

用于杂波抑制滤波器优化设计的混合遗传算法 及其收敛性分析

陶海红, 廖桂生, 王 伶

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 参差时变动目标显示(MTI)滤波器是在强运动杂波背景下检测弱目标和缓解盲速问题的一种有效方法. 选择适当参差码使参差时变 MTI 滤波器的第一零点尽可能浅, 可在有效抑制杂波的同时避免陷入其中的弱目标丢失. 本文采用了结合梯度的混合遗传算法(HGA)选择最优参差码, 与标准遗传算法(SGA)相比, 该算法只需要很小的种群规模. 采用马尔可夫链方法证明了 HGA 是以概率 1 收敛的全局随机搜索算法. 将该算法应用于米波雷达中, 性能分析和仿真实验表明, 基于混合遗传算法的杂波抑制滤波器设计是可行和有效的.

关键词: 混合遗传算法; 杂波抑制; 弱目标检测; 类似梯度; 参差码; 第一零点

中图分类号: TN957.51; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 12-2086-04

Hybrid Genetic Algorithm for Optimal Design of Clutter Rejection Filter and Its Astringency Analysis

TAO Hai-hong, LIAO Gui-sheng, WANG Ling

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

Abstract: The optimal stagger time-variant MTI filter is an effective method to detect weak target in strong moving clutters and alleviate the blind speed problem. Selecting the suitable stagger code to make the nadir as low as possible can efficiently suppress clutters while avoiding the loss of the weak target in it. The paper presents a hybrid genetic algorithm (HGA) based on gradient to select the optimal stagger code. A further result on the Markov chain model of HGA shows that it is a global stochastic searching method and can converge with probability one. Compared with standard genetic algorithm (SGA), HGA has low complexity and requires small population size. We apply it in the area of metric-wave radar. The simulation experiments and performance demonstrate that the design method of clutter resistance filter based on HGA is feasible and valid.

Key words: hybrid genetic algorithm; clutter suppression; weak target detection; gradient-like; stagger code; the nadir

1 引言

雷达要探测的运动目标周围经常存在着各种杂波, 选择运动目标回波而抑制杂波背景是一个关键问题. 为了避免发生盲速效应, 通常采用“参差采样序列”的方法^[1,2], 选择适当参差码可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. 寻找最优参差码是一个多变量复杂非线性的优化问题, 传统的优化方法大致分为三类: (1) 微分法; (2) 枚举法; (3) 随机搜索法. 微分法所搜寻的极值点一般是局部最优值, 其次要求优化对象的梯度存在; 枚举法效率很低, 参差码的可行解范围很大, 无法逐一比较所有可行解的目标值; 普通的随机搜索法并不比枚举法更好.

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的非常有用的工具^[3,4]. 由于SGA为了避免早熟往往选取较大的初始种群规模^[3], 本文采用一种需要极小初始种群规模的HGA^[12]搜索最优参差码, 大大降低了运算复杂度; 并且利用滤波器时变权系数的优化, 在频谱杂波

中心频率处形成有一定谱宽(宽度随杂波散射元的均方根速度展宽)的深凹口同时将频谱上的盲速区推出三倍音速以外.

本文首先介绍了杂波信号模型, 其次提出了基于HGA的抑制多模杂波滤波器优化设计, 然后利用马尔可夫链分析HGA的收敛性, 最后给出了基于米波雷达参数的仿真结果和性能分析.

