

基于稀疏约束的星载 SAR 距离模糊抑制方法

王昕, 张宇, 叶啟

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

摘要: 星载合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 观测距离较远, 在任意时刻接收到的回波数据中不仅存在当前脉冲的反射回波, 还可能混入前几个脉冲反射的电磁信号, 进而造成距离模糊。为解决星载 SAR 观测距离模糊问题, 结合稀疏重建与双线性调频技术, 并利用循环迭代处理实现回波信号的距离模糊抑制。该方法首先对发射信号进行双线性调制, 再采用循环迭代算法对模糊区信号进行稀疏重建与分解, 从而实现混合回波数据的模糊杂波抑制和高精度聚焦成像。点目标仿真实验验证该方法的有效性与鲁棒性。

关键词: 合成孔径雷达; 距离模糊抑制; 稀疏重建; 双线性调频

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.WLW24032

A range ambiguity suppression method in spaceborne SAR based on sparse reconstruction

Wang Xin, Zhang Yu, Ye Qi

College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract: The range ambiguity problem in spaceborne synthetic aperture radar (SAR) observations was addressed. Due to the long observation distance, the echo data received at any instant not only contained the reflected echo of the current pulse but also might be mixed with electromagnetic signals reflected from the previous several pulses, thereby causing range ambiguity. To solve the range ambiguity problem in spaceborne SAR observations, sparse reconstruction and bilinear chirp technology were combined, and cyclic iterative processing was utilized to achieve range ambiguity suppression of the echo signals. In this method, the transmitted signal was first subjected to bilinear modulation, and then a cyclic iterative algorithm was adopted to perform sparse reconstruction and decomposition of the signals in the ambiguity region, thereby achieving ambiguity clutter suppression and high-precision focused imaging of the mixed echo data. The effectiveness and robustness of the method were verified by point target simulation experiments.

Key words: synthetic aperture radar, range ambiguity suppression, sparse reconstruction, bilinear frequency modulation

0 引言

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 具有全天时、全天候的工作能力, 能够在极端天气 (如大雾、大雪) 下对目标进行观测成像^[1-5], 已在军事、航空航天、民用等领域得到了广泛的应用。

SAR 通过发射电磁波信号并在接收时对回波进行处理, 可以实现对地面物体的二维高分辨率成像。不同目标反射回波在时延 (距离向) 和多普勒相位历史 (方位向) 上存在较大差异, 据此可对目标进行分辨。机载 SAR 系统中, 当前脉冲发射信号对应的回波通常会在当前时刻返回; 而星载 SAR 平台

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者:

基金项目:

Foundation Item:

轨道高度高、测绘斜距大,在脉冲工作体制下,远距离目标的回波往返时延可能超过脉冲重复周期(pulse repetition interval, PRI),导致雷达在接收时可能混入前几个发射脉冲照射远区目标所产生的回波。接收数据重排后,远距离目标回波对应的时间延迟位置出现偏差,从而产生距离模糊^[6-9]。严重的距离模糊现象常会导致成像质量明显下降,无法实现目标的有效识别和定位。

近年来, SAR 距离模糊抑制成为研究热点之一。现有研究一般从系统设计和信号处理两个方面抑制距离模糊。在系统设计方面^[8-9],主要通过设计天线接收方式^[10-14]和采用正交编码^[15-17]来抑制。例如,文献[10]对发射脉冲施加方位向相位编码,并对接收脉冲进行相应解调,使距离模糊部分相对于不模糊部分产生一定的偏移,从而可通过滤波器将其消除。然而,该方法具有一定的局限性,只能使部分距离模糊发生偏移,仍然有部分距离模糊无法消除。文献[11]结合方位向相位编码(azimuth phase coding, APC)和数字波束形成(digital beam forming, DBF)技术: APC 技术使部分距离模糊信号在多普勒域发生平移,而有用信号不受影响;同时使用多个通道接收回波,使模糊信号和有用信号在俯仰维产生分离,并在多普勒域使用滤波器分离模糊能量、重建方位向信号,取得了很好的距离模糊抑制效果。文献[16]提出将方位向相位编码和正负调频体制相结合,通过方位向相位编码可以使点目标和分布式目标的距离模糊发生偏移,再通过正负调频体制有效地散焦距离模糊,从而对点目标和分布式目标均能有效地抑制距离模糊。文献[17]提出采用基于线性调频的正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)波形来减轻高重频 SAR 中的距离模糊。由于 OFDM 波形相互正交,接收时能够分离出当前波形而去除其他波形,从而能够完全消除距离模糊信号而保留不模糊信号。此方法的不足之处在于,很难找到多个 OFDM 波形。在信号处理方面,则是对回波图像进行后期处理来抑制距离模糊^[18-24]。例如,文献[18]提出结合稀疏重建和匹配滤波抑制距离模糊:在多普勒域对回波图像模糊区域中的强射点进行稀疏重建并处理,获得模糊图像;从原图像中去除模糊图像后,再经匹配滤波处理,即可得到距离模糊抑制后的图像。在场景稀疏的前提下,该方法相较于匹

