

# 基于积累孔径插值技术的星载间断调频连续波SAR成像方法

闵林<sup>①②③</sup> 刘向前<sup>①②④</sup> 李宁<sup>\*①②④</sup>

<sup>①</sup>(河南大学河南省智能技术与应用工程技术研究中心 开封 475004)

<sup>②</sup>(河南大学河南省大数据分析处理重点实验室 开封 475004)

<sup>③</sup>(河南大学信息化管理办公室 开封 475004)

<sup>④</sup>(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)

**摘要:** 间断调频连续波(IFMCW)合成孔径雷达(SAR)模式通过在不同时间间隔内交替发射和接收信号,解决了星载调频连续波(FMCW)SAR必须收发分置的问题。然而,在该模式下,雷达天线会间歇性地工作于发射和接收状态,从而导致回波数据中出现周期性的空缺。为了解决上述问题,该文提出了一种基于积累孔径插值技术的缺失数据迭代自适应成像处理方法(MIAA-AAIT),用于恢复缺失的数据。实验结果表明,所提方法可以有效地恢复缺失数据,从而显著提高成像质量,大幅降低由周期性数据缺失引起的虚假目标能量。

**关键词:** 合成孔径雷达; 间断调频连续波; 虚假目标; 迭代自适应

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)07-2461-08

DOI: 10.11999/JEIT210140

## Spaceborne Interrupted Frequency Modulation Continuous Wave SAR Imaging Based on Accumulated Aperture Interpolation Technique

MIN Lin<sup>①②③</sup> LIU Xiangqian<sup>①②④</sup> LI Ning<sup>①②④</sup>

<sup>①</sup>(Henan Engineering Research Center of Intelligent Technology and Application, Henan University, Kaifeng 475004, China)

<sup>②</sup>(Henan Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Henan University, Kaifeng 475004, China)

<sup>③</sup>(Network Information Center Office, Henan University, Kaifeng 475004, China)

<sup>④</sup>(College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The Intermittent Frequency Modulation Continuous Wave (IFMCW) Synthetic Aperture Radar (SAR) mode solves the problem that the spaceborne Frequency Modulation Continuous Wave (FMCW) SAR must be bistatic by alternately transmitting and receiving signals in different time intervals. However, in this mode, the radar antenna will work intermittently in the transmitting and receiving state, resulting in periodical gaps in the echo data. In order to solve the above problems, a Missing-data Iterative Adaptive imaging processing Approach (MIAA) is proposed, based on Accumulated Aperture Interpolation Technique (AAIT) to recover the data gaps. Experimental results show that the proposed method can effectively recover missing data, thus improving significantly imaging quality and suppressing greatly the artifacts energy caused by the periodical data gaps.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Interrupted Frequency Modulation Continuous Wave (IFMCW); Artifacts; Iterative Adaptive Approach (IAA)

收稿日期: 2021-02-07; 改回日期: 2021-03-26; 网络出版: 2021-04-15

\*通信作者: 李宁 hedalining@henu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61871175), 河南省高等学校重点科研项目(19A420005, 21A520004), 河南省科技攻关计划项目(192102210082, 212102210093, 212102210101), 河南省青年人才托举工程(2019HYTP006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61871175), The College Key Research Project of Henan Province (19A420005, 21A520004), The Plan of Science and Technology of Henan Province (192102210082, 212102210093, 212102210101), The Youth Talent Lifting Project of Henan Province (2019HYTP006)

## 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式微波成像传感器,能够不受天气和光照的影响,实现全天时、全天候的成像。目前,星载SAR已发展成为一种不可或缺的遥感对地观测手段。随着星载SAR的不断发展,面向不同的应用需求,SAR系统模式越来越多元化<sup>[1-4]</sup>。传统脉冲式SAR系统的高峰值功率需求使得有效载荷较大,生产成本也较高。随着微型卫星的快速发展,轻小型星载SAR载荷的研制需求日益迫切。调频连续波(Frequency Modulation Continuous Wave, FMCW) SAR系统通过提高发射信号的占空比,以降低系统的峰值功率,从而实现系统低成本和轻量化的目标,在星载SAR系统中具有较大的应用潜力<sup>[5]</sup>。然而,一般而言,FMCW SAR系统的研制面临着两大技术挑战,其一,若在同一平台使用两个独立的天线分别用于信号的发射和接收,则天线之间需要保持足够的间距,来保持较高的收发信号隔离度;其二,需要一个稳定可靠的同步机制,来保证发射机和接收机之间的时间、空间和相位同步。

