

# 高频雷达射频干扰抑制的自适应接收滤波设计

杨贤<sup>1</sup>, 张华冲<sup>1</sup>, 李华<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北石家庄 050081; 2. 重庆邮电大学, 重庆 400065)

**摘要:** 为抑制高频雷达中的射频干扰, 本文提出了一种自适应滤波器设计方法。首先, 基于海杂波和射频干扰的多普勒特性, 设计了海杂波区域自适应检测算法, 以有效地估计射频干扰特性。然后, 对海杂波、噪声和射频干扰的功率谱进行分析, 并采用连续均值剔除算法, 以检测射频干扰是否存在及其频率范围。最后, 引入基于相似度约束的接收滤波器算法, 根据射频干扰频带自动计算约束参数, 从而实现了接收滤波器的自适应设计, 以稳健地抑制射频干扰。仿真结果表明, 相比传统白化滤波器, 本文所设计滤波器可以有效地抑制宽带和窄带射频干扰, 提高雷达抗干扰能力。

**关键词:** 高频雷达; 射频干扰; 接收滤波器; 连续均值剔除算法

中图分类号: TN958.93

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2024)01-0063-06

**引用格式:** 杨贤, 张华冲, 李华. 高频雷达射频干扰抑制的自适应接收滤波设计[J]. 雷达科学与技术, 2024, 22(1): 63-68.

YANG Xian, ZHANG Huachong, LI Hua. Adaptive Design of Receiving Filter for Radio Frequency Interference Suppression in High-Frequency Radar[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(1): 63-68.

## Adaptive Design of Receiving Filter for Radio Frequency Interference Suppression in High-Frequency Radar

YANG Xian<sup>1</sup>, ZHANG Huachong<sup>1</sup>, LI Hua<sup>2</sup>

(1. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

2. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In order to suppress the radio frequency interference (RFI) in high-frequency (HF) radar, an adaptive filter design method is proposed in this paper. Firstly, based on the Doppler characteristics of sea clutter and RFI, an adaptive detection algorithm for sea clutter region is designed to estimate the RFI characteristics effectively. Then, based on the power spectral analysis of sea clutter, noise and RFI, a consecutive mean excision algorithm is employed to detect the presence of RFI and its frequency range. Finally, a similarity constraint based receive filter algorithm is used to automatically calculate the constraint parameters according to the RFI frequency band, so as to adaptively design the receive filter to achieve robust suppression of RFI. Simulation results show that, compared with the traditional whitening filter, the proposed filter can effectively suppress both broadband and narrowband RFIs and improve radars' anti-interference capability.

**Key words:** high-frequency radar; radio frequency interference; receive filter; consecutive mean excision algorithm

## 0 引言

高频(High-Frequency, HF)雷达是海况探测和广域监视的有力工具,按工作原理可分为天波雷达和地波雷达<sup>[1-2]</sup>。然而,由于工作在高频波段(3~30 MHz),高频雷达经常受到射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)影响<sup>[3-4]</sup>。经过传统的脉

冲压缩和多普勒处理,射频干扰在距离-多普勒(Range-Doppler, RD)图上表现为条纹状<sup>[5-7]</sup>。其中,与距离单元平行的直线条纹由点频干扰引起,遍布RD图的带状条纹由宽带干扰引起,这严重降低了高频雷达的目标探测能力。

许多学者已经研究出各种有效的干扰抑制方法,包括基于空域的波束形成<sup>[8]</sup>、基于频域的干扰

频谱消除<sup>[9]</sup>、基于信号分解的迭代抑制<sup>[10]</sup>,以及接收滤波器的设计<sup>[11-12]</sup>等。然而,这些办法仍存在一些局限性。例如,波束形成无法抑制主瓣干扰<sup>[8]</sup>,干扰频谱消除未考虑宽带干扰<sup>[9]</sup>,信号分解参数难控<sup>[10]</sup>,图像纹理对单频干扰检测效果不佳<sup>[11]</sup>,直线检测技术不能检测宽带干扰<sup>[12]</sup>。就上述问题,文献<sup>[13]</sup>提出了基于滤波器设计的射频干扰抑制方案,对主旁瓣干扰和宽带窄带干扰均有效。但是,该方案在海杂波选取和相似度参数设置方面依赖经验,缺乏自适应性。如果海杂波区域检测不当,或射频干扰强度过大以致超过相似性门限能有效抑制的范围,固定的阈值设置可能导致干扰抑制不充分。

