通常导致相干积累时间(Coherent Processing Interval, CPI)内目标不同位置处散射点的多普勒响应非平稳，若直接使用距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法进行成像处理，会使方位向发生“散焦”，影响ISAR成像质量。为了解决上述难题，需要在成像过程中进行针对性的平动及转动补偿，从而实现精细化聚焦和高质量成像。

传统的平动补偿方法专注于目标回波间的差异，通常假设目标在一个脉冲时间内保持静止。在天基环境下，由于目标相对于雷达的高速运动，目标在一个脉冲时间内的位移变得不可忽视。这时，传统的平动补偿方法无法解决脉内运动的影响。因此，需要单独考虑脉内补偿。常见的脉内补偿方法思路是建立目标运动参数(主要是径向速度)与相位的多项式模型(主要是二次相位)之间的关系，先估计目标的运动参数，再利用估计参数构造补偿信号，通过与原信号的卷积运算实现脉内运动补偿，最终实现较高质量的成像[16-22]。由于高速目标的解调回波信号表现为多分量线性调频信号，且相位误差主要表现在二次项，只需要准确地估计单次回波信号调频率即可解算目标的瞬时运动速度，从而构建补偿项实现误差相位补偿。在选择估计方法时，需要综合考虑探测场景及目标特点，分析待估信号特征、算法运算量、结果准确度等因素。现有的调频率估计方法包括图像偏置(Map Drift, MD)法[23]、分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)法[24-26]、Radon-Wigner变换法[27-29]、解线性调频法[30]等。MD法在信噪比较低的情况下精度较差；FRFT法需要进行峰值点的二维搜索，在处理多次回波数据时，若需达到较高精度，所需运算量资源大，计算效率低；Radon-Wigner变换法适用于目标转动角速度较慢的情况，使用场景受限；而解线性频调法运算量较小，计算精度较

高,适合于处理多分量同调频率的信号,较其他参数估计方法具有明显优势。机动目标转动参数估计往往较为复杂,利用图像整体信息作为参数估计的判别依据是一种可行的思路[31]。

针对SBISAR机动目标成像,本文提出一种基于最小熵的脉内多普勒补偿和转动空变相位补偿算法。首先,建立SBISAR目标成像的信号模型。然后,在解线性调频的基础上利用最小熵准则构建参数估计代价函数,通过拟牛顿的共轭梯度下降方式求解估计目标调频率,构造补偿项进而实现脉内补偿。类似地,建立图像熵代价函数,在计算出估计参数后,完成对目标转动的空变相位补偿。最后,根据卫星轨道实际数据和仿真模型,通过实验分析验证所提出方法的有效性。

1 信号模型

SBISAR成像信号模型,SBISAR成像几何如图1所示,搭载雷达的卫星与空间目标位于同一范围但不同高度的轨道,通常探测卫星更高,两者在各自的轨道绕地球转动,当空间目标位于雷达的探测范围内,可以获得目标的回波信息。目标散射点$p(x_i,y_i)$在t_m时间瞬时转动角度为$\theta(t_\mathrm{m})$,下面对信号模型进行详细推导。

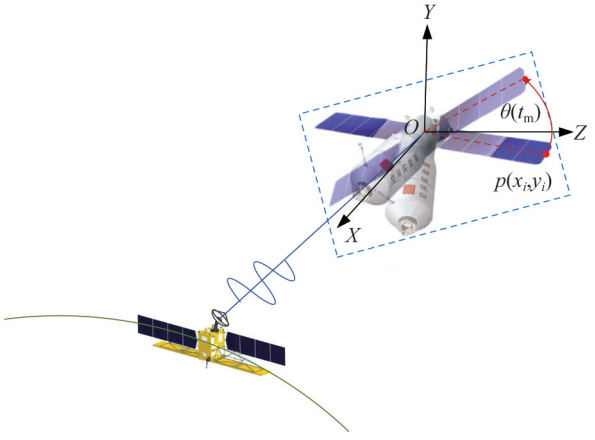


图1 SBISAR成像几何

Fig.1 SBISAR imaging geometry

假设SBISAR发射载频为f_c,带宽为B,脉冲持续时间和脉冲重复时间分别为T_p和T_a的LFM信号,空间目标对应的回波信号表达式为

$$s_\mathrm{r}(\hat{t},t_\mathrm{m})=\sum_{i=1}^{K}\sigma_i A\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}-2R_i/c}{T_\mathrm{p}}\right)\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_\mathrm{c}(t-2R_i/c)+\mathrm{j}\pi\gamma\left(\hat{t}-2R_i/c\right)^2\right) \tag{1}$$

其中,

$$\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}-2R_i/c}{T_\mathrm{p}}\right)=\begin{cases}1, & 0\leqslant\hat{t}\leqslant T_\mathrm{p}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

$$R_i=R_i(t_\mathrm{m})+v_m\hat{t}+\cos\theta(t_\mathrm{m})\cdot y_i+\sin\theta(t_\mathrm{m})\cdot x_i \tag{3}$$

式中:K为目标散射点个数;σ_i为散射点回波衰减系数;A为发射信号幅度;调频率$\gamma=B/T_\mathrm{p}$;$\hat{t}$为快时间;t_m为慢时间;全时间$t=\hat{t}+t_\mathrm{m}$;散射点$p(x_i,y_i)$与雷达在t_m时刻的距离为R_i;v_m为第m次回波目标相对于雷达的径向速度,利用泰勒级数展开$\theta(t_\mathrm{m})$并忽略高阶项,$\theta(t_\mathrm{m})\approx\omega t_\mathrm{m}+\dot{\omega}t_\mathrm{m}^2/2$为目标瞬时转动角度,$\omega$、$\dot{\omega}$分别为目标转速和转动加速度。

进一步地,R_i可表达为

$$R_i\approx R_i(t_\mathrm{m})+v_m\hat{t}+y_i-\frac{y_i\omega^2t_\mathrm{m}^2}{2}+x_i\cdot\left(\omega t_\mathrm{m}+\frac{\dot{\omega}t_\mathrm{m}^2}{2}\right)=R_{pi}+R_{ri} \tag{4}$$

式中:$R_{pi}=R_i(t_\mathrm{m})+v_\mathrm{m}\hat{t}$,$R_{pi}$为$t_\mathrm{m}$时刻目标中心点到雷达的径向距离,$R_{ri}=y_i-\frac{y_i\omega^2t_\mathrm{m}^2}{2}+x_i\left(\omega t_\mathrm{m}+\frac{\dot{\omega}t_\mathrm{m}^2}{2}\right)$为散射点到目标中心点的径向距离。

