

采用改进特征子空间投影的SAR脉冲式直达波干扰抑制方法

舒高峰 刘明月 李宁*

(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)

(河南大学河南省大数据分析处理重点实验室 开封 475004)

(河南大学河南省空间信息处理工程研究中心 开封 475004)

摘要: 射频干扰(RFI)会污染合成孔径雷达(SAR)回波信号,增加SAR图像解译难度。脉冲式直达波干扰(PDWI)作为典型的RFI,在原始回波域以明亮条纹状掩盖SAR回波信息,对SAR成像质量产生严重影响。现有的干扰抑制方法中,传统的特征子空间投影(ESP)方法对整条含干扰脉冲进行干扰抑制,造成了脉冲中非干扰位置有用信号损失。为了保护有用信号,该文提出一种改进ESP的SAR脉冲式直达波干扰抑制方法。首先,通过两次检测干扰,获取PDWI在时域中的具体位置。其次,仅对检测的干扰位置数据,采用ESP将有用信号和干扰信号分离。最后,从原始数据中减去ESP重构的干扰数据以实现干扰抑制。仿真和实测数据处理表明,与现有方法相比,该方法能够有效避免SAR原始数据中有用信号的损失,抑制了脉冲式直达波干扰。

关键词: 射频干扰; 合成孔径雷达; 脉冲式直达波干扰; 特征子空间投影

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-1382-09

DOI: [10.11999/JEIT230665](https://doi.org/10.11999/JEIT230665)

SAR Pulsed Direct Wave Interference Suppression Method Using Improved Eigen-Subspace Projection

SHU Gaofeng LIU Mingyue LI Ning

(College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

(Henan Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Henan University, Kaifeng 475004, China)

(Henan Engineering Research Center of Spatial Information Processing,

Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Radio Frequency Interference (RFI) will pollute the echo signal of Synthetic Aperture Radar (SAR) and increase the difficulty of SAR image interpretation. Pulsed Direct Wave Interference (PDWI), as a typical RFI, covers SAR echo information with bright fringes in the original echo domain, which has a serious impact on SAR imaging quality. Among the existing interference suppression methods, the traditional Eigen Subspace Projection (ESP) method suppresses the whole pulse containing interference, which leads to the loss of useful signals in the non-interference positions in the pulse. In order to protect useful signals, an improved ESP SAR pulsed direct wave interference suppression method is proposed. Firstly, the specific position of PDWI in the time domain is obtained by twice detecting interference. Secondly, ESP operation is used to separate the useful signal from the interference signal only for the detected interference position data. Finally, the interference data of ESP reconstruction is subtracted from the original data to achieve interference suppression. Simulation and measured data processing show that, compared with the existing methods, this method can effectively avoid the loss of useful signals in SAR raw data and suppress the pulsed direct wave interference.

Key words: Radio Frequency Interference (RFI); Synthetic Aperture Radar (SAR); Pulsed Direct Wave Interference (PDWI); Eigen-Subspace Projection (ESP)

收稿日期: 2023-07-04; 改回日期: 2023-12-01; 网络出版: 2023-12-07

*通信作者: 李宁 hedalining@henu.edu.cn

基金项目: 河南省自然科学基金(222300420115)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Henan (222300420115)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动式微波遥感器件,能够全天候、全天候获取高分辨雷达图像。然而,随着信息化时代的高速发展,各式各样的电磁设备数量多、体制繁、功率高,使得电磁频谱十分拥挤,构成了极为复杂的电磁环境,对SAR系统产生了严重的同频段射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)。脉冲式直达波干扰(Pulsed Direct Wave Interference, PDWI)作为一种典型的RFI形式,在SAR回波中一般表现为周期性的明亮条纹,其存在掩盖了SAR回波信号信息,严重阻碍了对SAR图像的解译。

针对SAR回波受射频干扰污染问题,SAR领域相关学者提出了很多RFI抑制方法。如迭代自适应方法^[1](Iterative Adaptive Approach, IAA)、基于瞬时频率估计和正则化时频滤波的抑制方法^[2]。该类方法属于参数化方法,干扰形式复杂多变,具有不确定性,很难精确建立干扰模型,也无法保证参数估计精度。相比参数化方法,非参数化方法实现简单、适用性强、无需建立RFI的参数模型,主要利用RFI与回波信号在不同变换域中的特征,基于盲源分离的思想,实现干扰抑制。陷波滤波法作为典型的非参数化方法,其主要思想是将干扰在作用域陷波置零。然而,陷波后会缺失部分信号,导致成像后出现场景目标图像模糊以及异常点目标响应。两步陷波法^[3]结合线性预测模型对频谱进行补偿,使频谱变得连续且干扰得到有效抑制,但陷波滤波导致的信噪比损失不能通过线性预测来补偿。不同于陷波类方法,矩阵分解法的主要原理是将SAR信号与干扰信号分离后,再进行干扰抑制。经典的矩阵分解类方法包括特征子空间投影^[4](Eigen Subspace Projection, ESP)法、独立分量分析法^[5]、复经验模态分解法^[6]等。在干扰较强的情况下,这类方法会有较好的抑制效果。

上述干扰抑制方法通用性强,针对性弱,但会不同程度地损失有用信号,造成图像细节信息的丢失。以含PDWI的SAR数据为例,Zhang等人^[7]提出了图拉普拉斯聚类半参数算法,将时变干扰聚类在非线性低维流形中,通过构建不同信号脉冲之间的拉普拉斯嵌入连接来抑制干扰。2022年,Zhang等人^[8]从保护有用信号角度出发,提出了一种基于低秩稀疏分解的SAR RFI抑制方法。该方法利用峰度系数法检测RFI,联合低秩稀疏与C均值聚类方法定位RFI的准确位置,然后对分离出的有用信号进行重构,实现RFI抑制。这两类方法都属于半参