2010年,在欧洲合成孔径雷达学术会议上,英国萨里大学的Ahmed等人<sup>[6]</sup>首次提出了星载间断调频连续波(Interrupted FMCW, IFMCW) SAR的设计方案,该方案颠覆了传统星载FMCW SAR系统的设计理念,只需要单个物理天线就可以实现FMCW SAR的系统研制和信号收发。2011年,在荷兰航天局的支持下,荷兰的卫星测试与模拟私人有限公司(Satellite test and Simulation Besloten Venootschap, SSBV)宣布了一种集轻量化和低成本为一体的微型雷达卫星研制计划,星上雷达采用FMCW SAR成像系统,并配置IFMCW SAR成像模式,同时给出了该模式的具体设计方案<sup>[7]</sup>。在该模式下,雷达天线会根据时延设置,间歇性地工作于发射信号或接收回波状态。由于在发射信号的过程中需要关闭接收机,此时在回波数据中会出现周期性的数据空缺,缺失比接近50%<sup>[6]</sup>。对接收到的信号成像时,周期性的数据缺失将导致生成的SAR图像质量退化,严重影响图像解译。文献<sup>[6]</sup>提出使用插值技术来填补缺失数据;文献<sup>[8]</sup>提出了一种基于相邻回波之间关系的信号重建算法;文献<sup>[9,10]</sup>提出了使用基于线性预测模型的孔径插值技术来重建图像。上述几种方法<sup>[6-10]</sup>在面对数据缺失比接近50%的条件下,图像质量的提升效果有限。最近,文献<sup>[11]</sup>使用压缩感知的方法恢复缺失数据,取得了较好的实验效果,但该方法对场景的要求

较高,场景具备稀疏性是使用压缩感知的前提条件<sup>[11]</sup>。

为了解决上述问题,本文结合缺失数据迭代自适应方法(Missing-data Iterative Adaptive Approach, MIAA)和积累孔径插值技术(Accumulated Aperture Interpolation Technique, AAIT)的优点,提出了一种改进的星载IFMCW SAR成像处理方法,即MIAA-AAIT,能够更精确地恢复缺失的回波数据,进一步降低由周期性数据缺失引起的虚假目标能量,提高SAR图像成像质量。

本文结构安排如下:第2节给出本文所述IFMCW SAR系统的信号模型;第3节给出具体算法的实现流程;第4节给出点目标和面目标的实验结果,验证所提方法的有效性;第5节对本文进行总结,给出相应结论。

## 2 IFMCW SAR信号模型

传统FMCW SAR系统采用两根天线,分别用于发射信号和接收回波,而星载IFMCW SAR系统则使用单根天线,其间歇性地工作于发射和接收状态。在IFMCW SAR模式下,雷达天线首先工作于发射状态,连续发射信号,在接收到第1条回波前,切换为接收状态,准备接收目标回波,待接收完波束覆盖区的全部回波后,天线再次转换为发射状态,如此循环往复,直至SAR系统完成预定工作任务。**图1**为星载IFMCW SAR正侧视条带成像几何关系图,传感器高度 $h$ ,平台速度 $v$ ,"蓝色"表示发射信号,"绿色"表示接收回波。**图2**为IFMCW模式下的收发时序图, $T_t$ 和 $T_r$ 分别表示雷达天线发射信号和接收回波的连续工作时间。

对于IFMCW模式,天线发射和接收在一个循环周期内的连续工作时间可以分别表示为

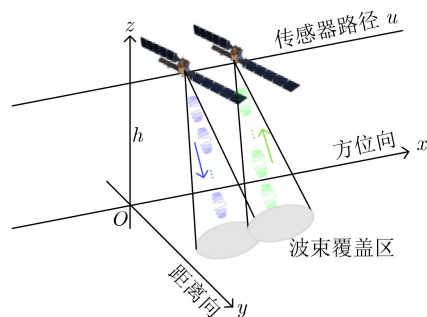


图1 星载IFMCW SAR正侧视条带成像几何关系图

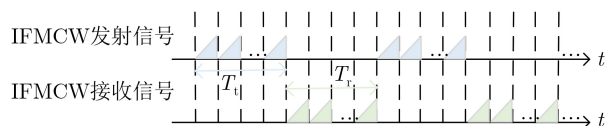


图2 IFMCW模式收发时序图

$$T_t = \frac{2 \cdot R_{\text{near}}}{c} \quad (1)$$

$$T_r = \frac{2 \cdot R_{\text{far}} + T_p}{c} \quad (2)$$

其中,  $c$ 表示光速,  $T_p$ 表示调频信号脉冲持续时间,  $R_{\text{near}}$ 和 $R_{\text{far}}$ 分别表示雷达照射区域的最近斜距和最远斜距。

