

多杂波背景下用于低速弱目标检测的滤波器优化设计

陶海红 廖桂生 汪莉君

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文提出了一种用于多杂波背景下的低速弱目标检测的脉间参差滤波器优化设计, 该算法采用脉间滑动脉冲的方式进行参差 MTI 滤波器设计, 并利用与梯度结合的遗传算法搜索最优的脉冲重复周期排布组合, 使滤波器第一零点尽可能浅, 可在有效抑制杂波和同频干扰的同时避免陷入其中的弱目标丢失, 同时该滤波器可形成多个凹口以滤去多种杂波, 并将盲速推到三倍音速以外。采用梯度遗传算法对脉冲重复周期进行搜索, 由于该算法所需初始种群规模小, 与标准遗传算法相比复杂度大大降低。仿真结果和性能分析验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 梯度遗传算法, 参差 MTI, 参差码, 第一零点

中图分类号: TN713, TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)10-1580-05

Novel Filter Design for Detecting Weak Targets of Slow Speed Out of Multi-mode Clutters

Tao Hai-hong Liao Gui-sheng Wang Li-jun

(National Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The paper presents a novel stagger MTI filter design algorithm, which can detect weak targets of slow speed out of multi-mode clutters. The method is carried out by slipping pulses, and the best pulse repetitive frequencies selected by gradient-GA make the first notch as shallow as possible, so the weak targets in the first notch can be detected. Multi-model clutters can be suppressed by MTI filter, and blind-velocity can be appeared out of three times velocity of sound. Combined GA's the capability of the whole searching and not limited by selection of initial parameter with the gradient GA's advantage of fast searching, it can offer fewer initial population and low computation complexity. The simulation and performance analysis demonstrate the feasibility and validity of the algorithm.

Key words Gradient-genetic algorithm, Stagger MTI, Stagger code, First notch

1 引言

雷达要探测的目标, 通常是运动着的物体。但在目标的周围经常存在着各种地物、云雨、海浪及敌人施放的金属丝等杂波和与接收机同频的欺骗式干扰。无论从抗干扰或改善雷达工作质量的观点来看, 检测低速运动弱目标而抑制杂波背景和干扰都是一个很重要的问题。为了避免发生盲速效应, 通常采用脉间“参差采样序列”的方法^[1,2], 可以在滤除多种杂波和抑制干扰的同时, 将盲速推到三倍音速以外。适当选择不同脉冲重复频率(PRF)可以使第一零点尽可能的浅, 以确保不会丢失陷入其中的弱目标。在实际工作中, 不仅要求第一等效盲速值要尽可能覆盖目标可能出现的速度范围, 而且要求在该速度范围内频率响应曲线比较平坦。因此, PRF的选取成为这项工作的关键。其选择决定了无盲速的速度范围和频率响应第一零点的深度。

图1是脉间4参差MTI滤波器结构框图, 对应于第1组参差滤波器可以搜索到最优的脉冲重复周期 T_1, T_2, T_3 , 使 $y(n)$ 频率响应的第一零点尽可能的浅, 然而滑动后得到的第2组、第3组滤波器抽头延迟变为 T_2, T_3, T_1 和 T_3, T_1, T_2 , 不再是最优的, 这必会导致频率响应的第一零点明显下降, 从而影响弱目标性能。