数化方法,虽然能够优化模型,解决超参数优化问题。但该类方法计算量大、复杂度高。针对PDWI,为了提高PDWI的检测精度和抑制能力,Li等人^[9]在2022年提出了一种时域陷波滤波(Time-domain Notch Filtering, TNF)方法,采用对数比算子逐脉冲地检测PDWI,在时域通过构造陷波滤波器去除PDWI,结合缺失数据迭代自适应方法(Missing data Iterative Adaptive Approach, MIAA)恢复缺失的数据。相较于频域陷波法,TNF方法具有简单实施的优点。但是,该方法对隐藏在强回波信号中的PDWI检测效果欠佳。为了解决这一问题,该团队又提出了一种3步抑制PDWI的方法:定位、陷波和矩阵填充^[10]。该方法采用短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)技术进行干扰检测,同时结合了奇异值阈值算法和拉格朗日插值技术对时域陷波后的数据进行自适应填充,实现PDWI干扰抑制。在高信噪比条件下,该方法具有更好地检测PDWI的能力。然而,在大缺失数据比下,自适应填充法恢复性能有限。针对陷波方法的局限性,Lü等人^[11]在2023年提出了一种联合距离向和方位向滤波的SAR数据中的线性调频PDWI抑制方法。该方法通过匹配滤波和傅立叶变换对线性调频PDWI的距离向和方位向同时进行能量聚焦,利用掩码处理实现对PDWI的滤波功能,通过相位补偿来进行数据恢复。该方法克服了传统陷波滤波方法引入的异常目标响应和伪影,适用于大带宽、大脉冲宽度的线性调频PDWI抑制,但其抑制性能取决于调频率估计的精度,且对多干扰源的PDWI需要迭代处理。

对于回波域中的PDWI,相比于剔除干扰后再对缺失数据进行填充,如何更多地保留受PDWI污染的有用信号是本文研究的主要目的。从保护有用信号角度出发,结合时频脊能量积累与ESP方法的优点,本文提出一种改进ESP的SAR脉冲式直达波干扰抑制方法。本方法利用特征值分解与时频域能量积累对PDWI进行两次检测以确定其在时域的准确位置,采用ESP方法仅对干扰位置数据进行PDWI与有用信号有效分离,从而实现保护有用信号的目的;从原始数据中减去ESP重构的干扰数据,以实现干扰抑制。仿真数据与实测数据验证了该方法的有效性。

2 基本信号模型、特征和方法

2.1 PDWI信号模型和特征

PDWI信号是单向传播的,主要来源于地基雷达、通信设备。图1(a)为SAR系统与PDWI干扰源的空间几何关系。PDWI作为典型的RFI形式,当

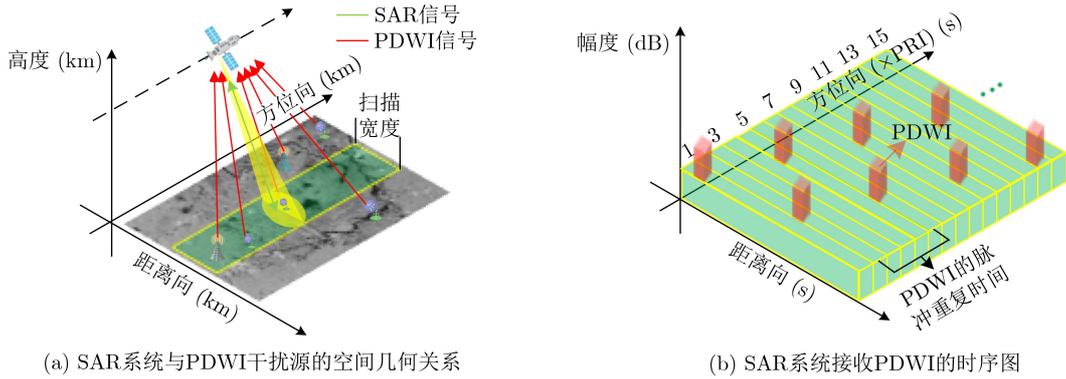


图1 SAR系统与PRFI的时、空关系图

PDWI与SAR系统在时间、频率满足重叠且干扰源波束照进SAR接收机主瓣或旁瓣时, SAR系统会收到PDWI信号。图1(b)为SAR系统接收PDWI的时序图。

忽略噪声的影响, SAR系统经过正交解调和数字采样后, 其接收到的含有PDWI的SAR回波数据可以表示为

$$X(\tau, \eta) = S(\tau, \eta) + I(\tau, \eta) \quad (1)$$

其中, $S(\tau, \eta)$, $I(\tau, \eta)$ 分别表示有用信号, 干扰信号。 τ 表示距离向时间, η 表示方位向时间。

根据PDWI信号的收发特性, 可以将PDWI表示为

$$I(\tau, \eta) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{\tau}{T(\eta)}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_1}{T_1}\right) \cdot A_n(\eta) \cdot \exp(j\phi) \quad (2)$$