2 杂波模型

对于 n 个杂波其功率谱可以由标准偏差 σ_f 表征的高斯曲线⁽¹⁾来表示

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

其中 C_k 是第 k 个杂波的幅度, 对应中心频率为 f_{k0} , 标准偏差 $\sigma_{kf} = 2\sigma_{kv}/\lambda$ (赫兹), σ_{kv} 为径向速度标准偏差(米/秒), λ 为雷达工作波长(米). 由此得杂波的相关函数为

$$M_C(i, j) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} C(f) e^{j2\pi f(t_i - t_j)} df = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} C(f) e^{j2\pi f(t_i - t_j)} df \quad (2)$$

收稿日期: 2003-08-08; 修回日期: 2004-03-25

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金; 武器装备预研基金(No. 51407030101DZ0120)

3 基于 HGA 的参差时变多凹口滤波器设计

3.1 种群初始化

用 GA 求解优化问题,首先要把待求的变量进行适当的编码,然后串接成遗传算法中的染色体。编码方式有很多种^[3~5],本文采用二进制编码。用 $X(k)$ 表示第 k 代种群,随机产生初始种群 $X(0)$ 。

3.1.1 编码

(1) 参差码模型 在参差时变算法^[1,2]中,参差码是一个重要的参数。设雷达工作在 N 参差的情况下,发射周期分别为 T_1, T_2, \dots, T_N ,最小公约数为 T ,有

$$T_i = K_i T, i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中 K_i 是参差码。 K_1, K_2, \dots, K_N 为参差比。雷达平均重复周期

$$T_r = (T_1 + T_2 + \dots + T_N) / N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i \right) T \quad (4)$$

$$\text{令 } K_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i, \text{ 则式(4)变为 } K_{av} = T_r \cdot 1/T = (1/f_r) f_b \quad (5)$$

其中 $f_r = 1/T_r$ 为雷达平均重复频率, $f_b = 1/T$ 。假定目标最大速度为三倍音速, $f_{dmax} = 2 \times 3 \times 340 / \dots$ 。则选 $K_{av} = f_{dmax} / f_r$ 可将盲区推出三倍音速以外。

参差码的最大值与最小值之比称为最大参差比,即

$$r = \max[K_1, K_2, \dots, K_N] / \min[K_1, K_2, \dots, K_N] \quad (6)$$

T 的大小与不模糊测速的距离有关,故系统对 r 有一定要求。

由式(4)和(6)得参差码搜索范围为:

$$[\text{ceil}(N \times K_{av} / (1 + (N-1) \times r)), \text{floor}(N \times K_{av} \times r / (N-1 + r))] \quad (7)$$

ceil 和 floor 分别是朝正无穷方向取整、朝负无穷方向取整。

(2) 参差码的二进制编码 因参差码均值固定,故选前 $N-1$ 个参差码 K_1, K_2, \dots, K_{N-1} 作为染色体变量,则 K_N 为 $N \times K_{av} - \sum(K_1, K_2, \dots, K_{N-1})$, 每一个变量用一定位二进制编码表示,变量所占的位数由参差码要求的动态范围和精度来确定。假设需要 l 位二进制码,染色体 X_j 可表示为

$$X_j = \{a_i | i=1, \dots, l\} \quad (8)$$

其中 $X_j \in S, S = \{0, 1\}^n$ 为个体空间。取 $X = (X_1, \dots, X_M)$ 作为一个种群,其中 M 为种群规模。

3.1.2 HGA 的适应度函数

在不同参差码

的情况下,参差时变 MTI 滤波器归一化频率响应 $G(f)$ 的第一零点深度差别很大,使第一零点深度最浅的参差码称为最优参差

码。本文采用如图 2 所示横向 FIR 滤波器^[7~9]结构实现 $G(f)$ 。图 1 中输出信号为

$$Y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_{1,i+1} x(n-i) \quad (9)$$

其中 $(w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,N})$ 是随时间变化的滤波器系数,

即是 n 的函数,抽头延迟线也随着 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:

$$G(f) = \frac{1}{2} \sum_{j=0}^1 \left| \sum_{i=0}^{N-1} w_{j,i+1} e^{-j2\pi(f_{n+i+j} - t_{n+j})} \right| \quad (10)$$

滤波器的权值优化最常用的方法是特征矢量法^[11],但其计算量也较大。为此本文采用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^[10,11]。

适应度函数 f_i 是 GA 中衡量个体优劣的尺度,是个体空间 S 到正实数空间的映射,即 $f: S \rightarrow R^+$ ^[6]。本文采用以下非线性规划来选择多杂波情况下的最优参差码。

