

单通道合成孔径雷达抗调频斜率失配干扰新方法

孟智超^① 卢景月^① 张帅钦^② 张 磊^{*③} 王虹现^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(63610部队 库尔勒 841001)

^③(中山大学电子与通信工程学院 广州 510275)

摘 要: 该文针对单通道合成孔径雷达(SAR)无法有效抑制调频斜率失配干扰的问题进行了深入的研究。根据干扰频谱与真实回波频谱的差异, 该文提出了一种基于频域匹配滤波处理的合成孔径雷达调频斜率失配干扰抑制方法。该方法在准确测得干扰调频斜率的基础上, 首先利用干扰信号的空间稀疏性以及低信干比(SIR)的特点, 对干扰位置进行稀疏超分辨估计以获得较为精确的干扰时延相位。然后通过获得的干扰调频斜率和时延相位重建干扰信号频谱, 以此为基础设计正交匹配滤波器在频域实施干扰信号的抑制, 并重建不失真场景图像。最后, 计算机仿真实验验证了该文所提方法的有效性。

关键词: 抗干扰; 调频斜率失配干扰; 稀疏; 正交匹配滤波

中图分类号: TN975

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)09-2246-07

DOI: 10.11999/JEIT190687

A New Method of Anti-FM Slope Mismatch Jamming for Single Channel Synthetic Aperture Radar

MENG Zhichao^① LU Jingyue^① ZHANG Shuaiqin^②

ZHANG Lei^③ WANG Hongxian^①

^①(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(No.66393 Unit, the PLA, Kuerle 841001, China)

^③(School of Electronic and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The problem that single-channel Synthetic Aperture Radar (SAR) can not effectively suppress FM slope mismatch jamming is studied in this paper. According to the difference between the jamming spectrum and the real echo spectrum, a method for suppressing the mismatch jamming of SAR FM slope based on matched filtering in the frequency domain is proposed. Based on the accurate measurement of the slope of jamming FM, the sparse super-resolution estimation of the jamming position is carried out to obtain a more accurate phase of jamming delay by utilizing the sparsity of the jamming signal and the characteristics of low Signal-to-Interference Ratio (SIR). Then, the spectrum of the interference signal is reconstructed by the obtained slope of interference frequency modulation and phase delay. Based on this, the orthogonal matched filter is designed to suppress the interference signal in the frequency domain and reconstruct the undistorted scene image. Finally, computer simulation experiments verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: Anti-jamming; FM slope mismatch jamming; Sparse; Orthogonal matched filtering

1 引言

合成孔径雷达^[1](Synthetic Aperture Radar, SAR)以其能够对地面场景进行实时高分辨成像的

能力, 在民事以及军事应用中变得越来越重要^[2,3]。战场侦查、毁伤评估中, 尤其需要SAR这种能够进行高分辨成像的传感设备。但是军事应用中的SAR系统将不可避免的成为敌方电子干扰的重要对象, 干扰可使SAR图像失真, 系统无法获取目标信息^[4]。因而研究针对SAR的抗干扰方法显得尤为重要。

有源相干干扰^[5]是一类由干扰机发射的, 能够在SAR系统信号处理中获得匹配滤波增益的相干干扰。这类干扰的特点是发射功率相较于非相干干扰

收稿日期: 2019-09-05; 改回日期: 2020-04-02; 网络出版: 2020-04-11

*通信作者: 张磊 zhanglei57@mail.sysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771372, 61771367)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771372, 61771367)

低、干扰区域可通过相干性进行灵活控制，因而具有比非相干干扰更好的干扰效果。调频斜率失配干扰^[6,7]便是该类干扰中的典型代表。干扰机通过发射与将要干扰的SAR线性调频(Linear Frequency Modulate, LFM)信号的调频率略有差异的LFM信号，在SAR系统信号处理过程中能够获得一定的匹配滤波增益，同时又在距离上具有一定的展宽，以此形成对SAR图像的大功率遮蔽干扰。通常，多通道SAR可以通过阵列空域滤波对干扰加以抑制^[8-10]，而单通道SAR却没有足够的空域资源进行干扰抑制。对此，文献^[11]提出利用频率陷波以及参数化方法进行调频斜率失配干扰的抑制，但是这两种方法均有不足。频域陷波法在对干扰频率抑制的同时不可避免地造成了真实回波信号频谱的损失，必将导致匹配滤波增益的下降以及匹配滤波函数旁瓣电平的提高。对于文中提到的基于对去斜后信号参数建模进行干扰对消的方法，由于去斜后单频信号的幅度估计误差较大，因而干扰抑制效果较差。通过对SAR成像信号处理过程以及干扰的特性进行深入研究发现，当调频斜率失配干扰与目标在空域区分度较小时，即使是多通道SAR系统仍无法从空域抑制干扰。但是由于调频斜率不同，干扰信号与真实回波的频谱具有一定差异，因而可以在频域对干扰进行抑制。借鉴正交子空间投影技术^[12]设计频域正交匹配滤波器，令该滤波器位于频域干扰信号正交子空间中即可实现干扰抑制。为了设计正交匹配滤波器，必须获得频域干扰信号的精确距离估计，而干扰信号的空间稀疏性及高干信比特性使得稀疏超分辨技术^[13,14]可以被应用。压缩感知^[15](Compressing Sensing, CS)技术指出，当信号具有稀疏性或可压缩性时，便可以通过低于Nyquist采样点数的观测值准确或近似恢复原信号。本文结合压缩感知超分辨技术及正交子空间投影技术，提出了基于频域处理的抗调频斜率失配干扰新方法。所提方法以准确测得干扰调频斜率为基础，利用稀疏超分辨技术以及剩余能量最小法对干扰位置进行估计以获得较为精确的干扰时延相位。然后通过干扰调频斜率和干扰时延相位重建干扰信号并以此设计正交匹配滤波器。最后，利用正交匹配滤波在频域抑制干扰信号。所提方法在有效抑制干扰的同时避免了频域陷波带来的信号损失和对干扰回波幅度估计带来的误差，能够实现不失真场景图像的重建。

