

文章编号: 1671-0576(2021)04-0015-06

基于人工蜂群算法的 FRM 信道化设计

赵小琪^{1,2}, 曲海山³, 张文旭^{1,2}, 何俊希^{1,2}, 王 哲³

- (1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工程大学先进船舶通信与信息技术工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

摘 要: 为满足高效、低复杂度数字信道化结构的需要, 提出了一种基于人工蜂群算法的频率响应屏蔽(frequency response masking, FRM)信道化设计方法。该方法将 FRM 与数字信道化窄过渡带滤波器组相结合, 降低了计算复杂度及工程实现难度。推导了基于人工蜂群算法优化的 FRM 信道化结构, 通过仿真验证了该设计的正确性, 并对信道化优化结构进行了 FPGA 硬件实现。通过与经典 FRM 信道化结构性能进行对比, 验证了基于人工蜂群算法的 FRM 信道化结构具有更低的资源消耗与时延。

关键词: 频率响应屏蔽; 数字信道化; 人工蜂群算法; 宽带接收机

中图分类号: TN911

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.04.003

FRM Channelized Design based on Artificial Bee Colony Algorithm

ZHAO Xiao-qi^{1,2}, QU Hai-shan³, ZHANG Wen-xu^{1,2},
HE Jun-xi^{1,2}, WANG Zhe³

- (1. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. Key Laboratory of Advanced Marine Communication and Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 3. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high efficiency and low complexity of digital channelized structure, artificial bee colony algorithm based on frequency response masking (FRM) channelized design method is proposed. FRM is combined with digital channelized narrow transition band filter banks in the method, which reduces the computational complexity and engineering implement difficulty. FRM channelized structure

收稿日期: 2021-09-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2020F020); 南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工信部重点实验室基金(KF20181904)

作者简介: 赵小琪(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事滤波器组结构研究。

optimized based on the artificial bee colony algorithm is deduced, and the correctness of design is verified by simulation. The channelized optimization structure is implemented by field programmable gate array(FPGA), and the performance of channelization structure is compared with the classic FRM channelization structure. It is verified that FRM channelized structure based on artificial bee colony algorithm has lower resource consumption and delay.

Key words: frequency response masking; digital channelization; artificial bee colony algorithm; wideband receiver

0 引言

电子对抗也称电子战。电子战双方采取一系列措施和行动,目的是破坏对方电子系统和电子设备使用性能,同时保护己方战斗力。接收机是电子对抗系统中的关键设备,极具研究发展空间。在现代化战争中,传输的信号在时间上密集且形式复杂,需要接收机能够实时接收并处理大的瞬时宽带信号,同时具有动态范围大、灵敏度高等特点,能在复杂电磁环境下有效截获信号^[1]。信道化接收机是目前唯一一种既可工程化,又能满足电子战需求的宽带接收机。

数字信道化接收机在保持信道化接收机高性能的同时,通过数字化提高接收机的灵活性与稳定性,减小输出信号带宽,降低对后端数据处理速率的要求^[2]。数字信道化接收机的发展热点是低时延与低资源消耗,其中数字信道化滤波器组结构为重点优化对象。

WU 等^[3]对基于频率响应屏蔽(frequency response masking, FRM)的窄带余弦调制滤波器组进行了 FPGA 实现,证明了在窄带数字信道化设计中应用 FRM 技术可以降低硬件复杂度。SHARMA 等^[4]将粒子群算法与共同子表达式相结合,在优化有限脉冲响应(FIR)滤波器性能的同时,节省了工程实现时所需加法器的数量。随着宽带数字接收机与信号处理需求的日益增大,信道间窄过渡带化及工程低复杂度化成为数字信道化技术的研究重点^[5]。本文提出一种基于人工蜂群(artificial bee colony, ABC)的优化算法,对 FRM 信道化结构进行低复杂度和低延时的优化设计。

1 基于 FRM 的信道化结构

信道化设计中所用原型滤波器的性能是影响信号重构效果的重要因素之一。滤波器特性越理想,过渡带越窄,重构效果越好。如何在不增加硬件复杂度的前提下使滤波器的过渡带变窄,成为重点关注的问题。FRM 技术就是众多窄过渡带滤波器的设计方法之一。