因此,本文针对海杂波区域和射频干扰频带的自适应检测问题开展研究,提出了海杂波区域检测和相似度参数设置的自适应方法,最终给出一套自适应滤波器设计方案。首先,根据文献<sup>[14]</sup>中频率-多普勒(Frequency-Doppler, FD)图的观测统计量,提出了新的自适应海杂波区域检测方法,以得到无海杂波区域。然后,通过对射频干扰和噪声的频谱分析,将射频干扰频率检测问题视为未知噪声中的异常值(outlier)检测,计算出未被射频干扰影响的“干净”区域的比例因子,从而实现射频干扰频率的自适应检测。最后,基于无海杂波区域、干扰的协方差矩阵以及未被射频干扰影响的“干净”区域,推导出滤波器的相似性门限与干扰带宽之间的直接关系,从而实现相似度参数的自适应赋值,最终得到射频干扰抑制的自适应滤波器设计方案。

海杂波区域检测和干扰频点检测都属于未知数据的异常值检测问题。本文采用了连续均值剔除(Consecutive Mean Excision, CME)算法来应对这些异常值检测挑战。该算法于2002年首次提出,旨在未知先验信息的情况下寻找被破坏的时域或频域样本<sup>[15]</sup>。随后,研究人员提出了适用于不同情况的CME算法,如后向CME、前向CME(Forward CME, FCME)<sup>[16]</sup>、双阈值CME<sup>[17]</sup>和基于最小值的CME<sup>[18]</sup>。实践经验表明,基于FCME原理并结合数据分布特点,设计对应的异常值检测算法,能够解决本文面临的海杂波多普勒频点和宽带干扰频点检测问题。

## 1 海杂波区域划分

本节首先分析海杂波的多普勒特性,然后建立观测统计量,利用异常值检测算法检测海杂波并将其置零,最后得到无杂波区域的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)、自相关函数和协方差矩阵 $R$ 。

假设高频雷达接收站以采样频率 $f_s$ 接收基带信号,每个周期采样点数为 $M$ ,积累 $P$ 个周期作相干处理。令接收数据为 $\mathbf{y}$ ,是 $PM$ 维的行向量。对于天线阵列来说,接收数据可视为经空域波束形成后的时域数据。

根据文献<sup>[14]</sup>对海杂波多域特性的分析,FD图中射频干扰的频域特征明显,因此可在频域-多普勒域进行海杂波检测和抑制。具体办法是,根据FD矩阵中雷达带宽内无干扰的FD单元的平均功率,检测某多普勒单元是否含有海杂波,继而得到无杂波区域。

海杂波区域划分的具体步骤如下:

1) 将雷达观测数据 $\mathbf{y}$ 排列为矩阵,并使用快速傅里叶变换处理 $\mathbf{y}$ ,生成 $P$ 行 $M$ 列的FD矩阵 $\mathbf{X}_{FD}$ <sup>[14]</sup>。

2) 计算雷达带宽在频域的对应该宽度, $M_B = \lfloor MB/f_s \rfloor$ ,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整, $B$ 为雷达带宽。雷达频率对应序号为 $\lfloor (M - M_B)/2 \rfloor$ 到 $\lfloor (M + M_B)/2 \rfloor$ 。

3) 取雷达频段内较小幅度点,比如 $1/2$ ,计算各多普勒单元的平均幅度,得到观测统计量 $\mathbf{A}_{FD}^{sc}$ 。

4) 对于观测统计量 $\mathbf{A}_{FD}^{sc}$ ,使用异常值检测算法,例如FCME算法,检测出海杂波所在多普勒单元,进而得到无杂波区域 $\mathbf{P}_{cf}$ 。

5) 根据 $\mathbf{P}_{cf}$ ,逆多普勒处理至时域,并估计其自相关函数、PSD和协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 。

## 2 RFI频点检测

本节首先分析RFI和噪声的功率谱密度,然后用改进FCME算法,对PSD进行异常值检测,得到射频干扰频点,从而计算未被射频干扰影响的干净区域比例 $\gamma_{cf}$ ,以支持后续的滤波器自适应设计。