配滤波算法具有更好的距离模糊抑制能力。此外,文献[25]-[30]利用模糊区域目标的相位历史差异来实现抑制处理。

星载 SAR 照射场景较大,其中存在沙漠、海面等后项散射较弱区域,这些区域的地面信号强度较弱,难以被单一雷达站点有效检测。加之观测距离远、接收到的信号衰减严重,其产生的距离模糊一般来自模糊区的能量较强的目标回波。为此,本文面向场景稀疏假设,推导了稀疏重建所需要的观测矩阵,并提出了基于稀疏重建和双线性调频的距离模糊抑制处理算法。首先,介绍了 SAR 回波模型及 SAR 回波处理流程;其次,基于距离压缩后的回波信号推导了稀疏重建所需的观测矩阵;然后,基于观测矩阵与循环迭代算法实现距离模糊图像的重建;最后,通过匹配滤波算法得到距离模糊抑制后图像,并利用点目标仿真验证了本文所提方法的有效性。相对于经典稀疏重建算法,本文所提方法只需要对模糊点目标所占场景进行重建,大大降低了计算量。

1 信号模型与发射波形设计

SAR 数据采集空间几何关系如图 1 所示。SAR 在高度 H 处, t_0 、 t_1 、 t_2 为飞行过程中的不同时刻,相邻两时刻相隔一个 PRI; R_0 和 R_1 分别为主像区和第一模糊区的瞬时斜距。

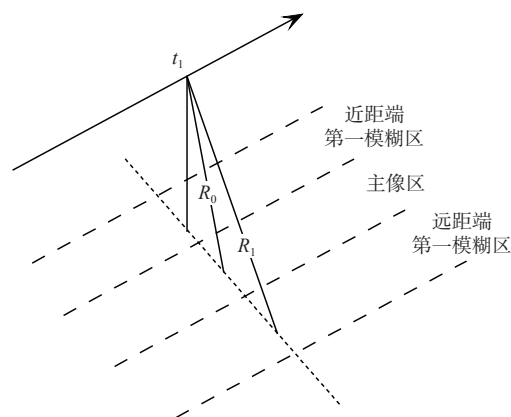


图1 SAR数据采集空间几何关系

SAR 回波数据处理流程为: 首先, SAR 交替发射双线性调频信号, 并接收回波数据, 依次完成距离向脉冲压缩、距离徙动校正与方位向傅里叶变换; 随后, 构建距离模糊信号的观测矩阵, 采用循环迭代算法对距离模糊信号做方位一维稀疏重建,

完成距离模糊信号估计；接着，将回波信号与重建信号相减，实现距离模糊信号消除；最后，利用匹配滤波器进行方位向脉冲压缩，经方位向傅里叶变换后，获得去除模糊信号后的有用信号。其流程图如图2所示。

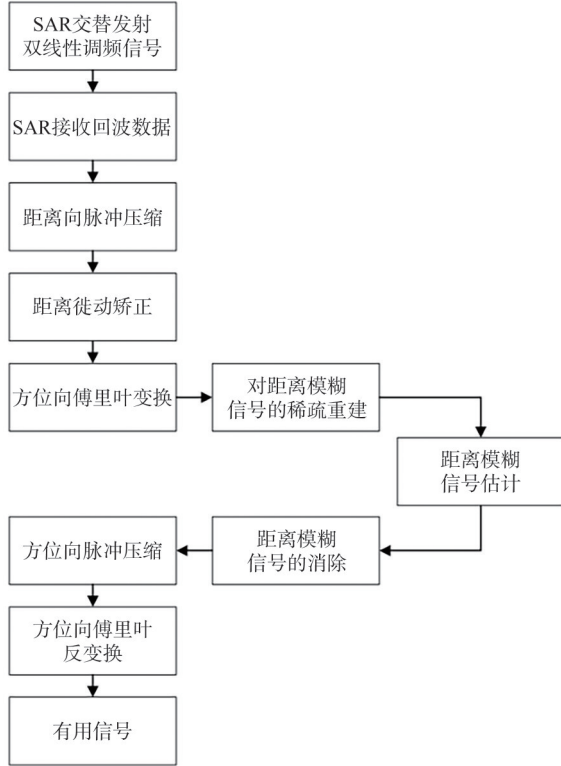


图2 SAR回波数据处理流程图

SAR在 t_0 、 t_1 时刻分别发射线性调频信号后，接收到回波 $s_{\text{down}}(\tau, t)$ 、 $s_{\text{up}}(\tau, t)$ ：