文中提出了一种整体优化脉间参差MTI滤波器的方法。

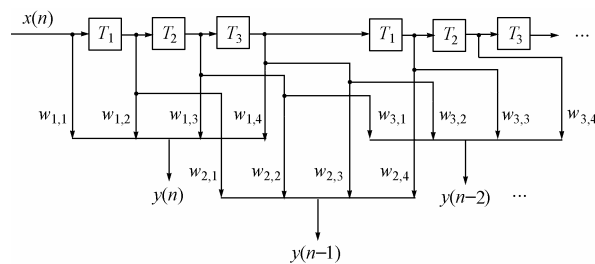


图1 脉间参差MTI滤波器

然而由于脉冲重复周期个数的增加, 可行解范围很大, 出现组合爆炸情况, 无法逐一比较所有可行解的目标值, 这给搜索工作带来极大困难。近年来, 遗传算法(GA)是一种模拟自然遗传和达尔文进化理论而提出的并行随机搜索算法。由于该算法具有全局优化能力, 并适用于非凸优化、多峰函数优化等多种场合, 因此它已成为求解非线性优化问题非常有力的工具^[3,4]。由于传统遗传算法(CGA)为了避免早熟往往选取较大的初始种群规模^[3], 文中采用一种需要极小初始种群规模的梯度GA(Gradient-GA)^[5]来搜索最优, 大大降低了运算复杂度。

文中首先介绍了脉间参差 MTI 滤波器的设计模型, 其次提出了基于 Gradient-GA 的抑制多模杂波和干扰的多凹口滤波器优化设计方法, 最后给出了基于米波雷达参数的仿真结果和性能分析。

2 脉间参差 MTI 滤波器的设计模型

文中采用如图 2 所示横向FIR滤波器^[6-10]结构实现脉间参差MTI滤波器设计, 输入信号送到一组抽头延迟线上, 各延迟线的延迟时间 T_1, T_2, \dots, T_6 等于发射脉冲重复周期, $(w_{1,1}, w_{1,2}, w_{1,3}, w_{1,4})$ 是 1 组滤波器的权系数, $(w_{2,1}, w_{2,2}, w_{2,3}, w_{2,4})$ 、 $(w_{3,1}, w_{3,2}, w_{3,3}, w_{3,4})$ 分别是滑动后的 2 组滤波器权系数, 该滤波器的输出信号为

$$Y(n) = \sum_{i=0}^{4-1} w_{1,i+1}x(n-i) \quad (1)$$

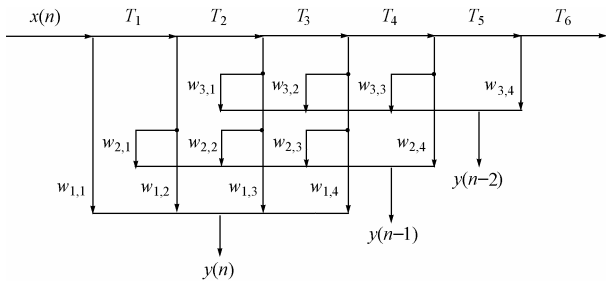


图 2 6 个脉冲脉间参差 MTI 滤波器

2.1 参差码模型

设雷达工作在 N 参差的情况下, 其发射周期为 T_1, T_2, \dots, T_N ,

$$T_i = K_i \Delta T, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中 K_1, K_2, \dots, K_N 称为参差码, ΔT 为其最小公约数, 通常称 $K_1 : K_2 : \dots : K_N$ 为参差比。平均重复周期 T_r 为

$$T_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i \right) \Delta T = K_{av} \Delta T \quad (3)$$

其中 K_{av} 是参差码均值, 可得

$$K_{av} = T_r \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{1}{f_r} \cdot f_b \quad (4)$$

其中 $f_r = 1/T_r$ 为雷达平均重复频率, $f_b = 1/\Delta T$ 。如果不参

差, 第一盲速点频率为 f_r ; 反之, 为 f_b , 所以 K_{av} 也称为在参差条件下的盲速扩展倍数。假定目标最大速度为三倍音速, $V_{r,max} = 3 \times 340 \text{m/s} = 1020 \text{m/s}$, $f_{d,max} = 2V_{r,max}/\lambda$ (其中 λ 为雷达工作波长)。如果 $K_{av} \geq f_{d,max}/f_r$, 就可以满足将盲速区推出三倍音速以外的要求。

参差码的最大值与最小值之比称为最大参差比, 即

$$r = \max[K_1, K_2, \dots, K_N] / \min[K_1, K_2, \dots, K_N] \quad (5)$$

r 越大, 雷达发射周期 T 的变化就越大, 在雷达中 T 的大小与不模糊测速的距离有关, 所以系统通常对 r 有一定要求。参差码搜索范围为

$$[\text{ceil}(N \times K_{av} / (1 + (N - 1) \times r)), \text{floor}(N \times K_{av} \times r / (N - 1 + r))] \quad (6)$$