噪声功率相对低且平坦,而射频干扰功率很高,并集中于特定的频率。因此,可以将射频干扰频率的幅度视为异常值,使用FCME方法来检测它们。假设噪声PSD是零均值的复高斯分布,而射频干扰在特定的频率上表现为较大的异常值,则射频干扰频率的检测类似于检测复高斯噪声中的异常值。

然而,相比窄带干扰,宽带干扰检测面临的问题是干扰频点数量未知,可能很大。如使用文献[7]方法,其检测门限难以确定。如果采用一般的 $\alpha$ 倍标准差法,宽带干扰频点太多会导致标准差估计的偏差过大,最终使得检测结果不准确。因此,若要在PSD中较为准确地估计噪声方差,就需要排除宽带干扰的影响。

本节采用FCME方法来检测PSD中的射频干扰频率。研究人员已开发各种CME算法来检测加性噪声中的异常值,且不需要关于异常值或噪声的平均值或协方差的先验信息。大多数CME算法是以迭代的方式操作的:根据噪声重复计算阈值,然后将超出阈值的样本归入异常集或噪声集。实践经验表明,FCME算法是射频干扰频率检测的一个合理选择。在实际数据处理中,FCME和双阈值CME在检测窄带干扰频率时有相似的表现,但FCME的效率更高。此外,后向CME无法准确检测宽带干扰频率,而基于最小值的CME则不如FCME稳健。

FCME算法的步骤如下。

首先,将样本按其幅度从大到小排序。然后,给定初始集的大小 $l_0$ ,视为无干扰的噪声集。 $l_0$ 的大小可设为所有样本数目的10%,一般可以保证该集合没有干扰。接下来,不断重复“根据样本计算门限”的迭代操作,直至达到结束条件。

假设当前迭代的样本集合为 $\mathbf{x}$ ,集合大小为 $l$ ,当前阈值是噪声均值与比例因子的乘积,即

$$T_{\text{cme}} = \bar{\mathbf{x}} \cdot T_{\text{fa}} \quad (1)$$

式中 $\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{l} \sum_{l'=1}^l |\mathbf{x}(l')|$ 是当前集合的平均样本幅度, $T_{\text{fa}}$ 是比例因子,为

$$T_{\text{fa}} = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \sqrt{-\ln(P_{\text{fa}})} \quad (2)$$

由预设的恒虚警概率决定。比如, $P_{\text{fa}}=0.001$ 时 $T_{\text{fa}}=$

2.97, $P_{\text{fa}}=0.01$ 时 $T_{\text{fa}}=2.42$ 。

使用该门限,对待检测样本做分类,所有低于门限 $T_{\text{cme}}$ 的样本归为新的噪声集,高于门限者归为新的待检测样本集。随着 $\mathbf{x}$ 更新, $l$ 增大,FCME算法会反复更新 $\bar{\mathbf{x}}$ 和 $T_{\text{cme}}$ ,迭代直至在待检测样本集中找不到小于阈值的样本,此时待检测样本集视为异常值集合。

表1总结了检测射频干扰频率的FCME算法。它的输入是雷达信号波段内的PSD和期望的虚警概率 $P_{\text{fa}}$ ,它的输出为未被射频干扰占用的干净频带的比率 $\gamma_{\text{cf}}$ 和方差 $\sigma_{\text{cf}}$ 。

表1 FCME算法检测射频干扰频率

将雷达信号波段的PSD从小到大排列为顺序统计量 $f$ ,假设为 $L$ 维,设置所需的 $P_{\text{fa}}$ 和初始集大小 $l_0$ 。

1) 由式(2)计算 $T_{\text{fa}}$ ,令 $l=l_0$ ;

2) 提取前 $l$ 个样本作为当前集 $f_{(l)}$ ,计算其均值

$$\bar{f}_{(l)} = \frac{1}{l} \sum_{l'=1}^l |f(l')|$$

3) 若 $l \leq L-1$ 且 $|f(l+1)| \leq T_{\text{fa}} \cdot \bar{f}_{(l)}$

令 $l=l+1$ 并回到第2步,否则,继续;