当雷达工作在Dechirp模式,并以雷达径向距离R_ref处的回波信号为参考时,参考信号可表示为

$$s_\mathrm{ref}(\hat{t},t_\mathrm{m})=\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}-2R_\mathrm{ref}/c}{T_\mathrm{a}}\right)\exp\left(\mathrm{j}2\pi f_\mathrm{c}(t-2R_\mathrm{ref}/c)+\mathrm{j}\pi\gamma\left(\hat{t}-2R_\mathrm{ref}/c\right)^2\right) \tag{5}$$

空间目标回波Dechirp后信号表达式为

$$\begin{aligned}s_\mathrm{d}(\hat{t},t_\mathrm{m})&=s_r(\hat{t},t_\mathrm{m})\cdot s_\mathrm{ref}^*(\hat{t},t_\mathrm{m})=\\&\sum_{i=1}^{K}\sigma_i A\cdot\mathrm{rect}\left(\frac{\hat{t}-2\left(R_{pi}+R_{ri}\right)/c}{T_\mathrm{p}}\right)\\&\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_{pi}+R_{ri}-R_\mathrm{ref}\right)\right)\\&\exp\left(\mathrm{j}4\pi\frac{\gamma}{c^2}\left(\left(R_{pi}+R_{ri}\right)^2-R_\mathrm{ref}^2\right)\right)\\&\exp\left(-\mathrm{j}4\pi\frac{\gamma}{c}\left(R_{pi}+R_{ri}-R_\mathrm{ref}\right)\hat{t}\right)\end{aligned} \tag{6}$$

忽略高阶较小项,信号可进一步表达为

$$s_{\mathrm{d}}(\hat{t},t_{\mathrm{m}})=s_{\mathrm{r}}(\hat{t},t_{\mathrm{m}})\cdot s_{\mathrm{ref}}^{*}(\hat{t},t_{\mathrm{m}})\approx\sum_{i=1}^{K}\sigma_i A\cdot \mathrm{rect}\left(\frac{(1-2v_m/c)\hat{t}-2(R_i(t_{\mathrm{m}})+R_{ri})/c}{T_{\mathrm{p}}}\right)\exp\left(-\mathrm{j}4\pi\left(\frac{\gamma}{c}\left(R_i(t_{\mathrm{m}})+y_i-\frac{y_i\omega^2t_{\mathrm{m}}^2}{2}+x_i\left(\omega t_{\mathrm{m}}+\frac{\dot{\omega}t_{\mathrm{m}}^2}{2}\right)-R_{\mathrm{ref}}\right)+\frac{v_m}{\lambda}\right)\hat{t}\right)\cdot\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_i(t_{\mathrm{m}})+y_i-\frac{y_i\omega^2t_{\mathrm{m}}^2}{2}+x_i\left(\omega t_{\mathrm{m}}+\frac{\dot{\omega}t_{\mathrm{m}}^2}{2}\right)-R_{\mathrm{ref}}\right)\right)\exp\left(-\mathrm{j}4\pi\frac{v_m}{c}\gamma\hat{t}^2\right)\quad(7)$$

由式(7)可见，脉冲内回波包络受到展缩因子$1-2v_m/c$的影响导致频谱畸变，同时相位由$\hat{t}$的一次项变为二次项，式(6)中相位对时间求导得到的与速度有关的频率称为脉内多普勒频率。其中，一次项会使散射点距离向脉压位置产生偏移，二次项会使散射点距离脉压后的主瓣被展宽，进而导致一维距离像的畸变，所以需要根据信号特性在脉冲压缩之前将信号重新补偿为多个单频信号的叠加。同时，式(7)的第二个相位项中由转动带来的相位误差项不可忽略，如果对式(7)沿方位向进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform，FFT)，最终的二维SBISAR图像会出现“散焦”现象，因此，需要对脉压后的信号进行转动误差相位校正。

2　运动补偿方法

2.1　脉内多普勒补偿

由于转动误差对脉内多普勒补偿过程影响较小，故在脉压前不考虑转动影响，将式(7)整理为

$$\begin{cases}s_{\mathrm{d1}}(\hat{t},t_{\mathrm{m}})=\sum_{i=1}^{K}\sigma_i A\cdot \mathrm{rect}\left(\dfrac{(1-2v_m/c)\hat{t}-2\left(R_i(t_{\mathrm{m}})+R_{ri}\right)/c}{T_{\mathrm{p}}}\right)\exp\left(\mathrm{j}2\pi\left(a_{m,i}+b_{m,i}\hat{t}+\dfrac{1}{2}c_m\hat{t}^2\right)\right)\\ a_{m,i}=-\dfrac{2\left(R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}\right)}{\lambda}\\ b_{m,i}\approx-\dfrac{2\gamma\left(R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}\right)}{c}-\dfrac{2v_m}{\lambda}\\ c_m\approx-\dfrac{4v_m\gamma}{c}\end{cases}\quad(8)$$

从式(8)可以看出，在第m次脉冲作用期间，SBISAR回波信号经过解线性调频后的输出信号不再是多分量单频信号，而是一个包含多分量的线性调频信号。

对多分量LFM信号进行脉内多普勒补偿，基本方法是通过估计信号的调频率，构造补偿信号，然后与原信号相乘以消除误差项，以下是具体的补偿算法。

1) 基于最小熵的速度估计

目标的脉内运动通常导致距离包络的展宽，相应地引起距离像熵值增加。因此，本节在解线性调频的基础之上以最小熵方法进行调频率估计，根据调频率解算速度，并构造补偿项对每个回波逐次进行相位补偿。在这里，式(8)的多分量LFM信号具有相同的调频率，这确保了在进行相关操作时能获得准确的估计值。首先，构造相位补偿因子与式(8)共轭相乘。当补偿项的调频率接近式(8)的调频率c_m时，多分量LFM信号近似为多分量正弦波信号，相应的包络具有较小的香农熵，当熵值达到全局最小时，可以获得调频率的准确估计。为了快速逼近实际值，采用牛顿迭代算法以加速收敛。具体方法如下。

建立相位补偿因子$\tilde{\eta}(n)$为

$$\tilde{\eta}(n)=\exp\left(\mathrm{j}\pi\tilde{a}T_{\mathrm{s}}^2n^2\right),n=0,1,\cdots,N-1\quad(9)$$

式中：$\tilde{a}$为调频率c_m的估计值；N为信号采样数；T_{s}为采样时间间隔。

将式(9)代入离散化的式(8)，得：

$$\tilde{s}_{\mathrm{d1},m}(n)=\sum_{i=1}^{K}\sigma_i A\cdot \mathrm{rect}\left(\frac{(1-2v_m/c)nT_{\mathrm{s}}-2\left(R_i(t_{\mathrm{m}})+R_{ri}\right)/c}{T_{\mathrm{p}}}\right)\cdot\exp\left(\mathrm{j}2\pi(a_{m,i}+b_{m,i}nT_{\mathrm{s}})\right)\cdot\exp\left(\mathrm{j}\pi(c_m-\tilde{a})T_{\mathrm{s}}^2n^2\right)\quad(10)$$