在最大参差比给定为 $A, B = f_{dmax} / f_r$ 的情况下,即

$$\begin{aligned} D_1 &= \min[G_{10}(f) + G_{20}(f)] \\ f &\in D_s, \bar{D}_c \\ r &\leq A, K_{av} \geq B \end{aligned} \quad (11)$$

其中 D_s 表示目标多普勒频率分布区,通常为 $(0, K_{av}f_r)$ 之间, D_c 表示多杂波谱的分布区, \bar{D}_c 为 D_c 的补集。 $G_{10}(f), G_{20}(f)$ 分别是对应于两种杂波的滤波器频率响应 $G(f)$ 的第一零点深度,通过对 D_1 的搜索,即可得到最优参差码所对应的滤波器频率响应。因此参差码的适应度函数为

$$f_j = \text{Con} - D_1(X_j), j=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

其中 Con 是一个足够大的常数或者是 $D_1(X_j)$ 的最大值以保证 f_j 为正数。

3.2 类似梯度的复制算子

在 SGA 中,通常采用 J. Holland 教授提出的轮盘方式选择复制对象,即以旋转赌轮 M (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,但会导致早熟现象。且每次旋转就选择一个染色体^[5],这会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。而且在参差时变滤波器设计中,对于每一种参差码组合都要实现滤波器设计来计算适应度,因此初始种群的大规模带来的运算量也是相当大的。本文所采用的只需要很少种群数的类似梯度的复制算子^[12]很好的解决了这些问题。

新的复制算子包含下面三步: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。

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

$M)$ 分组解码为

$$V_j(k) = [v_{j1}(k) \dots v_{jn}(k)]^T \quad V^l(1 \leq l \leq n) \quad (13)$$

步骤 2 产生一个新的染色体

$$\begin{aligned} v_j(k+1) &= v_j(k) + \frac{[f_b(k) - f_i(k)]}{f_b(k)} \\ &\quad [v_b(k) - v_j(k)](1 \leq j \leq M) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 j 是一个正数^[13], $v_b(k)$ 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 $\bar{V}_j(k+1) (1 \leq i \leq M)$ 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

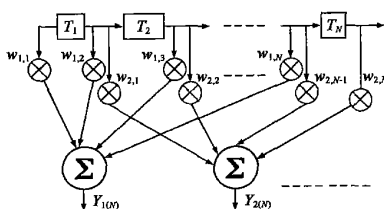


图 1 参差时变的多凹口 FIR 滤波器结构

应度差值和参数差值. 实际上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, 从式(14)知, 只有具有最优适应度的染色体保持不变, 使复制算子保持种群的多样性, 避免了早熟现象. 而且通过单个染色体的参数矢量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. 为了使新的参数点在复制过程中不会在搜索空间外发展, 选择 j 在 0 和 2 之间以确保复制算子的稳定性^[13].

因此对于第 k 步在 $X(k)$ 中按类似梯度的方法复制 M 个母体遵循式(15)的概率分布,

$$P\{T_s(X_j(k)) = Y_j(k)\} = \begin{cases} \frac{f(Y_j(k))}{\sum_{X \in X(k)} f(X)} \cdot \frac{f(X_j(k))}{\sum_{X \in X(k)} f(X)} & \text{且满足式(16)} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

其中 $j = 1 \sim M$.

3.3 杂交

对 3.2 中复制的 M 个母体进行单点随机杂交^[6], 即

$$P\{T_c(X_1^{(j)}, X_2^{(j)}) = X_j^{(l)}(k+1)\} = \begin{cases} jp_c/n, & X_j^{(l)}(k+1) = Y_1^{(j)} \text{ 且 } X_j^{(l)}(k+1) = AY_1^{(j)} + (I-A)Y_2^{(j)} \\ (1-p_c) + jp_c/n, & X_j^{(l)}(k+1) = Y_1^{(j)} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

其中 $j = j(X_1^{(j)}, X_2^{(j)}, X_j^{(l)}(k+1))$ 为用单点杂交 $(X_1^{(j)}, X_2^{(j)})$ 可以生成 $X_j^{(l)}(k+1)$ 的基因位置的个数, l 为染色体长度, 杂交概率 p_c 满足 $0 < p_c < 1$, 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.