其中 ceil 和 floor 分别是朝正无穷方向取整、朝负无穷方向取整。

2.2 滤波器的实现

由式(1)得滤波器的频率响应为

$$H1(jf) = \sum_{i=0}^{N-1} w_{1,i+1} e^{-j2\pi f i T} \quad (7)$$

当参差变 T 时, 滤波器的权系数是时变的, 也就是说权系数应是 n 的函数, 抽头延迟线也随着变 T 而变化。如果输出取两次输出的均值, 则总的滤波器频率响应为

$$G(f) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^1 \left| \sum_{i=0}^{N-1} w_{j,i+1} e^{-j2\pi f (t_{n+i+j} - t_{n+i})} \right| \quad (8)$$

如果输出取两次输出的最大值, 则有

$$G(f) = \max \left\{ \left| \sum_{i=0}^{N-1} w_{1,i+1} e^{-j2\pi f (t_{n+i} - t_n)} \right|, \left| \sum_{i=0}^{N-1} w_{2,j+1} e^{-j2\pi f (t_{n+i+1} - t_{n+1})} \right| \right\} \quad (9)$$

衡量MTI滤波器性能好坏的重要标志是改善因子 I ^[2, 10], 即滤波器输出信号杂波功率比(信杂比) S_o / C_o 与滤波器输入信杂比 S_{in} / C_{in} 之比,

$$I = (E[S_o] / S_{in}) \times (C_{in} / C_o) \quad (10)$$

其中 $E[S_o]$ 是对所有可能目标多普勒频率 S_o 的统计平均值。滤波器的优化设计就是要得到一组最优的滤波器系数^[10], 使改善因子达到最大。最常用的方法是特征矢量法^[11]和在权矢量的元素之一为常数时使杂波输出功率最小的线性预测算法^[11,12]。其中杂波功率谱可以由标准偏差 σ_{kf} 表征的高斯曲线^[1]来表示:

$$C(f) = \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{2\pi\sigma_{kf}} \exp \left\{ -\frac{(f - f_{k0})^2}{2\sigma_{kf}^2} \right\} \quad (11)$$

其中 C_k 是第 k 个杂波的幅度, 中心频率为 f_{k0} , 标准偏差 $\sigma_{kf} = (2\sigma_{kv} / \lambda)$ (Hz), σ_{kv} 为径向速度标准偏差(m/s), λ 为雷达工作波长(m)。

3 基于 Gradient-GA 的脉间参差滤波器的优化算法

图3为用于最优参差码搜索的梯度遗传算法流程框图^[3,4]。

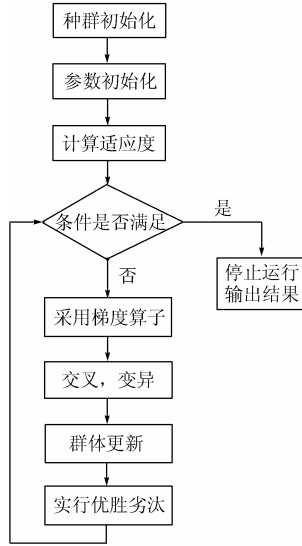


图3 梯度遗传算法流程框图

3.1 编码

在遗传算法中,通过编码把待求的最优权表示为字符串的形式,即染色体。在参差码寻优中,将参差码作为变量,每组参差码依次编码后作为一个字符串个体。由式(6)可确定需要二进制数的维数 l 位,则在 N 参差的情况下,每个染色体个体由 lN 位的字符串构成,可表示为 $X_j = \{a_i\}_{i=1, \dots, lN}^j$, 每一代所产生的染色体个体总和称为群体。

3.2 适应度函数的构造

衡量染色体优劣的指标是适应度,适应度的相对大小反映了个体之间的相对优劣性,根据适应度的大小,决定某些个体是繁殖或是消亡。因此,适应度是驱动遗传算法的动力,在遗传过程中具有重要意义。

