低波段天基雷达射频干扰机理及抑制方法

陈筠力[1,4],李劼爽[2],侯雨生[3],刘艳阳[3,4],陶明亮[2]

(1.上海航天技术研究院,上海200090;2.西北工业大学 电子信息学院,陕西 西安710072;
3.上海卫星工程研究所,上海200090;4.中科卫星应用德清研究院,浙江 德清313200)

摘　要: 天基合成孔径雷达(SAR)是一种重要的主动遥感设备,在测绘、目标警戒、资源探测等方面具有独特的全天时、全天候优势。但由于低波段电磁频谱异常拥挤复杂,也容易受到其他无线电设备的非蓄意射频干扰(RFI)。本文针对工作于P、L波段的天基SAR系统,分析其常见的地面射频干扰源及其干扰机理,并构建典型的窄带与宽带干扰模型,比较分析了频域陷波、最小均方(LMS)算法、自适应线谱增强(ALE)、特征子空间分解与时频滤波等多种干扰抑制算法,并在卫星实测数据的基础上进行仿真验证抑制宽带干扰的有效性。仿真结果表明:时频滤波算法抑制宽带干扰效果最好,造成的信号损失最小,能够为后续天基合成孔径雷达的抗干扰算法设计提供决策依据。

关键词: 天基合成孔径雷达; 低波段; 射频干扰; 干扰抑制

中图分类号: TN 955.3; TN 959.74　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.05.008

Radio Frequency Interference Mechanism and Suppression Methods for Low-Band Space-Borne Radar

CHEN Junli[1,4], LI Jieshuang[2], HOU Yusheng[3], LIU Yanyang[3,4], TAO Mingliang[2]

(1.Shanghai Academy of Space Technology, Shanghai 200090, China; 2.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China; 3.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200090, China; 4.Deqing Academy of Satellite Applications, Deqing 313200, Zhejiang, China)

Abstract: Space-borne synthetic aperture radar (SAR) is an important active remote sensing instrument, which has unique all-weather and all-time advantages in surveying and mapping, target detection, resource exploration, etc. However, due to the congestion of electromagnetic spectra in low band, it is also vulnerable to be affected by unintentional radio frequency interferences (RFIs) from other radio devices. In this paper, the common terrestrial interfering sources and the jamming mechanisms of space-borne SAR systems operating in P and L bands are analyzed. Typical narrowband and broadband jamming models are established. Several interference suppression algorithms such as the frequency-domain notch filtering algorithm, the least mean square (LMS) algorithm, the adaptive line enhancement (ALE) algorithm, the eigen-subspace decomposition algorithm, and the time-frequency filtering algorithm are comparatively analyzed, and the effectiveness of suppressing broadband interferences is verified by simulation based on the measured satellite data. The simulation results show that the time-frequency filtering algorithm has the best suppression effect on broadband interferences and the minimum signal distortion, which can provide decision-making basis for the subsequent anti-jamming algorithm design of future space-borne SAR.

Key words: space-borne synthetic aperture radar (SAR); low-band; radio frequency interference; interference suppression

收稿日期: 2019-08-07; **修回日期:** 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61801390, 61601298);上海航天科技创新基金(SAST2018-041);浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室开放基金(2018KF01,2018KF04)。

作者简介: 陈筠力(1971—),男,研究员,主要研究方向为卫星总体设计和卫星测试。

通信作者: 李劼爽(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为雷达认知抗干扰。

0　引言

低波段天基合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar，SAR）受到雨雪影响小，穿透率高，有利于在探测、侦察领域提供高分辨率清晰图像。国际电联协议对天基雷达工作频率使用制定的范围[1]见表1，其中P、L等低波段的工作带宽范围较窄，与其他系统冲突的频率段较多，容易受到许多潜在的干扰源影响。

表1　天基雷达典型波段工作频率

Tab.1　Typical operating frequencies of space-borne radar[1]

频段	频率范围/MHz	有效带宽/MHz
P	432～438	6
L	1 215～1 300	20～85
S	3 100～3 300	20～200
C	5 250～5 570	20～320
X	8 550～8 650	20～100
	9 300～9 900	20～300