单天线星载IFMCW SAR系统的工作时序不同于传统双天线FMCW SAR系统, 雷达天线处于发射状态时, 将无法接收目标回波, 导致在雷达方位向产生周期性的数据空缺。在这种模式下, 雷达以burst方式工作, 发射持续时间占空比 $\gamma$ 可以表示为

$$\gamma = \frac{T_t}{T_t + T_r} \quad (3)$$

从式(1)—式(3), 可以发现信号发射持续时间比接收持续时间稍短一些, 发射持续时间占空比逼近于50%。

显然, 与传统FMCW SAR接收到的回波数据形式不同, IFMCW SAR接收到的原始数据中存在周期性的数据空缺。图3给出了IFMCW SAR和FMCW SAR信号回波示意图。对于IFMCW SAR模式, 点目标在距离压缩和距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)后的接收信号可表示为

$$s_{\text{raw}}(\tau, t) = A_0 \cdot p_r \left( \tau - \frac{2 \cdot R_0}{c} \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi \cdot f_0 \cdot R_0}{c} \right) \cdot \sum_1^n \text{rect} \left( \frac{t - n \cdot (T_t + T_r)}{T_r} \right) \cdot \exp(j \cdot \pi \cdot k_a \cdot t^2) \quad (4)$$

其中,  $A_0$ 为任意复参数,  $p_r(\cdot)$ 为距离压缩脉冲包络,  $\tau$ 为距离快时间,  $t$ 为方位慢时间,  $R_0$ 为参考斜距,  $c$ 为光速,  $f_0$ 为雷达中心频率,  $n$ 为burst数量。

方位FFT后的信号为

$$s_{\text{raw}}(\tau, f) = A_0 \cdot p_r \left( \tau - \frac{2 \cdot R_0}{c} \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi \cdot f_0 \cdot R_0}{c} \right) \cdot \sum_1^n \text{rect} \left( \frac{f + n \cdot (W_t + W_r) + k_a \cdot t_0}{W_r} \right) \cdot \exp \left( \frac{-j \cdot \pi \cdot f^2}{k_a} \right) \quad (5)$$

其中,  $W_t$ 为缺失数据处带宽,  $W_r$ 为burst带宽,  $f$ 为方位频率,  $k_a$ 为方位向调频率。

IFMCW SAR方位处理从式(5)的频谱中去除了2次相位。当多个burst被相干处理时, 点目标在时域的脉冲响应表示为

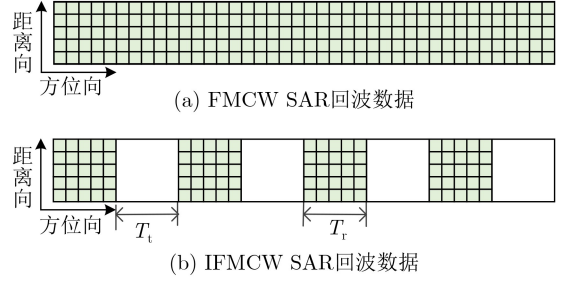


图3 FMCW SAR回波数据和IFMCW SAR回波数据

$$h_{(\tau, t)} = A_0 \cdot p_r \left( \tau - \frac{2 \cdot R_0}{c} \right) \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi \cdot f_0 \cdot R_0}{c} \right) \cdot \text{sinc}(k_a \cdot T_r \cdot t) \cdot \frac{1}{k_a(T_t + T_r)} \cdot \sum_1^n h_A \left( t - \frac{n}{k_a \cdot (T_t + T_r)} \right) \quad (6)$$

其中,  $h_A$ 为FMCW模式下方位向点目标响应。

由IFMCW SAR信号回波形式和式(4)—式(6)可以看出, 方位向回波数据的周期性缺失, 将导致目标在方位向出现周期性的重影现象, 亦称为虚假目标。在面目标场景下, 虚假目标会严重干扰SAR场景中其他地物的辨识, 甚至导致图像中的真实信息被强目标产生的虚假目标所掩盖。