$$s_{\text{down}}(\tau, t) = w_a(t) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R(t)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[-j\pi k_r(\tau - \tau_d(t))^2\right] \quad (1)$$

$$s_{\text{up}}(\tau, t) = w_a(t) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R(t)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[j\pi k_r(\tau - \tau_d(t))^2\right] \quad (2)$$

其中， τ 表示快速时间， t 表示方位时间， $w_a(t)$ 表示方位向天线方向图， $R(t)$ 表示雷达和目标之间的方位向时变距离， λ 表示发射信号的波长， k_r 表示调频斜率， $\tau_d(t)$ 表示发射时间延迟， τ_p 表示发射脉冲持续时间。

若SAR在 t_1 时刻接收回波数据，则不仅会接收到 $s_{\text{up}}(\tau, t)$ ，还会接收到 t_0 发射的 $s_{\text{down}}(\tau, t)$ ，从而引入距离模糊。在此情形下，需要对接收到的信号数

据进行距离向脉冲压缩。可以采用匹配滤波器进行距离向脉冲压缩，滤波器 $H_{\text{up}}(f)$ 表达式为：

$$H_{\text{up}}(f) = \exp\left[j\pi \frac{f^2}{k_r}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{f}{B_r}\right] \quad (3)$$

其中， rect 为矩形窗函数， f 表示距离向频率， B_r 表示发射脉冲带宽。

此时，经处理后的距离模糊信号 $s_{\text{down}}(\tau, t)$ 可表示为：

$$s_{\text{down, defocus}}(\tau, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot w_a(t) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R(t)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[-j\pi \frac{k_r}{2}(\tau - \tau_d(t))^2\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_d(t)}{2\tau_p}\right] \quad (4)$$

经分析，距离模糊信号与有用信号相比，在脉冲压缩处理后振幅降低了 $1/\sqrt{2}$ ，等价于信号强度被抑制了3 dB；同时，信号持续时间加倍，距离向线性调频仍然存在，调制率减半至 $\frac{k_r}{2}$ 。这一结果可以证明正负调频信号能够有效抑制距离模糊信号的能量。

2 稀疏重建处理

有第1节的论述可知，在SAR成像过程中，对回波信号进行距离向脉冲压缩和距离徙动校正后，回波数据中的距离模糊数据会发生散焦，但仍然会留存一部分难以消除的距离模糊数据。因此，本节将采用稀疏重建方法对残留距离模糊数据进行恢复，该方法得以实现的前提是场景满足稀疏性假设。

SAR接收到的总回波信号由主像分量与模糊像分量构成，即

$$S_E = S_{\text{MI}} + S_{\text{BI}} + N_{\text{noise}} \quad (5)$$

其中， S_{BI} 表示SAR发射信号照射到地面模糊区域的物体后产生的回波信号； S_{MI} 表示雷达发射信号照射到地面主像区目标产生的回波信号； N_{noise} 表示雷达成像过程中所引入的高斯白噪声； S_E 表示雷达发射信号后接收到的当前时刻所有回波信号。

经过距离徙动校正、方位向傅里叶变换后，主像信号与模糊像信号均可以表示为方位一维信号。主像信号可表示为：

$$s(f_\eta; R_c) = \sigma W_a(f_\eta) \exp \left[-j \frac{4\pi R_c}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2V_r} \right)^2} \right] \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r} \right)^2} \quad (6)$$

模糊像信号可表示为:

$$s(f_\eta; R_c) = \sigma W_a(f_\eta) \exp \left[-j \frac{4\pi R_c \pm \frac{c \cdot n}{2PRF}}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2V_r} \right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r} \right)^2} \right] \quad (7)$$

其中, f_η 表示多普勒频率, PRF 为脉冲重复频率, V_r 表示 SAR 的飞行速度, R_c 表示波束照射中心照射目标时的斜距, f_{dc} 表示方位频率轴的中心频率, n 为模糊数, σ 表示物体的后向散射系数, $W_a(\cdot)$ 表