计算t_{m}对应的单次回波脉冲$\tilde{s}_{d1,m}(n)$沿快时间傅里叶变换的频谱，其离散傅里叶变换结果为$\tilde{s}_m[p]$，建立参数估计的最小熵代价函数为

$$\tilde{a}=\underset{\tilde{a}}{\mathrm{argmin}}\sum_{p=1}^{N}-\frac{\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}{I_a}\ln\frac{\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}{I_a}=\underset{\tilde{a}}{\mathrm{argmin}}\left(-\frac{1}{I_a}\sum_{p=1}^{N}\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2\ln\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2+\ln I_a\right)=\underset{\tilde{a}}{\mathrm{argmin}}\,E(\tilde{a})\quad(11)$$

式中：$E(\tilde{a})=-\sum_{p=1}^{N}\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2\ln\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2$，根据 Parseval定理，相位误差并不影响信号的总能量，此处用常量I_a表示。

由于空间目标相对雷达的径向速度是一个较大的区间，为了平衡算法的收敛速度和估值精度，采用基于拟牛顿的共轭梯度下降法进行求解，并且使用两级搜索的策略提高算法在宽速度范围条件下的收敛速度：

步骤 1 先对c_m以大搜索步长λ对整个速度区间进行一维遍历搜索，得到c_m的粗略估值$\tilde{\alpha}_0$；

步骤 2 以$\tilde{\alpha}_0$为初始值，利用牛顿迭代搜索，得到参数的精确估计，其迭代过程为

$$\tilde{\alpha}_{k+1}=\tilde{\alpha}_k+\Delta a_k \tag{12}$$

$$\Delta a_k=-\lambda_k\cdot\left(\frac{\partial^2\boldsymbol{E}(\tilde{a})}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k^2}\right)^{-1}\Bigg|_{\tilde{a}=\tilde{a}_k}\cdot\frac{\partial\boldsymbol{E}(\tilde{a})}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k}\Bigg|_{\tilde{a}=\tilde{a}_k} \tag{13}$$

式中：$\tilde{\alpha}_{k+1}$、$\tilde{\alpha}_k$分别为第$k+1$次和第k次迭代对调频率c_m的估计值；$\frac{\partial\boldsymbol{E}(\tilde{a})}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k}$、$\frac{\partial^2\boldsymbol{E}(\tilde{a})}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k^2}$分别为$\boldsymbol{E}(\tilde{a})$关于$\boldsymbol{a}_k$的梯度向量和Hessian矩阵；$\lambda_k$为搜索步长。

$$\frac{\partial\boldsymbol{E}(\tilde{a})}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k}=-\sum_{k=1}^{N}\left(1+\ln\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2\right)\cdot\frac{\partial\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}{\partial\tilde{\alpha}_k} \tag{14}$$

$$\frac{\partial\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}{\partial\tilde{\alpha}_k}=2Re\left(\tilde{s}^*{}_m[p]\cdot\frac{\partial\left|\tilde{s}_m[p]\right|}{\partial\tilde{\alpha}_k}\right) \tag{15}$$

同时，

$$\frac{\partial^2\boldsymbol{E}(\tilde{a})}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k^2}=-\sum_{k=1}^{N}\left(1+\ln|\tilde{s}_m[p]|^2\right)\cdot\frac{\partial^2|\tilde{s}_m[p]|^2}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k^2}+\frac{1}{\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}\cdot\left(\frac{\partial\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k}\right)^2 \tag{16}$$

$$\frac{\partial^2\left|\tilde{s}_m[p]\right|^2}{\partial\tilde{\alpha}_k^2}=2Re\left(\tilde{s}^*{}_m[p]\cdot\frac{\partial^2\tilde{s}_m[p]}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k^2}\right)+2\left|\frac{\partial\tilde{s}_m[p]}{\partial\tilde{\boldsymbol{\alpha}}_k}\right|^2 \tag{17}$$

当$\tilde{a}$趋近于c_m时，熵值达到最小，对应的调频率估计值$\tilde{a}$作为最终的估计输出。此时，速度估计值：

$$\tilde{v}_m\approx\frac{\tilde{\alpha}\cdot c}{4\gamma} \tag{18}$$

2）相位补偿

根据速度估计值构造相位补偿项：

$$h=\exp\left(\mathrm{j}4\pi\frac{\tilde{v}_m}{c}\gamma\hat{t}^2\right)\cdot\exp\left(\mathrm{j}4\pi\frac{\tilde{v}_m}{\lambda}\hat{t}\right) \tag{19}$$

将式(19)与式(7)相乘即可消除脉内多普勒误差，令$\Gamma=1-2v_m/c$，将补偿后的第m次脉冲沿距离向对$\hat{t}$做傅里叶变换：

$$s_{\mathrm{d2}}(f_{\mathrm{r}})=\sum_{i=1}^{K}\sigma_i A\cdot\frac{T_{\mathrm{p}}}{\Gamma}\sin c\left(\frac{T_{\mathrm{p}}}{\Gamma}\left(f_{\mathrm{r}}+2\frac{\gamma}{c}\left(R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}\right)\right)\right)\cdot\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi}{\Gamma}\cdot\frac{R_i(t_{\mathrm{m}})}{c}\cdot\left(f_{\mathrm{r}}+2\frac{\gamma}{c}\left(R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}\right)\right)\right)\cdot\exp\left(-\mathrm{j}4\pi\left(\frac{R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}}{\lambda}\right)\right) \tag{20}$$

由式(20)可知，散射点距离脉压位置为

$$f_{\mathrm{r}}=-2\frac{\gamma}{c}\left(R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}\right) \tag{21}$$

将式(21)代入式(20)得到补偿后第m次回波脉压信号：

$$s_{\mathrm{d3}}(f_{\mathrm{r}})=\sigma_i A\cdot\frac{T_{\mathrm{p}}}{\Gamma}\sin c\left(\frac{T_{\mathrm{p}}}{\Gamma}\left(f_{\mathrm{r}}+2\frac{\gamma}{c}\left(R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}\right)\right)\right)\cdot\exp\left(-\mathrm{j}4\pi\frac{R_i(t_{\mathrm{m}})-R_{\mathrm{ref}}}{\lambda}\right) \tag{22}$$

