

图中的系数 $2K1$ 被称为前向系数, 系数 $K2$ 、 $K3$ 和 $K4$ 被称为反馈系数. 该滤波器的系统函数为

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-1})(1 - 2K1 \cdot z^{-1} + z^{-2})}{(1 - K4 \cdot z^{-1})(1 - K2 \cdot z^{-1} - K3 \cdot z^{-2})} \quad (1)$$

对于图 1 中递归式 MTI 滤波器的系数设计, Mark and Woods 最早提出的设计准则是使滤波器通带尽可能的平坦^[4], 随后他们又对该准则进行了改进, 提出还应考虑改善因子的大小, 最佳的设计应在通带平坦和改善因子之间寻求最优折衷^[5]. 之所以这样考虑, 根本原因是 MTI 滤波器的通带特性 (通带波纹和通带带宽) 与改善因子之间是矛盾的^[6], 二者不可能同时达到最优.

上面提到的设计准则对于我们有很好的启发, 由于在实际 MTI 滤波器的性能指标中, 最重要的参数是 IF、滤波器通带波纹和通带宽度, 因此我们的设计准则为: 在保证必须的通带带宽 (-3dB 带宽) 和其余系统指标要求的前提下, 应根据实际的应用环境, 在改善因子和通带波纹间寻求最优匹配.

在如上的设计准则下设计滤波器系数 (如 $K1 \sim K4$), 如果换一个角度考虑, 则类似于一个多维空间搜索的参数优化过程, 即在适当的系数取值范围内 (以保障系统稳定性) 寻找合适的取值, 以便设计出的滤波器能够达到指标要求. 对于这样的多参数优化问题, 采用穷举法等搜索方法, 不仅非常费时费力, 而且可能只搜索到局部最优值. 为此, 我们使用 GA 来加速搜索过程.

GA 是建立在自然选择和自然遗传学基础上的全局优化算法, 它采用了结构化的但随机性的并行多点搜索策略. GA 的基本原理是 J.Holland 于 1975 年首先提出的^[7,8], 80 年代 D.Goldberg 进行了大量的研究工作, 并成功地将它应用于各种类型的优化问题. 由于在算法中没有使用导数、积分等运算, 因此非常适用于无具体解析表达式的优化问题.

下面就以 GA 的基本思想为基础, 设计一个多参量、带约束 (必须满足系统要求) 的参数优化问题的遗传寻优算法, 用于递归式 MTI 滤波器的系数设计.

3 GA 在 MTI 滤波器设计中的应用

应用 GA 的关键问题是构造合适的适应函数 (Fitness Function)^[7,8], 它是 GA 和实际系统间的一个重要连接. 由于在设计 MTI 滤波器时的目的是得到高的改善因子 (IF), 宽的通带宽度 (用 B_p 表示), 低的通带波纹 (用 δ_p 表示), 因此构造的适应函数为

$$f(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \text{IF} + B_p + 1/\delta_p \quad (2)$$

其中 $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_H]$ 为前向系数向量, $\mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_Q]$ 为反馈系数向量.

与大多数 GA 的应用相似, 我们对参数组 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 中的每一位系数 $a_k (k = 1, \dots, H)$ 和 $b_k (k = 1, \dots, Q)$ 采用二进制编码, 每位系数编码后的码长是 32 位, 编码方式是基 2 的普通二进制码.

在上述工作的基础上, 递归式 MTI 滤波器设计的遗传寻优算法如下:

步骤 1 随机产生一个包含 L 条染色体 (Chromosome) 的初始种群 M^0 , 其中的第 $i (i = 1, 2, \dots, L)$ 条染色体为 $[\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i]^T$ (T 表示转置), $a_{ik} (k = 1, \dots, H)$ 和 $b_{ik} (k = 1, \dots, Q)$ 为染色体中的基因 (Gene).