其中, τ_1 , T_1 和 $T(\eta)$ 分别表示干扰信号的到达时间、干扰信号的持续时间和SAR信号接收持续时间。 $\text{rect}(\cdot)$ 是矩形窗函数, 第1个窗函数表示SAR信号到达时刻在接收持续时间内, 第2个窗函数表示干扰到达时间与SAR接收持续时间重叠。相位项 ϕ 一般分为线性调频和正弦调频, 它们是通过信号调频的方法确定的。

PDWI信号特征是构成干扰检测的基础。PDWI信号包含以下特征:

(1)能量强: 由于SAR信号是双向传播的后向散射波, 而PDWI信号是单向传播的直达波, PDWI信号的能量通常比SAR信号的能量强。对于具有能量压制性的PDWI信号, 在不同域(特别是频域、时频域)中PDWI信号相比SAR信号会发生明显的能量跳变。

(2)时宽短: 一般来讲, PDWI源发射的干扰信号带宽是固定的, 且小于SAR信号的带宽。

2.2 传统的特征子空间投影方法

对于含干扰的SAR原始回波数据, ESP方法能够将PDWI和有用信号投影到不同空间进行分离,

然后滤除PDWI, 保留有用信号。该方法利用特征值分解, 将量级较大的特征值对应的特征向量构成干扰子空间, 再将原数据投影到干扰子空间内, 得到干扰信号, 其余特征值对应的特征向量构成无干扰的信号子空间。通过对干扰子空间重建1维信号, 剔除SAR信号中的干扰信号, 可以达到抑制干扰的目的。其过程如下:

(1)定义某一条脉冲信号 $X_i(\tau_j)$, i 表示第 i 条脉冲, j 表示第 j 个距离向采样点, $i = 1, 2, \dots, N_a$; $j = 1, 2, \dots, N_r$ 。 N_a 表示方位向采样点数, N_r 表示距离向采样点数。按照时间延时嵌套构造Hankel矩阵 D

$$D = \begin{bmatrix} X_i(\tau_1) & X_i(\tau_2) & \dots & X_i(\tau_M) \\ X_i(\tau_2) & X_i(\tau_3) & \dots & X_i(\tau_{M+1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_i(\tau_L) & X_i(\tau_{L+1}) & \dots & X_i(\tau_{M+L-1}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, L 为Hankel矩阵的维度。 L 太小, 特征值分解不充分, L 太大, 计算量增大, 因此, 实际处理中建议选取32, 64或128, 且 $M = N_r + 1 - L$ 。

(2)对协方差矩阵 R 进行特征值分解, 表示为

$$R = DD^H = UAU^H \quad (4)$$

其中, $A = \text{diag}(r_1, r_2, r_3, \dots, r_L)$, $r_m (1 \leq m \leq L)$ 为特征值且 $r_1 > r_2 > r_3 > \dots > r_L$, 其对应的特征向量为 $U = [u_1, u_2, \dots, u_L]$ 。前 k 个明显大的特征值为干扰信号的特征值 Λ_k , 对应的特征向量 $U_k = [u_1, u_2, \dots, u_k]$ 映射为干扰信号子空间。干扰信号可以由 $s_i = U_k U_k^H D$ 表示。然后, 使用二值平均法对干扰信号进行数据重构, 表示为

$$x_i(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2} [s_i(1, \tau) + s_i(\tau, 1)], & 1 \leq \tau \leq M - 1 \\ \frac{1}{2} [s_i(\tau - M + 1, M) + s_i(\tau, 1)], & M \leq \tau \leq L \\ \frac{1}{2} [s_i(\tau - M + 1, M) + s_i(L, \tau - L + 1)], & L + 1 \leq \tau \leq N_r \end{cases} \quad (5)$$

最后，从SAR数据中剔除重构的干扰信号，得到抑制后的脉冲信号。至此，逐个脉冲重复上述过程，直到剔除所有干扰脉冲信号中的干扰信号为止。

3 基于改进特征子空间投影的SAR脉冲式直达波干扰抑制方法

由于传统的特征子空间投影与自适应填充方法在抑制PDWI方面存在一定的局限性。文献[12]提出了一种改进ESP的SAR图像RFI抑制方法。该方法在传统ESP方法上增加了专门用于RFI检测的预处理模块，一定程度上保持了图像细节信息，减少了时域逐脉冲干扰抑制带来的巨大运算量问题。但该方法在检测时并未聚焦到干扰在时域的准确位置，而是对整条含干扰脉冲进行干扰抑制。因此，仍存在原始数据有用信号保护不足问题。针对该问题，本文提出一种改进ESP的SAR脉冲式直达波干扰抑制方法，所提方法流程如图2所示。本方法首先基于PDWI在时频域能量强的特征，采用特征值分解与时频域能量积累分别检测含PDWI的回波脉冲和PDWI在回波脉冲中的具体位置。其次，仅对检测到的PDWI位置数据，利用ESP方法实现PDWI信号与有用信号分离，进而保护更多有用信号。最后，从原始数据中剔除ESP重构的PDWI信号实现干扰抑制。具体步骤如下：

