

基于多参数约束的 MTD 滤波器迭代优化设计

缪惠峰,李 品,侯义东

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要:动目标检测(MTD)滤波器作为动目标检测雷达的核心部件,其杂波抑制性能将对雷达动目标探测能力起着决定性的影响。文中同时考虑滤波器期望频率响应和信噪比增益,通过构建多参数约束条件,在满足阻带衰减、零陷深度和杂波宽度的条件下,提出 MTD 滤波器组的迭代优化设计算法。首先固定滤波器通带宽度,将优化问题转换为二次规划凸问题,再通过二分法迭代求解出满足基本设计条件的最小通带宽度滤波器。设计实例表明:所提算法在不同杂波环境下均具备较高的鲁棒性,尤其当杂波与通带存在重合区域时,所设计的滤波器性能更加优越。

关键词:动目标检测;滤波器;凸优化;多参数约束

中图分类号:TN959 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2021)03-0025-05

引用格式:缪惠峰,李 品,侯义东. 基于多参数约束的 MTD 滤波器迭代优化设计[J]. 现代雷达, 2021, 43(3): 25-29.

MIU Huifeng, Li Pin, HOU Yidong. An iterative optimization method for MTD filter design based on multi-parameter constraints[J]. Modern Radar, 2021, 43(3): 25-29.

An Iterative Optimization Method for MTD Filter Design Based on Multi-parameter Constraints

MIU Huifeng, Li Pin, HOU Yidong

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: As the core component of MTD radar, the clutter suppression performance of MTD filter will have a decisive impact on the radar detection ability to moving target. In this paper, considering the expected frequency response and signal-to-noise gain of the filter, an iterative optimization algorithm for MTD filters is proposed under the conditions of stopband attenuation, null depth, and clutter width. First, the optimization problem is transformed into a quadratic programming convex problem through fixing the passband width of the filter, and then the minimum passband width filter is solved by dichotomy iteration. Design examples show that the proposed algorithm has high robustness in different clutter environments, especially when the clutter and passband overlap, the designed filter performs better.

Key words: moving target detection; filter; convex optimization; multi parameter constraint

0 引 言

脉冲多普勒雷达在搜索、跟踪和识别各种空中机动目标时,其整体探测性能往往受到目标周边较强的环境杂波限制^[1-2]。典型杂波干扰包含地杂波、气象杂波以及海杂波等,它们相对于雷达具有一定的径向速度,因此杂波谱在多普勒维上轻微地展宽^[3]。通常情况下,杂波信号的功率很强,在不做任何处理的情况下,将会完全淹没目标回波,严重降低雷达的检测概率。此外,如果杂波在距离维度上出现强点,也将被误识别为真实目标,从而拉高了雷达的虚警率^[4]。

为了抑制强杂波干扰,动目标显示(MTI)和动

目标检测(MTD)技术应运而生,它们利用杂波和目标在多普勒维度上的差异,设计合适的时域滤波器在不损失运动目标回波功率的情况下,最大限度地降低杂波功率^[5]。相对于 MTI 滤波器,MTD 滤波器不仅可以在杂波区域形成凹陷,还可以对目标回波提供一定的相参积累增益^[6]。因此,对于强杂波环境或目标回波强度较弱时,MTD 滤波器可以更大程度上提升目标的检测概率^[7]。MTD 滤波器一般采用滑窗 MTI 级联离散傅里叶变换(DFT)方式或有限冲击响应(FIR)滤波器方式实现,相对于前者,FIR 滤波器可以灵活地配置杂波带宽、凹陷深度、阻带衰减、通带宽度参数,更加有利于优化设计适用于雷达外场杂波环境的滤波器响应曲线^[8-11]。

对于 MTD 滤波器 FIR 系数的优化设计,文献[8]借鉴于空域滤波思想,提出基于数字综合算法的迭代设计方法,在杂波区域添加大量的干扰信号,使用 MVDR 准则求解出最优滤波器系数,并通过比较与期望响应的差异来动态更新干扰信号功率,直至滤波器响应满足设计要求。该方法对于滤波器期望响应特性和杂波功率迭代因子较为敏感,很容易出现迭代不收敛或过收敛现象。文献[10]改进了数字综合算法的杂波干扰功率迭代方式,提高了算法的稳健性,有效避免了算法不收敛的现象,但是依旧无法避免滤波器系数过收敛。当滤波器系数出现过收敛时,滤波器阻带衰减将会超过期望值,此时通带将一定程度地被展宽,从而降低了 MTD 滤波器的信噪比(SNR)增益。文献[11]提出了基于凸优化的设计方法,将 MTD 滤波器设计条件转换为标准的二阶锥规划问题,可以在满足期望响应的条件下,最大程度地降低了滤波器 SNR 增益损失。该算法在构建和求解凸优化问题时,没有考虑滤波器权值优化过程中通带形状和宽度的变化,从而使得设计的 MTD 滤波器并非最优。