2.2 转动空变相位补偿

在式(22)的基础上，考虑转动误差，回波信号距离像可表示为

$$S_{\mathrm{d4}}(f_{\mathrm{r}},t_{\mathrm{m}})=\sum_{m=1}^{M}s_{\mathrm{d3}}(f_{\mathrm{r}},t_{\mathrm{m}})\cdot\exp\left(\mathrm{j}4\pi\frac{y_i\omega^2t_{\mathrm{m}}^2}{2\lambda}\right)\cdot\exp\left(-\mathrm{j}\frac{4\pi x_i}{\lambda}\cdot\left(\omega t_{\mathrm{m}}+\frac{\dot{\omega}t_{\mathrm{m}}^2}{2}\right)\right) \tag{23}$$

可以看出，转动相位误差具有时变性，且与散射中心的位置有关，因此，产生了距离-方位空变相位误差。

将式(23)离散化，近似假设$\sin c(\hat{t})\approx\delta(\hat{t})$，则图像中第$(n,m)$个元素可以写成：

$$s_{\mathrm{d5}}(n,m)\approx\sum_{m=1}^{M}\rho(n,m)\cdot\exp\left(\mathrm{j}\pi\left(y_i+\Delta y\right)\tau\cdot\left(\frac{m}{P_{\mathrm{RF}}}\right)^2\right)\cdot\exp\left(-\mathrm{j}\frac{2\pi}{M}(m+\Delta k)\cdot\left(m+\frac{\beta m^2}{2P_{\mathrm{RF}}}\right)\right) \tag{24}$$

式中：M为方位向离散点数；P_{RF}为脉冲重复频率；

$t_{\mathrm{m}}=\dfrac{m}{P_{\mathrm{RF}}}\in\dfrac{[-M/2+1:m/2]}{P_{\mathrm{RF}}}$；$(\Delta k,\Delta y)$对应目标改变的旋转中心；$\tau=\dfrac{2f_c\omega^2}{c}$；$\beta=\dfrac{\dot{\omega}}{\omega}$；定义变量$\boldsymbol{\varphi}=\left[\tau\ \beta\ \Delta y\ \Delta k\right]$。

假设$\tilde{\boldsymbol{\varphi}}=\left[\tilde{\tau}\ \tilde{\beta}\ \Delta\tilde{y}\ \Delta\tilde{k}\right]$为参数估计值，进行校正后的SBISAR图像可以表示为

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})=&\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}s_{\mathrm{d5}}(n,m)\cdot\\&\exp\left(-\mathrm{j}\pi\left(y_i+\Delta\tilde{y}\right)\tilde{\tau}\cdot\left(\frac{m}{P_{\mathrm{RF}}}\right)^2\right)\cdot\\&\exp\left(\mathrm{j}\frac{2\pi}{M}\left(m+\Delta\tilde{k}\right)\cdot\left(m+\frac{\tilde{\beta}m^2}{2P_{\mathrm{RF}}}\right)\right)\end{aligned}\tag{25}$$

式中：$\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})$为利用参数$\tilde{\boldsymbol{\varphi}}$校正后的SBISAR图像。建立参数估计的最小熵代价函数：

$$\begin{aligned}\tilde{\boldsymbol{\varphi}}=&\\\underset{\tilde{\boldsymbol{\varphi}}}{\operatorname{argmin}}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}-\frac{\left|\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})\right|^2}{I_a}\ln\frac{\left|\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})\right|^2}{I_a}=&\\\underset{\tilde{\boldsymbol{\varphi}}}{\operatorname{argmin}}\left(-\frac{1}{I_a}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\left|\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})\right|^2\ln\left|\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})\right|^2+\right.&\\\left.\ln I_a\right)=\underset{\tilde{\boldsymbol{\varphi}}}{\operatorname{argmin}}E\left(\tilde{\boldsymbol{\varphi}}\right)&\end{aligned}\tag{26}$$

利用拟牛顿的坐标梯度下降法进行求解，通过固定其他参数，循环求解$\tilde{\boldsymbol{\varphi}}$中的参数，在达到收敛后，可以获得最终的参数估计和成像结果。整个成像过程如图2所示。