FRM 技术的基本原理是对原型滤波器进行插值,获得窄过渡带,然后利用两个屏蔽滤波器将多余的镜像频带屏蔽掉^[6]。FRM 滤波器的表达式为

$$F(z) = F'_a(z)F_{Ma}(z) + F'_c(z)F_{Mc}(z) \quad (1)$$

式中: $F'_a(z)$ 和 $F'_c(z)$ 是一组互补的 FIR 原型滤波器 $F_a(z)$ 和 $F_c(z)$ 经 P 倍插值后得到的插值滤波器; $F_{Ma}(z)$ 和 $F_{Mc}(z)$ 分别为对应的屏蔽滤波器。

$F_a(z)$ 与 $F_c(z)$ 的关系可以表示为

$$F_c(z) = z^{-(L_a-1)/2} - F_a(z) \quad (2)$$

式中: L_a 为滤波器 $F_a(z)$ 的长度。

对 $F_c(z)$ 进行 P 倍插值,插值滤波器 $F'_c(z)$ 的表达式为

$$F'_c(z) = z^{-P(L_a-1)/2} - F'_a(z) \quad (3)$$

对屏蔽滤波器 $F_{Ma}(z)$ 进行多相表示

$$F_{Ma}(z) = \sum_{l=0}^{N-1} z^{-l} F_{Ma,l}(z^N) \quad (4)$$

式中: $F_{Ma,l}(z^N)$ 为 $F_{Ma}(z)$ 的多相分量,其中 N 为信道数。

$F_{Ma}(z)$ 经复指数调制,进一步可得到

$$F_{Ma}(zW_N^k) = \sum_{l=0}^{N-1} (zW_N^k)^{-l} F_{Ma,l}(z^N) \quad (5)$$

式中: $W_N^k = \exp(j2\pi k/N)$ 为数字信道化调制因子,其中 $k(k=0,1,\dots,N-1)$ 为数字信道化结构中的信道编号。屏蔽滤波器 $F_{Mc}(z)$ 与 $F_{Ma}(z)$ 同理。将 FRM 技术与多相信道化结构相结合,即可得到基于 FRM 的多相数字信道化结构。这种结构在降低计算复杂度的同时,实现了窄过渡

带信道的设计目标。基于 FRM 的数字信道化结构如图 1 所示。输入信号为 $x(n)$,输出信号为 $y_0(n), y_1(n), \dots, y_{N-1}(n)$, IDFT 表示对信号进行离散傅里叶逆变换。将 D 倍抽取模块放置在滤波器组结构之前,可降低其采样率。

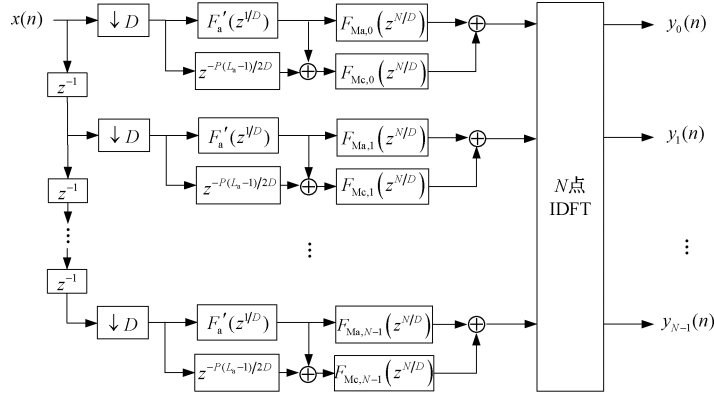


图 1 FRM 数字信道化结构

2 基于 ABC 算法的 FRM 滤波器组优化设计

2.1 ABC 算法原理

仿照自然界蜂群的结构,ABC 算法搜索蜜源的过程中会利用到 3 种蜂:工蜂、侦察蜂和观察蜂。通过相互之间的信息交流与合作,以最高效率来寻求最优解^[7]。人工蜂群算法对蜜源的寻找与确定主要分为 3 步:

a) 工蜂对每个初始蜜源进行侦察与探测,并记录蜜源花蜜量;

b) 搜索蜜源工作完成后,工蜂与观察蜂共享蜜源信息,观察蜂对蜜源信息进行优劣对比,择优选择蜜源进行采蜜;

c) 将采蜜后的蜜源舍弃,此蜜源的工蜂转换为侦察蜂角色,继续寻找新蜜源。

利用 ABC 算法解决函数问题时,两者具有一一对应关系:蜂群寻找蜜源行为对应函数优化问题,蜜源位置对应可行解,蜜源收益对应解的优秀程度,寻找蜜源的速度对应解的优化程度,截止到本代的最优蜜源位置对应局部最优解,蜜源最优位置则对应最优解^[8]。

实现过程中,ABC 算法首先随机生成 N 个 D 维初始解,组成初始种群,初始解即为蜜源初始

位置。3 种蜂分工合作、不断迭代。工蜂计算当前蜜源的花蜜量并分享给观察蜂,观察蜂依据轮盘赌规则选出具有特定概率值的蜜源继续完成后续操作。与此同时工蜂和观察蜂会对解集进行修改,对蜜源位置进行更新,开始进行寻找新蜜源的工作,并对蜜源质量进行评估。一个蜜源的位置可以表示为 $X = \{x_d | d = 1, 2, \dots, D\}$,其中 D 为蜜源位置维数。则第 i 个蜜源第 t 次迭代的位置可以表示为 $X_i^t = \{x_{id}^t | d = 1, 2, \dots, D, i = 1, 2, \dots, N\}$,其中 $X_i^t \in [L_d, U_d]$, L_d 和 U_d 分别表示蜜源位置搜索空间的下限与上限。

对第 i 个蜜源的位置进行初始化

$$x_{id}^0 = L_d + \text{rand}(0, 1)(U_d - L_d) \quad (6)$$

式中: $\text{rand}(0, 1)$ 表示 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

对第 i 个蜜源第 t 次迭代的位置更新

$$v_{id}^t = x_{id}^t + \lambda(x_{id}^t - x_{jd}^t) \quad (7)$$

式中: λ 为扰动幅度,取值为 $[-1, 1]$ 之间的均匀分布的随机数; x_{jd}^t 代表随机选择的邻域蜜源位置,其中邻域蜜源号 $j \in \{1, 2, \dots, N\}$,且 $j \neq i$,代表在 N 个蜜源中再随机选择一个蜜源。

工蜂在第 t 次迭代确定 X_i^t 为蜜源的选择概率

$$p_i = f(X_i^t) / \sum_{i=1}^N f(X_i^t) \quad (8)$$

式中: $f(X_i^t)$ 为 X_i^t 的适应度函数。 $f(X_i^t)$ 与概率成正比关系, 蜜源的适应度越高, 被选中的概率越大。

在 ABC 算法迭代寻求最优解过程中, 如果蜜源 X_i^t 经过 T_i 次迭代后到达预定阈值 T_L , 还没有找到更好的蜜源, 则放弃该蜜源。在此蜜源的工蜂转换为侦察蜂角色, 并挑选下一备选解集。上述过程可以表示为

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} L_d + \text{rand}(0,1)(U_d - L_d), & T_i \geq T_L \\ X_i^t, & T_i < T_L \end{cases} \quad (9)$$

2.2 FRM 滤波器组的优化

滤波器的优化设计涉及多维度目标的组合优化, 以利用高效的优化算法来寻求最优解为目标, ABC 算法恰好能满足这类需求。寻找全局最优蜜源即对应寻找问题的全局最优解。采用 ABC 算法对 FRM 滤波器组进行优化主要分为以下 6 个步骤。

(1) 蜜源初始化

根据实际要求确定 FRM 滤波器组中的原型滤波器、上支路屏蔽滤波器及下支路屏蔽滤波器的通带截止频率和阻带起始频率参数, 利用频率抽样法计算 FRM 多相数字滤波器组中各个滤波器的系数, 作为人工蜂群算法的初始蜜源。一组蜜源代表一组可能的优化解组合。