本文通过设计多参数约束条件,在满足期望阻带衰减、杂波宽度和凹陷深度的条件下,优化设计出具有最小通带宽度的 MTD 滤波器组。由于优化过程并非标准的凸优化问题,本文先构造出一个二次规划子问题,再使用二分法迭代求解优化过程。在迭代过程中,所提算法可以根据通带宽度动态更新杂波和阻带区域,保证阻带和杂波衰减约束条件始终是最严苛的。设计实例表明,所提算法可以满足不同杂波环境下的 MTD 滤波器设计需求,当杂波区域与通带存在重合区域时,本文设计的滤波器杂波抑制性能更加优越。

1 算法原理

MTD 滤波器组由一系列带通 FIR 滤波器组成,每个带通滤波器具有不同的中心频率,通常中心频率的间隔与 FFT 频率分辨率相对应,即

$$\omega_n = 2\pi \frac{n - N/2}{TN}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

式中: ω_n 为第 n 号滤波器中心频率; T 为雷达脉冲重复周期(PRT); N 为滤波器阶数。每个 MTD 滤波器应当在其中心频率处的增益恒为 0 dB,即

$$H(\omega_n) = 1, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

式中: $H(\omega)$ 为滤波器频率响应。为了防止滤波器通带中心频率出现偏移,我们约束

$$|H(\omega)| \leq 1, \quad \omega \in \Omega_p \quad (3)$$

式中: $\Omega_p = [\omega_n - \frac{\omega_p}{2}, \omega_n + \frac{\omega_p}{2}]$ 为通带频率范围, ω_p 为期望的通带宽度。一般可以适当约束阻带衰减以进一步抑制通带之外的目标回波强度

$$|H(\omega)| \leq 10^{-P_a/20}, \quad \omega \in \Omega_s \quad (4)$$

式中: $\Omega_s = \{\omega | \omega \notin \Omega_p\}$ 为阻带频率范围; P_a 为期望的阻带衰减。MTD 滤波器最为关键的要求是在零频附近的杂波区域形成远高于阻带衰减的零陷,即

$$|H(\omega)| \leq 10^{-P_c/20}, \quad \omega \in \Omega_c \quad (5)$$

式中: $\Omega_c = \{\omega | \omega \in [-\omega_c, \omega_c] \& \omega \notin \Omega_p, \omega_c = \frac{4\pi T \sigma_c f_0}{c}\}$ 为归一化的杂波频率宽度,其由杂波的均方根速度 σ_c 决定,上式中, c 为光速, f_0 为雷达载频, P_c 为期望的杂波零陷深度。MTD 滤波器的设计目标是在满足条件式(2)~式(5)的前提下,使得滤波器的 SNR 增益最大,即

$$\max_{\mathbf{h}, \omega_p} \frac{|H(\omega_n)|^2}{\|\mathbf{h}\|_2} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{h}$ 为滤波器冲击响应向量; $\|\cdot\|_2$ 表示 2-范数,代人条件(2),上述最大化问题可以等价

$$\min_{\mathbf{h}, \omega_p} \|\mathbf{h}\|_2 \quad (7)$$

综合考虑将式(2)~式(5)的条件,从通道中心、通道带宽、杂波零陷、阻带衰减多个参数对条件进行约束,将条件式(2)~式(5)的角频率 ω 离散化为 $\omega = [-\pi, -\pi + \Delta\omega, \dots, 0, \Delta\omega, \dots, \pi - \Delta\omega]$,此时第 n 组 MTD 滤波器优化问题和约束条件可表示为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{h}, \omega_p} \quad & \|\mathbf{h}\|_2 \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \mathbf{a}(\omega_n)\mathbf{h} = 1 \\ |\mathbf{a}(\omega_i)\mathbf{h}| \leq 1, \omega_i \in \Omega_p \\ |\mathbf{a}(\omega_i)\mathbf{h}| \leq 10^{\frac{-P_a}{20}}, \omega_i \in \Omega_s \\ |\mathbf{a}(\omega_i)\mathbf{h}| \leq 10^{\frac{-P_c}{20}}, \omega_i \in \Omega_c \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