3.4 变异

通过 $X^l(k+1) = (X_1^l(k+1), \dots, X_M^l(k+1))$ 产生 $X(k+1) = (X_1(k+1), \dots, X_M(k+1))$ 满足如下概率

$$P\{T_m(X_j^l(k+1)) = X_j(k+1)\} = p_m^{d(X_j^l(k+1), X_j(k+1))} (1-p_m)^{l-d(X_j^l(k+1), X_j(k+1))}, j = 1 \sim M \quad (17)$$

其中 p_m 为变异概率, $d(X_j^l(k+1), X_j(k+1)) = \sum_{i=1}^l |a_{ji}^l - a_{ji}|$ 为 $X_j^l(k+1)$ 与 $X_j(k+1)$ 的 Hamming 距离^[6].

3.5 停机原则

如果满足最大的预设进化代数或所要求条件, 则停止, 否则继续进化.

则从 $X(0)$ 出发, 即得到种群序列 $\{X(k); k=0\}$ 的混合遗传算法为:

$$X(k) = T(X(k-1)) = T_m \cdot T_c \cdot T_s(X(k-1)) \quad (18)$$

4 基于马尔可夫链的 HGA 算法收敛性

在证明 HGA 的收敛性之前先介绍一个定义.

定义 1 $M^* = \{X; F(X) = \max\{f(X); X \in S\}\}$ 称为种群满意集.

定义 2 $F(X) = \max\{f(X_j); j=1 \sim M\}$ 称为 $X = (X_1, \dots,$

$X_M)$ 的种群满意值.

定义 3 $M_0^* = \{Y = (Y_1, \dots, Y_M); Y_m \in M^*\}$ 称为满意种群集 M^* 的子集.

定理 设 $\{X(k); k=0\}$ 是由混合遗传算法进化得到的种群序列, 则有:

- (1) $\{X(k); k=0\}$ 是 S^M 上非齐次的马尔可夫链;
- (2) $\{X(k); k=0\}$ 是以概率 1 收敛到 M_0^* , 即

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P\{X(k) = M_0^* / X(0) = X_0\} = 1 \quad (19)$$

证明: (1) 首先, 遗传机制都无后效性, 即与当前种群状态有关, 而与以前的种群状态无关, 因此 HGA 是一个马尔可夫链是显然的.

其中 T_m 和 T_c 均与 k 无关^[6], $\{X(k); k=0\}$ 是否齐次关键看 T_s . 从式(14)可知梯度复制算子选择母体, 取决于上代各染色体的相对适应度, 即 $P\{X(k+1) = Y / X(k)\}$ 与 k 有关. 所以 $\{X(k); k=0\}$ 是非齐次的.

(2) 记 $P_k\{X, Y\} = P\{X(k+1) = Y / X(k) = X\}$, $P(k) = (P_k\{X, Y\}; X, Y \in S^N)$, $P(\cdot) = \lim_{k \rightarrow \infty} P_k\{X, Y\} = P\{T_m \cdot T_c \cdot T_s(X) = Y\}$, 从式(14)知只有最优适应度的染色体保持不变, 即杰出者选择^[6]可知

- (a) 当 $X, Y \in M_0^*$ 时, $P_k\{X, Y\} > 0$, $P_k\{Y, X\} > 0$, 即 $X \leftrightarrow Y$
- (b) 当 $X \in M_0^*, Y \notin M_0^*$ 时, $P_k\{X, Y\} = 0$, 即 X 不能到达 Y

即 M_0^* 为正常返的非周期的不可约闭集, S^N / M_0^* 是非常返的状态集^[14]. $P(\cdot)$ 是本原随机矩阵^[6], 于是存在一个平稳分布^[6]使