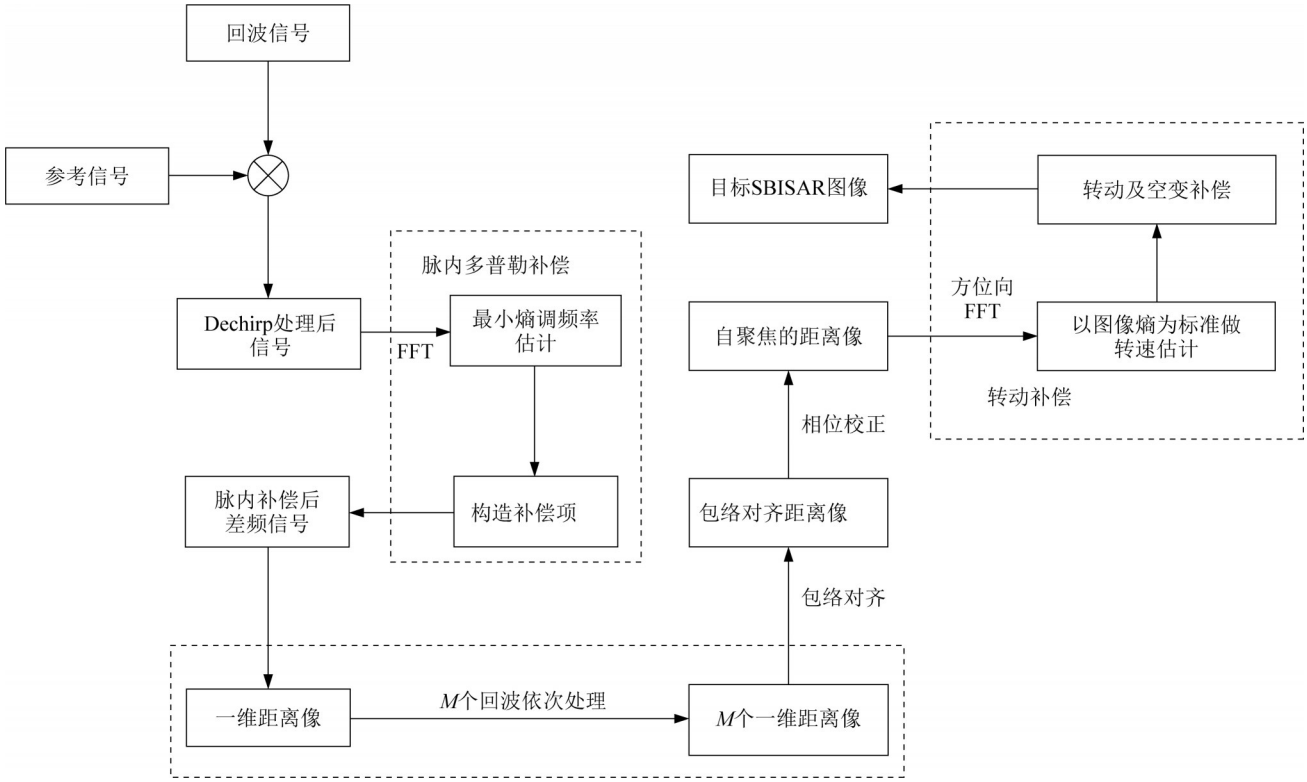


图2　RD成像算法流程

Fig.2　Flow chart of the RD imaging algorithm

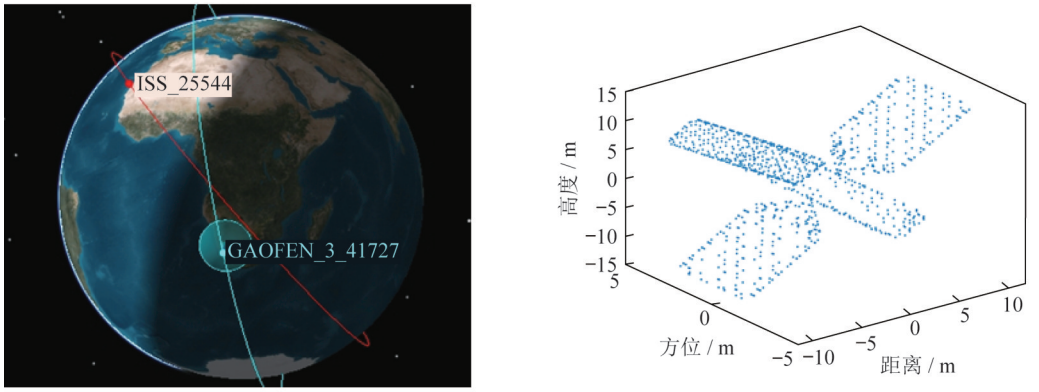
2.3　算法复杂度分析

本文提出的最小熵算法的计算量主要表现在两次补偿迭代过程中梯度向量和Hessian矩阵的求解。脉内补偿过程中，第1步扫描点数远小于信号长度，可忽略不计，第2步一轮迭代需要进行2次FFT和$2N$次复乘，运算复杂度为$\mathrm{O}(2N\cdot\log_2 N)$，假设迭代次数为$K_1$，则计算运算复杂度为$\mathrm{O}(2K_1N\cdot\log_2 N)$，脉间转动补偿过程中，每次迭代需要更新4个未知参数，而求解$\dfrac{\partial\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})}{\partial\varphi}$和$\dfrac{\partial^2\tilde{\mu}(n,m;\tilde{\boldsymbol{\varphi}})}{\partial\varphi^2}$可通过固定chirp值的chirp-Fourier变换来实现，因此，假设迭代次数是K_2，运算复杂度为$\mathrm{O}(8K_2N\cdot M^2)$。

3 实验分析

通过实验分析验证本文算法补偿空间目标复杂运动的有效性。首先,通过建立点回波模型详细分析算法的有效性及性能优势。随后,通过建立电磁散射模型,并利用实测数据验证在存在噪声、干扰和其他未知因素的实际环境下,算法仍能够发挥作用。实验均在一台主频 3.40 GHz,内存 192 GB 电脑平台上运行,仿真软件为MATLAB R2023b、STK11.0和ANSYS Electromagnetics Suite。

点散射模型仿真实验:利用高分三号(GF-3)卫星和国际空间站的卫星星历(Two-Line Orbital Element,TLE)数据,通过STK软件导入TLE数据,观测初始历元时刻为世界标准时间(Universal Time Coordinated,UTC)2023 年 7 月 13 日 04:00:00,持续 1 周时间,获取 GF-3 卫星对空间站观测的轨道数据,仿真建立 GF-3 卫星对国际空间站的观测模型,如图 3(a)所示。根据轨道数据,计算各脉冲时间内空间目标相对于雷达平台的径向速度,代入回波模型,完成雷达回波信号建模。空间目标轨道参数见表 1,雷达系统仿真参数设置见表 2。仿真模型和卫星的散射点模型如图 3(b)所示。



(a) 成像几何仿真　　(b) 卫星目标点散射仿真模型

图 3　成像几何与目标散射点模型

Fig.3　Imaging geometry and target scattering point model

表 1　空间目标轨道参数

Tab.1　Orbital parameters of the space target

参数	数值
远地点/km	417.765 4
真近点角/(°)	61.771 3
偏心率/(°)	0.000 5
轨道倾角/(°)	51.642 3
近地点幅角/(°)	76.542 4
升交点赤经/(°)	349.194 0