优化上述问题中的优化变量 ω_p 动态影响约束条件的作用域,导致其不能直接通过凸优化方法求解。我们注意到阻带和杂波区域的噪声强度远远小于通带区域,所以滤波器的 SNR 增益可以近似表示为

$$SNRG \approx \frac{|H(\omega_n)|}{\int_{\Omega_p} |H(\omega)|^2 d\omega} \quad (9)$$

其中积分区域在通带 Ω_p 范围内,可以看出较高的 SNR 增益将对应更小的通带宽度,现在我们可以一次优化时,固定通带宽度,从而将优化问题(8)转换为一个标准二次规划凸优化问题(10),并使用二分法迭代求解出满足约束条件的最小通带宽度 MTD 滤波器。

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{h}, \omega_p} \quad & \|\mathbf{h}\|_2 \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \mathbf{a}(\omega_n)\mathbf{h} = 1 \\ |\mathbf{a}(\omega_i)\mathbf{h}| \leq 1, \omega_i \in \Omega_p^* \\ |\mathbf{a}(\omega_i)\mathbf{h}| \leq 10^{\frac{-P_a}{20}}, \omega_i \in \Omega_s^* \\ |\mathbf{a}(\omega_i)\mathbf{h}| \leq 10^{\frac{-P_c}{20}}, \omega_i \in \Omega_c \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

先确定归一化通带宽度的下限 ω_l ,一般为不加窗 DFT 对应的通带宽度,再给定通带宽度上限 ω_h ,初始通带宽度设置在中点 $\omega_p = (\omega_l + \omega_h)/2$,并求解二次规划凸优化问题(10),并判断最小通带宽度 ω_p^* 。在区间的上半部分或下半部分,并据此更新区间。

此时产生了一个新的通带宽度区间,其仍然包含滤波器最小通带宽度,但宽度仅有原区间的一半。重复这个过程直至通带宽度达到收敛条件:

算法1 MTD 滤波器的二分法迭代凸优化设计

给定:最小通带宽度 ω_l ,最大通带宽度 ω_h 和容忍度 $\zeta > 0$ 。

重复:

1) 令 $\omega_p = (\omega_l + \omega_h)/2$,此时优化变量只剩下滤波器系数 $\mathbf{h}$;

2) 求解二次规划凸优化问题(10);

3) 如果问题(10)有解, $\omega_h = \omega_p$; 否则 $\omega_l = \omega_p$;直至: $\omega_h - \omega_l < \zeta$; 取出: MTD 滤波器系数 $\mathbf{h}$ 。

给定初始通带宽度范围时,需要保证满足约束条

件的最小通带宽度在区间 $[\omega_l, \omega_p]$ 内。

2 设计结果

本节首先给出 MTD 滤波器的迭代设计过程,如图1所示,雷达工作频率为3 000 MHz,脉冲重复周期为1 600 μs ,滤波器阶数为16,杂波均方根速度为0.32 m/s,杂波区期望零陷深度为-70 dB,阻带期望衰减为-30 dB,最小和最大通带宽度分别为0.4 rad/s 和 1.8 rad/s。正如算法1所描述的,迭代初始时,滤波器通带宽度较大,出现了畸变的通带幅频响应,随着迭代过程的推进,通带宽度根据二分法不断下降,幅频特性曲线也趋于稳定。

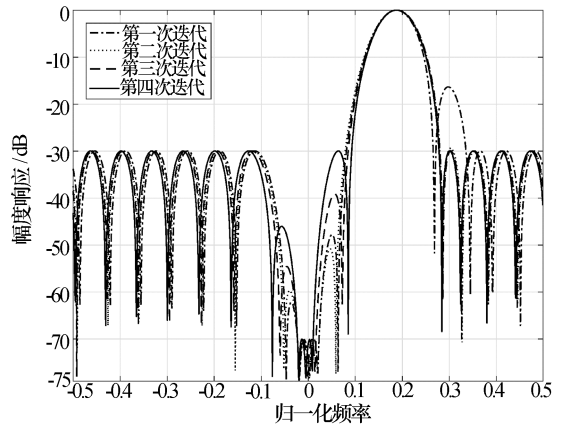


图1 MTD 滤波器迭代设计过程

针对实际中雷达经常面临的地杂波、海杂波和气象杂波干扰,下面将给出具体的 MTD 滤波器组设计实例来验证所提算法的有效性。雷达工作频率、脉冲重复周期和滤波器阶数与图1仿真条件一致,地杂波均方根速度为0.32 m/s,期望零陷深度设为-70 dB,海杂波均方根速度为1.2 m/s,期望零陷深度设为-60 dB,气象杂波均方根速度为4 m/s,期望零陷深度设为-50 dB,三个滤波器组的期望阻带衰减均为-30 dB。