(2) 蜜源优先排序

算法初始化时, 令蜜源的数量大于工蜂数量, 且为其整数倍, 以便获得更大的蜜源搜索范围, 获取更好的解方案。评估蜜源的花蜜量, 既适应值, 对适应值高的蜜源继续进行优化。优先排序的蜜源数量等于工蜂数量。

(3) 工蜂

工蜂在邻域蜜源中选择一个蜜源, 并评估其适应值。为了获得新的评估源, 第 i 个蜜源的工蜂会随机选择该蜜源位置第 m 个维度的参数进行更新。邻域中新蜜源第 m 个维度的新参数计算公式为

$$x_{im}^{t+1} = x_{im}^t + \lfloor \varphi \delta_{im}^t \rfloor \quad (10)$$

其中

$$\delta_{im}^t = x_{im}^t - x_{km}^t \quad (11)$$

式中: x_{im}^t 为第 i 个蜜源的第 m 个维度的参数, 其

中 $m \in \{1, 2, \dots, D\}$; $\lfloor \cdot \rfloor$ 代表向下取整; φ 为 $[-1, 1]$ 范围内的随机数; δ_{im}^t 为第 i 个蜜源与邻域蜜源之间第 m 个维度参数的差值; x_{km}^t 为邻域蜜源的第 m 个维度的参数, 其中 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$, 且 $k \neq i$ 。

上述方法虽然可以确保生成的候选解集仍在搜索空间内(全部蜜源), 但还需要建立两个约束以确保新的候选解不会超出系数值的边界。令 v_{lb} 为蜜源参数的最低边界, v_{ub} 为蜜源参数最高边界, 若 $x_{im}^{t+1} < v_{lb}$, 则令 $x_{im}^{t+1} = v_{lb}$; 若 $x_{im}^{t+1} > v_{ub}$, 则令 $x_{im}^{t+1} = v_{ub}$ 。计算新蜜源的适应值后, 工蜂运用贪婪机制选择适应值更好的蜜源作为新蜜源。

(4) 观察蜂

观察蜂对它收集到的所有工蜂提供的花蜜信息进行评估, 根据花蜜量选择蜜源。蜜源花蜜量越高, 拥有的观察蜂越多。观察蜂根据花蜜量信息修改解集方案, 并运用贪婪机制进行新旧蜜源的判断与交换。

(5) 侦察蜂

若当前蜜源的花蜜量经过一定迭代次数的循环和替换后并没有增加, 则舍弃该蜜源。同时侦察蜂会寻找随机生成的新蜜源进行后续计算。经过以上 5 个步骤的计算后得到的最优解会被记录并储存。

(6) 优化终止

重复进行步骤(1)至步骤(5), 直到算法计算得到的误差值满足要求, 终止计算。计算得到各个滤波器系数的最优解, 从而完成 FRM 滤波器组的优化设计。

滤波器系数优化流程如图 2 所示。

3 仿真与实现

3.1 基于 ABC 算法优化的 FRM 滤波器仿真

对基于 ABC 算法优化的 FRM 滤波器组进行仿真。结构中原型滤波器、上支路屏蔽滤波器与下支路屏蔽滤波器的通带截止频率、阻带起始频率、阻带衰减和阶数等参数如表 1 所示, 且通带纹波均为 0.01 dB。

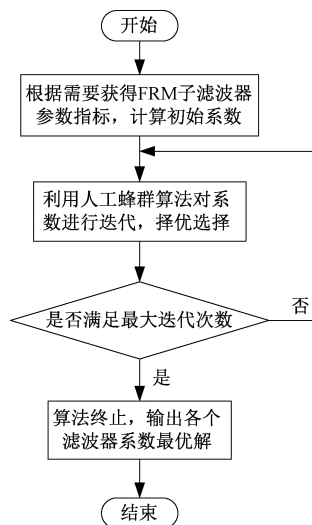


图 2 滤波器系数优化流程图

表 1 FRM 滤波器参数

滤波器	通带截止 频率/MHz	阻带起始 频率/MHz	阻带 衰减/dB	阶数
$F_a(z)$	322.56	414.72	60	64
$F_{Ma}(z)$	70.08	107.04	58	128
$F_{Mc}(z)$	49.92	72.96	45	260