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi_{1,1,BI-} & \phi_{1,2,BI-} & \cdots & \phi_{1,N,BI-} & \phi_{1,1,BI+} & \phi_{1,2,BI+} & \cdots & \phi_{1,N,BI+} \\ \phi_{2,1,BI-} & \phi_{2,2,BI-} & \cdots & \phi_{2,N,BI-} & \phi_{2,1,BI+} & \phi_{2,2,BI+} & \cdots & \phi_{2,N,BI+} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{M,1,BI-} & \phi_{M,2,BI-} & \cdots & \phi_{M,N,BI-} & \phi_{M,1,BI+} & \phi_{M,2,BI+} & \cdots & \phi_{M,N,BI+} \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中, $\phi_{m,n}$ 表示第 n 个目标处、第 m 个离散采样点的回波信号, 矩阵元素表达式为:

$$\phi_{m,n,BI-} = \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_c - \frac{c}{2PRF} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2V_r} \right)^2} \right] \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{\eta m}}{2V_r} \right)^2} - j2\pi f_{\eta m} \eta_{c|n} \quad (11)$$

$$\phi_{m,n,BI+} = \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_c + \frac{c}{2PRF} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{dc}}{2V_r} \right)^2} \right] \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_{\eta m}}{2V_r} \right)^2} - j2\pi f_{\eta m} \eta_{c|n} \quad (12)$$

其中, $f_{\eta m}$ 表示在多普勒域坐标轴的第 m 个位置的频率数值, $m=1, 2, 3, \dots, M$; $\eta_{c|n}$ 表示在方位向上 RAS 的波束中心照射地面物体的时刻, $n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

3 基于循环迭代算法的 SAR 信号处理

在场景稀疏条件下对 SAR 回波数据进行稀疏重建, 需要选择 k 个能精确重建回波的数据, 这里的 k 值为 k 个最集中的稀疏解。为此, 稀疏重建过程采用循环迭代算法实现。为实现距离模糊信号的稀疏重建, 本节利用正交匹配追踪^[28] (orthogonal

示方位向的幅度和频率包络。

对比式 (6)、式 (7) 可以看出, 模糊像对应的距离与真实目标距离存在偏差, 模糊目标与非模糊目标的相位历史存在多普勒中心差异。

对于产生距离模糊的区域, 在同一个距离门内, 点目标形成的向量可以表示为:

$$X_{BI-} = (\sigma_{1,BI-} \ \sigma_{2,BI-} \ \cdots \ \sigma_{N,BI-})^T \quad (8)$$

$$X_{BI+} = (\sigma_{1,BI+} \ \sigma_{2,BI+} \ \cdots \ \sigma_{N,BI+})^T \quad (9)$$

其中, X_{BI-} 表示近距端第一模糊区距离模糊信号, X_{BI+} 表示远距端第一模糊区的距离模糊信号。

如果能够构造观测矩阵, 则可对上述信号进行求解, 满足关系式: 模糊区回波图像 S_{BI} = 观测矩阵 $\phi \times$ 需要求解的值 X 。因此, 观测矩阵的构建是求解的关键, 文献[5]已经给出该观测矩阵。

matching pursuit, OMP) 算法进行稀疏成像处理。

如第 2 节所述, 主像及其模糊像可以表示为方位一维信号, 使用 OMP^[29-30] 算法对模糊性的方位一维进行稀疏重建。OMP 算法的输入包括三个部分: 一是观测矩阵 $A = \phi\psi$, 其中, A 的维度为 $N_a \times N_r$; 二是目标向量 b , 即待重构的向量, 其维度为 $N_r \times 1$; 三是迭代次数 K , 即对目标向量 b 求解时需要迭代的次数。

将 OMP 算法应用于 SAR 稀疏成像中, 具体步骤如下:

(1) 构建距离模糊信号的观测矩阵 (如第 1 节所述);

(2) 将观测矩阵 ϕ 、信号 y 、迭代次数 K 作为参数输入 OMP 算法;

(3) 更新残差 r_i , 当迭代次数达到 K 时, 停止迭代, 得到模糊信号的向量 X 的估计值 $\hat{X}$;

(4) 将各次迭代得到的列向量 $\hat{X}$ 组合得到距离模糊信号矩阵;

(5) 将距离模糊信号矩阵乘以观测矩阵, 得到稀疏重建的距离模糊信号 S_{BIS} 。

利用匹配滤波器对经稀疏重建的距离模糊信号进行方位向脉冲压缩, 方位向滤波器 $H_{az}(f_\eta)$ 可表示为:

$$H_{az}(f_\eta) = \exp \left[j \frac{4\pi R_c}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_\eta}{2V_r} \right)^2} \right] \quad (13)$$