(1) PDWI初步检测：定义某一条脉冲信号为 $X_i(\tau)$ ，根据式(3)、式(4)进行特征值分解，获取每条脉冲的最大特征值。逐脉冲重复以上过程，获取最大特征值序列，记为

$$\psi = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_a}] \quad (6)$$

根据K-means聚类算法[13]将 ψ 分为干扰信号和无干扰信号两类

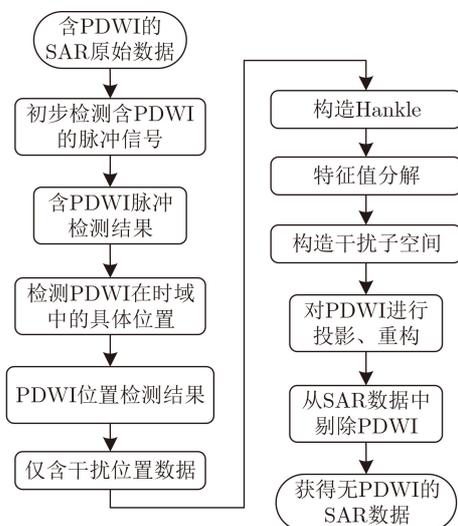


图2 所提方法流程图

$$Q_i = \begin{cases} 0, & \lambda_i < \sigma_1 \\ 1, & \lambda_i \geq \sigma_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中， Q_i 表示第 i 条脉冲检测结果，“0”表示无干扰的脉冲，“1”表示含干扰的脉冲， σ_1 表示K-means聚类得到的阈值。采用L2正则化线性回归模型[14]仅对公式(6)中无干扰脉冲的最大特征值进行拟合，获取拟合函数 $H(i)$ ， $H(i)$ 将作为PDWI抑制过程ESP分离干扰和有用信号的阈值。

(2) PDWI二次检测：根据式(7)得到的初步检测结果，将SAR信号转换到时频域，通过积累STFT频谱的能量来检测PDWI[10]，获取干扰位置信息 $P_i(\tau_j)$ 。检测后的含干扰脉冲信号表示为

$$\bar{X}_i(\tau) = \begin{cases} S_i(\tau) + I_i(\tau), & P_i(\tau_{j1}) \leq \tau \leq P_i(\tau_{j1}) + T_i \\ S_i(\tau), & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

其中， $P_i(\tau_{j1})$ 表示出现干扰的初始位置。 T_i 表示第 i 条回波脉冲中的干扰脉宽。

(3) PDWI抑制：联合干扰位置信息 $P_i(\tau_j)$ 和特征子空间投影将干扰位置处的SAR信号分解为PDWI和有用信号。其中，仅对干扰位置数据进行特征值分解后，大于 $H(i)$ 的特征值，其对应的特征向量投影为干扰子空间 s_i 。根据式(5)将 s_i 重建成1维干扰信号序列 $x_i(\tau)$ ，并从SAR回波数据中剔除PDWI位置的干扰数据，从而达到抑制干扰的目的。干扰抑制流程如图3所示。干扰抑制后的信号表示为

$$\bar{X}_i(\tau) = \begin{cases} X_i(\tau) - x_i(\tau), & P_i(\tau_{j1}) \leq \tau \leq P_i(\tau_{j1}) + T_i \\ S_i(\tau), & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

4 实验结果及分析

本文利用仿真SAR数据和Sentinel-1A星载SAR原始回波数据进行了实验验证。表1总结了仿真实验的主要系统参数。

表1 SAR系统与PDWI仿真参数

| 参数 | 值 |
|---------|---------------|
| 距离向采样频率 | 32.317 MHz |
| 脉冲重复频率 | 1256.981 Hz |
| 景中心斜距 | 988647 m |
| 载频 | 5.400 GHz |
| 脉宽 | 41.74 μ s |
| 发射信号带宽 | 30 MHz |
| 平台等效速度 | 6955 m/s |
| PDWI载频 | 5.405 GHz |
| PDWI带宽 | 5 MHz |

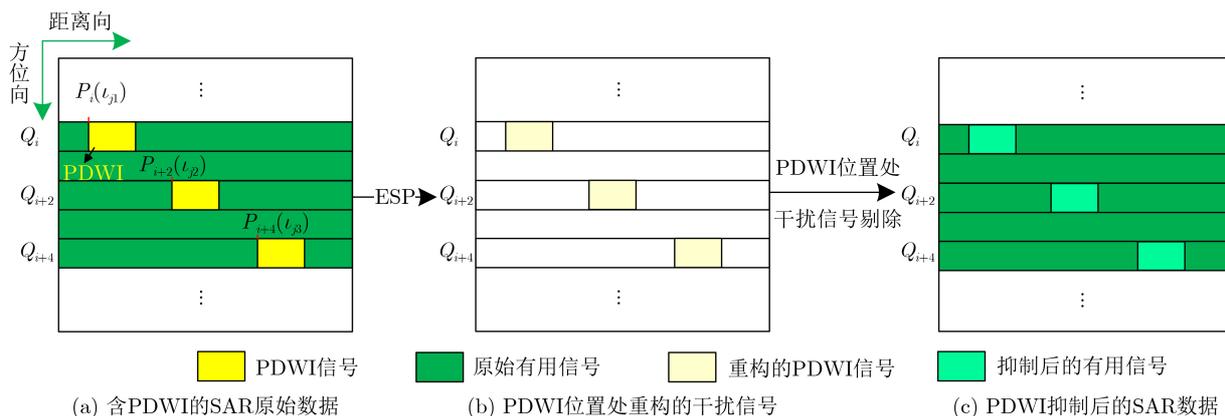


图3 改进ESP的脉冲式直达波干扰抑制示意图

4.1 仿真数据实验验证

在仿真实验中, 本文使用了加拿大RADARSAT-1星载SAR的原始回波数据, 并在此数据的基础上加入了不同程度干扰信号数据。本文定义原始回波域仿真的干扰数据与SAR信号数据的零范数比值(Interference to Signal Zero Norm Ratio, ISZNR)。为了验证所提方法抑制PDWI的有效性, 本实验通过与TNF-MIAA和ESP方法进行比较, 验证了该方法保护有用信号的潜力。其中TNF-MIAA方法是在干扰位置检测的基础上, 利用时域陷波抑制PDWI并用MIAA技术修复缺失的数据间隙。ESP方法是在初步检测含干扰脉冲的基础上, 利用ESP方法对含PDWI的整条脉冲进行抑制。