### 3 所提MIAA-AAIT方法

针对IFMCW SAR模式中的数据缺失问题, 旨在去除图像中的虚假目标, 改善图像质量, 本文提出了一种基于AAIT技术的MIAA方法, 称为MIAA-AAIT。所提方法的处理流程如图4所示。首先, 对IFMCW数据进行距离向聚焦和RCMC处理, 获得方位向未压缩的IFMCW SAR数据; 然后, 进行子孔径划分和孔径插值操作, 得到无缺失的SAR数据。最后, 对插值后的数据进行方位压缩得到聚焦SAR图像。

#### 3.1 积累子孔径划分

对于低轨星载SAR系统, 雷达与目标的相对距离一般为百公里量级。相应地, 在IFMCW模式下, 一个周期内发射信号和接收信号的持续时间都较为短暂, 导致原始回波数据出现周期性缺失, 且单个burst的持续脉冲个数较少(10~20)。

与传统SAR子孔径划分方法不同<sup>[8]</sup>, IFMCW SAR方位未压缩数据在子孔径划分中, 采用了积累策略, 即添加了一个循环回路, 进行孔径积累, 提高后续缺失数据迭代恢复的观测样本数, 提高参数估计的准确性。

图5给出了积累子孔径的过程和子孔径滑动划分的过程。如图5所示, 将IFMCW SAR数据划分为若干子孔径, 其中第1个子孔径由1组连续数据(图5中以“绿色”代表)和1组空缺数据(图5中标记

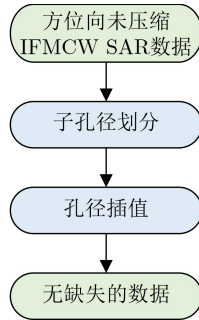


图4 本文所提MIAA-AAIT方法总体流程图

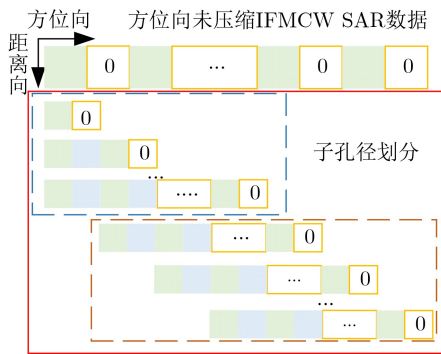


图5 本文方法子孔径划分过程示意图

为“0”)构成,然后使用本文插值方法恢复第1处空缺数据;第2个子孔径由3组连续的burst数据(含1个恢复的空缺数据)和1组空缺数据组成,然后基于3组连续数据恢复空缺数据;按照此方式进行积累并划分子孔径,待获得足够的样本后(或称为子孔径长度),保持子孔径长度不变,进行滑动窗口子孔径划分。通过这种方式,实际上增加了参数 $T_1$ 的值,从而提高了缺失数据插值的精度。

一般情况下,对数据进行插值处理时,观测样本越多,数据恢复的准确性越高。然而,对于IFMCW SAR系统来说,并非积累的数据越多越好。首先,条带模式下目标的观测时间受到合成孔径长度的限制。如果子孔径长度超过合成孔径的限制,将无法实现有效的插值。其次,随着外推数据长度的增加,本文缺失数据恢复算法的计算量剧增,大幅增加了算法的复杂度。综合上述因素,本文使用合成孔径长度的2/3作为数据插值时子孔径积累的目标长度。

### 3.2 基于MIAA的孔径插值技术

本文在子孔径划分之后,方位压缩之前,通过MIAA恢复子孔径中缺失数据,其算法流程如图6所示。首先,对子孔径数据进行预处理;然后,使用MIAA方法进行孔径插值恢复子孔径数据中缺失的数据;最后,进行后处理操作,以便进行方位压缩,得到质量改善的聚焦SAR图像。

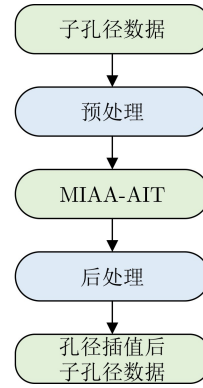


图6 基于MIAA的孔径插值流程图

#### 3.2.1 预处理

在距离压缩和RCMC后,为了提高插值结果的准确性,对子孔径数据进行Dechirp处理,即将每个子孔径数据与其方位向线性调频共轭相乘,去除目标相位中的2次项,使子孔径数据相位与方位向形成线性关系<sup>[12,13]</sup>,使SAR信号形式与MIAA方法的处理模型相匹配,Dechirp处理可表示为

$$H = S \cdot \exp(-j\pi K_a t^2) \quad (7)$$

其中, $S$ 为方位未压缩的子孔径数据, $K_a$ 为方位向调频率, $t$ 为方位慢时间。

#### 3.2.2 MIAA

MIAA是一种非参数频谱估计算法,通过迭代自适应方法(Iterative Adaptive Approach, IAA)估计频谱信息,从而恢复缺失的数据。MIAA与其他数据恢复方法不同,MIAA在恢复缺失数据过程中,不改变原本样本的理想特征<sup>[13-16]</sup>。在已有数据序列中设置频率分量,使用迭代的方式估计频谱,从而恢复缺失数据。