这些干扰源造成的主要干扰形式为有源的非蓄意干扰[2]。这类干扰根据干扰带宽占总带宽的比值分为窄带非蓄意干扰与宽带非蓄意干扰。窄带非蓄意干扰常常来源于电台等设备发射的窄带信号以及同波段电视网、通信网以及地面雷达的非相参电磁干扰，而宽带非蓄意干扰的干扰源主要是地面电视广播卫星和空间监视雷达的发射信号以及部分其他天基雷达探测地面目标后反射回来的信号。其常见干扰源如图1所示。这类干扰形式上与天基雷达发射的线性调频信号相近，成像结果往往显示白色的亮纹，影响图像的解读与判定。

图1　天基雷达常见干扰源

Fig.1　Common interference sources to space-borne radar

为了消除干扰对于SAR系统的影响，可以从信号处理的角度对干扰进行分离与相消。以时域或频域自适应抵消估计为思想的最小二乘估计算法[3]、最小均方（Least Mean Square，LMS）算法[4]、自适应线谱增强（Adaptive Line Enhancement，ALE）算法[5]等；以频域陷波为思路的陷波滤波法[6]、通道均衡法等；有基于空间分解重构思想，利用信号子空间与干扰子空间正交来去除干扰的特征值子空间分解法[7]和奇异值分解法[8]；利用干扰和信号小波变换后系数不同来分离干扰域信号的小波分解法[9]；通过经验模式对瞬态干扰分解重构的经验模态分解算法[10]等。这些方法在抑制窄带干扰上有显著的效果，但处理宽带干扰的效果欠佳。目前处理宽带干扰的方法有利用短时傅里叶变换（Short Time Fourier Transform，STFT）[12]作时频域分析，或者是在处理窄带干扰的基础上进行改进，如将前面小波分解法与特征子空间法联合处理宽带干扰[11]，或STFT法结合小波分解抑制宽带干扰[9]。

未来地面无线电设备对带宽的需求越来越高，SAR系统将更容易受到宽带干扰的影响。本文通过建立和分析典型干扰模型，仿真并验证多种算法对窄带与宽带联合干扰的有效性。

1　干扰模型

根据上节对P、L波段的地面干扰源分析，可将干扰建模为以下几种基本模型。

1）窄带干扰。窄带干扰可构建成以下形式[12]：

$$rfi(n)=\sum_{m=1}^{N}A_m(n)\exp\left[\mathrm{i}\left(2\pi f_m n\right)\right] \tag{1}$$

式中：N为干扰信号的数量；A_m、f_m分别为系统工作信号的幅度、载波频率。

2）宽带干扰线性调频型宽带干扰的可构建成以下形式[12-13]：

$$rfi(n)=\sum_{m=1}^{N}A_m(n)\exp\left[\mathrm{i}\left(2\pi f_m n+\pi g_l n^2\right)\right] \tag{2}$$