再对式(13)进行方位向傅里叶反变换,得到距离模糊抑制后的成像结果。

下面对经典稀疏重建方法、文献[16]算法,以及本文方法的计算复杂度进行对比。首先,对RAS发射信号后的回波进行采样,距离向的采样点数为 N ,方位向的采样点数为 M ;在RAS成像场景中,对观测场景的方位向进行采样,采样点数为 N_p ,并对距离向进行采样,采样点数为 N_q ;求解每一个信号所需要的迭代步数 I 。据此,匹配滤波算法计算复杂度可以表示为 $O(MM\log(N_p N_q))$;稀疏重建算法的计算复杂度可表示为 $O(IMN N_p N_q)CL_1 = O(IMN N_p N_q)$ 。文献[16]算法假设模糊点目标占总场景的比例为 P ,其计算复杂度可以表示为 $O(IMN N_p N_q/P)$ 。其中, P 值不是一个固定的数值,而是由卫星参数、雷达参数决定的。本文所提算法的计算复杂度为 $O(IMN N_p N_q/Q)$,其中, Q 为散焦模糊点目标占总场景的比例。对于星载SAR来说,由于其平台高度较高、成像场景大,使用经典稀疏重建算法计算量很大;而本文算法仅需对散焦模糊能量所占总场景进行稀疏重建,减小了计算量,但略大于文献[25]提出的算法。

4 仿真实验

为验证本文所提方法的有效性,本节开展仿真实验,分析不同场景下该方法的距离模糊抑制性能。仿真实验所用RAS参数见表1。

表1 仿真实验所用SAR参数

参数	数值
发射信号载频/GHz	9.6
信号带宽/MHz	100
脉冲重复频率/Hz	5 000
场景中心斜距/km	600
雷达飞行速度/(m·s ⁻¹)	7 000
合成孔径时间/s	0.7

实验共构建三类仿真场景:场景一包含1个点目标和两个距离模糊目标,场景二包含1个点目标和100个距离模糊的点目标,场景三包含1个矩形扩展目标和100个距离模糊的点目标,以此验证本文方法的鲁棒性。三类场景均采用LFM信号作为

发射波形进行回波仿真:场景一设置2个距离模糊点目标,场景二、场景三均设置100个距离模糊点目标,分别围绕主点目标与矩形扩展目标分布。基于含由距离模糊目标的原始回波成像,以此完成原始成像、单独稀疏重建成像、仅采用双线性调频信号成像,以及采用双线性调频联合稀疏重建成像。三类场景对应的成像结果如图3、图4、图5所示。

综合三类场景的对比结果可见,采用双线调频与稀疏重建图像的距离模糊抑制效果均优于两种方法单独使用;且该方案在单点目标、多点模糊目标及扩展目标等不同目标形态下均保持有效,验证了本文方法的有效性与鲁棒性。

5 结束语

本文提出了一种基于稀疏约束的星载SAR距离模糊抑制方法。该方法采用双线性调频信号作为发射信号,借助双线性调频体制对模糊能量进行抑制;随后构建距离模糊信号对应的观测矩阵,并使用循环迭代算法对距离模糊信号的方位一维信号进行稀疏重建;最后将原始回波信号与重建得到的模糊像信号相减,实现了模糊能量的去除。本文方法以场景稀疏为前提,具有很好的距离模糊抑制性能。从点目标仿真实验的成像结果可以看出,与稀疏重建和匹配滤波算法相比,该方法能够进一步抑制模糊,且具有较好的适用性与鲁棒性。

参考文献:

- [1] Elachi C. Spaceborne radar remote sensing: applications and techniques[M]. New York: IEEE Press, 1988.
- [2] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar[M]. New York: Wiley, 1991.
- [3] Henderson F M, Lewis A J. Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar[M]. 3rd. Wiley, 2013.
- [4] Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, 1(1): 6-43.
- [5] Costas J P. A study of a class of detection waveforms having nearly ideal range: Doppler ambiguity properties[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(8): 996-1009.
- [6] Long D, Ulaby F. Microwave radar and radiometric remote sensing[M]. Ann Arbor Michigan: University of Michigan Press, 2014.
- [7] Lan L, Liao G S, Xu J W, et al. Control and utilization of range-dependent beam pattern with waveform diverse array radars[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(12): 1-31.
- [8] Harger R O. Synthetic aperture radar systems: theory and design [M].