步骤 2 执行繁殖 (Reproduction) 算子的运算. 首先计算出种群 M^m 中, 每条染色体所对应的 IF, B_p , δ_p . 如果它们的值满足滤波器性能要求, 则按照 (2) 式求出适应函数的值; 否则根据越界程度, 采用非线性惩罚方式确定该染色体的适应函数值, (3) 式给出了一种典型的带惩罚的适应函数 (假设只有 IF 和 δ_p 越界).

$$f(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \text{IF} \cdot (N_1 \cdot |\text{IF} - \text{IF}_s|) + B_p + \frac{1}{\delta_p \cdot (N_2 \cdot |\delta_p - \delta_{ps}|)}, \quad (3)$$

其中 IF_s 表示系统要求的改善因子, δ_{ps} 表示系统要求的通带波纹, N_1 , N_2 的取值范围为 $(0, +\infty)$ 。根据计算出的适应函数值, 采用轮盘赌 (Roulette Wheel) 的方法对各条染色体进行竞争选择, 从而构成种群 \mathbf{X}^m 。

步骤 3 执行交叉 (Crossover) 算子的运算。从种群 \mathbf{X}^m 中随机选取两条染色体 (设 L 为偶数), 进行交叉操作, 交叉概率为 P_c 。共重复 $L/2$ 次, 使新的种群中包含 L 条染色体, 此时种群变为 \mathbf{Y}^m 。交叉算法的目的是使来自父代的遗传物质能组合到一起以产生更优良的个体, 交叉概率的取值范围为^[7]: $0.6 \leq P_c \leq 0.99$ (De Jong, 1975; Grefenstette, 1986; Schaffer *et al.*, 1989)。

步骤 4 执行变异 (Mutation) 算子的运算。对种群 \mathbf{Y}^m 中每一条染色体的每一位基因都进行变异操作, 即某一比特位由 1 变为 0 或由 0 变为 1, 变异概率为 P_m 。变异算法的目的是对染色体引入变异, 这种变异可以是局部的或全局的, 从而能以当前种群为基础进行整个空间搜索。通常 P_m 的取值较小^[7]: $0.001 \leq P_m \leq 0.01$ (De Jong, 1975; Grefenstette, 1986; Schaffer *et al.*, 1989), 但是我们在实验中发现, 由于我们的 GA 是在有约束情况下的使用 (应满足系统要求), 所以如果在不满足要求的染色体使用较小的变异概率, 不利于算法快速收敛到最优解。为此我们在算法中使用了自适应选择变异概率的技巧, 即当某条染色体对应的 IF , B_p 和 δ_p 中至少有一个不满足要求时, 该染色体所有基因的变异概率为一个较大的值 P_{mb} , 反之则为较小的值 P_{ms} 。

经以上三个算子的运算, 最后得到新的种群 \mathbf{M}^{m+1} 。

步骤 5 如果迭代次数 m 达到预先设定的值, 或种群中相同染色体的个数超过一定限度, 则停止计算^[7], 输出此时种群的染色体值, 求出对应的适应函数值。显然, 最大的适应函数值所对应的染色体中各位基因的值, 即为所求的最优系数值。

如果不满足迭代终止条件, 令 $m = m + 1$, 返回步骤 2。

步骤 6 为了保证系统的稳定性, 我们还应检验 MTI 滤波器极点的位置。如果极点在单位圆内, 则中止本次搜索; 否则, 返回步骤 1。

4 设计实例

实例 1 设计一个双路递归式 MTI 滤波器, 该滤波器如图 2 所示^[3], 可调整的系数为反馈系数 K_1 和 K_2 。

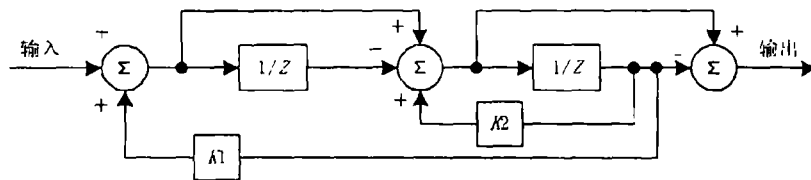


图 2 双路对消器

该滤波器的系统函数为

$$H(z) = \frac{(1 - z^{-1})^2}{1 - (K_1 + K_2) \cdot z^{-1} + K_1 \cdot z^{-2}}. \quad (4)$$