文中的适应度由滤波器频率响应的第一零点的深度来表示,假设参差码个数为 N ,参差时变滤波器以 n 个脉冲为一组进行脉间参差,则有 $M+n-1=N$,其中 M 为滤波器滑动的次数。下面用非线性规划描述滑动参差码的优化算法。

$$\left. \begin{aligned} D_{m0}^{(k)} &= \min [G_{m10}^{(k)}(f) + G_{m20}^{(k)}(f)], (m=1, 2, \dots, M) \\ D_0 &= \max \left\{ \min [D_{10}^{(k)}, D_{20}^{(k)}, D_{30}^{(k)}, \dots, D_{M0}^{(k)}], (k=1, 2, \dots, P) \right\} \\ \max \{K_i\} / \min \{K_i\} &\leq r \\ K_1, K_2, \dots, K_N &\text{互为质数} \\ K_{av} &> R_f \end{aligned} \right\} (12)$$

其中 $D_{m0}^{(k)}$ 是滑动后得到的第 m 组滤波器在第 k 个染色体所对应参差码的情况下的第一零点深度, k 代表该滤波器的参

差码组合, $D_{10}^{(k)}, D_{20}^{(k)}, \dots, D_{M0}^{(k)}$ 分别对应滑动所得的 M 组滤波器的第一零点深度,通过对 D_0 (即 $D_0^{(1)}, D_0^{(2)}, \dots, D_0^{(P)}$ 中的最大值)所对应参差码的搜索可以得到最优参差码,其中 P 为参差码组合数。于是滑动后形成的各个滤波器的凹口都不会陷得过深,从而整个滤波器组从综合意义上能够更有效地实现杂波抑制及其凹口内的弱目标检测。由上得,参差码的适应度函数为

$$f_j = C - D_0(X_j), \quad j=1, 2, \dots, M \quad (13)$$

其中 C 是一个足够大的常数或者是 $D_0(X_j)$ 的最大值以保证 f_j 为正数。

3.3 Gradient-GA 的实现步骤

假设 $X(k)$ 为第 k 代种群。则用于优化参差码的 Gradient-GA 的过程为

- (1) 对于 $k=0$ 随机产生初始种群 $X(0)$, 并计算对应的适应度值, 构成 $P(0)$;
- (2) 对于第 k 步在 $X(k)$ 中按类似梯度的方法复制 M 个母体。

在CGA中,通常采用Holland教授提出的转盘方式选择复制对象,选择过程是以旋转赌轮 M (种群数目,一般取20~60为宜)次为基础^[3],种群数过小可以强迫算法收敛,但有可能使算法过早终止到非最优解,即导致早熟现象。而且每次旋转就选择一个染色体^[5],这种选择方法往往造成最优个体的丢失,强壮个体的过度支配作用以及不能在搜索空间有新的起点,初始种群的大规模带来的适应度的运算量也是相当大的。文中采用的只需要很少种群数的类似梯度的复制算子^[5]很好地解决了这些问题。

让 $V^l = \{V | v_i^{(v)} \leq v \leq v_i^{(u)}\}$ 成为搜索空间,其中 $v_i^{(v)}$ 和 $v_i^{(u)}$ 分别是染色体 X 分组译码后 V 的第 i 个元素的下界和上界, n 是 V 的维数。新的复制算子包含下面3步:

步骤 1 $X(k)$ 的 l 位二进制数染色体结构 $X_j(k)$ ($1 \leq j \leq M$) 分组解码为

$$V_j(k) = [v_{j1}(k) \cdots v_{ji}(k) \cdots v_{jn}(k)]^T \in V^l (1 \leq i \leq n) \quad (14)$$

步骤 2 产生一个新的染色体

$$v_j(k+1) = v_j(k) + \eta_j \frac{[f_b(k) - f_j(k)]}{f_b(k)} [v_b(k) - v_j(k)] \quad (1 \leq j \leq M) \quad (15)$$