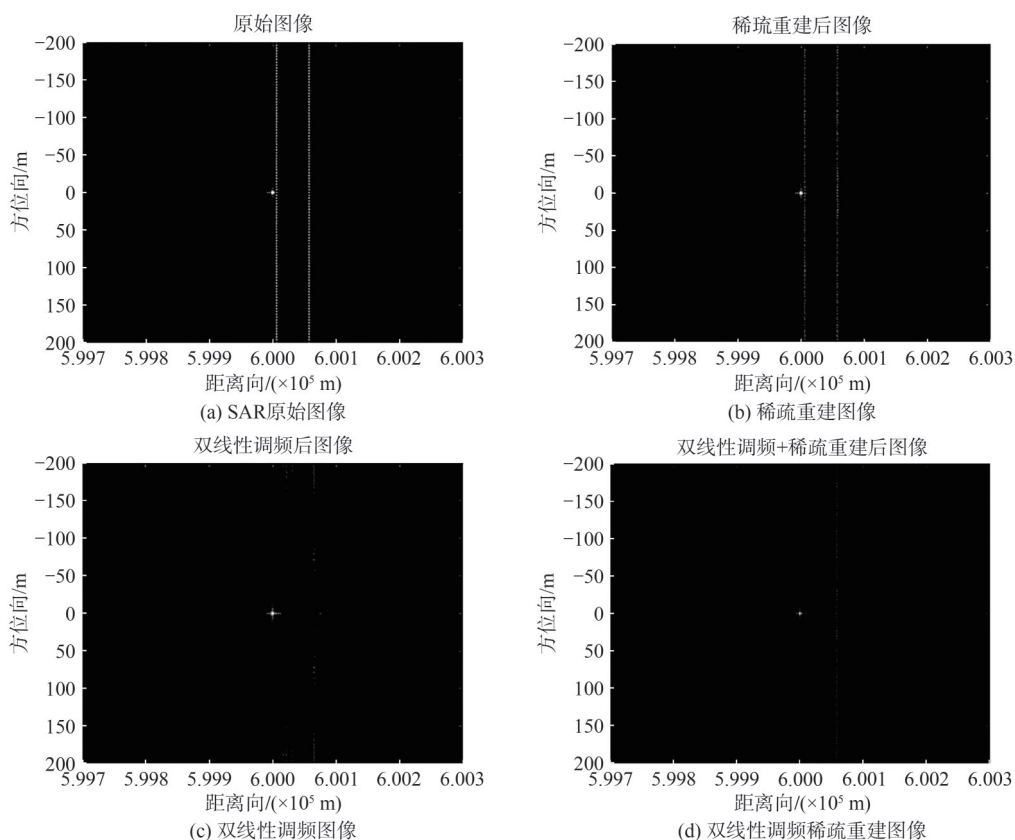


图3 场景一成像结果

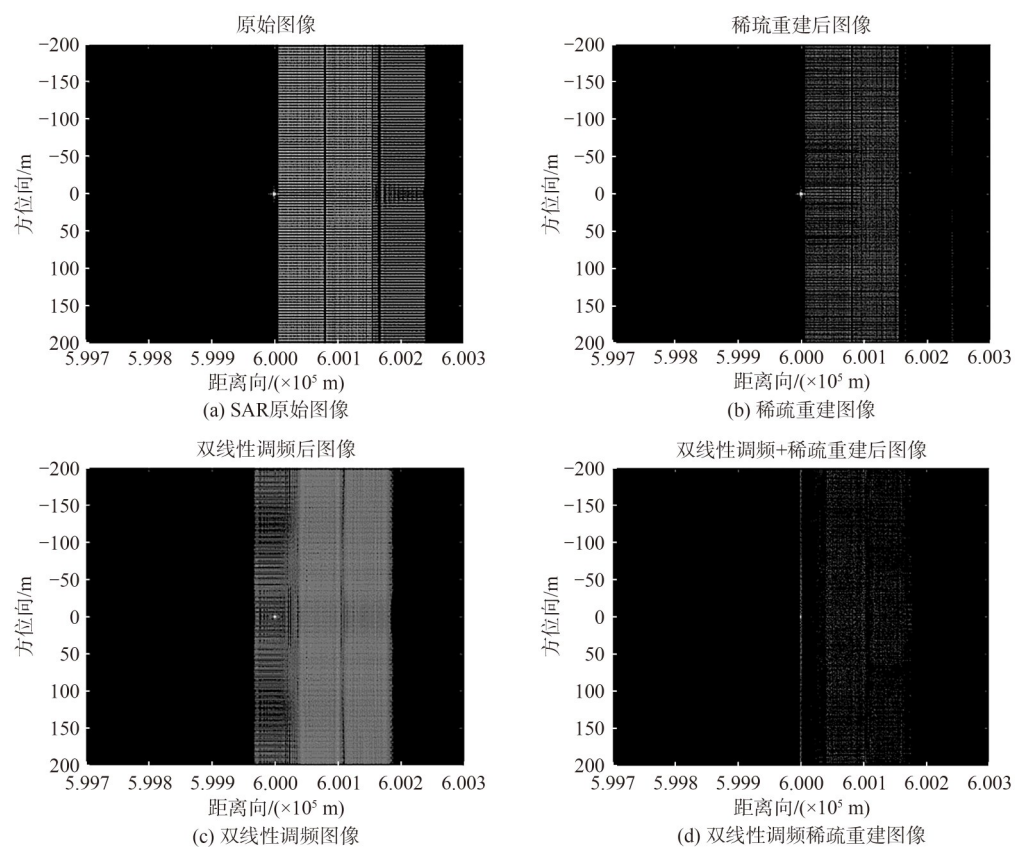