本文在预处理后,运用MIAA对子孔径中缺失数据进行恢复。以第 $m$ 个子孔径为例,假设预处理后子孔径数据的表达式为

$$\mathbf{S} = \begin{cases} \mathbf{S}_s(\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_i, \mathbf{S}_B)^T, 1 < i < B \\ \mathbf{S}_g(\mathbf{S}_{B+1}, \mathbf{S}_{B+2}, \dots, \mathbf{S}_i, \mathbf{S}_N)^T, B+1 < i < N \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{S}_s$ 为子孔径中连续数据, $\mathbf{S}_g$ 为子孔径中空缺数据, $[\cdot]^T$ 为矩阵转置。令

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{a}_s(\omega_k) &= [1, e^{j\omega_k}, \dots, e^{j(B-1)\omega_k}]^T \\ \mathbf{a}_g(\omega_k) &= [e^{jB\omega_k}, e^{j\omega_k}, \dots, e^{j(N-1)\omega_k}]^T \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, $\omega_k = 2\pi k/K$ , $k = 0, 1, \dots, K$ 表示频率, $K$ 为频域中总的采样数,一般情况下, $K$ 的值应远大于 $B$ 。 $\mathbf{a}_s(\omega_k)$ 和 $\mathbf{a}_g(\omega_k)$ 分别为 $\mathbf{S}_s$ 和 $\mathbf{S}_g$ 在频率 $\omega_k$ 处的傅里叶向量。



由 $\mathbf{a}_s(\omega_k)$ 和 $\mathbf{a}_g(\omega_k)$ 进一步得到 $\mathbf{S}_s$ 和 $\mathbf{S}_g$ 的傅里叶矩阵 $\mathbf{a}_s$ 和 $\mathbf{a}_g$ ，可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{a}_s = [\mathbf{a}_s(\omega_1), \mathbf{a}_s(\omega_2), \dots, \mathbf{a}_s(\omega_k)] \\ \mathbf{a}_g = [\mathbf{a}_g(\omega_1), \mathbf{a}_g(\omega_2), \dots, \mathbf{a}_g(\omega_k)] \end{cases} \quad (10)$$

信号的协方差矩阵可以表示为

$$\mathbf{R} = \sum_{k=0}^{K-1} p_k \cdot \mathbf{a}_s(\omega_k) \cdot \mathbf{a}_s^H(\omega_k) = \mathbf{a}_s \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{a}_s^H \quad (11)$$

其中， $[\cdot]^H$ 为矩阵共轭转置， $\mathbf{p}$ 为对角矩阵，其对角元素 $p_k$ 为信号在频率 $\omega_k$ 处的功率，即

$$p_k = |\hat{s}(\omega_k)|^2 \quad (12)$$

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_0 & & 0 \\ & p_1 & \\ & & \ddots \\ 0 & & & p_{K-1} \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中， $\hat{s}(\omega_k)$ 为 $\mathbf{S}_s$ 在频率 $\omega_k$ 处的频谱，即

$$\hat{s}(\omega_k) = \frac{\mathbf{a}_s^H(\omega_k) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{S}_s}{\mathbf{a}_s^H(\omega_k) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{a}_s(\omega_k)} \quad (14)$$

在式(11)—式(14)中，只有 $\mathbf{S}_s$ 的频谱 $\hat{s}(\omega_k)$ 是未知的，为了确定最终的频谱，找到满足条件的最优解，在MIAA中使用迭代的方法求得 $\hat{s}(\omega_k)$ 。在迭代的开始，将协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 初始化为单位矩阵，这相当于使用最小二乘法，初始化MIAA中的频谱。通过重复迭代式(11)和式(14)，直到 $\hat{s}(\omega_k)$ 收敛。通常情况下，迭代10~15次 $\hat{s}(\omega_k)$ 可达到收敛条件<sup>[14-16]</sup>。