其中 η_j 是一个正数^[5], $v_b(k)$ 是种群中最大适应度 $f_b(k)$ 对应的最优染色体 $X_b(k)$ 分组译码后的最优值。其中新的染色体由于上下界的限制不会超出搜索空间。

步骤 3 将矢量 $V_j(k+1)$ ($1 \leq i \leq M$) 编码为 $X_j(k+1)$ 组成下一代进化种群 $X(k+1)$ 。

新的复制算子给当前种群中每一个染色体分配了一个新的参数矢量,该矢量基于个体和最优染色体之间的归一化

适应度差值和参数差值。这个算法实际上就是使种群朝最优染色体靠近, 弱的个体比强的个体得到更多的调整, 个体的复制减少了, 因为从式(15)可知, 只有具有最优适应度的染色体保持不变, 这使复制算子保持了种群的多样性, 因此避免了收敛到局部最小值的早熟现象。所提复制算子的另一个重要特性是通过单个染色体的参数矢量的调整在搜索空间中有了发展新搜索方向的能力, 因为只要所有个体不具有相同的适应度就会产生不属于父代的新个体。为了运算成功, 新的参数点在复制过程中不能在搜索空间外发展。选择 η_j 在 0 与 2 之间以确保复制算子的稳定性^[5]。

$$P\{T_s(\mathbf{X}_j(k)) = \mathbf{Y}_j(k)\} = \begin{cases} f(\mathbf{Y}_j(k)) / \sum_{\mathbf{X} \in \mathbf{X}(k)} f(\mathbf{X}), & (\mathbf{Y}_j(k)) \in \mathbf{X}(k) \\ f(\mathbf{X}_j(k)) / \sum_{\mathbf{X} \in \mathbf{X}(k)} f(\mathbf{X}), & (\mathbf{Y}_j(k)) \notin \mathbf{X}(k) \\ & \text{且满足式(15)} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $j=1 \sim M$ 。可见具有最优适应度的染色体 $\mathbf{Y}_j(k) = \mathbf{X}_b(k)$ 保持不变, 而其他都产生不属于父代的个体。

(3) 对(2)中复制的 M 个母体进行单点随机杂交^[13], 即

$$P\{T_c(\mathbf{Y}_1^{(j)}, \mathbf{Y}_2^{(j)}) = \mathbf{X}'_j(k+1)\} = \begin{cases} jp_c/n, & \mathbf{X}'_j(k+1) \neq \mathbf{Y}_1^{(j)} \\ & \text{且 } \mathbf{X}'_j(k+1) = A\mathbf{Y}_1^{(j)} + (I-A)\mathbf{Y}_2^{(j)} \\ (1-p_c) + jp_c/n, & \mathbf{X}'_j(k+1) = \mathbf{Y}_1^{(j)} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

其中 $j = j(\mathbf{Y}_1^{(j)}, \mathbf{Y}_2^{(j)}, \mathbf{X}'_j(k+1))$ 为用单点杂交 $(\mathbf{Y}_1^{(j)}, \mathbf{Y}_2^{(j)})$ 可以生成 $\mathbf{X}'_j(k+1)$ 的基因位置的个数, l 为染色体长度, 杂交概率 p_c 满足 $0 < p_c \leq 1$, A 是一个对角线矩阵, 前 r 个对角元素为 1 而其它元素为 0, r 为单点杂交的杂交点。

(4) 设变异概率为 p_m , 通过 $\mathbf{X}'^l(k+1) = (\mathbf{X}'_1^l(k+1), \dots, \mathbf{X}'_M^l(k+1))$ 产生 $\mathbf{X}(k+1) = (\mathbf{X}_1(k+1), \dots, \mathbf{X}_M(k+1))$ 满足概率:

$$P\{T_m(\mathbf{X}'_j(k+1)) = \mathbf{X}_j(k+1)\} = p_m^{d(\mathbf{X}'_j(k+1), \mathbf{X}_j(k+1))} (1-p_m)^{l-d(\mathbf{X}'_j(k+1), \mathbf{X}_j(k+1))}, \quad (j \leq M) \quad (18)$$