图4 场景二成像结果对比

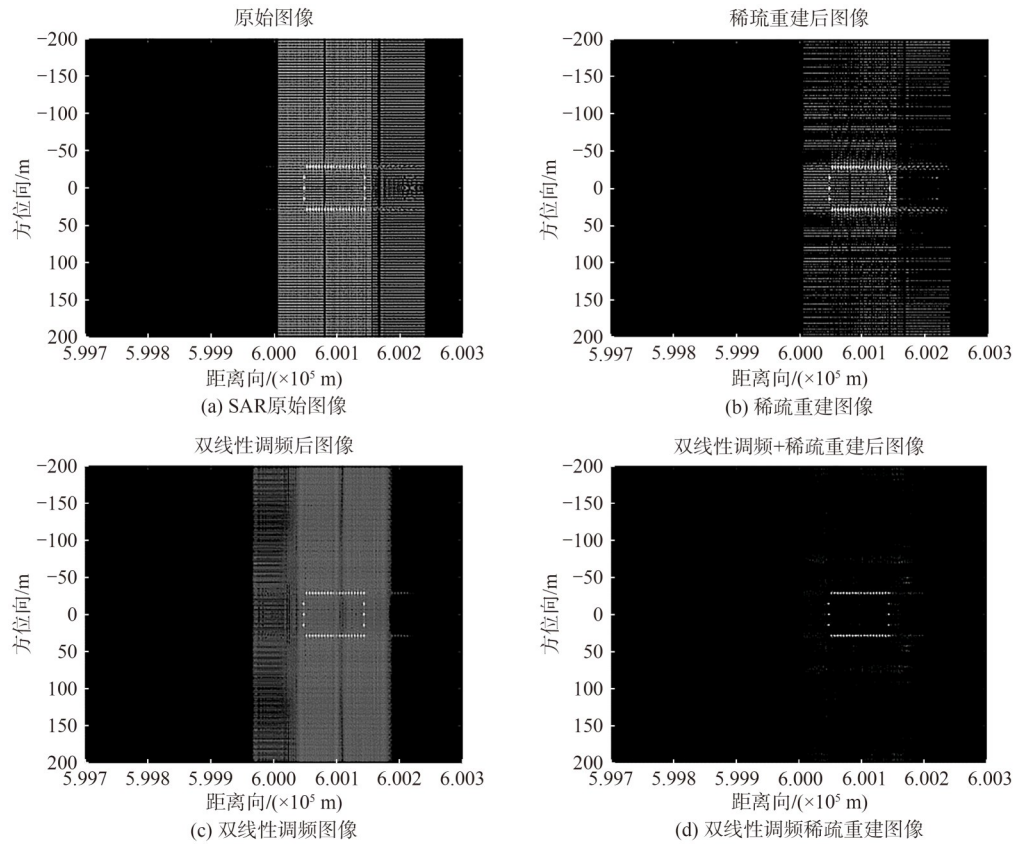
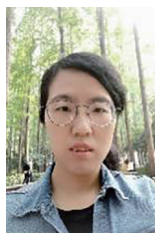