迭代完成后，如式(15)，根据估计的 $\hat{s}(\omega_k)$ ，通过最小均方误差准则恢复缺失数据<sup>[17,18]</sup>。

$$\hat{\mathbf{g}} = \sum_{k=0}^{K-1} [p_k \cdot \mathbf{a}_s^H(\omega_k) \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{S}_s] \cdot \mathbf{a}_g(\omega_k) \quad (15)$$

其中， $\hat{\mathbf{g}}$ 为根据可用数据样本估计的缺失数据。在子孔径积累和滑动过程中，依次对每个子孔径数据使用MIAA恢复空缺数据。

### 3.2.3 后处理

对所有子孔径数据完成孔径插值后，通过逆Dechirp操作，将子孔径数据恢复为方位压缩前的调频信号格式。再根据每个子孔径在原先数据中的位置，沿方位向将子孔径中缺失数据的恢复结果插入相应的位置，此时IFMCW SAR数据中已无缺失数据。最后，通过方位压缩得到质量提升的SAR图像。

## 4 实验结果与分析

IFMCW SAR模式利用星载SAR与地面目标的收发双程距离时延实现连续多帧数据采集。在机载

条件下，受作用距离限制，无法获取IFMCW SAR模式的外场试验数据。本节通过对星载IFMCW SAR模式下的点目标和面目标进行仿真实验，验证所提方法的有效性，主要仿真参数如表1所示。

表1 星载IFMCW SAR模式仿真参数

参数	数值	参数	数值
雷达工作载频(Hz)	16.70	脉冲发射频率(Hz)	3479.00
雷达有效速度(m/s)	7613.00	天线长度(m)	4.48
带宽(MHz)	180.00	接收脉冲(个)	13
景中心斜距(km)	534.00	缺失脉冲(个)	12
发射脉冲时宽( $\mu$ s)	266.71	斜视角( $^\circ$ )	0

### 4.1 点目标仿真实验验证

实验场景中设置3个点目标，应用所提方法，其成像结果如图7所示，本文以左上角点目标为例进行量化分析。图8为应用不同方法的点目标方位向剖面结果。其中，No Gaps为无缺失数据理想情况下的成像结果，可作为不同IFMCW SAR成像处理结果的理想参考图像；Zero Padding为对缺失数据补零后的成像结果，可以看出由于周期性的补0，目标在方位向出现了周期性的重影现象，即虚假目标现象，与真实值相比，其归一化幅值为-3.56 dB，严重影响了后续的图像解译；LPM-AAIT为采用线性预测模型的成像处理结果<sup>[9]</sup>，从中可以看到，本方法在一定程度上有效降低了虚假

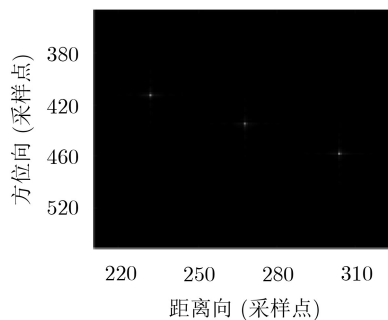


图7 点阵目标仿真成像结果

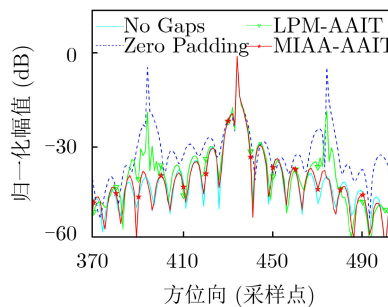


图8 点目标方位向剖面图

目标水平, 相比直接补零处理, 虚假目标能量下降了14.38 dB, 达到-17.94 dB; MIAA-AAIT为本文所提方法的成像处理结果, 可以看到, 所提方法处理结果的虚假目标能量比达到-38.54 dB, 与理想值接近, 验证了所提方法的有效性。

#### 4.2 面目标仿真实验验证

为了进一步验证所提方法的有效性, 选取含舰船目标的典型海面区域进行面目标仿真实验。图9为不同情况下研究区域的聚焦SAR图像, 其中图9(a)

为无缺失数据理想情况下的成像结果, 作为参考图像, 用于对算法的性能进行比较; 图9(b)为缺失数据的IFMCW SAR数据补零成像结果, 从中可以看到多个明显的虚假舰船目标, 同时海面的散射信息也变得模糊不清; 图9(c)为使用线性预测模型获得的成像结果, 其与图9(b)相比, 虚假目标得到了有效抑制; 图9(d)为本文所提方法的成像结果, 从中已无法辨识虚假目标, 其获得的处理效果与图9(a)接近。