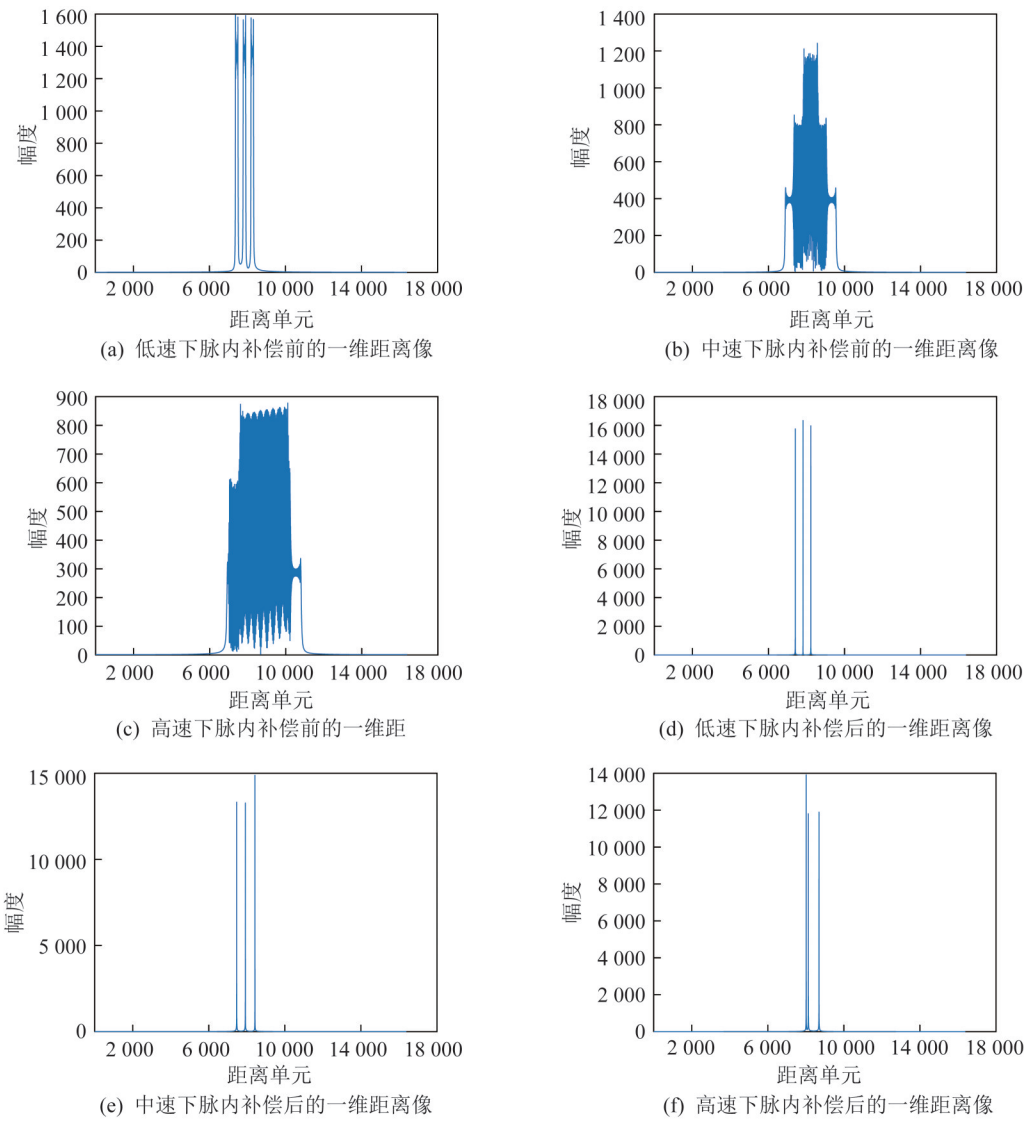
表 2　点散射仿真雷达参数

Tab.2　Parameters of the radar in the point scatter simulation

参数	数值
载频/GHz	10
带宽/GHz	1
脉冲宽度/μs	51.2
信号采样频率/MHz	10
脉冲重复频率/Hz	500
积累时间/s	1.792

单个回波脉冲速度补偿前后的距离像如图 4 所示,脉冲包含了 3 个散射点信息。其中,图 4(a)和图 4(d)为观测到目标时间第 7.17 s,径向速度约 300 m/s 的图像;图 4(b)和图 4(e)为选取时间第 21.05 s,径向速度约 2 400 m/s 的图像;图 4(c)和图 4(f)为选取时间第 39.42 s,径向速度约 8 000 m/s 的图像。3 种运动状态分别对应于低速、中速和高速。作为对比,图 4(a)~图 4(c)未进行脉内补偿,而图 4(d)、图 4(e)和图 4(f)经过了脉内补偿。从图像对比可以看出,经过速度补偿后,频谱聚焦性能得到了提高,距离偏移也得到了修正。补偿基本上消除了高速运动目标对距离像的影响。用不同信噪比条件下的均方根误差(Root Mean Square Error,RMSE)为评估不同方法脉内运动估计效果的指标,定义为

$$R_{\mathrm{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\left\|v_m-\tilde{v}_m\right\|_2^2} \tag{27}$$



(a) 低速下脉内补偿前的一维距离像　(b) 中速下脉内补偿前的一维距离像

(c) 高速下脉内补偿前的一维距　(d) 低速下脉内补偿后的一维距离像

(e) 中速下脉内补偿后的一维距离像　(f) 高速下脉内补偿后的一维距离像

图 4　单次回波一维距离像

Fig.4　One-dimensional range profile of a single echo

添加高斯白噪声，并设置－10～10 dB 的不同信噪比条件，分别使用 MD、FRFT 和最小熵法估计单次回波调频率，每个信噪比条件进行 20 次蒙特卡罗实验，结果取平均值如图 5 所示。可以看出最小熵法在不同信噪比条件下具有最优的估计误差，同时保证了鲁棒性。

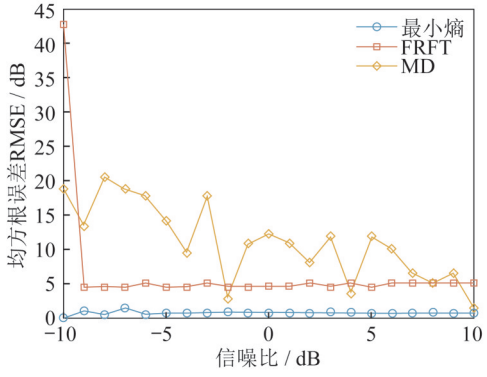
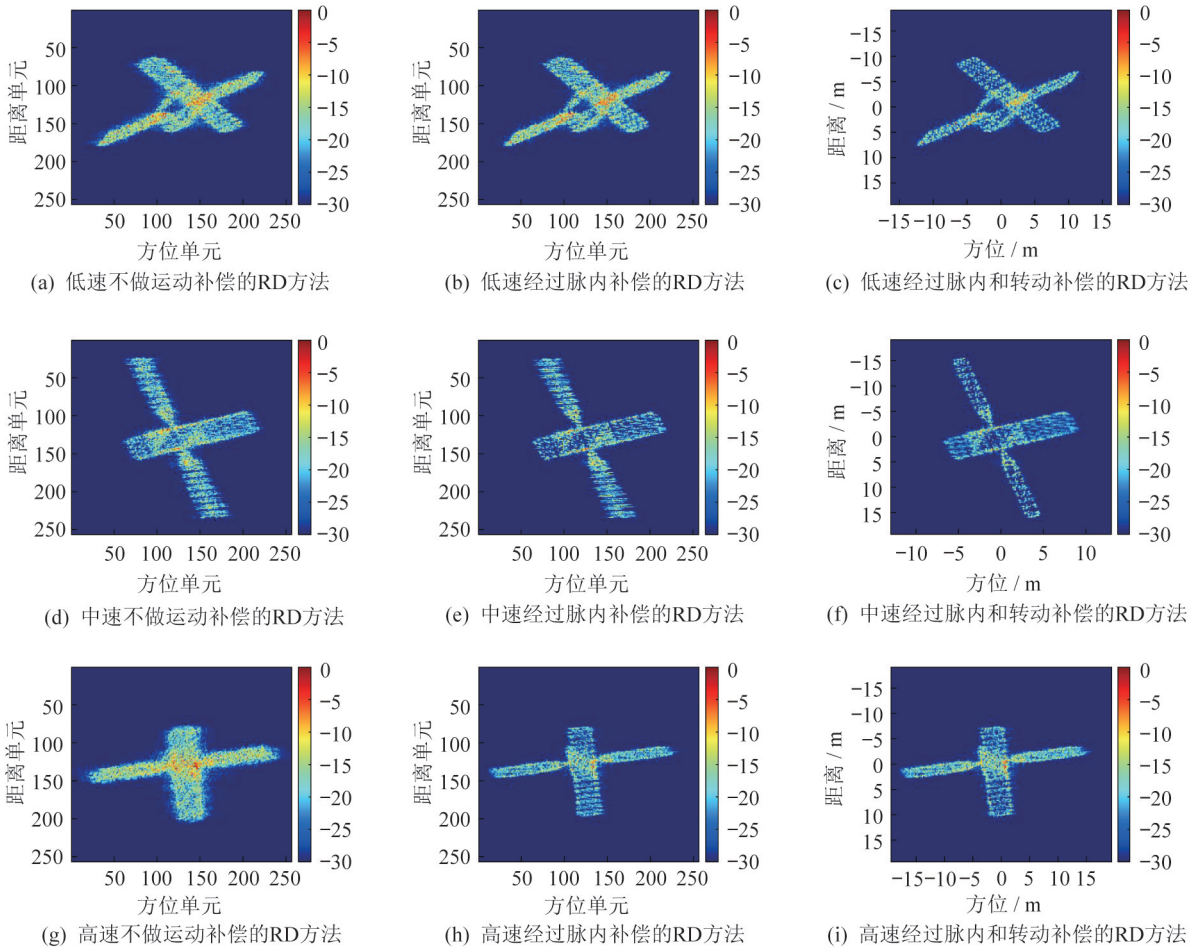