图5 场景三成像结果对比

- New York: Academic Press, 1970.
- [9] Villano M, Krieger G, Moreira A. New insights into ambiguities in quad-pol SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(6): 3287-3308.
- [10] 兰岚, 廖桂生, 许京伟, 等. 基于频率分集阵列的多功能一体化波形设计与信号处理方法[J]. 雷达学报, 2022, 11(5): 850-870.
- Lan L, Liao G S, Xu J W, et al. Waveform design and signal processing method of a multifunctional integrated system based on a frequency diverse array[J]. Journal of Radars, 2022, 11(5): 850-870.
- [11] Dall J, Kusk A. Azimuth phase coding for range ambiguity suppression in SAR[C]//Proceedings of the IGARSS 2004.2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1734-1737.
- [12] Tan S C, Wang G H, Wang N, et al. Joint range ambiguity resolving and multiple maneuvering targets tracking in clutter via MMPHDF-DA[J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(8): 4975.
- [13] Kamrath L, Baginski M, Martin S. Reduction of Doppler and range ambiguity using AES-192 encryption-based pulse coding[J]. Sensors, 2023, 23(5): 2568.
- [14] Li J, Sun G C, Xia X G, et al. A two-dimensional phase coding for range ambiguity suppression[J]. Digital Signal Processing, 2018, 81: 155-162.
- [15] 郭磊, 王宇, 邓云凯, 等. 基于方位向相位编码技术的方位向多通道SAR距离模糊抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3): 601-606.
- Guo L, Wang Y, Deng Y K, et al. Range ambiguity suppression for multi-channel SAR system using azimuth phase coding technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3): 601-606.
- [16] Kramer G. Suppression of ambiguities by phase coding[C]//Proceedings of EUSAR 2002. Cologne: [s.n.], 2002: 97-100.
- [17] Xu W, Huang P P, Tan W X. Azimuth phase coding by up and down chirp modulation for range ambiguity suppression[J]. IEEE Access, 2019, 7: 143780-143791.
- [18] Wang W Q. Mitigating range ambiguities in high-PRF SAR with OFDM waveform diversity[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(1): 101-105.
- [19] Li F, Xin L, Guo Y, et al. A framework of mixed sparse representations for remote sensing images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(2): 1210-1221.
- [20] 齐萌, 黄丽佳, 仇晓兰, 等. 一种结合稀疏重建和匹配滤波的距离模糊抑制方法[J]. 雷达学报(中英文), 2022, 11(1): 95-106.
- Qi M, Huang L J, Qiu X L, et al. Method of range ambiguity suppression combining sparse reconstruction and matched filtering[J]. Journal of Radars, 2022, 11(1): 95-106.
- [21] 毕辉, 张冰尘, 洪文, 等. 基于复图像的稀疏SAR成像方法在高分三号数据上的验证[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 123-130.
- Bi H, Zhang B C, Hong W, et al. Verification of complex image based sparse SAR imaging method on GaoFen-3 dataset[J]. Jour-

- nal of Radars, 2020, 9(1): 123-130.
- [22] 肖鹏, 吴有明, 于泽, 等. 一种基于压缩感知恢复算法的SAR图像方位模糊抑制方法[J]. 雷达学报, 2016, 5(1): 35-41.
Xiao P, Wu Y M, Yu Z, et al. Azimuth ambiguity suppression in SAR images based on compressive sensing recovery algorithm[J]. Journal of Radars, 2016, 5(1): 35-41.
- [23] Xu Z Q, Liu M Q, Zhou G R, et al. An accurate sparse SAR imaging method for enhancing region-based features *via* nonconvex and TV regularization[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 350-363.
- [24] Jin G D, Wang W, Deng Y K, et al. A novel range-azimuth joint modulation scheme for range ambiguity suppression[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5207210.
- [25] Li N, Xing M D, Hou Y X, et al. Ship focusing and positioning based on 2-D ambiguity resolving for single-channel SAR mounted on high-speed maneuvering platforms with small aperture[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5221213.
- [26] Lu X Y, Yu W C, Xia M Y, et al. Range-ambiguity suppression for noise radar in cluttered environment *via* sparse recovery[J]. Electronics Letters, 2021, 57(23): 894-896.
- [27] 李健. 基于多个角度约束的距离模糊抑制方法[J]. 科技视界, 2019, 9(14): 25-26.
Li J. A range ambiguity suppression method based on multiple look-direction constraints[J]. Science & Technology Vision, 2019, 9(14): 25-26.
- [28] Candes E J, Tao T. Decoding by linear programming[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(12): 4203-4215.
- [29] 吴江月. 基于去噪功能的压缩感知算法在图像处理中的应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
Wu J Y. Application of compressed sensing algorithm based on denoising function in image processing [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [30] 高睿. 基于压缩感知的匹配追踪重建算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
Gao R. Research on matching pursuit reconstruction algorithm based on compressive sensing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.

[作者简介]



王昕(1985-), 女, 博士, 南京邮电大学通信与信息工程学院副教授, 主要研究方向为雷达信号处理。



张宇(1999-), 男, 硕士, 南京邮电大学通信与信息工程学院, 主要研究方向为合成孔径雷达成像。



叶啟(1998-), 男, 硕士, 南京邮电大学通信与信息工程学院, 主要研究方向为合成孔径雷达成像。