

最陡下降算法在MTD滤波器设计中的应用

甘露, 李会勇, 徐政五

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】针对雷达中动目标检测技术中滤波器组设计,从普遍采用基于最小最大化的优化原则出发提出了一种改进优化原则。该方法具有明确物理含义,即是使输出杂波功率最小,从而使优化问题简化为最小化目标函数,大大简化了MTD滤波器设计中优化问题的求解难度。文中采用最陡下降算法求解该问题,通过计算机仿真,可以看到该方法与原来采用方法具有相似的结果,为工程应用提供了一种简单、实用的方法。

关键词 动目标检测; 最小最大化; 滤波器设计; 最陡下降算法

中图分类号 TN957.051 文献标识码 A

Applications of Steepest Descent Arithmetic in Designing the MTD filters

GAN Lu, LI Hui-yong, XU Zheng-wu

(School of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A new improved optimization method is promoted based on common minimum-maximum principle for implementation of the filter bank of MTD radar. This new method has clearly physical signification, which is to minimize the output power of the clutter. In this way, it can change the optimization function to a minimal function. It reduces the complexity of solution the optimization problem. In this paper, the steepest descent arithmetic is used. The computer simulations results show that it is approximate to the common ones. The new method is a viable way in engineering applications.

Key words MTD minimum-maximum filter-design; steepest; descent; arithmetic

动目标检测器(MTD)方案是上世纪70年代出现的一种雷达信号检测技术,其核心技术,就是设计多普勒滤波器组,MTD滤波器设计方法是采用离散傅里叶变换(DFT)做频域分析^[1],或是采用Delong最佳滤波器设计方法^[2],目前被广泛采用的是切比雪夫滤波器设计,及基于切比雪夫滤波器的优化设计^[3]。近年来,MTD滤波器的设计方法有了新的发展如采用小波变换等^[4],但设计复杂,工程实用性较差。本文针对第3种方法提出一种采用最陡下降算法的优化方法,该方法具有物理意义明显、求解简单的特点。

1 MTD滤波器设计方法比较

早期MTD滤波器,直接采用DFT算法。该算法等效于一组窄带滤波器组,具有数字硬件实现简单的特点,由于MTD雷达中可以利用脉冲数较少,因而使用该方法设计的滤波器组旁瓣电平高。为了克服其缺点,采用了改进算法,如海明加窗等^[1]。Delong提出了基于已知杂波谱的设计方法,该设计方法的缺点是主瓣宽,能克服其缺点的设计通常是采用对角加载技术,当杂噪比为50 dB以上时,可以改善设计效果。DFT算法是

基于对杂波分布未知的情况设计,它对杂波分布是不敏感;而Delong算法是基于杂波分布已知的情况设计,当杂波的分布变化时,设计的最佳滤波器就不再是最佳。切比雪夫方法是设计 $N-1$ 个具有同样通带宽度的和阻带电平的滤波器,将其等间隔地安置在零到重复频率之间。该设计与杂波分布无关。当MTD雷达主要工作在强地杂波区域或其他干扰及杂波的频移不太高时,就需要考虑杂波的影响。考虑杂波影响的最优化FIR滤波器设计采用DFP-BFGS变尺度法求滤波器最佳系数,该方法将切比雪夫设计方法得到的滤波器的系数作为目标函数的初始值,其不足之处在于求解复杂。本文提出了一种新的优化算法,该算法将目标函数转化为求最小值。由于目标函数为平方和形式,可以采用更有效简单的方法求解。

2 数学模型

2.1 最小最大优化问题转化为最小化问题

本文讨论 N 阶的MTD FIR滤波器。以 $W \in \mathfrak{R}^N$ 作为滤波器的加权系数,即 $W = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$, $(\cdot)^T$ 表示向量的转置,则滤波器时域冲击响应为:

$$h(m) = w_1 x(m) + w_2 x(m-1) + \dots + w_N x(m-N+1) \quad (1)$$

为了考查 N 阶FIR滤波器的频率响应,需要做 M 点离散傅里叶变换(DFT), $M \gg N$,则对应的频率响应为:

$$h(W, m) \rightarrow H(W, f) \quad (2)$$

$$H(W, f) = (H(W, f_1), H(W, f_2), \dots, H(W, f_M)) \quad (3)$$

考虑MTD FIR滤波器优化设计目标函数为使滤波器的各个旁瓣的最高电平最低,并且对于不同频率位置的旁瓣的关切程度是不一样的,对于杂波功率谱电平较大的地方给予较大的加权值,反之亦然。最直接的办法就是采用杂波的功率谱的采样值 $c(f_i)$ 作为加权值,杂波功率谱大的地方,加权系数就大。将脉冲重复频率(PRF)上除主瓣外的整个频率范围 Φ_1 ,划分为 $K(K < M)$ 个互不相交频率子集合。

在第 m 个子集合上最高旁瓣电平为:

$$U_m = \max_{k \in \Phi_{1,m}} \text{abs}(H_{W,k}) \quad (4)$$

则目标函数则可写为:

$$y(W) = \sum_{k=1}^K c_k U_k = \sum_{k=1}^K c_k (\max_{k \in \Phi_{1,m}} \text{abs}(H_{W,k})) \quad k \in \Phi_1 \quad (5)$$