图 5　不同方法的 RMSE 性能表现

Fig.5　RMSE performances of different methods

实验采用互相关法、特显点法和 Keystone 分别完成包络对齐、初相校正和越距离徙动，最后使用所提出的最小熵法完成目标转速估计和补偿，成像结果如图 6 所示。与上面实验条件一致，图 6(a)～图 6(c)目标为低速运动状态，图 6(d)～图 6(f)为中速运动，图 6(g)～图 6(i)为高速运动。由图可以看出，在经过两次补偿后，图像散焦明显改善，成像质量有较大提高，同时，补偿算法每次实验处理 896 次回波，分别用时 122.750 s，124.735 s，121.442 s。



(a) 低速不做运动补偿的RD方法 (b) 低速经过脉内补偿的RD方法 (c) 低速经过脉内和转动补偿的RD方法

(d) 中速不做运动补偿的RD方法 (e) 中速经过脉内补偿的RD方法 (f) 中速经过脉内和转动补偿的RD方法

(g) 高速不做运动补偿的RD方法 (h) 高速经过脉内补偿的RD方法 (i) 高速经过脉内和转动补偿的RD方法

图 6 基于点散射仿真模型的距离-多普勒成像结果对比

Fig.6 Comparison of the RD imaging results using echo of point scatter simulation

为了进一步验证算法在复杂的实际环境中仍然具有作用,本文分别使用电磁仿真模型和雷达测量的B-727飞机目标数据进行实验。电磁仿真轨道数据为西安地面雷达观测卫星数据中的一段,仿真雷达参数见表3,仿真卫星模型散射模型如图7所示。

表 3 电磁仿真雷达参数

Tab.3 Parameters of the radar in the electromagnetic simulation

参数	数值
载频/GHz	17
带宽/GHz	2
脉冲重复频率/Hz	50
孔径时间/s	2.56

图8(a)为距离-多普勒成像结果,图8(b)为本文方法,可以看到本文方法聚焦效果更好。使用美国海军研究实验室提供的波音B727飞机的观测数据测试算法性能[32],该数据包含256个连续脉冲,载频9 GHz,带宽为150 MHz,脉冲重复频率为20 kHz,总相干处理时间为0.012 8 s。图8(c)为距离-多普勒成像结果,图8(d)为本文算法结果。处理电磁仿真数据和实测数据均能在30次迭代内收敛,其中电磁仿真实验用时5.850 s,实测数据实验用时3.516 s。

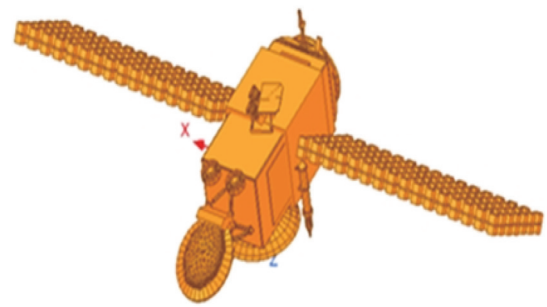


图 7 卫星目标电磁仿真模型

Fig.7 Model of satellite target in electromagnetic simulation

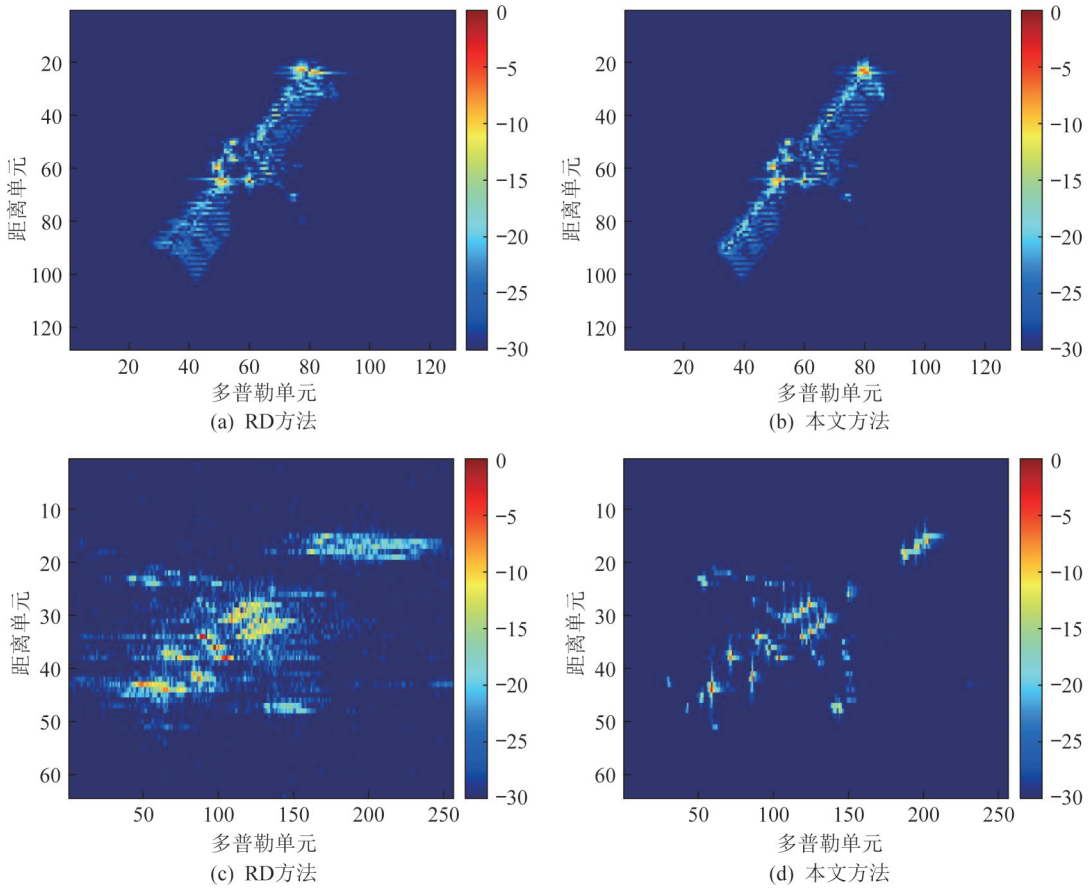


图 8　基于电磁仿真模型的距离-多普勒成像结果对比

Fig.8　Comparison of the RD imaging results using echo of electromagnetic simulation