2 SAR成像及调频斜率失配干扰原理

调频斜率失配干扰是一种典型的相干干扰，干扰机与SAR相同，都发射LFM信号，但其调频斜率与SAR系统发射的LFM信号调频斜率略有不同。

$$S_I(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi \cdot (\alpha\gamma) t^2) \quad (1)$$

其中， T_p 为SAR信号脉冲宽度， γ 为SAR信号LFM信号调频斜率， α 为调频率失配比 $\alpha = \frac{\gamma_I}{\gamma_S} \in [0, 1]$ ，其中 γ_I 和 γ_S 分别为SAR信号和干扰的调频斜率。干扰信号离散频域表达式为

$$\dot{F}_{S_I} = \text{FFT}[S_I(t_r)] = \text{rect}\left(\frac{f}{\alpha\gamma T_p}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{\alpha\gamma}\right) \quad (2)$$

式中，顶上标“.”表示离散数据，下标 r 表示接收。经过与SAR系统参考函数匹配滤波后

$$\begin{aligned} & \text{IFFT}\left\{\dot{F}_{S_{\text{ref}}}^* \odot \dot{F}_{S_I}\right\} \\ &= \text{IFFT}\left[\text{rect}\left(\frac{f}{\gamma T_p}\right) \exp\left(j\pi \frac{f^2}{\gamma}\right) \odot \text{rect}\left(\frac{f}{\alpha\gamma T_p}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{\alpha\gamma}\right)\right] \\ &= \text{rect}\left(\frac{t_r}{(1-\alpha)T_p}\right) \exp\left[j\pi \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right) \gamma t_r^2\right] \quad (3) \end{aligned}$$

式中，上标*表示共轭。由式(3)可见匹配滤波后的干扰时域仍为LFM信号，且时域宽度为 $(1-\alpha)T_p$ 。可见通过改变参数 α 便可以控制干扰在距离向的扩展范围。通常情况下，为了使干扰得到较大的匹配滤波增益，调频率失配比应满足 $1-\alpha < 1/D$ ^[16]， D 为匹配滤波前后信号时宽之比称为脉冲压缩比。

3 正交匹配滤波干扰抑制

3.1 距离估计

一般情况下单部干扰机仅能发射一个非欺骗式点源调频斜率失配干扰，要想遮蔽更大的场景区域需要多个干扰机。各个干扰机之间具有一定距离，即干扰点源在空间中满足稀疏分布的特点。于此同时，为了实现地面场景的遮蔽干扰，干扰机发射能量往往远大于真实回波信号能量，即雷达回波具有高干信比的特点。这两个特点使得压缩感知超分辨算法得以应用。首先对干扰进行匹配滤波，在距离向将出现稀疏分布的干扰峰值点，这些峰值点对应的距离即为干扰点源的距离位置。但是，由于系统分辨率的限制，仅从匹配滤波的结果进行干扰位置估计，其误差将在半个距离门之内。基于这一不足，本文在所提匹配滤波的基础上利用稀疏超分辨^[17]算法对干扰点源位置进行超分辨估计。

近年来，CS技术在雷达信号处理中被广泛应用。CS技术指出，当信号具有稀疏性或可压缩性时，可以通过比Nyquist采样数更少的采样来重建原信号。在SAR/ISAR成像中，CS技术可以有效