在归一化杂波谱宽 $\sigma_c = 0.0191$ 时, 某雷达系统要求的 MTI 滤波器改善因子 $IF \geq 35\text{dB}$, 归一化通带带宽 (-3dB 带宽) $B_p \geq 0.66$, 通带波纹 $\delta_p \leq 2\text{dB}$ 。

设计时的几个关键参数设置如下: 交叉概率 $P_c=80\%$, 变异概率 $P_{mb}=20\%$, $P_{ms}=0.1\%$, 种群中染色体个数 $L=100$, 迭代终止条件为迭代 100 次, $K1$ 和 $K2$ 的搜索范围为 $(-1, 1)$ 。

经过搜索获得的 $K1=0.380$, $K2=0.105$ (易证明此时系统是稳定的), 相对应的 $IF=36.4872\text{dB}$, $\delta_p < 1.5\text{dB}$ 。在文献 [3] 中也给出几组 $K1$ 和 $K2$ 的取值, 它们对应的 MTI 滤波器性能如表 1 所示(系数 2~ 系数 5)。

利用系数 3 设计出的 MTI 滤波器实际上是二项式系数加权的非递归式滤波器。图 3 给出了利用表中系数设计出的 MTI 滤波器的幅频响应图。

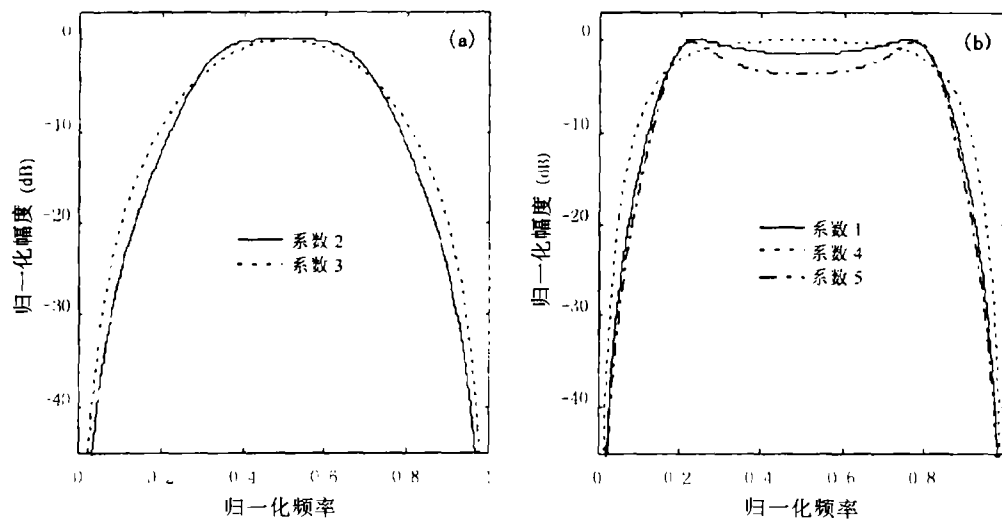


图 3 MTI 滤波器幅频响应图
(a) 系数 2 和系数 3. (b) 系数 1, 系数 4 和系数 5

表 1 双路对消器的系数设计

系数号	$K1$	$K2$	通带宽度 (-3dB 带宽)	$IF(\text{dB})$	$\delta_p(\text{dB})$
1	0.380	0.105	0.67	36.49	< 1.5
2	0.200	-0.600	0.38	46.03	0
3	0.000	0.000	0.36	39.89	0
4	0.200	0.600	0.66	28.46	0
5	0.500	0.000	0.66	37.73	> 3.5