4) 计算干净带宽的比例 $\gamma_{\text{cf}} = l/L$ 和标准差 $\sigma_{\text{cf}}$

$$\sigma_{\text{cf}} = \sqrt{\|f_{(l)}\|^2 / 2l}$$

### 3 自适应滤波算法设计

目前,我们已经准备好无杂波区域 $\mathbf{P}_{\text{cf}}$ ,协方差矩阵 $\mathbf{R}$ ,以及干净带宽比例 $\gamma_{\text{cf}}$ 。在设计滤波器之前,先分析另外两种同样基于 $\mathbf{R}$ 的滤波。第一种是经典的白化滤波 $\mathbf{R}^{-1}$ ,白化滤波通常是简单而有效的,但是当 $\mathbf{R}$ 非正定时,它并不稳健。第二种是基于子空间投影的滤波,该滤波抑制窄带射频干扰十分有效,然而,它对宽带干扰的抑制效果较差,因为干扰子空间无法与噪声和残余杂波子空间分离。因此,本文在滤波器中引入一个约束条件,以提高滤波器的稳健性和有效性。

本文在相似性约束下设计接收滤波器,该约束将设计的滤波器限制在发射波形的一定欧氏距离内。欧氏距离中的相似性约束相当于对相关系数的要求,对白化滤波器产生了对角线负载。实际上,对角线负载也是一种经典且稳健的技术。

本文设计的滤波器 $\mathbf{w}$ 和发射波形 $\mathbf{s}$ 之间的相

似性约束可以表述为

$$\frac{|s^H w|}{\|s\| \|w\|} \geq \varepsilon, \left\| \frac{s}{\|s\|} - \frac{w}{\|w\|} \right\|^2 \leq 2(1 - \varepsilon) \quad (3)$$

式中  $\varepsilon$  是相似性阈值, 相似性约束  $\varepsilon$  控制了发射波形和设计滤波器之间的最小相关性。

在相似性约束  $\varepsilon$  下, 输出信噪比优化问题被重写为

$$\begin{cases} \max_w & |w^H s|^2 / (w^H R w \cdot \|s\|^2) \\ \text{s.t.} & |w^H s| \geq \varepsilon \cdot \|w\| \|s\| \end{cases} \quad (4)$$

假设  $R$  是对称正定, 最优滤波可由以下公式给出:

$$w_{\text{opt}} = \begin{cases} s, & \varepsilon = 1 \\ (R + \lambda_\varepsilon I)^{-1} s, & \varepsilon \in (\varepsilon_{\text{wf}}, 1) \\ R^{-1} s, & \varepsilon \in (0, \varepsilon_{\text{wf}}) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $I$  表示单位矩阵, 而

$$\varepsilon_{\text{wf}} = \frac{s^H R^{-1} s}{\|s\| \sqrt{s^H R^{-2} s}} \quad (6)$$

表示白化滤波的相似度,  $\lambda_\varepsilon$  是方程(7)的唯一解。

$$\frac{s^H (R + \lambda I)^{-2} s}{[s^H (R + \lambda I)^{-1} s]^2} = \frac{1}{\varepsilon^2 \|s\|^2} \quad (7)$$

式(7)可以用数值方法有效地求解, 因为方程左侧对于  $\lambda$  来说是单调递减的。

理论上, 协方差矩阵  $R$  应该是对称正定的。但在实践中,  $R$  是根据样本来估计的, 有可能噪声子空间中存在一些小的非正定的特征值。在这种情况下, 白化滤波  $R^{-1} s$  是不稳健的。然而, 方程(7)依然有解  $\lambda_\varepsilon$  为式(5)提供对角加载。因此本文所设计的滤波器对于射频干扰抑制兼具稳健性和有效性。

鉴于  $\varepsilon$  在滤波器设计中的重要性, 下面将讨论如何自适应地赋值  $\varepsilon$ 。

假设发射波形  $s$  的功率谱为  $S(f)$ ,  $f \in \mathcal{F}$ , 其中  $\mathcal{F}$  表示信号带宽。假设滤波器的理想频谱为  $\hat{W}(f)$ ,  $\hat{W}(f)$  应在射频干扰频段  $\mathcal{F}_1$  有缺口并与  $S(f)$  在  $\mathcal{F} \sim \mathcal{F}_1$  中相同。因此我们定义

$$\hat{W}(f) = \begin{cases} S(f), & f \in \mathcal{F} \sim \mathcal{F}_1 \\ 0, & f \in \mathcal{F}_1 \end{cases} \quad (8)$$