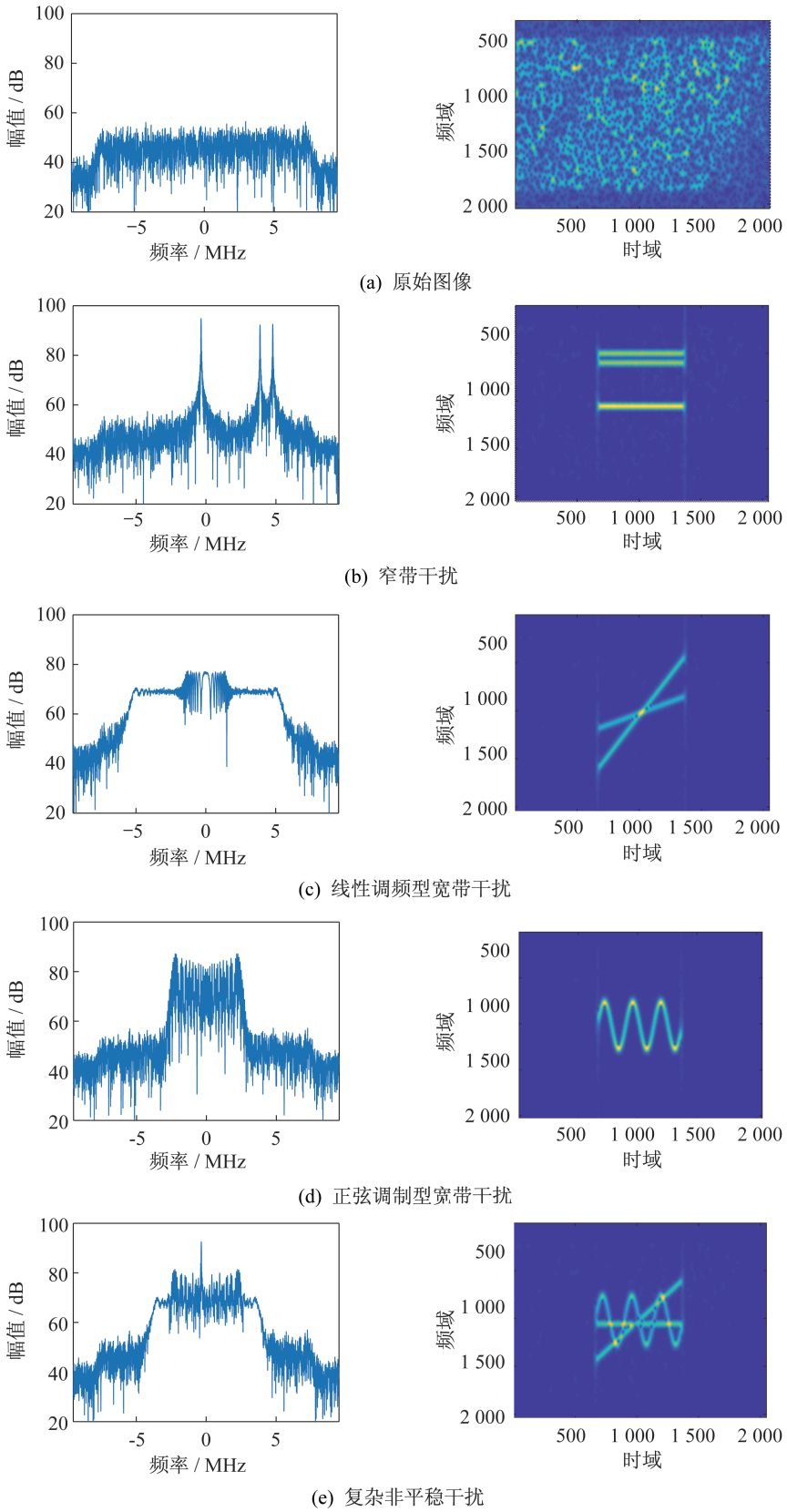
式中：N为干扰信号的数量；A_m、f_m、g_l分别为系统工作信号的幅度、载波频率、调频率。

正弦调制型宽带干扰的可构建成以下形式[13]：

$$rfi(n)=\sum_{m=1}^{N}A_m(n)\exp\left[\mathrm{i}g_l\sin\left(2\pi f_m n+\theta_l\right)\right] \tag{3}$$

式中：N为干扰信号的数量；A_m、f_m、g_l、θ_l分别为系统工作信号的幅度、载波频率、调频率和相位。

在欧洲实测ERS雷达回波的某一距离维回波数据上分别添加窄带干扰、线性调频型宽带干扰和正弦调制型宽带干扰3种联合干扰，取其中单次方位回波数据观察其频域与时频谱图，如图2所示。



(a) 原始图像

(b) 窄带干扰

(c) 线性调频型宽带干扰

(d) 正弦调制型宽带干扰

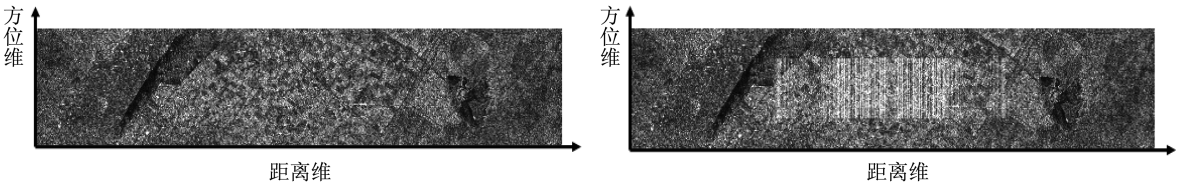
(e) 复杂非平稳干扰

图 2 不同干扰情况下频谱及时频谱比较

Fig.2 Comparison of spectrum and time-frequency representations under different types of interferences