去除因匹配滤波产生的旁瓣,因而成为了超分辨成像^[7]的一种重要手段。CS数学模型为

$$\mathbf{x} = \Phi \mathbf{s} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{x}$ 为原始信号, Φ 为稀疏字典, $\mathbf{s}$ 为 $\mathbf{x}$ 在稀疏字典基下的投影系数向量。CS理论指出, 当 $\mathbf{x}$ 直接稀疏或者 $\mathbf{s}$ 稀疏时, 便可以通过少于Nyquist采样的采样数对 $\mathbf{x}$ 进行准确或近似恢复。CS采样过程可以表示为矩阵形式

$$\mathbf{y} = \Psi \mathbf{x} = \Psi \Phi \mathbf{s} = \Theta \mathbf{s} \quad (5)$$

其中, $\Theta = \Psi \Phi$ 为感知矩阵, 采样矩阵 Ψ 的行数远小于列数, 意味着更少的采样数。压缩感知理论证明, 当矩阵 Θ 满足约束等距性(Restricted Isometry Property, RIP)时, 可通过 l_1 范数约束对稀疏信号 $\mathbf{s}$ 准确重构。对于雷达信号处理中的距离超分辨而言, 其采样矩阵与稀疏字典都是确定已知的形式。其中稀疏字典中的稀疏基是SAR系统发射信号的时延

$$\Phi = [S_t(t - \Delta\tau) \quad S_t(t - 2\Delta\tau) \quad \cdots \quad S_t(t - M\Delta\tau)] \quad (6)$$

其中, $\Delta\tau$ 为单位时延, M 为场景网格数。采样矩阵一般为单位矩阵, 当进行稀疏采样时采样矩阵由单位矩阵中的数行组成。在距离超分辨估计中不需要考虑稀疏采样的过程, 取采样矩阵为单位矩阵即可。

对于本文所示的干扰源距离超分辨估计问题中, 干扰源在空间稀疏分布, 干扰能量远大于真实回波信号, 因而干扰源数可以通过对干扰信号的匹配滤波峰值个数进行计算获得。获得了干扰源个数后, 距离超分辨估计问题变为一个已知信号稀疏度 K 的稀疏重建问题。本文使用贪婪算法中的典型代表——正则化正交匹配追踪算法^[18](Regularized Orthogonal Matching Pursuit, ROMP)对干扰源位置进行稀疏重建。

当稀疏估计精度仍无法满足干扰抑制条件时, 为了更进一步减小干扰位置估计误差, 本文提出利用最小化剩余能量来进一步估计干扰精确位置信息。在稀疏估计结果的基础上, 再进行距离向网格插值, 对每个网格点进行干扰信号重建并计算相应的正交投影矩阵。而后利用该矩阵对回波信号进行处理, 选取剩余能量最小的网格点即为干扰位置的精确估计值

$$\min_{\hat{R}} \|\mathbf{P} \cdot \mathbf{F}_{S_r}\|_2 = \min_{\hat{R}} \left\| \left(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{F}}_{S_i} \cdot \hat{\mathbf{F}}_{S_i}^H \right) \cdot \mathbf{F}_{S_r} \right\|_2 \quad (7)$$

其中, 上标H表示共轭转置, $\mathbf{P}$ 为当前网格重建的干扰信号频域正交投影矩阵, 具体表达将在3.2节中给出。 $\mathbf{F}_{S_r}$ 为场景回波的频域表达, 是真实回波与干扰回波的叠加。 $\hat{\mathbf{F}}_{S_i}$ 为重建的干扰信号频域表达

$$\hat{\mathbf{F}}_{S_i} = \text{FFT}[S_i(t_r)] \exp\left(-j2\pi \frac{2\hat{R}_i}{c} f_r\right) \quad (8)$$

利用该精确估计值即可重建干扰信号。重建后的干扰信号为

$$\begin{aligned} \hat{S}_i(t_r) = S_i\left(t_r - \frac{2\hat{R}_i}{c}\right) &= \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_p}\right) \\ &\cdot \exp\left(j\pi \cdot (\alpha\gamma) \left(t_r - \frac{2\hat{R}_i}{c}\right)^2\right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\hat{R}_i$ 即为干扰距离估计值。

3.2 正交匹配滤波

匹配滤波是利用雷达系统发射信号与回波信号进行相关, 从而实现最大信噪比准则下的滤波处理, 由于时域滤波器由发射信号的时域共轭反转得到, 因而被称为匹配滤波。其数学模型如式(10)

$$\begin{aligned} \alpha_p \text{Sinc}(t - \tau) &= S_{\text{ref}}^*(-t) * \alpha_p S_r(t - \tau) \\ &= \text{IFFT}\{\text{FFT}[S_{\text{ref}}^*(-t)] \\ &\quad \cdot \text{FFT}[\alpha_p S_r(t - \tau)]\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, 符号 $*$ 表示卷积, $S_{\text{ref}}^*(-t)$ 为参考信号的共轭翻转, 而参考信号即为发射信号。 $S_r(t - \tau)$ 为回波信号, α_p 为回波幅度。由上式可以看到, 匹配滤波实际是参考信号的频域共轭与回波信号频域相乘后变换回时域的结果。同理, 将式(10)离散化后表示为

$$\text{Sinc}(t - \tau) = \text{IFFT}\left[\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^* \odot \dot{\mathbf{F}}_{S_r}\right] \quad (11)$$