根据 Parseval 定理,  $s$  和  $\hat{w}$  的相关关系计算为

$$\frac{|s^H \hat{w}|}{\|s\| \|\hat{w}\|} = \frac{\left| \int_{\mathcal{F}} S^*(f) \hat{W}(f) df \right|}{\sqrt{\int_{\mathcal{F}} |S(f)|^2 df \cdot \int_{\mathcal{F}} |\hat{W}(f)|^2 df}} = \frac{\int_{\mathcal{F} \sim \mathcal{F}_1} |S(f)|^2 df}{\int_{\mathcal{F}} |S(f)|^2 df} \quad (9)$$

回顾前面推导, FCME 方法提供了  $\gamma_{\text{cf}}$  作为未占用带宽  $\mathcal{F} \sim \mathcal{F}_1$  与整个波段  $\mathcal{F}$  的宽度比。假设  $|S(f)|$  是平坦的, 相似性约束可赋值为

$$\varepsilon = \sqrt{\gamma_{\text{cf}}} \quad (10)$$

综上, 将自适应滤波器设计归纳为图1框图所示。匹配、白化和未匹配的滤波器是自适应选择的。当  $\gamma_{\text{cf}} = 1, \varepsilon = 1$  时, 没有检测到射频干扰, 采用发射波形做匹配滤波。在有射频干扰的情况下, 当  $\varepsilon_{\text{wf}} > \varepsilon$  时, 白化滤波  $R^{-1} s$  为全局最优。否则, 利用公式(7)求解  $\lambda_\varepsilon$ , 从而设计滤波器  $(R + \lambda_\varepsilon I)^{-1} s$ 。

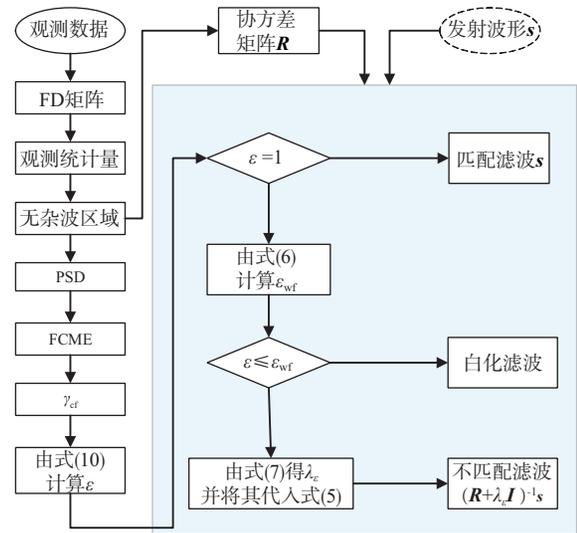


图1 自适应滤波设计方案图

## 4 实验结果

本节采用实测数据验证所设计的滤波器性能。高频雷达采用线性调频连续波, 带宽  $B=10$  kHz, 采样频率  $f_s=42$  kHz, 相干积累周期数  $P=256$ , 包含宽带干扰以及多个目标。对实测数据进行信号处理和脉冲压缩, 实测数据的RD图如图2所示。传统的信号处理采用匹配滤波器进行脉冲压缩, 使