其中 $d(\mathbf{X}'_j(k+1), \mathbf{X}_j(k+1)) = \sum_{i=1}^l |a'_{ji} - a_{ji}|$ 为 $\mathbf{X}'_j(k+1)$ 与 $\mathbf{X}_j(k+1)$ 的Hamming距离^[14]。

(5) 如果满足停止准则, 则停止, 否则转向步骤 2。

则从 $\mathbf{X}(0)$ 出发, 即得到种群序列 $\{\mathbf{X}(k); k \geq 0\}$ 的 Gradient-GA 为

$$\mathbf{X}(k) = T(\mathbf{X}(k-1)) = T_m \cdot T_c \cdot T_s(\mathbf{X}(k-1)) \quad (19)$$

4 仿真结果和性能分析

不失一般性, 文中仿真给出了 9 参差 6 脉冲滑动滤波器实现同时抑制地物杂波和箔条杂波两种杂波的滤波器频率特性及性能比较。在仿真中, 雷达工作波长 $\lambda = 2.4\text{m}$, 参差码均值 $K_{av} = 100$, 脉冲重复周期 $T_r = 3300\mu\text{s}$, 最大参差比 $R_t = 1.14$; 地杂波模型的参数: 杂波频率标准偏差 $\sigma_f = 9\text{Hz}$, $f_0 = 0\text{Hz}$, 杂噪比 $\text{CNR} = 60\text{dB}$; 箔条杂波模型的参数: $\sigma_f = 20\text{Hz}$, $f_0 = 60\text{Hz}$, $\text{CNR} = 60\text{dB}$ ^[10]。用遗传算法搜索时, 取迭代次数为 100, 种群数为 6, $P_c = 0.55$, $P_m = 0.05$ 。

图 4 是 50 次独立蒙特卡罗试验得到的 Gradient-GA 和 CGA 的最优适应度和平均适应度(种群的整体性能)曲线, 可以看出: Gradient-GA 很快收敛到最优值, 而 CGA 很快收敛到局部最优值; 前者的平均适应度随着进化代数增加迅速提高靠近最优适应度曲线并一直接近, 而后者的平均适应度和最优适应度则逐渐靠近。这些差异是由于类似梯度的复制算子使种群朝最优染色体靠近, 弱的个体比强的个体得到更多的调整, 个体的复制减少了, 只有具有最优适应度的染色体保持不变。这使复制算子保持了种群的多样性, 因此避免了收敛到局部最小值的早熟现象。

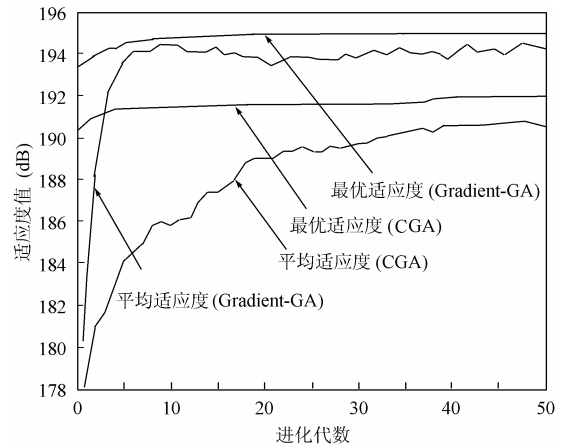


图 4 用于抑制地物、箔条双模杂波的 Gradient-GA 和 CGA 的收敛曲线

图 5 给出脉间滑动 4 次所得到的 4 组 6 参差 MTI 滤波器的频率响应曲线。基于 Gradient-GA 搜索得到的最优参差比为 101 : 102 : 100 : 104 : 93 : 101 : 100 : 98 : 101。从仿真结果可以看出每次滑动得到的滤波器都可以形成两个展宽的凹口抑制有一定谱宽的地物和箔条杂波, 并且将盲速推远, 有效地抑制了盲速效应。图 5 中实线表示第 3 次滑动得到的滤波器的频率响应, 它具有 4 个频率响应中最深的第一零点, 其余 3 条曲线的最深的凹口都比实线的第一零点的深度浅。图 6 给出了采用图 2 所示方法得到的 4 组 6 参差 MTI 滤波器频率响应频率曲线, 其最优参差比为 103 : 91 : 102 :