式中, $\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}$ 和 $\dot{\mathbf{F}}_{S_r}$ 分别表示发射信号与回波信号的离散频谱。 $\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}$ 和 $\dot{\mathbf{F}}_{S_r}$ 都是 $N \times 1$ 维列向量, 因而该过程也可以表示为矩阵相乘的形式, $\odot$ 表示矩阵点积。

$$\text{Sinc}(t - \tau) = \text{IFFT}\left[\text{diag}\left(\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^*\right) \cdot \dot{\mathbf{F}}_{S_r}\right] \quad (12)$$

式(12)中, $\text{diag}(\cdot)$ 表示以向量元素为主对角线元素形成的主对角线矩阵, 即

$$\text{diag}(\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^*) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^*(1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^*(2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^*(N) \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (13)$$

将式(13)称为频域匹配滤波矩阵。

$$\mathbf{P} = \mathbf{I}_{N \times N} - \bar{\mathbf{F}}_{S_i} \cdot \bar{\mathbf{F}}_{S_i}^H \approx \mathbf{I}_{N \times N} \quad (14)$$

其中 $\bar{\mathbf{F}}_{S_i}$ 为 $\dot{\mathbf{F}}_{S_i}$ 的归一化后的干扰频域信号。由于 $\bar{\mathbf{F}}_{S_i}$ 中元素的绝对值远小于1, 因而正交投影矩阵近似为单位矩阵。频域正交匹配滤波矩阵为

$$\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^\perp = \text{diag}\left(\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^*\right) \cdot \mathbf{P} \quad (15)$$

正交匹配滤波为

$$\begin{aligned} \text{IFFT} \left[\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^\perp \cdot \dot{\mathbf{F}}_{S_r} \right] &= \text{IFFT} \left[\text{diag} \left(\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^* \right) \cdot \mathbf{P} \cdot \dot{\mathbf{F}}_{S_r} \right] \\ &\approx \text{IFFT} \left[\text{diag} \left(\dot{\mathbf{F}}_{S_{\text{ref}}}^* \right) \cdot \dot{\mathbf{F}}_{S_{s,r}} \right] \\ &= \text{Sinc} \left(\dot{t}_r - \dot{\tau} \right) \end{aligned} \tag{16}$$

由式(16)可以看到，在正交匹配滤波的过程中，干扰被抑制而真实回波信号完成了匹配滤波过程。完整的算法流程图如图1所示。

4 仿真实验

仿真实验模拟SAR制导雷达与干扰机对抗过程，制导雷达对目标成像于此同时干扰机对目标进行遮蔽干扰使得SAR无法获取目标图像进而不能进行匹配制导。干扰机间歇发射调频斜率失配干扰以形成对SAR图像的区域遮蔽。实验验证了正交匹配滤波在不同信干比下的干扰抑制性能，并且将正交匹配滤波算法与频域陷波技术进行对比。由于实际中SAR系统回波信噪比通常在-10~0 dB之间，所以下实验均在脉压前信噪比为0 dB的情况下进行。实验参数如表1所示。

为了验证两种干扰抑制方法的影响因子之间的关系，本文通过测试多组实验参数分别绘制了各影

响因子之间的曲线关系，如图2和图3所示。图2中SIR均定义为脉冲压缩前信干比。距离估计相对误差定义为距离门长度对绝对误差的归一化，干扰抑制比定义为干扰抑制后能量与干扰抑制前能量之比。由图2(a)可以看出，随着信干比的不断降低，干扰点源距离估计相对误差逐渐降低，对于不同的 α 其趋势相同。图2(b)表明，当距离估计相对误差低于0.01时干扰抑制比快速下降，干扰抑制效果迅速增强。但是要想达到这一误差，信干比必须小于-20 dB。对比图2(a)、图2(b)可以看到，虽然信干比过高导致干扰点源距离估计具有一定误差，但是这一误差对应的干扰抑制比仍然大于当前的干信比。也就是说，即使干扰点源距离估计有一定误差，但是其所带来的干扰抑制能力足以完全抑制当前干扰，因而，本文所提方法可在较大的信干比动态范围内正常工作。 α 和SIR对频域陷波法干扰抑制比的影响如图3所示，可以看到不同 α 之间差异较小，干扰抑制比的变化主要受SIR影响，随着SIR的不断降低，干扰抑制能量逐渐不足以抑制干扰能量，干扰抑制性能逐渐下降，这一点从1维点目标试验中也可以得到验证。综上，频域陷波法干扰抑制能力随SIR下降逐渐下降，且对真实回波有一定损失。正