从表 1 和图 3 可以看出, 设计出来的系数所构成的 MTI 滤波器能够满足系统要求, 且具有较宽的通带范围。与该系数相比, 系数 2 和系数 3 尽管具有平坦的通带和较高的 IF , 但是通带范围过窄; 而系数 4 尽管具有较宽的通带宽度和平坦的通带特性, 但 IF 却很小; 系数 5 则不具备平坦的通带特性。当然, 对于不同的系统要求应采用不同的系数, 因此以上的对比仅适用于本例的情况。

实例 2 设计一个三路递归式 MTI 滤波器, 该滤波器如图 1 所示 [3], 可调整的系数为 $K1 \sim K4$ 。

在归一化杂波谱宽 $\sigma_c=0.019$ 时, 某雷达系统要求的 MTI 滤波器改善因子 $IF \geq 50\text{dB}$, 归一化通带带宽 $B_p \geq 0.66$, 通带波纹 $\delta_p \leq 1\text{dB}$ 。

设计时的几个关键参数(如 P_c, P_{mb}, P_{ms} 等)的设置与实例 1 相同, $K2 \sim K4$ 的搜索范围为 $(-1, 1)$, $K1$ 的搜索范围无特殊要求, 本例中为 $(-2, 2)$ 。经过搜索获得的 $K1=0.9800$,

$K_2 = 0.9117$, $K_3 = -0.6531$, $K_4 = -0.0219$ (易证明此时系统是稳定的), MTI 滤波器的具体性能参见表 2。表 2 还列出文献 [3] 中给出的系数值(系数 2~ 系数 4), 以及文献 [5] 中给出的系数值(系数 5)。

利用系数 4 设计出的 MTI 滤波器实际上是二项式系数加权的非递归式滤波器。图 4 给出了利用表中系数设计出的 MTI 滤波器的幅频响应图。

表 2 三路对消器的系数设计

系数号	K_1	K_2	K_3	K_4	通带宽度 (-3dB 带宽)	IF (dB)	δ_p (dB)
1	0.9800	0.9117	-0.6531	-0.0219	0.70	52.41	≤ 0.93
2	1.0	1.2	-0.70	0.088	0.77	42.04	≤ 1.01
3	0.98	0.71	-0.25	0.5	0.63	43.42	0
4	1.0	0	0	0	0.30	56.74	0
5	0.984375	1.6875	-0.765625	0.8125	0.90	16.65	0