图 2(a)为原始图像的频谱与时频谱图，其频谱图呈现随机噪声分布，其频域可以看作是多个线性调频信号频谱的叠加。图 2(b)在图 2(a)基础上加入了 3 处不同频率的窄带干扰，在频域上对应有 3 处尖峰，时频谱图上的窄带干扰表现出窄带干扰的频率不随时间变化的特点。图 2(c)在其基础上加入了 2 个调频率不同的线性调频型宽带干扰。图 2(d)在其基础上加入了正弦调制型宽带干扰，可以看出 2 类宽带干扰在原始图像基础上均有一个较宽的带宽凸起，其实质可看作多个复正弦信号的叠加。线性调频型宽带干扰表现出其频率随时间线性变化的特点；正弦调制型宽带干扰表现出其频率随时间以正弦波线性变化的特点，图 2(e)展示了上述 3 种干扰叠加后的干扰频谱与时频谱图，这一类复杂非平稳干扰是目前干扰抑制领域研究的难点问题。

图 3(a)为未加入干扰的原始图像，图 3(b)为加入图 2(e)联合干扰后的图像。可以看出，原始图像受干扰的影响的部分呈现条纹状的白带，对地物场景产生了遮盖，将会影响后续的图像解译处理。



(a) 原始图像　　(b) 联合干扰后图像

图 3　加入干扰前后成像结果对比

Fig.3　Comparison of imaging results with and without interferences

2　干扰抑制算法

本节将针对图 2(e)所示的复杂非平稳干扰，比较分析不同干扰抑制算法的有效性。

2.1　频域陷波法

频域陷波法是最常见的解决干扰的方法，通过设置门限将超过的部分去除来达到抑制干扰的效果。其基本步骤如下[14]：

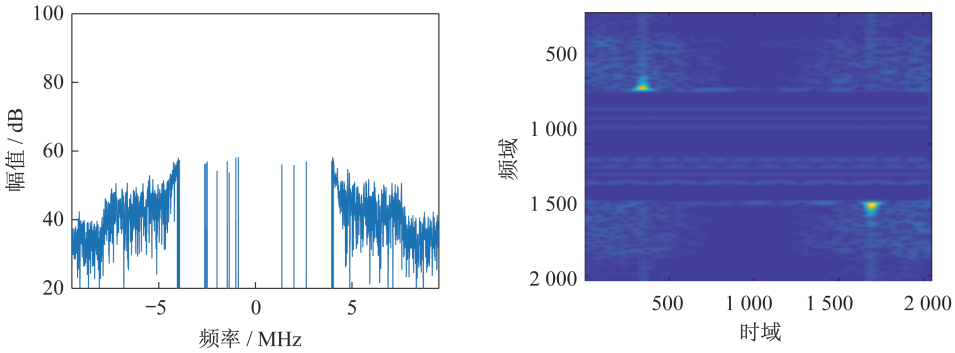
步骤 1　干扰信号作距离维傅里叶变换。

步骤 2　设定门限，取干扰信号的期望与 3 倍标准差的和，若干扰功率过大，可以适当调整选取标准差的倍率。

步骤 3　陷波处理，主要有归零法，设立衰减系数和取均值法，这里采取归零法。

步骤 4　对数据作傅里叶逆变换，获得抑制窄带干扰后的回波。

处理干扰的结果如图 4 所示，时频图上的干扰已基本消去，但与图 3(a)频谱上对比实际成像可以看出陷波法处理会导致频谱断裂并且大量原始数据丢失，进而导致目标响应旁瓣能量升高和空间分辨率降低。



(a) 频域　　(b) 时频谱图

图 4　复杂非平稳干扰情况下频域陷波法处理结果

Fig.4　Suppression results of complex non-stationary interferences obtained by the frequency-domain notch filtering method

2.2 LMS算法

LMS算法是使输入信号和期望信号之间的误差均方值最小,从而使输入信号尽可能逼近期望信号。其基本步骤如下[15]:

步骤1 确定原始信号x和期望信号$d(n)$,初始化权值迭代系数$w(n)$,步长μ。

步骤2 迭代循环,依次计算

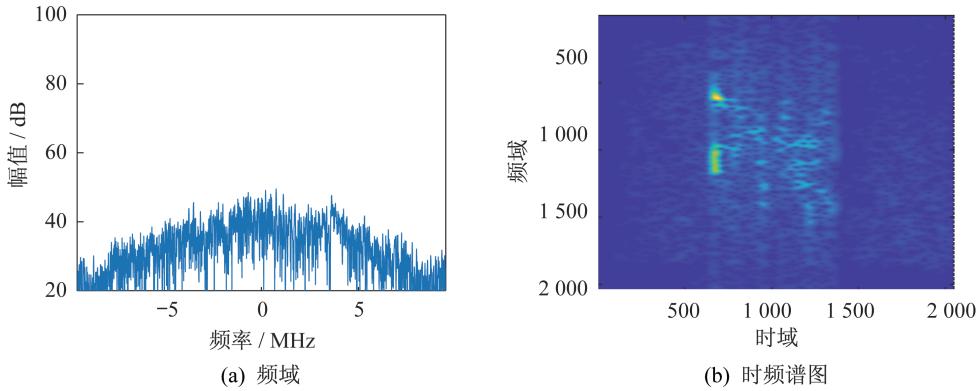
$$y(n)=w(n)x^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$e(n)=d(n)-y(n) \tag{5}$$

$$w=w+\mu e(n)x(n) \tag{6}$$

步骤3 判断是否满足迭代次数。若满足,则算法结束,输出结果$y(n)$;若否,则转入第2步继续循环。当步长μ选择过大导致均方误差过大,则会出现数据溢出的情况,而滤波器的抽头数N选择过小则会导致收敛速度缓慢。

处理结果如图5所示,从频谱上可以看出其可以有效抑制窄带干扰,但从时频图中还有大量的宽带干扰能量残余。



(a) 频域 (b) 时频谱图

图5 复杂非平稳干扰情况下LMS处理结果

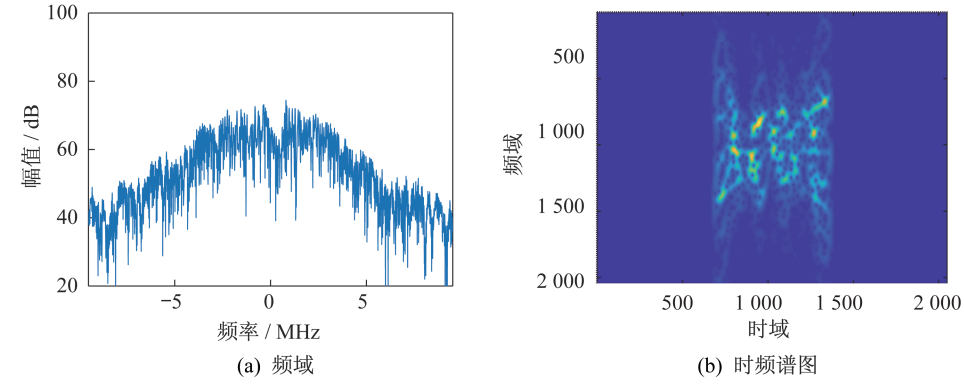
Fig.5 Suppression results of complex non-stationary interferences obtained by the LMS method

2.3 ALE器算法

VU等[16]提出采用ALE器来抑制RFI,其特点是期望信号$d(n)$无需噪声参考信号,而是利用输入信号的延迟信号$x(n-\tau)$,其余步骤等同LMS算法。输入信号包括宽带干扰和窄带信号时,如延迟信号τ大于宽带干扰的自相关函数的有效宽度而小于窄带信号的有效宽度时,则利用LMS滤波器将使宽带干扰与延时宽带干扰无关,窄带信号与延时窄带信号相关,从而将窄带信号从宽带干扰中分离出来。该方法处理窄带干扰效果与LMS处理结果类似,如图6所示,从时频图上可以看出窄带干扰已经消去,但宽带干扰仍有很大残留。