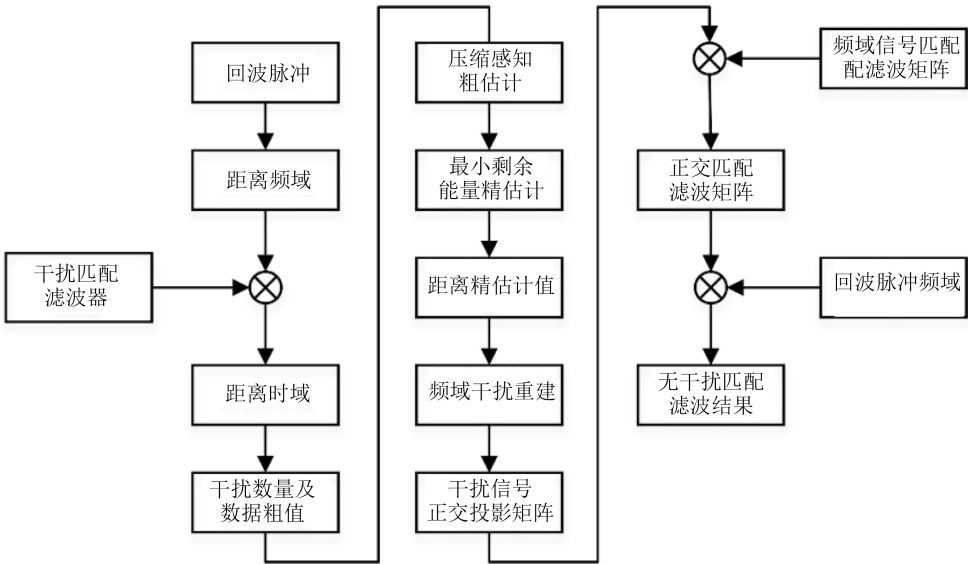


图1 算法流程示意图

表1 实验参数

参数	数值	参数	数值
载频	3 GHz	距离向采样点	1024
信号带宽	100 MHz	脉冲数	512
脉冲宽度	2 μ s	脉冲重复频率	3 kHz
采样频率	120 MHz	干扰点源数量	1
平台速度	50 m/s	调频斜率失配比	0.8

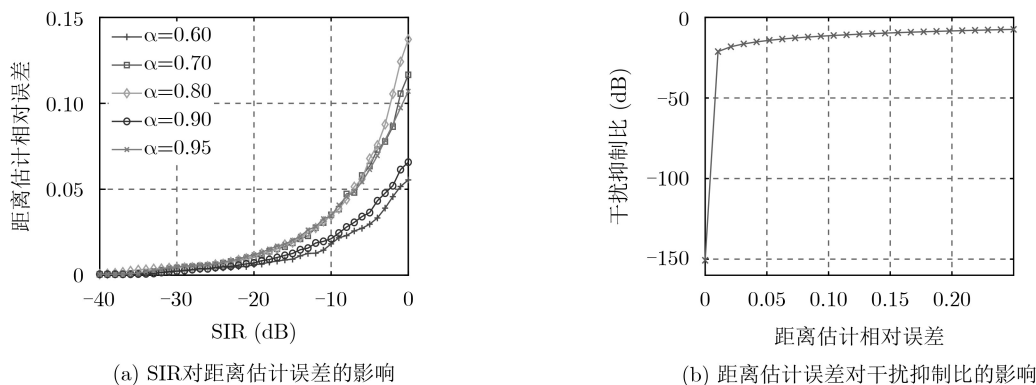


图2 正交匹配滤波影响因子关系曲线

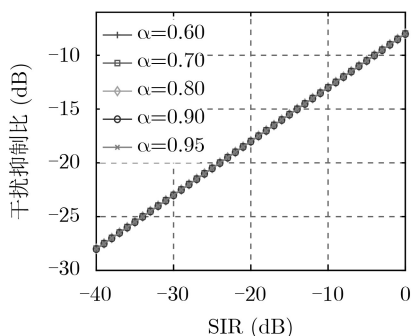


图3 SIR对频域陷波法干扰抑制比的影响

交匹配滤波法可在更大的SIR动态范围内正常工作,同时对真实回波损失较小。

为了进一步验证将本文所提方法对SIR的容忍

度以及与频域陷波法进行对比,本文又进行了2维多点目标的干扰抑制成像仿真实验。实验结果如图4所示。

两实验均在脉压前信干比为-29.5 dB的情况下进行,对比图4(c)、图4(d),频域陷波法在抑制干扰的同时不可避免的将真实回波信号频谱也同时压制,参考信号与回波信号发生失配,因而距离向匹配滤波函数旁瓣升高。反观本文所提的正交匹配滤波法,在干扰抑制过程中对真实回波信号造成损失较小,因而干扰抑制后点目标成像结果与无干扰点目标成像结果差异很小,进一步说明了正交匹配滤波的优异性能。两者干扰抑制比分别为-22.75 dB、-84.6 dB,可见,本文所提算法干扰抑制效果远远好于频域陷波法。