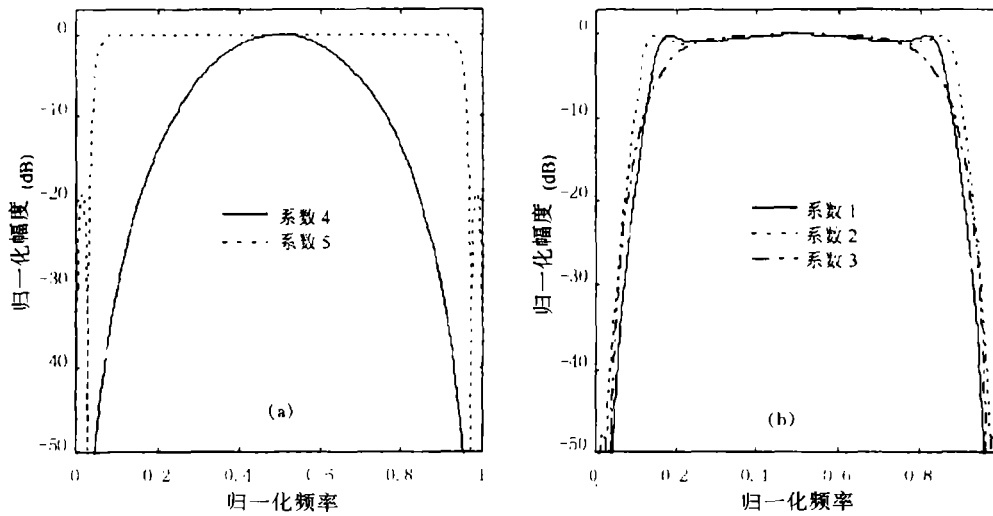


图 4 MTI 滤波器幅频响应图
(a) 系数 4 和系数 5, (b) 系数 1, 系数 2 和系数 3

从表 2 和图 4 可以看出, 设计出来的系数所构成的 MTI 滤波器能够满足系统要求, 且具有较宽的通带范围。与该系数相比, 系数 3 和系数 4 尽管具有平坦的通带和较高的 IF, 但是通带范围较窄(特别是系数 4); 而系数 5 具有最宽的通带宽度和平坦的通带特性, 但 IF 却也最小; 系数 2 的通带起伏稍大, 而 IF 较小。与实例 1 类似, 以上的对比也仅适用于本例的情况。此外, 图 4 的仿真结果从侧面说明了通带特性与 IF 之间一般是相互矛盾的, 即在非递归式 MTI 滤波器基础上增加反馈尽管可以改善通带特性, 但却是以降低 IF 为代价的。

5 结 论

本文提出一种递归式 MTI 滤波器的有效设计方法, 由于在设计中充分考虑了系统的要求(如 IF 等), 并在算法中加以应用, 因此可以保证设计出的滤波器具有较佳性能。仿真结果表明本文的算法是有效的, 引入的遗传算法不仅使滤波器设计更具灵活性, 而且加快了参量搜索速度, 且能获得全局近似最优解。

需要提到的是, 由于遗传算法搜索到的是全局近似最优解, 因此在找到适当系数后, 还可以在各系数取值附近做一定的调整, 看是否能进一步改善 MTI 滤波器性能。

参 考 文 献

- [1] Galati G (Ed.). Advanced Radar Techniques and Systems. London, UK: Peter Peregrinus Ltd., 1993, Chapter 6.
- [2] Schleher D C. MTI and Pulsed Doppler Radar. Norwood, MA: Artech House, Inc., 1991, 361-384.
- [3] Skolnik M I. Radar Handbook. New York: McGraw-Hill, 1990, 15.23-15.28.
- [4] Mark J W, Woods H A. A recursive digital MTI radar filter. Proc. IEEE, 1972, 60(6): 728-729.
- [5] Mark J W, Woods H A. Improvement factor of a recursive MTI radar filter. Proc. IEEE, 1972, 60(11): 1442-1443.
- [6] Klemm R. Multiplier-free filters for ground clutter suppression. IEE Proc.-F, 1986, 133(1): 12-15.
- [7] Hassoun M H. Fundamentals of Artificial Neural Networks. Cambridge, MA.: MIT Press, 1995, 439-452.
- [8] Tang K S, Man K F, Kwong S, *et al.* Genetic algorithms and their applications. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(6): 22-37.

DESIGN OF RECURSIVE MTI FILTER BASED ON
THE GENETIC ALGORITHM

Huang Yong Peng Yingning

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In theory, it is possible to synthesize any frequency response curve with the recursive MTI(Moving Target Indication) filters. As a result, the applied field of this kind of filter is wide. A new design method is presented to design flexibly a recursive MTI filter that can meet the specifications of the system. The method is based on the Genetic Algorithm(GA) and constitutes the fitness function with improvement factor, passband width and ripple of a filter. It speeds the search process and achieves near-global optimum parameters by means of the GA. Two kinds of classical recursive MTI filters are designed in this paper. The results demonstrate the validity of this design method that can design flexibly and quickly a required filter.

Key words Recursive MTI filter, Genetic algorithm, Improvement factor, Passband width, Passband ripple

黄 勇: 男, 1972 年生, 博士生, 主要研究方向包括雷达信号处理、谱估计、神经网络、无线通信等。
彭应宁: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 目前的研究方向为: 谱估计、自适应滤波、自适应阵列信号处理、并行信号处理、雷达信号处理、神经网络与子波变换等。