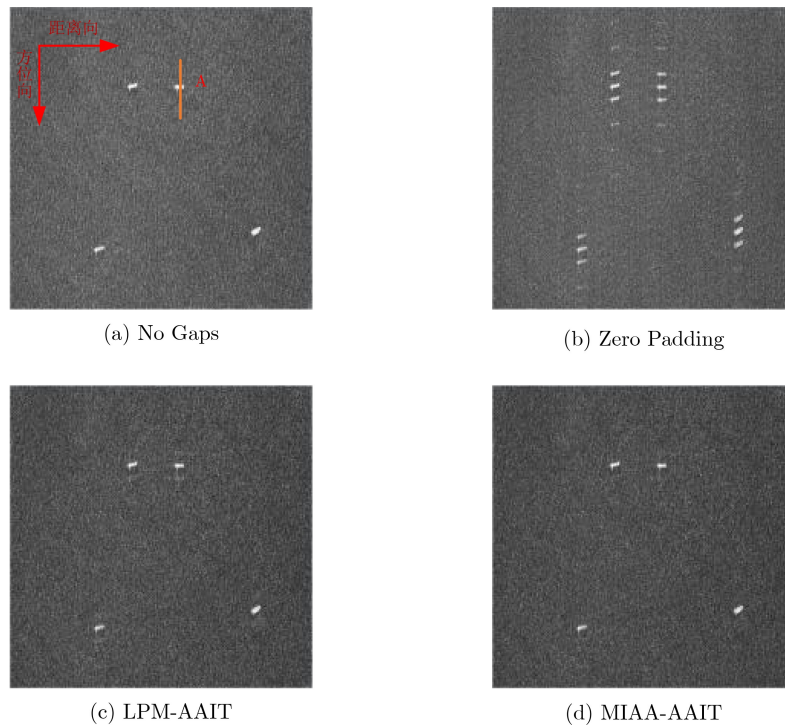


图9 面目标仿真成像结果

为了更好地说明所提方法的有效性, 如图9所示, 本文以图9中的一个舰船目标为中心, 进行定量分析。图10为选取目标的方位向剖面分析结果, 从中可以明显看出, 所提方法对虚假目标的抑制效果最优。相比真实目标, 虚假目标能量只有达到-30 dB, 才与背景杂波能量相近。

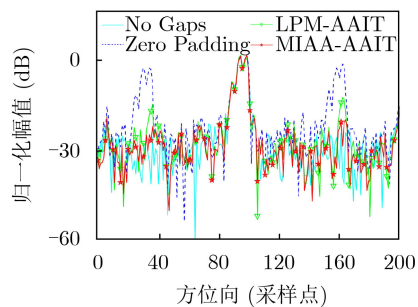


图10 A舰船中心方位向剖面图

同时, 本文利用图像对比度(Image Contrast, IC)和图像熵(Image Entropy, IE)作为评判指标<sup>[17-20]</sup>, 进一步证明本文方法的优越性。分析结果如表2所示, 可以看到, 除无缺失FMCW外, 本文所提方法获得的图像, 其对比度值最大, 熵值最小, 与理想参考值最接近, 证明了所提方法的有效性。

## 5 结束语

IFMCW SAR模式是一种新体制星载SAR模

表2 研究区域IC和IE

模式	IC	IE
FMCW	1.70	10.35
IFMCW	0.94	11.53
LPM-AAIT	1.58	10.92
MIAA-AAIT	1.63	10.56

式,有望配置于在研和未来微型星载SAR载荷。针对IFMCW SAR模式获取的回波数据存在周期性数据缺失的问题,本文提出了一种有效的解决方案,即MIAA-AAIT。相比已有方法,所提方法可以进一步改善获取的SAR图像质量,大幅降低虚假目标能量。