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P\{X(k) = Y / X(0) = X_0\} = \begin{cases} (Y), & Y \in M_0^* \\ 0, & Y \notin M_0^* \end{cases} \quad (20)$$

显然 $P(\cdot)$ 有唯一的一个不可约的非周期的正常返类 M_0^* , 而 S^N / M_0^* 是非常返类. 于是 $\{X(k); k=0\}$ 是强遍历的, 对于任意初始状态 $X(0) = X_0$, 有 $\lim_{n \rightarrow \infty} P\{X(n) = Y / X(0) = X_0\} =$

(Y) 且 $\sum_{Y \in M} (Y) = 1$, 于是

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P\{X(k) = M_0^* / X(0) = X_0\} = \sum_{Y \in M} (Y) = 1 \quad (21)$$

证毕.

5 HGA 的仿真结果和性能分析

仿真参数: GA 仿真参数^[3]: $M=6$, $p_c=0.4$, $p_m=0.03$, $\text{Con}=200\text{dB}$, 终止条件设定为最大进化次数 50 次, $j=1.2$; 雷达仿真参数^[1]: $N=5$, $\sigma=0.8\text{m}$, $f_r=900\text{Hz}$, $r=1.14$, $K_{av}=300$, $f_{\text{dmax}}=2V_{\text{max}}/\lambda=2550\text{Hz}$; 杂波的仿真参数^[2]: 地杂波 $f_0=0\text{Hz}$, $f=0.1\text{Hz}$, 海杂波 $f_0=30\text{Hz}$, $f=1.25\text{Hz}$, 箔条杂波 $f_0=60\text{Hz}$, $f=3\text{Hz}$ 雨云杂波 $f_0=90\text{Hz}$, $f=7.5\text{Hz}$.

由仿真参数得参差码的动态范围为 270 ~ 332, 用整数 0 ~ 62 映射其动态范围, 每个参差码需要 6 位二进制数编码, 故染色体为 $X = \{a_1 a_2 \dots a_{24}\}$.

可行性判定: (a) K_5 的动态范围是 270 ~ 332, 则 $1168 < \sum(K_1 K_2 K_3 K_4) < 1390$; (b) 6 位二进制编码的范围是 0 ~ 63, 而所需动态范围为 0 ~ 62. 在交叉(变异)中产生子代如果不符合 a, b 条件则继续交叉(变异), 经过 10 次还找不到符合

条件的子代,则保留父代继续进化。

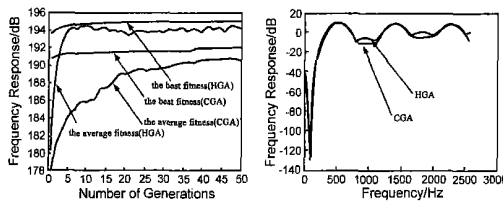


图 2 用于抑制箔条雨云双模杂波的 GA

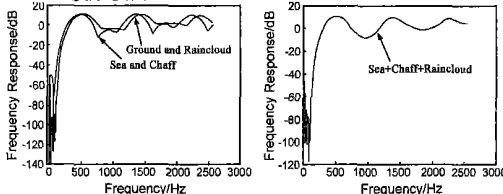


图 3 基于不同参差码的滤波器频率响应

图 4 基于 HGA 的抑制双模杂波的频率响应

图 5 基于 HGA 的抑制双模杂波的频率响应

实例 1 同时抑制箔条、雨云双模杂波的 HGA 和 SGA 性能比较。

图 2 是 50 次独立蒙特卡罗试验得到的 HGA 和 SGA 的最优适应度和平均适应度(种群的整体性能)曲线,其中 X 轴为进化代数(代), Y 轴为适应度值(分贝)。可以看出:HGA 很快收敛到最优值,而 SGA 很快收敛到局部最优值;HGA 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直接接近,而 SGA 的平均适应度和最优适应度则逐渐靠近。图 3 是分别由 HGA 和 SGA 得到的优化码所对应参差时变的多模杂波抑制的滤波器频率响应,其中 X 轴为频率值(赫兹), Y 轴为归一化的频率响应值(分贝)。通过第一零点的深度比较,可以看出 HGA 搜索的参差码优于 SGA 的,SGA 收敛到了局部最优值。