图4给出了本文方法与TNF-MIAA和ESP方法的仿真实验结果。图4(a)–图4(c)为PDWI仿真结果图。图4(d)–图4(f)为直接成像结果图。由图4(a)–图4(f)可以看出, 不同ISZNR下PDWI对SAR图像的污染程度是不同的。在20.16%的ISZNR下, PDWI经成像处理后完全覆盖了场景信息。下面3行分别是TNF-MIAA, ESP和本文方法的干扰抑制对比实验结果。从实验结果可以看出, 3种方法都能在一定程度上抑制PDWI, 但亮点目标的恢复效果不同。图4(d)–图4(f)中用红色矩形框标记了感兴趣的实验区域。图4(g)–图4(o)显示了干扰抑制后感兴趣区域的放大视图。图4(g)–图4(i)和图4(j)–图4(l)分别为TNF-MIAA和ESP方法的干扰抑制结果。根据图4中黄色椭圆框标记的结果和蓝绿色矩形框标记的亮点目标可以明显看出, TNF-MIAA方法由于在时域丢失太多有用信号导致亮点目标在方位向产生了较高的旁瓣。虽然MIAA方法对缺失的数据进行了自适应填充, 在一定程度上避免了周期性缺失方位向数据引起的分辨率下降。但是, MIAA方法恢复的数据与真实数据之间仍存在差异, 使得最后亮点目标聚焦效果不佳。ESP方法由于是对整

条脉冲进行抑制, 易造成非干扰位置处有用信号损失。且在整个回波数据中, 由于周期性缺失方位向数据导致成像处理后方位向旁瓣抬升, 产生目标虚影。而本文方法最大程度地保留了有用信号, 弥补了这一缺陷, 结合图4(m)–图4(o)和图5(a)亮点目标方位向剖面图可以看出, 本文方法成像处理后方位向旁瓣更接近原始数据, 亮点目标成像后聚焦效果更好, 图像分辨率更高。

表2总结了不同ISZNR下3种干扰抑制方法的均方根误差^[15]指标评估结果。均方根误差值越小, 干扰抑制性能越好。根据表2可以看出, 当ISZNR值为4.04%时, TNF-MIAA方法的抑制效果优于ESP方法。当ISZNR值为12.24%, 20.16%时, ESP方法的抑制效果优于TNF-MIAA。而本文方法在不同ISZNR的条件下, 从始至终都是优于前两个方法。这是因为TNF-MIAA方法的陷波操作剔除了干扰范围内的有用信号, 而MIAA方法恢复有用信号的能力随着ISZNR的提高而下降。ESP方法由于没有检测PDWI在回波中的具体位置, 导致含干扰脉冲的非干扰位置的有用信号损失。本文方法将干扰从PDWI位置处分离、提取出来, 仅抑制脉冲内干扰位置处的PDWI信号, 其它未受干扰影响的数据保持不变, 最大程度地保留了单个脉冲内的有用信号, 即在保护有用信号的基础上较好地抑制了干扰。为了突出本文方法的有效性, 以积分旁瓣比作为指标, 对比3种方法抑制PDWI的效果。其中积分旁瓣比越小, 干扰抑制性能越好, 如表2所示, 本文方法的积分旁瓣比相较于TNF-MIAA、ESP方法, 其比值更接近原始数据, 证明了本方法保护有用信号的有效性。

4.2 实测数据实验验证

如图6为欧空局Sentinel-1A L0级含PDWI的原始数据效果图。图7是对图6(a)使用不同干扰抑制方法后的成像结果图, 图7(a)–图7(c)为TNF-MI-