101 : 103 : 100。可以看出后面 3 个滑动滤波器频率响应的第一零点均明显下降。将图 5 和图 6 作比较可以看出, 采用改进的滑动参差码寻优方法能够使各滑动滤波器凹口都尽可能浅, 从脉间整体上更有效地检测低速弱目标。

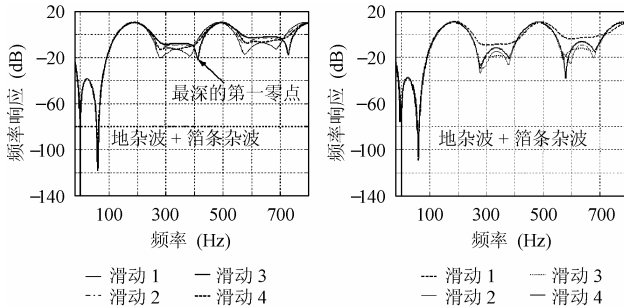


图 5 基于 Gradient-GA 的脉间参差 MTI 滤波器频率响应

图 6 传统方法的脉间参差 MTI 滤波器频率响应

5 结束语

本文提出了一种基于 Gradient-GA 的脉间参差时变 MTI 滤波器的优化设计方法。该滤波器在滤去多种杂波的同时将盲速推出三倍音速以外; 采用 Gradient-GA 搜索脉间的最优参差比, 使得滑动后得到的每个滤波器凹口都尽可能的浅, 避免落入这些凹口的弱目标丢失, 与传统脉间参差 MTI 滤波器的设计方法相比, 从脉间整体上提高了滤波器的低速弱目标检测性能。计算机仿真结果和性能分析验证了该算法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] Skolnik M. I. [美]著, 王军等译. 雷达手册. 北京: 电子工业出版社, 2003: 575 - 609.
- [2] Nitzberg R. Radar Signal Processing and Adaptive Systems. Boston & London: Artech House, 1999: 155 - 206.
- [3] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI: Univ, MichiEAn Press, 1975: 20 - 45.
- [4] 陈国良, 王熙法等. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1999: 59 - 122.
- [5] Pham D T, Jin G. Genetic algorithm using gradient-like reproduction operator. *Electronics Letters* 1995, 31(18): 1558 - 1559.
- [6] Fan Laiyao, Zhang Congxia, Ji Hongbing. Wiener filtering and LMS algorithm of periodic nonuniformly sampled stochastic sequence. *Electronics Letters*, 1995, 31(20): 1729 - 1731.
- [7] Weng Zuyin. Optimal design of clutter rejection filter for MTI system. Radar, 2001, CIE International Conference on, Proceedings, 15 - 18, Oct., 2001 : 457 - 478.
- [8] Soumekh M, Himed B. Multi-channel signal subspace processing methods for SAR-MTI. Radar Conference, 2003. Proceedings of the 2003 IEEE, 5-8 May, 2003: 126 - 132.
- [9] Huang Yong, Peng Yingning. Design of airborne adaptive recursive MTI filter for detecting targets of slow speed. Radar Conference, 2000. The Record of the IEEE 2000 International, 7-12 May, 2000: 215 - 218.
- [10] 樊来耀, 张戎宝, 姬红兵. 参差采样序列傅式分析的理论研究. 电子学报, 1994, 2(7): 76 - 83.
- [11] 张贤达. 现代信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1998: 125 - 138.
- [12] Simon Haykin. Adaptive Filter Theory (Fourth Edition). NJ: Prentice-Hall. July 2002: 94 - 135, 807 - 832.
- [13] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 93 - 105.
- [14] 毛用才, 胡奇英. 随机过程. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 101 - 142.

陶海红: 女, 1976 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为雷达信号与信息处理及智能方法在信号处理上的应用。

廖桂生: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事统计信号处理、子波变换和神经网络及其在雷达、通信中的应用研究。