实例 2 基于 HGA 的多种抑制杂波参差时变滤波器的优化设计

图 4、图 5 分别是基于 HGA 的抑制几种双模杂波(分别为同时存在地杂波和雨云杂波、海杂波和气象杂波)和多模杂波(同时存在海杂波、箔条杂波和气象杂波)的时变参差滤波器的频率响应,可以看出 HGA 所搜索的优化码使滤波器分别在相应杂波的中心频率处形成多个(多模杂波)有一定谱宽(宽度随杂波散射元的均方根速度展宽)的深凹口,有效的抑制了杂波,同时将盲速推出三倍音速(2550Hz)以外,并且第一零点都尽可能的浅。

6 结论

杂波抑制并检测弱目标是雷达信号处理系统中的一项关键技术,通过搜索最优参差码使滤波器频率响应的第一零点尽可能的浅,并且利用滤波器时变权系数的优化,在频谱杂波中心频率处形成有一定谱宽(宽度随杂波散射元的均方根速度展宽)的深凹口同时将频谱上的盲速区推出三倍音速以外,可在抑制杂波同时不会使陷入该凹口中的弱目标丢失。本文提出了一种用于搜索参差码的二进制编码的 HGA,采用类似梯度的复制算子保持了种群的多样性,因此避免了早熟现象;且由于其初始种群规模较 SGA 要小的多,故运算复杂度大大

降低。基于马尔可夫链的分析得出该算法是以概率 1 收敛的全局随机搜索方法。最后基于米波段的仿真结果验证了该算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] Ramon Nitzberg. Radar signal processing and adaptive systems[M]. Boston&London:Artech House,1999. 155 - 206.
- [2] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995. 244 - 282.
- [3] J H Holland. Adaptation in natural and artificial systems[M]. 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[M]. 北京:人民邮电出版社,1999. 59 - 122.
- [5] D E Goldberg. Evolutionary algorithms in search, optimization, and machine Learning[M]. MA:Addison-Wesley,1989. 31 - 45.
- [6] 张文修,梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000. 112 - 120.
- [7] FAN L Y, et al. Wiener filtering and LMS algorithm of periodic nonuniformly sampled stochastic sequence[J]. IEE Electronics Letters, 1995, 31(20):1729 - 1731.
- [8] Weng Z Y. Optimal design of clutter rejection filter for MTI system [A]. Radar, CIE International Conference on, Proceedings [C]. Beijing:CIE,Oct,2001. 475 - 478.
- [9] 樊来耀,张戎宝,等. 参差采样序列傅式分析的理论研究[J]. 电子学报,1994,2(7):76 - 83.
- [10] Haykin Simon. Adaptive filter theory fourth edition[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2002. 94 - 135,807 - 832.
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1998. 125 - 138.
- [12] PHAM D T, JIN G. Genetic algorithm using gradient-like reproduction operator[J]. IEE Electronics Letters, 1995, 31(18):1558 - 1559.
- [13] PHAM D T, JIN G. A genetic algorithm for function optimization[R]. Internal Report (2nd Ed.), UK:University of Wales Cardiff: Intelligent Systems Laboratory,1995.
- [14] 毛用才,胡奇英. 随机过程[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999. 101 - 142.

作者简介:



陶海红 女,1976 年 4 月生于安徽省亳州市,现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室讲师、在职博士,2002 年获西安电子科技大学信号与信息处理专业硕士学位,主要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 年生于广西桂林,现为西安电子科技大学教授、博士生导师,1992 年获西安电子科技大学博士学位,1999 年 11 月至 2000 年 11 月为香港中文大学访问学者,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。