2.4 特征子空间分解法

特征子空间分解法[17]利用干扰信号与接收信

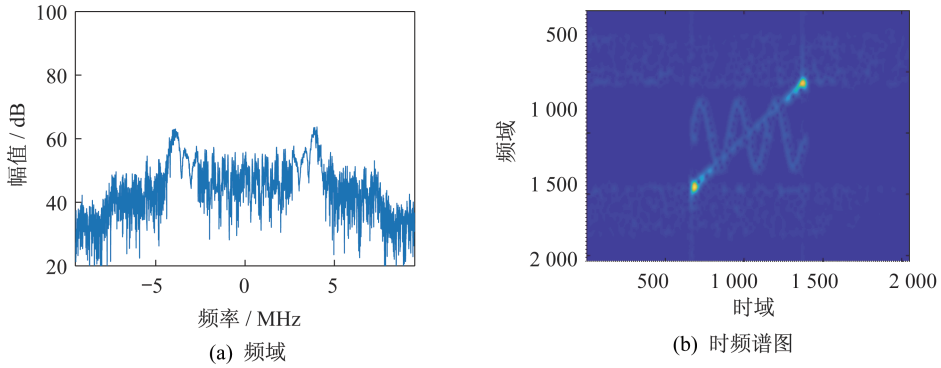


(a) 频域 (b) 时频谱图

图6 复杂非平稳干扰情况下ALE处理结果

Fig.6 Suppression results of complex non-stationary interferences obtained by the ALE method

号正交的特性，对原始数据的协方差矩阵进行特征值分解，找出特征值中明显较大的值，与之对应的特征向量构成干扰子空间，将原始数据投影到干扰子空间，即可得到对干扰数据的估计；然后从原始数据中减去估计所得的干扰数据，即为干扰抑制后的回波数据，处理结果如图 7 所示。由图 7 可见，宽带干扰一定程度上被抑制，但仍存在干扰残留。



(a) 频域　　(b) 时频谱图

图 7　复杂非平稳干扰情况下特征子空间分解法处理结果

Fig.7　Suppression results of complex non-stationary interferences obtained by the eigen-subspace decomposition method

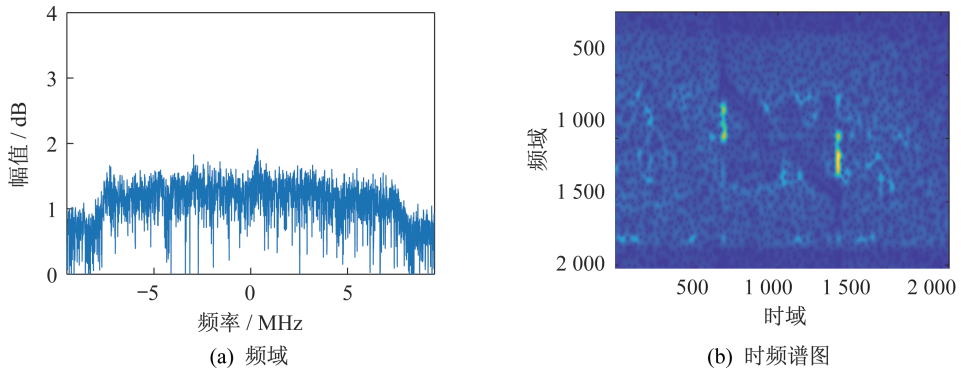
2.5　时频域非相干滤波

时频域非相干处理干扰的基本步骤如下[11]：

步骤 1　将输入信号作短时傅里叶变换，得到轴坐标为时间-频率的二维矩阵。

步骤 2　对矩阵每个时间点上的频谱设置门限，判定存在干扰较严重的频谱。对含有干扰较严重的频谱设置增益系数去除干扰。

步骤 3　将处理过的信号进行逆短时傅里叶变换，得到去除干扰后的数据。非相干检测干扰无需利用信号的相位信息，原理较为简单，处理大功率干扰时效果显著。处理干扰的结果如图 8 所示。显然，干扰处理效果很好，且无明显宽带干扰残留。



(a) 频域　　(b) 时频谱图

图 8　复杂非平稳干扰情况下时频非相干滤波方法处理结果

Fig.8　Suppression results of complex non-stationary interferences obtained by the time-frequency non-coherent filtering method

2.6　时频域相干滤波

时频域相干滤波法是针对特征子空间抑制窄带干扰较好但处理宽带干扰不干净，而提出的一种改进措施[18]，其具体原理是利用短时傅里叶变换将带干扰的非平稳信号分解到时频域上。由于在时频域上宽带干扰的能量分布被打散到每一条瞬时频谱上，因此，每个瞬时频谱上的干扰可以视作窄带干扰，此时用特征子空间法进行分解重构，便可以抑制掉原来的宽带干扰。其具体步骤如下：