用快速傅里叶变换进行多普勒处理,得到的RD图如图2所示。由于宽带干扰影响,整个RD图充满了水平条纹,潜在目标被干扰条纹掩盖。因此非常有必要做干扰抑制。

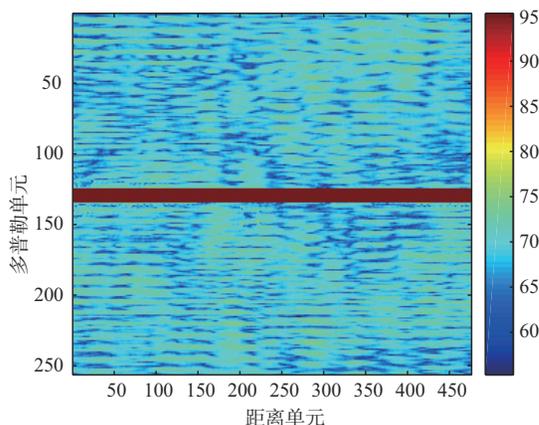
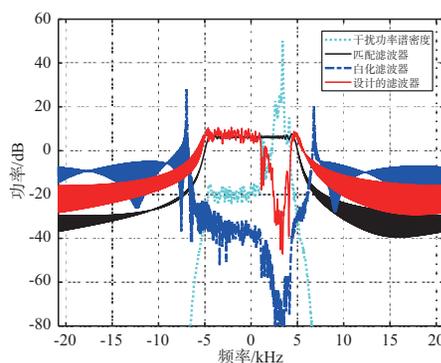


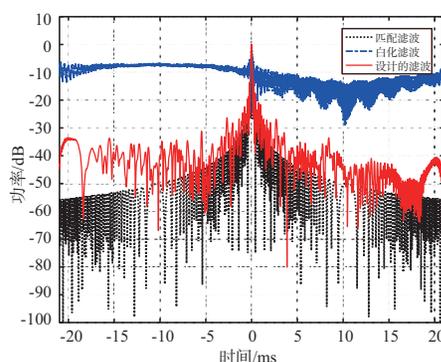
图2 有干扰的RD图

采用本文设计的滤波器来抑制射频干扰。首先使用观测统计量去除海杂波,得到无杂波区域  $P_{cf}$  的多普勒单元为  $[1, 2, \dots, 124]$  和  $[135, 136, \dots, 256]$ 。然后,根据  $P_{cf}$  计算功率谱  $f$  和协方差矩阵  $R$ 。通过对  $f$  进行 FCME, 检测出射频干扰频率,得到未被占用频带比例  $\gamma_{cf} = 0.66$ 。接下来,计算相似性阈值  $\varepsilon = 0.81$ 。最后,由式(5)得到本文设计的最佳滤波器,其中白化滤波器的相似度  $\varepsilon_{wf} = 0.66$ 。本文设计的滤波器和白化滤波器的频谱图如图3(a)所示。我们可以看到,设计的滤波器频谱在射频干扰频率处有凹陷,因此对干扰有抑制能力。图3(b)显示了3种滤波器的输出包络。与匹配滤波器相比,本文设计的滤波器的旁瓣水平增加,但幅度可以接受,几乎不影响RD图;不过,白化滤波器的频谱和输出包络严重畸形,因为  $R$  有一个相当小的特征值。

最后,实验数据经过干扰抑制后得到的RD图展示在图4中。从图4(a)可见,射频干扰条纹都被设计滤波器所抑制,背景噪声水平较低。为便于比较,观察白化滤波器的仿真结果图4(b),虽然射频干扰条纹已经抑制,但RD图中出现了很多噪声条纹。这是因为,白化滤波器输出有很多大幅度旁瓣。由此可见,相似性约束对于接收滤波器的优化作用很大。