式中 c_k 表示杂波在频点 f_k 处的功率谱的值; f_k 为在第 m 个子集合上的最高旁瓣电平对应的频点。由于DFT具有齐次性,FIR滤波器系数成比例变化时不会影响滤波器的频响曲线的形状和主副瓣的相对大小,因而式(5)的最优解是一组线性相关向量。为了使最优化问题的解唯一化,可以限定最高主瓣电平为常数 D ,作为约束条件。不失一般性,取 $D=1$;

$$\begin{cases} y(W) = \sum_{k=1}^K c_k U_k = \sum_{k=1}^K c_k (\max_{k \in \Phi_{1,m}} \text{abs}(H_{W,k})) & k \in \Phi_1 \\ \text{s.t. } \max_f \text{abs}(H_{W,l}) = 1 & l \in \Phi_2 \end{cases} \quad (6)$$

MTD FIR滤波器的主瓣一般在杂波电平较低处,故将主瓣包含的子频带也以该处的杂波信号电平值加权。将目标函数中的绝对值运算等效为平方运算,则目标函数可以改写为:

$$y(W) = \sum_{k=1}^{K+1} c_k (\text{abs}(H_{W,k})^2) \quad (7)$$

MTD FIR滤波器的优化问题,可用数学方程式如下:

$$\min_W y(W) = \min_W (\sum_k c_k \max_f |H_{W,k}|^2) \quad (8)$$

如果将整个PRF,含FIR滤波器的主瓣无限细分:

$$K \rightarrow \infty \quad \Delta\Phi \rightarrow 0 \quad (9)$$

则有:

$$\max_{f+\Delta\Phi} |H_{W,k}|^2 = |H(W, f)|^2 \quad (10)$$

将式(10)在式(9)的条件下带入式(8):

$$\begin{cases} \min_W y(W) = \min_W (\int c(f) \cdot |H(W, f)|^2 df) \\ \text{s.t. } \max_f \text{abs}(H_l) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

考虑MTD雷达FIR滤波器的特点,将原始的目标函数式(6)转换为新的目标函数式(11)。并且将最小最大化的优化问题简化为最小化的优化问题,还可以看到式(11)有明确的物理含义,即使通过滤波器的输出杂波功率最小。

2.2 最陡下降算法求解

将式(11)离散化,有:

$$\begin{cases} \min_w y(W) = \min_w \left(\sum_{i=1}^M c(f_i) |H(W, f_i)|^2 \right) \\ \text{s.t. } \max_i \text{abs}(H(W, f_i)) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

由式(2)可知 $H(W, f_i)$ 是 N 阶FIR滤波器的 M 点的DFT变换, $c(f_i)$ 是杂波功率谱在相同频点的采样值。式(12)是典型的带约束条件的非线性极值问题,对于式(12)中的约束条件,一般的方法是采用惩罚函数法,将约束条件以一定的条件加入到原目标函数中,构成新的目标函数。本文则是在对每一次迭代的 W 求DFT变换中,将其最大值归一化为1,而不去改造目标函数。这种归一化的方法,将大大简化求解得难度,而对式(12)中的目标函数的求解的方法很多,本文选择了最简单实用的最陡下降算法^[5]。

最优化的初始点 W_0 的选择应尽可能靠近最优值 W^* ,本文先用REMEZ方法设计一个在切比雪夫准则下的最优等纹波FIR滤波器,以该点为滤波器优化设计的初始点。在寻优的过程中,还加入了对滤波器的主副瓣比的要求,如在实验中设定为30 dB。这样能保证对系统噪声的抑制。

3 仿真结果

本文由8点的等纹波滤波器出发,采用最陡下降算法进行优化,结果如图1所示。图1中观察到优化后的滤波器的主瓣宽度变窄,在杂波较大的零频附近出现了比原滤波器更大的抑制,其他频率上的副瓣电平有所提高,但也控制在要求的30 dB范围内。经过计算MTD系统中滤波器组中改善因子最大有5 dB提高,而在整个频带内改善因子平均提高2~3 dB。

4 结束语

通过分析原有的MTD滤波器的优化目标,以滤波器旁瓣电平最小时为出发点,提出了比原方案物理意义更加明确的优化目标,即杂波的输出功率达到最小。同时,也简化了优化方法,使MTD滤波器组的优化设计方法更有可实现性。经过实验证实,该方法达到了设计要求。

本文研究工作得到电子科技大学青年基金(No. JX03007)资助,在此表示感谢。

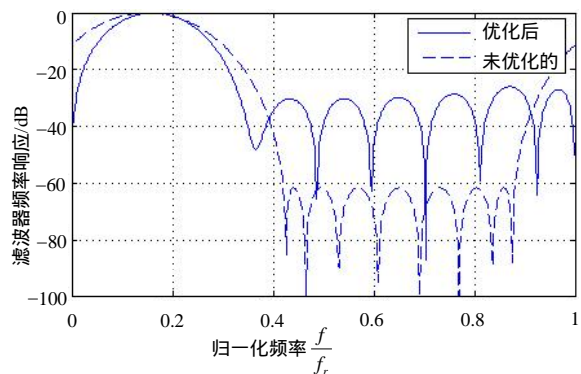


图1 优化前后MTD滤波器频响图

参 考 文 献

- [1] Skolnik, Merrill I. Radar handbook (2th ed)[M]. New York: McGraw-Hill, 1990
- [2] 林海, 毛二可, 韩月秋. 最优化方法在雷达MTD滤波器设计中的应用[J]. 信号处理, 1985, (2): 97-101
- [3] DeLong D, Hofstetter E. Optimum radar signal-filter pairs in a clutter[J]. IEEE Trans. Information Theory 1970, 16(1): 89-90
- [4] 李广柱, 马晓岩, 江 晶. 雷达信号处理MTI/MTD性能分析与功能测试[J]. 现代雷达. 2002, 24(2): 43-45, 59
- [5] 薛嘉庆. 最优化原理与方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1981