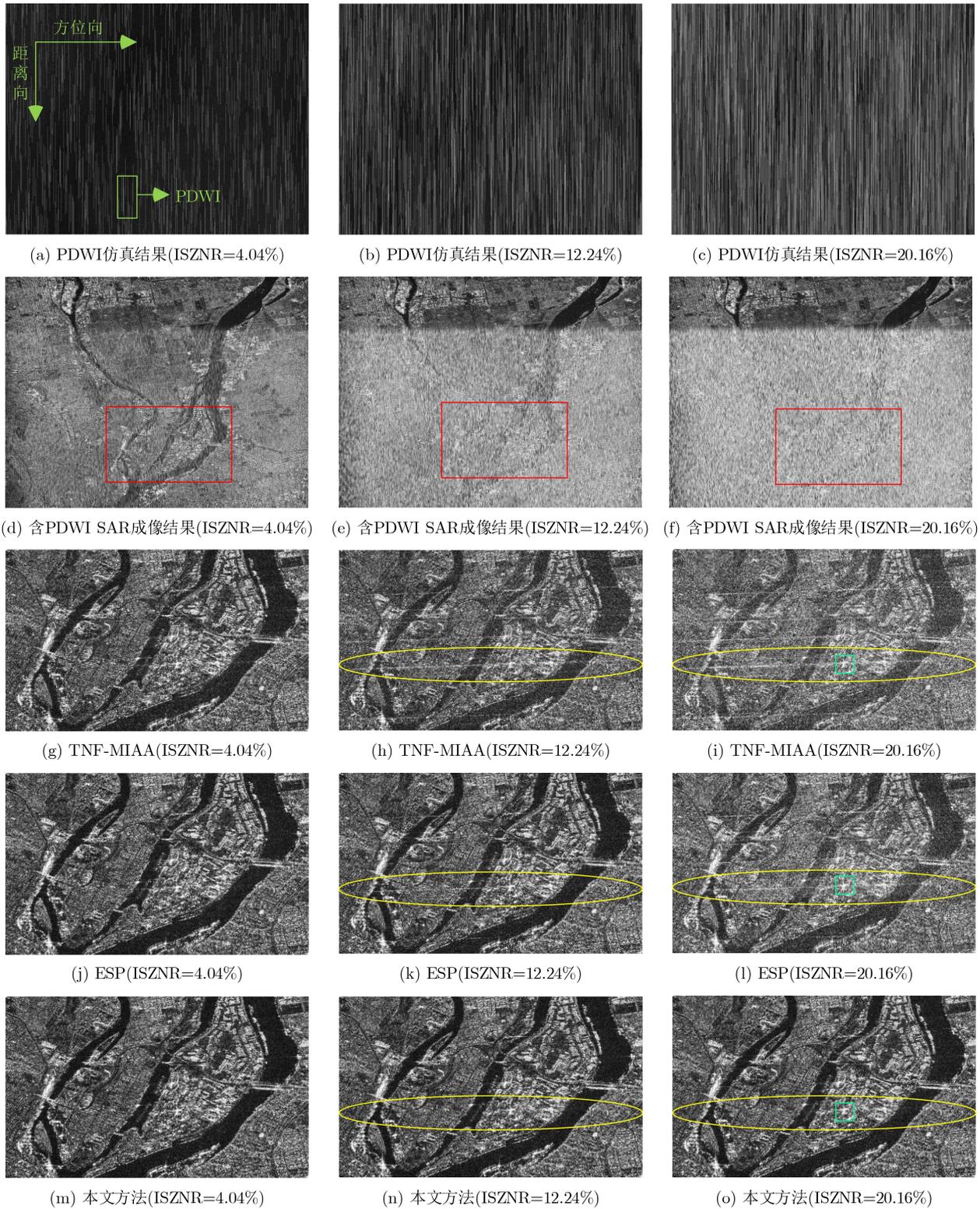


图4 仿真数据PDWI抑制前后SAR图像效果对比图

AA, ESP、本文方法的干扰抑制结果。图7(d)–图7(f)为图7(a)–图7(c)中红色矩形框标记的放大区域视图。图5(b)是图7(d)–图7(f)中蓝绿色矩形框标记的强点目标方位向剖面图。根据放大区域图中标记的黄色椭圆框可以看出，TNF-MIAA和ESP方法损

失了部分有用信号，所以强点目标在方位向上产生了较高的旁瓣。特别是ESP方法由于是对整条回波脉冲进行干扰抑制，导致图像细节信息丢失，强点目标产生亮条状“伪影”。而本文方法在从干扰位置数据中分离、提取出干扰的同时，保留了SAR数

表2 仿真数据下3种干扰抑制方法的评估指标(无干扰原始数据积分旁瓣比=-15.0222 dB)

| 方法 | 均方根误差 (ISZNR = 4.04%) | 均方根误差 (ISZNR = 12.24%) | 均方根误差 (ISZNR = 20.16%) |
|----------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| TNF-MIAA | 0.2975 | 0.4723 | 0.5904 |
| ESP | 0.3224 | 0.4463 | 0.4591 |
| 本文方法 | 0.2246 | 0.3156 | 0.3699 |

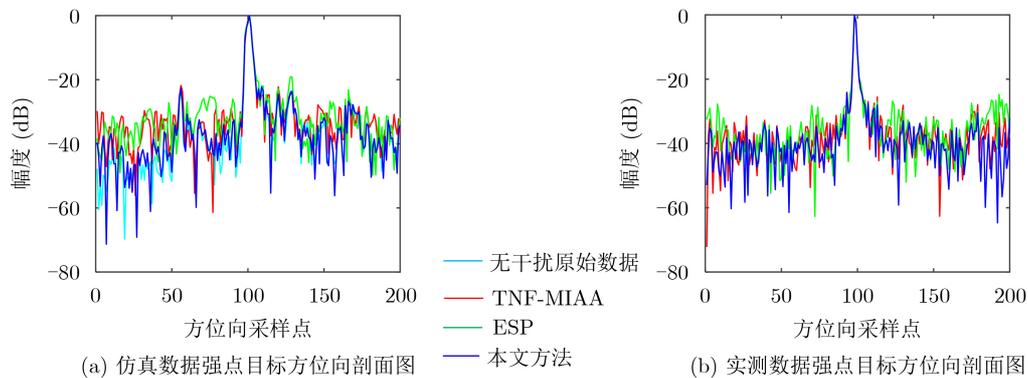
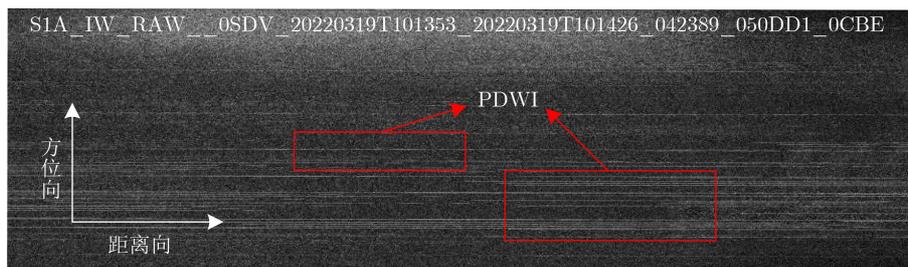
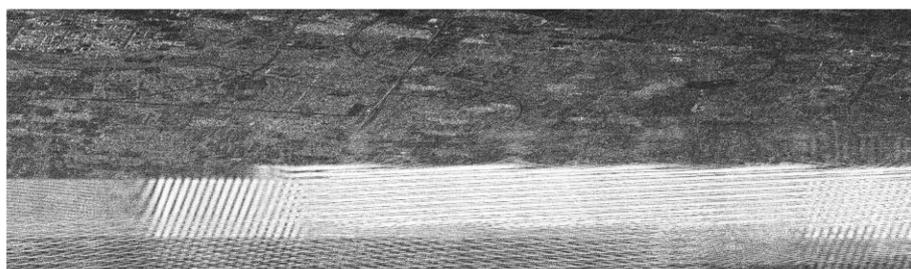