4　结束语

针对SBISAR成像背景，本文提出了一种处理高速平动及转动相位误差的补偿方法。首先，根据低轨卫星的运动特性，利用STK仿真建立了SBISAR成像的几何模型。其次，建立了SBISAR成像的信号模型，并推导了两种运动误差的存在形式。在此基础之上，提出了一种基于最小熵准则的参数估计方法，并采用拟牛顿方法加速收敛过程，分别在脉压前后实现对运动误差相位的补偿。最后，通过仿真实验验证了该算法的有效性，并获得了聚焦良好的二维SBISAR图像。

参考文献

[1] MARCHETTIE, STOVEA G, HOAREE G, CHERNIAKOV M, et al.Space-based sub-THz ISAR for space situational awareness-concept and design [J].IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(3):1558-1573.

[2] SHAO S, ZHANG L, LIU H. High-resolution ISAR imaging and motion compensation with 2-D joint sparse reconstruction[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(10):6791-6811.

[3] 周拥军，羌丽，李元祥. 国外高分辨率对地成像观测系统现状与发展趋势[J]. 飞控与探测，2021(5):1-8.

[4] 王辉，付玉龙，李金亮. 毫米波SAR卫星未来发展展望[J]. 上海航天(中英文)，2022，39(3):1-13.

[5] 何英姿，杜航，张海博. 基于深度学习的非合作目标感知研究进展[J]. 飞控与探测，2023(1):1-14.

[6] 李彬，苏汉生，贺峥光，等. 临近空间高速飞行器测控关键技术分析与总结[J]. 导弹与航天运载技术，2022(4):137-142.

[7] 杨自鹏，刘敏，张群，等. 天基在轨组装技术研究趋势及应用设想[J]. 导弹与航天运载技术(中英文)，2023(6):31-36.

[8] LI D, GUI X, LIU H, SU J, et al. An ISAR imaging algorithm for maneuvering targets with low SNR based on parameter estimation of multicomponent quadratic FM signals and nonuniform FFT[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote

Sensing,2016,9(12):5688-5702.
[9] 陈卫标,刘继桥,侯霞,等.大气环境监测卫星激光雷达技术[J].上海航天(中英文),2023,40(3):13-20.
[10] 李瑭,刘保国,汤达,等.天基为主的空间站测控通信模式[J].上海航天(中英文),2023,40(5):134-139.
[11] 李洪昌,卢晓东,姚雨晗,等.高超飞行器的天基多尺度异步平台协同探测方法[J].飞控与探测,2022(6):55-60.
[12] ZHANG S, LIU Y, LI X. Micro-doppler effects removed sparse aperture ISAR imaging via low-rank and double sparsity constrained ADMM and linearized ADMM[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021,30:4678-4690.
[13] DU H, NI P, CHEN J, et al. Integrated convolution network for ISAR imaging and target Recognition[J]. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems,2023,4(4):431-437.
[14] GUO B F, SHANG C X. Research on bistatic ISAR coherent imaging of space highspeed moving targe[C]// IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications.Ottawa,ON,Canada:IEEE,2014:205-209.
[15] 黎湘.复杂运动目标雷达成像研究进展[J].中国科学:信息科学,2021,51(2):305-324.
[16] 曾朝阳,王辉.W波段UAVMISAR实时成像运动补偿方法[J].上海航天(中英文),2020,37(1):63-69.
[17] 尹红飞.天基逆合成孔径激光雷达成像算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
[18] MARTORELLA M, ACITO N, BERIZZI F. Statistical CLEAN technique for ISAR imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (11):3552-3560.
[19] MUNOZ F, PEREZ M. Non-uniform rotation rate estimation for ISAR in case of slant range migration induced by angular motion [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2007, 1(4):251-260.
[20] MORRISON R L, DO M N, MUNSON D C. SAR image autofocus by sharpness optimization: A theoretical study[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(9): 2309-2321.
[21] XU G, XING M D, XIA X G, et al. Enhanced ISAR imaging and motion estimation with parametric and dynamic sparse bayesian learning [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2017, 3(4): 940-952.
[22] THOMAS K J, ALAA K A. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus [C]// IEEE International Conference on Image Processing. Atlanta: IEEE, 2006, 5: 645-648.
[23] XING M, WU R, BAO Z. High resolution ISAR imaging of highspeed moving targets[J]. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2005, 152(2): 58-67.
[24] 阮航,吴彦鸿,叶伟.基于FRFT-CLEAN的机动目标逆合成孔径激光雷达成像算法[J].电子与信息学报,2013,35(7):1540-1546.
[25] ZHANG S, SUN S, ZHANG W, et al. High-resolution bistatic ISAR image formation for high-speed and complex-motion targets [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(7): 3520-3531.
[26] LI Z, ZHANG X, YANG Q, et al. Hybrid SAR-ISAR image formation via joint FrFT-WVD processing for BFSAR ship target high-resolution imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-13.
[27] LI L, ZOU M, JIN G. GB-spaceborne bistatic ISAR high-speed compensation method for small space targets [C]// IEEE International Conference on Signal and Image Processing. Suzhou, China: IEEE, 2022: 681-685.
[28] ZHAO J, WANG Y. A cross-range scaling method for ISAR based on 2D MUSIC and WVD-hough transform [C]//IEEE International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. Hangzhou, China: IEEE, 2023: 1-3.
[29] 常雯,李增辉,杨健.基于迭代Radon-Wigner变换的FMCW-ISAR目标速度估计及速度补偿[J].清华大学学报(自然科学版),2014,54(4):464-468.
[30] 冯维婷,刘峥,戴奉周.连续波雷达的多目标检测与参数估计[J].雷达科学与技术,2005(3):144-147.
[31] 邬俊,徐刚.ISAR机动目标联合高分辨成像和参数估计[J].信号处理,2018,34(11):1355-1361.
[32] WU W, XU S, HU P, et al. Inverse synthetic aperture radar imaging of targets with complex motion based on optimized non-uniform rotation transform [J]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 593.