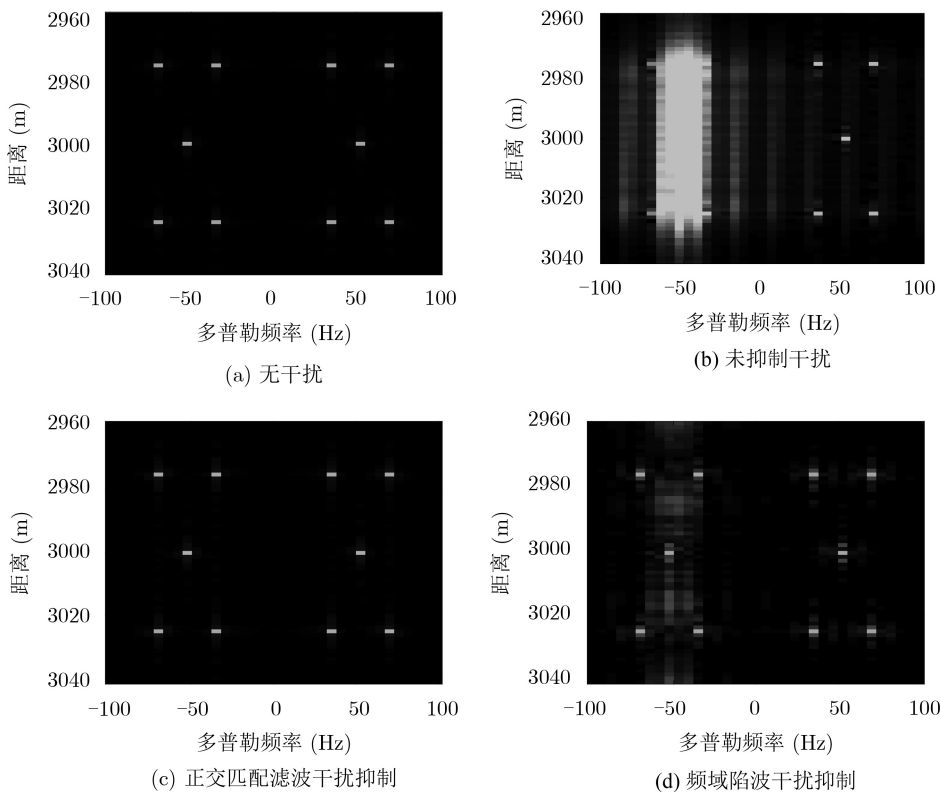


图4 点目标成像干扰抑制效果对比

为了更进一步验证正交匹配滤波在SAR图像干扰抑制中的效果并与频域陷波法对比,本文模拟真实作战场景中地面干扰机对SAR制导雷达进行干扰以遮蔽地面坦克集群。通过对一幅高分辨SAR图像进行逆向仿回波得到被干扰的回波数据,并进行正交匹配滤波干扰抑制与频域陷波干扰抑制处理。结果如图5所示。

两实验均是在脉压后信干比为 -13.47 dB的基础上进行的,从图5(b)可以看到,干扰在成像后覆盖了SAR图像上的一部分区域,使得图中的车辆被遮蔽。图5(c)为经过正交匹配滤波干扰抑制后的成像结果,本文所提方法有效的抑制了回波中的强干

扰恢复了SAR无干扰图像。对比无干扰SAR图像,图像信息被完整保留。于此同时,3个陷波带宽不同的频域陷波器被用于干扰抑制处理,3个陷波器的陷波宽度分别为40, 50, 60, 滤波器频率分辨率为 0.195 MHz,即各陷波器陷波频率宽度分别为 7.81 MHz, 9.77 MHz, 11.72 MHz。干扰抑制结果分别如图5(d)—图5(f)所示,虽然该方法抑制了大部分干扰也恢复了真实SAR图像,但是可以看到,成像结果出现距离向散焦以及旁瓣升高等现象。随着陷波带宽的增加,成像结果逐渐恶化,严重影响了SAR图像质量。通过以上SAR图像干扰抑制的实验结果,再次证明了本文所提方法的优异性能。