### 参 考 文 献

- [1] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载SAR技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229–240. doi: [10.11999/JEIT151116](https://doi.org/10.11999/JEIT151116).
- LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, *et al.* Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 229–240. doi: [10.11999/JEIT151116](https://doi.org/10.11999/JEIT151116).
- [2] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载SAR技术发展趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 1–33. doi: [10.12000/JR20008](https://doi.org/10.12000/JR20008).
- DENG Yunkai, YU Weidong, ZHANG Heng, *et al.* Forthcoming spaceborne SAR development[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 1–33. doi: [10.12000/JR20008](https://doi.org/10.12000/JR20008).
- [3] 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. doi: [10.1109/MGRS.2013.2248301](https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301).
- [4] SALZMAN J, AKAMINE D, LEFEVRE R, *et al.* Interrupted synthetic aperture radar (SAR)[C]. 2001 IEEE Radar Conference (Cat. No. 01CH37200), Atlanta, USA, 2001: 117–122. doi: [10.1109/NRC.2001.922962](https://doi.org/10.1109/NRC.2001.922962).
- [5] STOVE A G. Linear FMCW radar techniques[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1992, 139(5): 343–350. doi: [10.1049/ip-f-2.1992.0048](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0048).
- [6] AHMED N and UNDERWOOD C. Monostatic CW SAR concept for Microsatellites[C]. The 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 736–739.
- [7] HOOGEBOOM P, HANSSEN R, PASTENA M, *et al.* PanelSAR, an FMCW based X-band smallsat SAR for infrastructure monitoring[C]. The 27th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, USA, 2013: 1–5.
- [8] LIU Y, DENG Y K, WANG R, *et al.* Signal model and imaging algorithm for spaceborne interrupted continuous-wave synthetic aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(5): 348–358. doi: [10.1049/iet-rsn.2011.0287](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2011.0287).
- [9] LI Ning, WANG R, DENG Yunkai, *et al.* Improved full-aperture ScanSAR imaging algorithm based on aperture interpolation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(5): 1101–1105. doi: [10.1109/LGRS.2014.2384594](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2384594).
- [10] LI Ning, NIU Shilin, GUO Zhengwei, *et al.* Processing spaceborne interrupted FMCW SAR data with modified aperture interpolation technique[C]. 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018: 6695–6698. doi: [10.1109/IGARSS.2018.8518659](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518659).
- [11] LIU Kang, YU Weidong, and LV Jiyu. Azimuth interrupted FMCW SAR for high-resolution imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, To be published. doi: [10.1109/LGRS.2020.3019047](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3019047).
- [12] 王钢, 周若飞, 邹映琨. 基于压缩感知理论的图像优化技术[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 222–233. doi: [10.11999/JEIT190669](https://doi.org/10.11999/JEIT190669).
- WANG Gang, ZHOU Ruofei, and ZOU Yikun. Research on image optimization technology based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(1): 222–233. doi: [10.11999/JEIT190669](https://doi.org/10.11999/JEIT190669).
- [13] STOICA P, LI Jian, and LING Jun. Missing data recovery via a nonparametric iterative adaptive approach[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(4): 241–244. doi: [10.1109/LSP.2009.2014114](https://doi.org/10.1109/LSP.2009.2014114).
- [14] HUANG He, HUANG Penghui, LIU Xingzhao, *et al.* A novel unambiguous spectrum reconstruction algorithm for space-borne high resolution and wide swath SAR imaging based on iterative adaptive algorithm[C]. The 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Xiamen, China, 2019: 1–6. doi: [10.1109/APSAR46974.2019.9048447](https://doi.org/10.1109/APSAR46974.2019.9048447).
- [15] YARDIBI T, LI Jian, STOICA P, *et al.* Source localization and sensing: A nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(1): 425–443. doi: [10.1109/TAES.2010.5417172](https://doi.org/10.1109/TAES.2010.5417172).
- [16] NING Jiaqi, LIU Dacheng, LIU Kaiyu, *et al.* An improved full-aperture ScanSAR imaging method integrating the MIAA based aperture interpolation[J]. *Journal of Sensors*, 2020, 2020: 8196081. doi: [10.1155/2020/8196081](https://doi.org/10.1155/2020/8196081).
- [17] GLENTIS G O and JAKOBSSON A. Efficient implementation of iterative adaptive approach spectral estimation techniques[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(9): 4154–4167. doi: [10.1109/TSP.2011.2145376](https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2145376).

- [18] BERIZZI F and CORSINI G. Autofocusing of inverse synthetic aperture radar images using contrast optimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(3): 1185–1191. doi: [10.1109/7.532282](https://doi.org/10.1109/7.532282).
- [19] LI Xi, LIU Guosui, and NI Jinlin. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(4): 1240–1252. doi: [10.1109/7.805442](https://doi.org/10.1109/7.805442).
- [20] 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).
- 闵 林: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为SAR图像与信号处理.  
刘向前: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为SAR成像技术.  
李 宁: 男, 1987年生, 教授, 研究方向为多模式合成孔径雷达成像及其应用技术.

责任编辑: 余 蓉