由算法1迭代设计的 MTD 滤波器组幅频响应如图2所示。可以看到三种杂波的零陷深度均满足设计要求,当杂波区与通带没有交集时,滤波器零陷宽度将覆盖整个杂波区。在近零频的几组滤波器将优先保证通带宽度,这正是优化条件(5)的频率范围所约束的,不过当频率处于杂波区而又不在于通带范围内时,其衰减量仍然可以达到期望零陷深度。

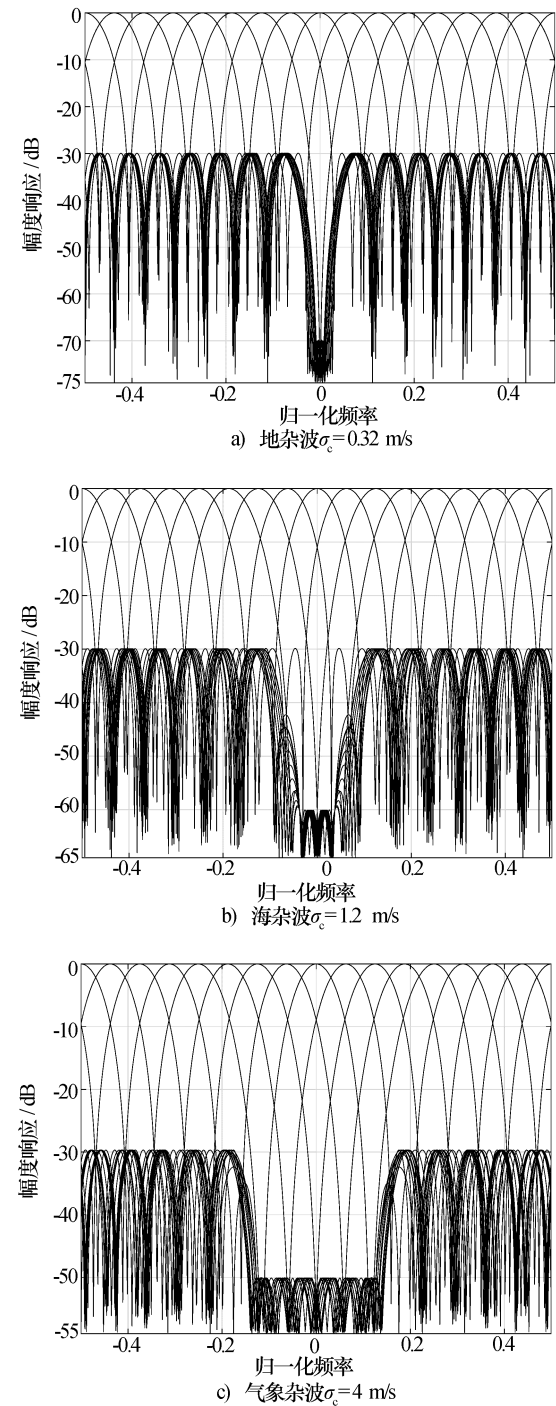


图2 不同杂波下MTD滤波器组幅频响应

图3给出了与文献[11]设计的MTD滤波器的幅频响应对比,雷达工作频率、脉冲重复周期和滤波器阶数与图1仿真条件一致,杂波均方根速度为1.2 m/s。可以看出当滤波器通带与杂波区域不存在交集时,本文提出的迭代优化算法与文献[11]提出的二次规划凸优化算法结果基本一致。而当两者存在交集时,文献[11]设计的滤波器中心频率出现了偏移,且增益超过了0 dB,相比而言,本文设计的滤波器采用二分法对通带进行了限制,这样通带区域形状更加接近期望

响应,且不需要人为调整通带宽度,鲁棒性更强。该方法设计的滤波器在零频附近的滤波器也能保持较好的通带形状,减少了由于通带畸变带来的滤波器交叠损失,因此本文的滤波器设计的滤波器在减小滤波器组损失上是更优的。