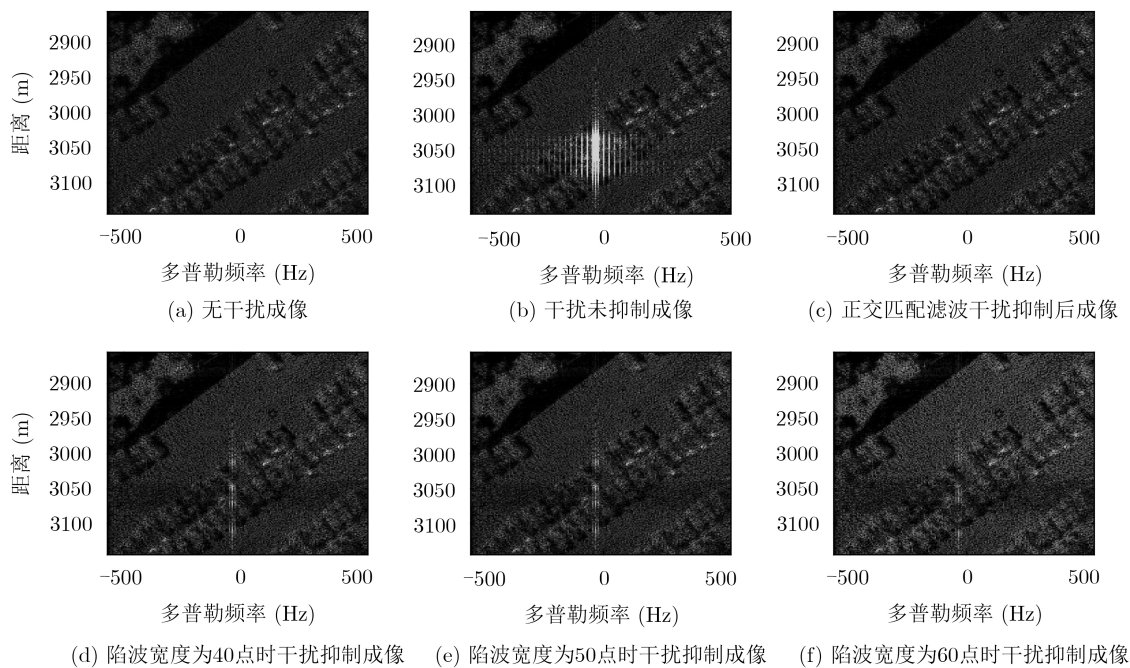


图5 干扰抑制成像对比实验

5 结论

为了在单通道SAR系统中有效抑制调频斜率失配干扰,本文提出了一种抗干扰的新方法。本方法在干扰调频斜率已知的基础上,利用稀疏超分辨率以及剩余能量最小化方法实现了对干扰源距离的精确估计并以此重建干扰信号频谱。然后将频域匹配滤波矩阵投影到干扰信号频谱的正交空间得到了频域正交匹配滤波矩阵。最后,通过正交匹配滤波实现了对干扰的有效抑制并无失真的重建SAR图像。虽然SIR对干扰源距离估计会产生一定误差,但该方法具有较强的距离误差容忍度,能够在较大的信干比动态范围下有效抑制干扰,且对真实回波损失较小。仿真实验验证了本文所提方法的有效性及其优越的干扰抑制性能。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BAO Zheng, XING Mengdao, and WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [2] 李煜, 陈杰, 张渊智. 合成孔径雷达海面溢油探测研究进展[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 751–762. doi: [10.11999/JEIT180468](https://doi.org/10.11999/JEIT180468).
LI Yu, CHEN Jie, and ZHANG Yuanzhi. Progress in research on marine oil spills detection using synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3): 751–762. doi: [10.11999/JEIT180468](https://doi.org/10.11999/JEIT180468).
- [3] 党彦锋, 梁毅, 别博文, 等. 俯冲段大斜视SAR子孔径成像二维空变校正方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2621–2629. doi: [10.11999/JEIT180021](https://doi.org/10.11999/JEIT180021).