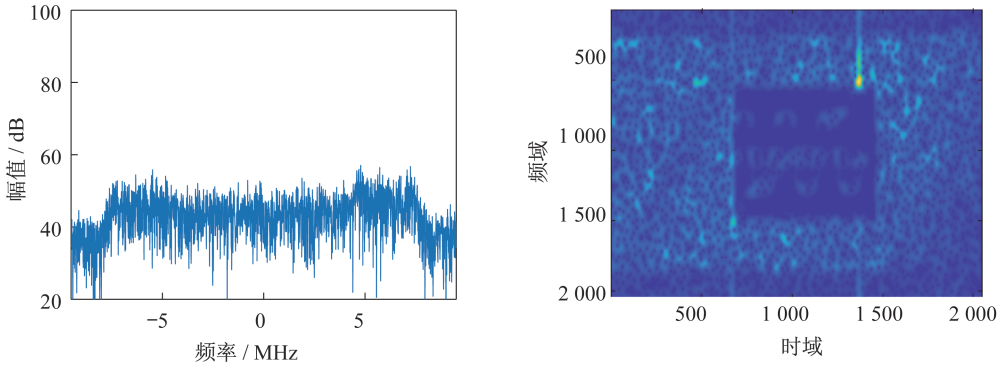
步骤 1　将输入信号作短时傅里叶变换，得到

轴坐标为时间频率的二维矩阵。

步骤 2 对时频谱上的每个频点对应的向量作特征子空间分解,求出对应的干扰子空间及其特征值进行正交,之后对每一个频点重构。

步骤 3 将处理过的信号进行逆短时傅里叶变换,得到去除干扰后的数据。

处理干扰的结果如图 9 所示。相比经典特征子空间分解法,其抑制干扰更为干净。



(a) 频域 (b) 时频谱图

图 9 复杂非平稳干扰情况下时频相干滤波方法处理结果

Fig.9 Suppression results of complex non-stationary interferences obtained by the time-frequency coherent filtering method

3 算法性能比较

本文选择数据处理前后的信噪比(SNR)和处理增益(Processing Gain, PG)作为算法性能比较的客观性指标,其定义如下[19]:

$$R_{\mathrm{RMS}}(x)=\frac{1}{\sqrt{N}}\|x\|_2 \tag{7}$$

$$R=20\log_{10}\frac{R_{\mathrm{RMS}}(x)}{R_{\mathrm{RMS}}(x_1-x)} \tag{8}$$

式中:R 为信噪比(SNR)。

$$G=20\left(\log_{10}\frac{R_{\mathrm{RMS}}(x)}{R_{\mathrm{RMS}}(x_1-x)}-\log_{10}\frac{R_{\mathrm{RMS}}(x)}{R_{\mathrm{RMS}}(y-x)}\right) \tag{9}$$

式中:G 为处理增益(PG);x 为原始图像数据;x_1 为干扰抑制后的图像数据;y 为加入干扰后的图像数据。

几种处理干扰算法对应的处理增益(PG)见表 2。从表 2 中可以看出,LMS 和 ALE 算法的 PG 大于 0 但远低于其余方法,说明其抑制窄带干扰有一定的效果,但处理宽带干扰效果欠佳,对应第 2.2、2.3 节频谱和时频谱图的结果。剩下的方法都可以一定程度上抑制宽带干扰,但频域陷波法、特征子空间分解法的增益稍低于两类时频滤波方法,说明后者处理宽带干扰的效果更好。

表 2 不同干扰方法抑制效果对比

Tab.2 Comparison of the suppression effects of different interference methods

抑制方法	PG/dB
频域陷波法[14]	19.29
LMS[15]	9.10
ALE[16]	8.59
特征子空间分解法[17]	21.33
时频域非相干滤波[11]	24.08
时频域相干滤波[18]	26.25