图5 PDWI抑制后强点目标方位向剖面图



(a) 实测数据时域图



(b) 实测数据成像结果

图6 含PDWI的星载SAR原始数据效果图

据原始有用信号数据,有效地减少了有用信号的损失。

针对星载SAR实测数据,本文采用灰度熵^[16]、平均梯度^[17]以及积分旁瓣比3个指标来评估本文方法的优越性。灰度熵和平均梯度值越大,干扰抑制性能越好。从表3可以看出,相比TNF-MIAA和ESP方法,本文方法的灰度熵和平均梯度值较高,积分旁瓣比较小,证明了本文方法保护有用信号和抑制干扰的有效性能。

5 结论

针对SAR原始数据中PDWI,现有的干扰抑制方法在一定程度上存在有用信号缺失问题,本文提出一种改进ESP的SAR脉冲式直达波干扰抑制方法。所提方法依据PDWI在时频域的特性,在干扰抑制之前进行了干扰两次检测,即检测PDWI在时域的准确位置,并仅对脉冲中检测到的干扰位置数据进行ESP操作。实验结果表明,与现有抑制方法相比,所提方法能够有效抑制PDWI的同时更好地

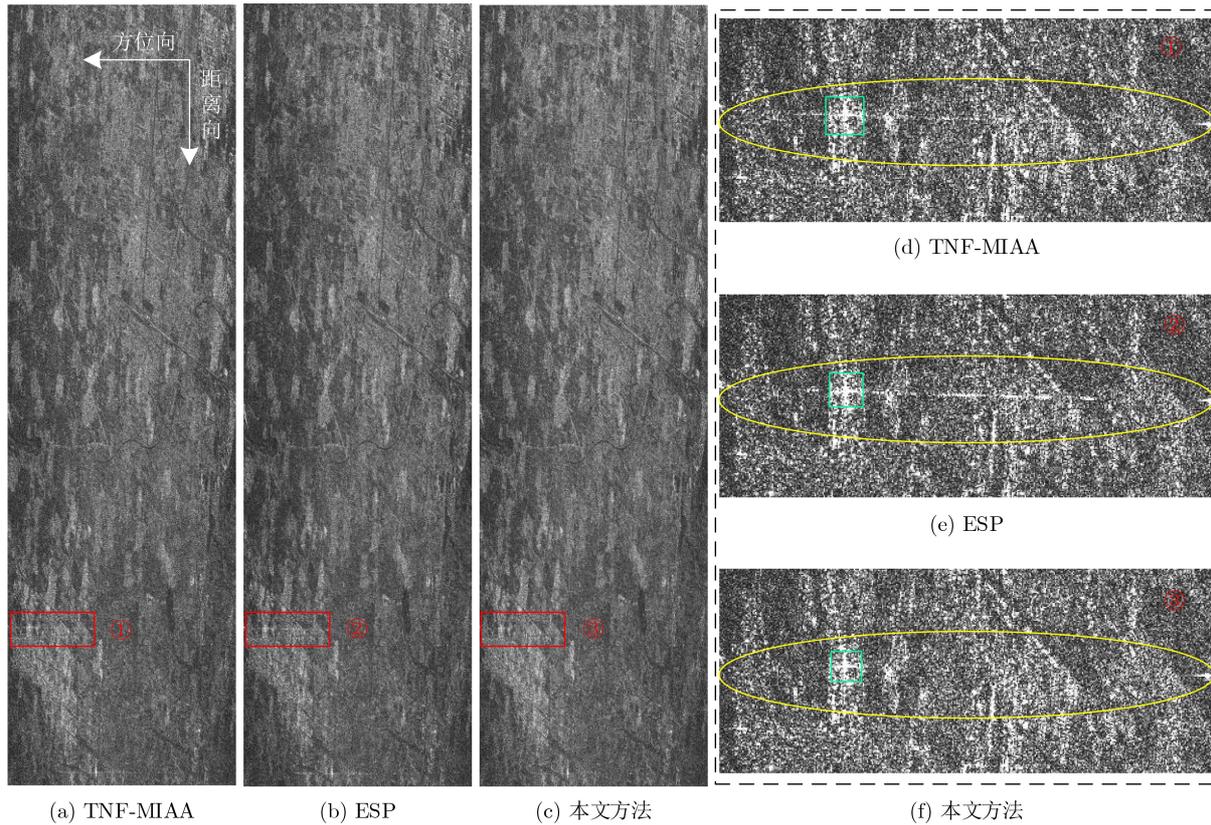


图7 不同PDWI抑制方法的星载SAR图像效果对比图

表3 实测数据下3种干扰抑制方法的评估指标(原始数据: 灰度熵=10.416 6; 平均梯度=69 707)

| 方法 | 灰度熵 | 平均梯度 | 积分旁瓣比在(dB) |
|----------|---------------|---------------|-----------------|
| TNF-MIAA | 8.6836 | 5 5105 | -15.1990 |
| ESP | 8.6681 | 4 9650 | -13.6327 |
| 本文方法 | 8.6846 | 5 5201 | -17.4983 |