- DANG Yanfeng, LIANG Yi, BIE Bowen, *et al.* Two-dimension space-variance correction approach for diving highly squinted SAR imaging with sub-aperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2621–2629. doi: [10.11999/JEIT180021](https://doi.org/10.11999/JEIT180021).
- [4] 纪朋徽, 代大海, 吴昊, 等. SAR成像电子对抗技术综述[J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 508–513. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2019.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2019.06.012).
- JI Penghui, DAI Dahai, WU Hao, *et al.* Review of SAR imaging electronic countermeasures[J]. *Radio Engineering*, 2019, 49(6): 508–513. doi: [10.3969/j.issn.1003-3106.2019.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3106.2019.06.012).
- [5] 杨立波, 高仕博, 胡瑞光, 等. 合成孔径雷达相干与非相干干扰性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2444–2449. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.09).
- YANG Libo, GAO Shibao, HU Ruiguang, *et al.* Performance analysis of coherent jamming and non-coherent jamming against SAR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(11): 2444–2449. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.09](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.09).
- [6] 吴一戎, 胡东辉. 一种新的合成孔径雷达压制干扰方法[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(11): 1664–1667.
- WU Yirong and HU Donghui. A new noise jamming approach to SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(11): 1664–1667.
- [7] 崔永辉, 高俊尧, 李明良, 等. LFM脉压雷达调频斜率失配干扰技术研究[J]. 空军预警学院学报, 2016, 30(2): 98–101. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2016.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2016.02.006).
- CUI Yonghui, GAO Junyao, LI Mingliang, *et al.* Research on FM slope mismatch jamming of LFM pulse compression radar[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2016, 30(2): 98–101. doi: [10.3969/j.issn.2095-5839.2016.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-5839.2016.02.006).
- [8] 齐维孔, 禹卫东. 距离向DBF-SAR系统抗欺骗干扰研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2830–2835.
- QI Weikong and YU Weidong. Research on countering deceptive jamming with range DBF-SAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2830–2835.
- [9] 刘力, 杨小鹏. 稳健的相干干扰抑制算法[J]. 信号处理, 2017, 33(12): 1555–1561. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.005](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.005).
- LIU Li and YANG Xiaopeng. Robust algorithm to suppress coherent jamming[J]. *Journal of Signal Processing*, 2017, 33(12): 1555–1561. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.005](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.005).
- [10] 曾铮, 张福博, 陈龙永, 等. 基于多输入多输出合成孔径雷达的二维混合基线抗欺骗干扰方法[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 90–99. doi: [10.12000/JR18118](https://doi.org/10.12000/JR18118).
- ZENG Zheng, ZHANG Fubo, CHEN Longyong, *et al.* A two-dimensional mixed baseline method based on MIMO-SAR for countering deceptive Jamming[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 90–99. doi: [10.12000/JR18118](https://doi.org/10.12000/JR18118).
- [11] 李兵, 洪文. SAR线性调频脉冲干扰抑制研究[J]. 遥测遥控, 2004, 25(4): 15–19. doi: [10.13435/j.cnki.ttc.001740](https://doi.org/10.13435/j.cnki.ttc.001740).
- LI Bing and HONG Wen. Study of suppressing linear FM pulse jamming to SAR[J]. *Journal of Telemetry, Tracking, and Command*, 2004, 25(4): 15–19. doi: [10.13435/j.cnki.ttc.001740](https://doi.org/10.13435/j.cnki.ttc.001740).
- 001740.
- [12] 王悦, 盛卫星, 陈向炜. 平面天线阵快速正交投影波束形成算法[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(3): 339–344. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2019.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2019.03.017).
- WANG Yue, SHENG Weixing, and CHEN Xiangwei. A fast orthogonal projection beamforming algorithm for planar array[J]. *Radar Science and Technology*, 2019, 17(3): 339–344. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2019.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2019.03.017).
- [13] 刘明. 基于压缩感知的雷达信号处理技术研究[J]. 信息通信, 2017(12): 8–9. doi: [10.3969/j.issn.1673-1131.2017.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1131.2017.12.003).
- LIU Ming. Research on radar signal processing technology based on compressed sensing[J]. *Information & Communications*, 2017(12): 8–9. doi: [10.3969/j.issn.1673-1131.2017.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1131.2017.12.003).
- [14] 李少东, 杨军, 陈文峰, 等. 基于压缩感知理论的雷达成像技术与应用研究进展[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 495–508. doi: [10.11999/JEIT150874](https://doi.org/10.11999/JEIT150874).
- LI Shaodong, YANG Jun, CHEN Wenfeng, *et al.* Overview of radar imaging technique and application based on compressive sensing theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 495–508. doi: [10.11999/JEIT150874](https://doi.org/10.11999/JEIT150874).
- [15] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306. doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [16] 李敬勇. 对线性调频脉冲压缩雷达干扰的时域分析[J]. 电子信息对抗技术, 1998, 13(3): 15–20.
- LI Jingyong. Time domain analysis of jamming to LFM pulse compression radar[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 1998, 13(3): 15–20.
- [17] 胡长雨, 汪玲, 朱栋强. 结合字典学习技术的ISAR稀疏成像方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1735–1742. doi: [10.11999/JEIT180747](https://doi.org/10.11999/JEIT180747).
- HU Changyu, WANG Ling, and ZHU Dongqiang. Sparse ISAR imaging exploiting dictionary learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1735–1742. doi: [10.11999/JEIT180747](https://doi.org/10.11999/JEIT180747).
- [18] 黄振, 柏正尧. ROMP的正则化分析研究[J]. 南阳理工学院学报, 2018, 10(4): 51–55. doi: [10.3969/j.issn.1674-5132.2018.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5132.2018.04.011).
- HUANG Zhen and BAI Zhengyao. Study on the analysis of ROMP's regularization[J]. *Journal of Nanyang Institute of Technology*, 2018, 10(4): 51–55. doi: [10.3969/j.issn.1674-5132.2018.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5132.2018.04.011).
- 孟智超: 男, 1997年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像与抗干扰.
- 卢景月: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像.
- 张帅钦: 男, 1983年生, 高级工程师, 研究方向为雷达目标特性与目标识别.
- 张磊: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达成像, 目标识别.
- 王虹现: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理.