从结果上看,本文几种抑制 RFI 的方法均有一定的作用。LMS 算法由于其算法的局限性,在正常步长的调整范围内未能抑制干扰。ALE 理论上可以很好地抑制窄带信号中的宽带干扰,但当信号为宽带信号,它不能把信号从宽带干扰中提取出来。其余方法均能对宽带干扰有一定抑制作用,但是频域陷波法会造成频谱断裂;经典特征子空间分解法的频谱并未与原始信号的频谱相匹配,同时时频图上仍有模糊的残留的宽带干扰。相比之下,时频滤波算法抑制宽带干扰造成的信号损失最小,比较适合处理复杂非平稳干扰。

4 结束语

地面无线电设备会对SAR造成干扰，影响图像的成像质量及解译准确度。本文对窄带、线性调频宽带干扰和正弦调制宽带干扰进行了建模分析，并针对复杂非平稳干扰进行了干扰抑制算法性能比较。应注意的是，没有一种万能的方法可以适用于解决所有的干扰场景。干扰抑制技术的有效性取决于许多因素，包括SAR系统的工作模式、RFI本身的性质以及可用的计算资源等。当前干扰抑制技术最适合干扰在频谱稀疏或在时频域上稀疏的情形，其效果取决于干信比，具体应用过程中应该考虑效率与性能的折衷平衡。本文工作能够为后续SAR的抗干扰算法设计提供决策依据。

参考文献

[1] ITU-R . Frequency bands and required bandwidths used for spaceborne active sensors operating in the Earth exploration-satellite (active) and space research (active) services [R]. Recommendation ITU-R RS.577-7. 2009.

[2] 刘志凌.天基SAR抗干扰与空间目标精确成像方法研究[D].西安：西安电子科技大学，2014.

[3] WEST R, MOON T, GUNTHER J. A novel block fast array RLS algorithm applied to linear flight strip-map SAR imaging [C]// Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2010: 979-983.

[4] LI Y L, LI X Y, ZHOU Z M. Side-Lobe reduction for radio frequency interference suppression via clipping of strong scatterers [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(8): 1178-1182.

[5] VU V T, SJOGREN T K, PETTERSSON M I, et al. An approach to suppress RFI in ultrawideband low frequency SAR [C]// IEEE Radar Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2010: 1381-1385.

[6] MEYER F J, NICOLL J B, DOULGERIS A P. Correction and characterization of radio frequency interference signatures in L-Band synthetic aperture radar data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(10):4961-4972.

[7] WANG X, YU W D, QI X Y, et al. RFI suppression in SAR based on approximated spectral decomposition algorithm [J]. Electronics Letters, 2012, 48 (10): 594-596.

[8] CHUNRUI Y, YONGSHENG Z, ZHEN D, et al. SVD-based methods for radio frequency interference applied to SAR [J]. Defense Science Journal, 2012, 62 (2): 132-136.

[9] ZHANG S, XING M, GUO R, et al. Interference suppression algorithm for SAR based on time-frequency transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3765-3779.

[10] ELGAMEL S A, SORAGHAN J J. Using EMD-FrFT filtering to mitigate very high power interference in chirp tracking radars [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(4): 263-266.

[11] ZHAO T, ZHANG Y, YANG L, et al. The RFI suppression method based on STFT applied to SAR [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2013, 31: 171-188.

[12] YANG L, ZHENG H, FENG J, et al. Detection and suppression of narrow band RFI for synthetic aperture radar imaging [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28: 1189-1198.

[13] 李东，占木杨，方志平.基于HAF的参数化SAR宽带干扰抑制[J].系统工程与电子技术，2017(3)：514-521.

[14] BUCKREUSS S, HORN R. E-SAR P-band SAR subsystem design and RF-Interference suppression [C]// IGARSS 98 Conference. DLR, Seattle, WA, USA: IEEE, 1998: 1-4.

[15] LORD R T, INGGS M R. Efficient RFI suppression in SAR using LMS adaptive filter integrated with range/Doppler algorithm [J]. Electronics Letters, 1999, 35, 629-630.

[16] VU V T, SJOGREN T K, PETTERSSON M I, et al. RFI suppression in ultra-wideband SAR using an adaptive line enhancer [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(4): 694-698.

[17] 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.

[18] TAO M, ZHOU F, ZHANG Z. Wideband interference mitigation in high-resolution airborne synthetic aperture radar data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1): 74-87.

[19] NGUYEN L H, TRAN T D. A comprehensive performance comparison of RFI mitigation techniques for UWB radar signals [C]// IEEE International Conference on Acoustics. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2017: 3086-309.