保护有用信号，且能够降低SAR图像中强点目标产生的高旁瓣，改善了SAR图像质量。

参考文献

[1] LIU Zhiling, LIAO Guisheng, and YANG Zhiwei. Time variant RFI suppression for SAR using iterative adaptive approach[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1424-1428. doi: 10.1109/LGRS.2013.2259575.

[2] HAN Wenchang, BAI Xueru, FAN Weiwei, et al. Wideband interference suppression for SAR via instantaneous frequency estimation and regularized time-frequency filtering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5208612. doi: 10.1109/TGRS.2021.3098783.

[3] XU Wei, XING Weida, FANG Chonghua, et al. RFI suppression based on linear prediction in synthetic aperture radar data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(12): 2127-2131. doi: 10.1109/LGRS.2020.3015205.

[4] 周峰, 邢孟道, 保铮. 基于特征子空间滤波的SAR窄带干扰抑制方法[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(5): 767-770. ZHOU Feng, XING Mengdao, and BAO Zheng. Narrow band interference suppression for SAR using eigen-subspace based filtering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(5): 767-770.

[5] ZHOU Feng, TAO Mingliang, BAI Xuerui, et al. Narrow-band interference suppression for SAR based on independent component analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(10): 4952-4960. doi: 10.1109/TGRS.2013.2244605.

[6] ZHOU Feng, XING Mengdao, BAI Xuerui, et al. Narrow-band interference suppression for SAR based on complex empirical mode decomposition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 423-427. doi: 10.1109/LGRS.2009.2015340.

[7] ZHANG Hui, HUANG Yan, LI Jie, et al. Time-varying RFI mitigation for SAR systems via graph Laplacian clustering techniques[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*

- Letters*, 2022, 1,19: 4010805. doi: [10.1109/LGRS.2021.3062828](https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3062828).
- [8] ZHANG Hengrui, MIN Lin, LU Jing, *et al.* An improved RFI mitigation approach for SAR based on low-rank sparse decomposition: From the perspective of useful signal protection[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3278. doi: [10.3390/rs14143278](https://doi.org/10.3390/rs14143278).
- [9] LI Ning, LV Zongsen, ZHAO Jianhui, *et al.* Time-domain notch filtering method for pulse RFI mitigation in synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4013805. doi: [10.1109/LGRS.2021.3077247](https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3077247).
- [10] LI Ning, LV Zongsen, and GUO Zhengwei. Pulse RFI mitigation in synthetic aperture radar data via a three-step approach: Location, notch, and recovery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5225617. doi: [10.1109/TGRS.2022.3161368](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3161368).
- [11] LV Zongsen, FAN Huaitao, CHEN Zhen, *et al.* Mitigate the LFM-PRFI in SAR data: Joint down-range and cross-range filtering[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5205918. doi: [10.1109/TGRS.2023.3265774](https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3265774).
- [12] 周春晖, 李飞, 李宁, 等. 改进的基于特征子空间的SAR图像射频干扰抑制算法[J]. *雷达学报*, 2018, 7(2): 235–243. doi: [10.12000/JR17025](https://doi.org/10.12000/JR17025).
ZHOU Chunhui, LI Fei, LI Ning, *et al.* Modified eigensubspace-based approach for radio-frequency interference suppression of SAR image[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(2): 235–243. doi: [10.12000/JR17025](https://doi.org/10.12000/JR17025).
- [13] HARTIGAN J A and WONG M A. A K -means clustering algorithm[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(1): 100–108. doi: [10.2307/2346830](https://doi.org/10.2307/2346830).
- [14] LI Ning, LV Zongsen, and GUO Zhengwei. Observation and mitigation of mutual RFI between SAR satellites: A case study between Chinese GaoFen-3 and European Sentinel-1A[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5112819. doi: [10.1109/TGRS.2022.3170363](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3170363).
- [15] HUANG Yan, ZHANG Lei, LI Jie, *et al.* A novel tensor technique for simultaneous narrowband and wideband interference suppression on single-channel SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(12): 9575–9588. doi: [10.1109/TGRS.2019.2927764](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2927764).
- [16] CUI Guangmang, FENG Huajun, XU Zhihai, *et al.* Detail preserved fusion of visible and infrared images using regional saliency extraction and multi-scale image decomposition[J]. *Optics Communications*, 2015, 341: 199–209. doi: [10.1016/j.optcom.2014.12.032](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.12.032).
- [17] SU Jia, TAO Haihong, TAO Mingliang, *et al.* Time-varying SAR interference suppression based on delay-Doppler iterative decomposition algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1491. doi: [10.3390/rs10091491](https://doi.org/10.3390/rs10091491).
- 舒高峰: 男, 讲师, 研究方向为SAR信号处理与成像技术.
刘明月: 女, 硕士生, 研究方向为SAR无意干扰抑制.
李 宁: 男, 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