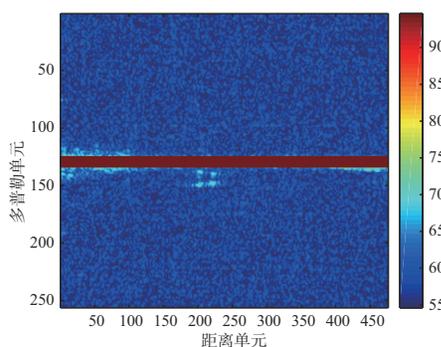


(a) 滤波频谱

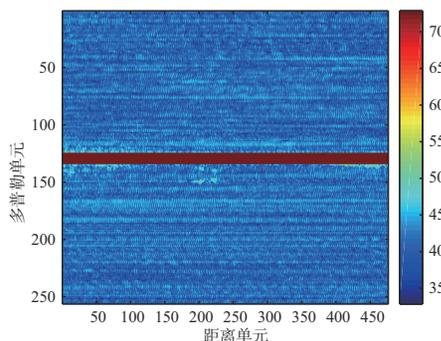


(b) 输出序列包络

图3 3种滤波器的频谱与输出



(a) 经本文滤波器抑制的RD图



(b) 经白化滤波器抑制的RD图

图4 设计滤波器和白化滤波器的RD图

## 5 结束语

本文提出了一种用于高频雷达射频干扰抑制的自适应接收滤波器设计方案。与传统的射频干扰抑制方法相比,本文对基于干扰协方差的接收滤波器进行了优化,能够有效抑制窄带和宽带射频干扰。为了实现滤波器自适应设计,本文提出了射频干扰频带检测和海杂波区域检测方法。即使存在海杂波,本文方法也能提取出无杂波区域,支撑对射频干扰协方差矩阵的估计以及对滤波器设计的相似性约束的评估。最后,实测数据处理实验结果证明了本文方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 周文瑜,焦培南.超视距雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [2] 高玉斌,岳显昌,周庆,等.高频地波雷达射频干扰慢时域抑制方法[J].雷达科学与技术,2023,21(1):53-63.
- [3] FABRIZIO G A. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications[M]. New York:McGraw-Hill Professional, 2013.
- [4] THAYAPARAN T, VILLENEUVE H, THEMENS D R, et al. Frequency Management System (FMS) for Over-the-Horizon Radar (OTHR) Using a Near-Real-Time Ionospheric Model[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60(1):1-11.
- [5] 罗忠涛.新体制天波超视距雷达信号处理研究[D].成都:电子科技大学,2015.
- [6] WANG Tao, LUO Zhongtao, WANG Zhaoyi. Modeling and Simulation of Radio Frequency Interference for High-Frequency OTH Radar[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Digital Signal Processing, Association for Computing Machinery, Chengdu, China: IEEE, 2022:248-253.
- [7] ZHANG Anan, LUO Zhongtao, LU Kun. Fusion Detection of Single-Frequency RFI Based on Doppler Maps for Sky-Wave OTH Radar[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Digital Signal Processing, Association for Computing Machinery, Chengdu, China: IEEE, 2022:199-204.
- [8] GUO Xin, SUN Hongbo, YEO T S. Interference Cancellation for High-Frequency Surface Wave Radar[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7): 1879-1891.
- [9] 胡进峰,李万阁,艾慧,等.基于频域干扰剔除的OTHR射频频干扰抑制算法[J].系统工程与电子技术,2016,38(5):1046-1051.
- [10] NAZARI M E, HUANG Weimin, ZHAO Chen. Radio Frequency Interference Suppression for HF Surface Wave Radar Using CEMD and Temporal Windowing Methods [J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(2):212-216.
- [11] 罗忠涛,郭人铭,郭杰,等.OTH雷达图像的粗糙度指标及用于射频干扰自适应抑制[J].自动化学报, 2022,48(3):887-895.
- [12] 吴太锋.结合图像分割的高频雷达干扰抑制方法研究[D].重庆:重庆邮电大学,2020.
- [13] LUO Zhongtao, HE Zishu, LI Jun. An Effective Scheme for Radio Frequency Interference Suppression in High-Frequency Radar[C]//2015 IEEE Radar Conference, Arlington, VA, USA: IEEE, 2015:539-544.
- [14] 罗忠涛,严美慧,卢琨,等.超视距雷达海杂波与干扰信号的多域特征与海杂波检测[J].电子与信息学报, 2021,43(3):580-588.
- [15] HENTTU P, AROMAA S. Consecutive Mean Excision Algorithm [C]// IEEE Seventh International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Prague, Czech Republic: IEEE, 2002:450-454.
- [16] VARTIAINEN J, LEHTOMAKI J, SAARNISAARI H, et al. Estimation of Signal Detection Threshold by CME Algorithms [C]// 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference, Milan, Italy: IEEE, 2004:1654-1658.
- [17] VARTIAINEN J, LEHTOMAKI J, SAARNISAARI H. Double-Threshold Based Narrowband Signal Extraction [C]// 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, Stockholm, Sweden: IEEE, 2005:1288-1292.
- [18] WANG Shuai, AN Jianping, WANG Aihua, et al. A Minimum Value Based Threshold Setting Strategy for Frequency Domain Interference Excision [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5):501-504.

### 作者简介:

杨贤女,硕士,主要研究方向为信号处理。

张华冲男,硕士,主要研究方向为卫星通信。

李华女,硕士研究生,主要研究方向为信号处理和数字图像处理。