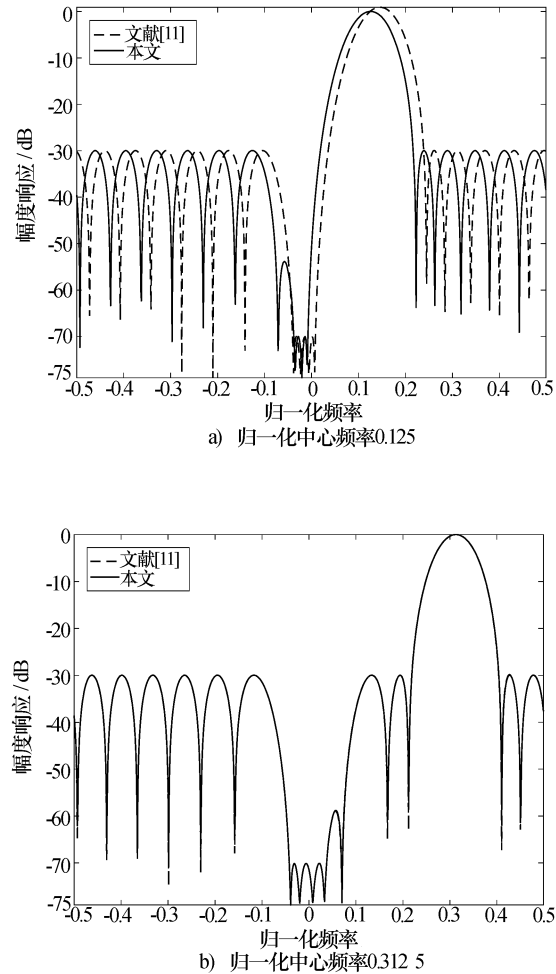


图3 本文设计的MTD滤波器与文献[11]的对比

3 结束语

本文同时考虑期望频率响应和信噪比增益,通过构建多参数约束条件,在满足阻带衰减、零陷深度和杂波宽度的条件下,提出MTD滤波器组的迭代优化设计算法。首先固定滤波器通带宽度,将滤波器优化问题构造为二次规划子问题,再通过二分法迭代求解满足基本设计条件的最小通带宽度。所提算法可以根据通带宽度动态更新杂波和阻带区域,从而保证阻带和杂波衰减约束条件始终是最严苛的。设计实例表明:所提算法在不同杂波环境下均具备较高的鲁棒性,尤其当杂波区域与通带存在重合时,所设计的滤波器性能更加优越。

参 考 文 献

[1] SPAFFORD L J. Optimum radar signal in clutter[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1968, 14 (6): 734-743.

[2] 常 磊. 雷达杂波模拟与应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

CHANG Lei. Research and application on simulation of radar clutter[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[3] SHNIDMAN D A. Generalized radar clutter model[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(3): 857-865.

[4] 欧 祥. 杂波背景下目标检测技术的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

OU Xiang. Research on target detection technique in clutter environment[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.

[5] DRURY W H. Improved MTI radar signal processor[R]. AD-A010-478. Lexington: Lincoln Laboratory.

[6] D'ADDIO E, FARINA A, STUDER F A. Performance comparison of optimum and conventional MTI and Doppler processors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(6): 707-715.

[7] CHANG C H, WONG C M, LIU W, et al. Radar MTI/MTD implementation and performance[C]// 2000 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Beijing: IEEE Press, 2000: 674-678.

[8] 谷 泓, 赵永波, 张守宏. 一种基于数字综合算法的 MTD 滤波器设计方法[J]. 航空计算技术, 2002, 32 (2): 58-62.

GU Hong, ZHAO Yongbo, ZHANG Shouhong. A design method of MTD filters based on the numerical synthesis algorithm[J]. Aeronautical Computer Technique, 2002, 32 (2): 58-62.

[9] 谭富春, 吕幼新, 杨皓翔. 一种基于遗传算法的混合滤波器组设计方法[J]. 现代雷达, 2015, 37(7): 26-29.

TAN Fuchun, LÜ Youxin, YANG Haoxiang. A method of hybrid filter banks design based on genetic algorithm[J]. Modern Radar, 2015, 37(7): 26-29.

[10] 贾可新, 张锦中. 一种改进的最大信杂比 MTD 滤波器设计算法[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 47-51.

JIA Kexin, ZHANG Jinzhong. An algorithm of designing modified maximum signal-to-clutter ratio MTD filter bank[J]. Fire Control Radar Technology, 2017, 46(2): 47-51.

[11] 贾可新, 张茹斌. 一种基于二阶锥规划的 MTD 滤波器组设计算法[J]. 雷达与对抗, 2019, 39(4): 6-9.

JIA Kexin, ZHANG Rubin. An algorithm in MTD filter bank design based on SOCP[J]. Radar & ECM, 2019, 39 (4): 6-9.

作者简介:

缪惠峰 男,1981 年生,硕士,高级工程师,研究方向为雷达信号处理;

李 品 男,1982 年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为雷达信号处理;

侯义东 男,1992 年生,博士,工程师,研究方向为阵列信号处理、雷达系统设计。