当 ABC 算法迭代次数为 300 次,工蜂与侦察蜂共 100 只,蜜源取值范围为 $[-1,1]$ 时,经 ABC 算法优化及经典频率抽样法设计的 FRM 滤波器幅频特性如图 3 所示。对比可知,利用 ABC 算法对 FRM 滤波器参数进行优化,可以在阶数不变或更低的条件下,增大滤波器的阻带衰减,从而提高数字信道化性能。

设采样率为 1.92 GHz,子频带个数为 16,抽取倍数 $D = 16$ 。仿真输入信号参数如表 2 所示。

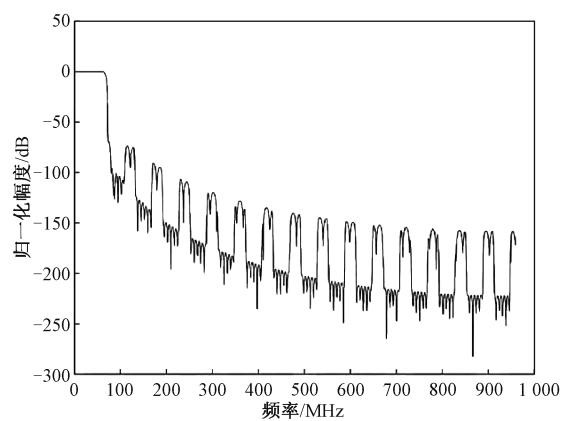
表 2 输入信号参数

输入信号 类型	中心频率/ MHz	频率范围/ MHz	信道编号
正弦	380	—	3,13
正弦	560	—	5,11
线性调频	105	75~135	1

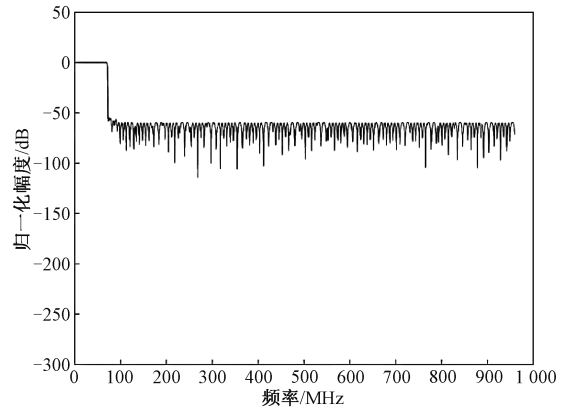
输入信号经过数字信道化结构后得到的有用信号子信道频谱如图 4 所示。

3.2 基于 ABC 算法优化的 FRM 滤波器的 FPGA 实现

System Generator 工具提供了使用 FPGA 构建、合成和验证系统的手段^[9]。利用 System



(a) ABC 算法优化



(b) 经典频率抽样法

图 3 优化后的 FRM 滤波器幅频特性

Generator 对基于 ABC 算法优化的 FRM 滤波器结构进行 FPGA 实现。首先对信号进行延时抽取,对上下支路的原型滤波器进行处理,再分别经过上下支路的屏蔽滤波器,最后经过快速傅里叶逆变换(IFFT)模块完成处理流程^[10]。

System Generator 实现 FRM 滤波器组需要搭建上下支路原型滤波器模型。上支路滤波器的优化系数由 Matlab 软件计算得到。为了在缩短计算时间的同时进一步减少硬件实现所占资源,滤波器的硬件实现采用分布式结构。各个滤波器的输出位宽统一为 16 bit,当输出不足 16 bit 时进行左移处理,以此来避免滤波器全精度输出时数据位宽不相等的情况发生。下支路原型滤波器可由输入数据经过延时与上支路原型滤波器做差得到,并在下支路添加相应延时模块,使上下支路计算群延时相等^[11]。

上下支路的屏蔽滤波器设计也是利用 Matlab 软件计算得到优化后的系数,进而对系数进行多项分解,最后导入到 System Generator 对

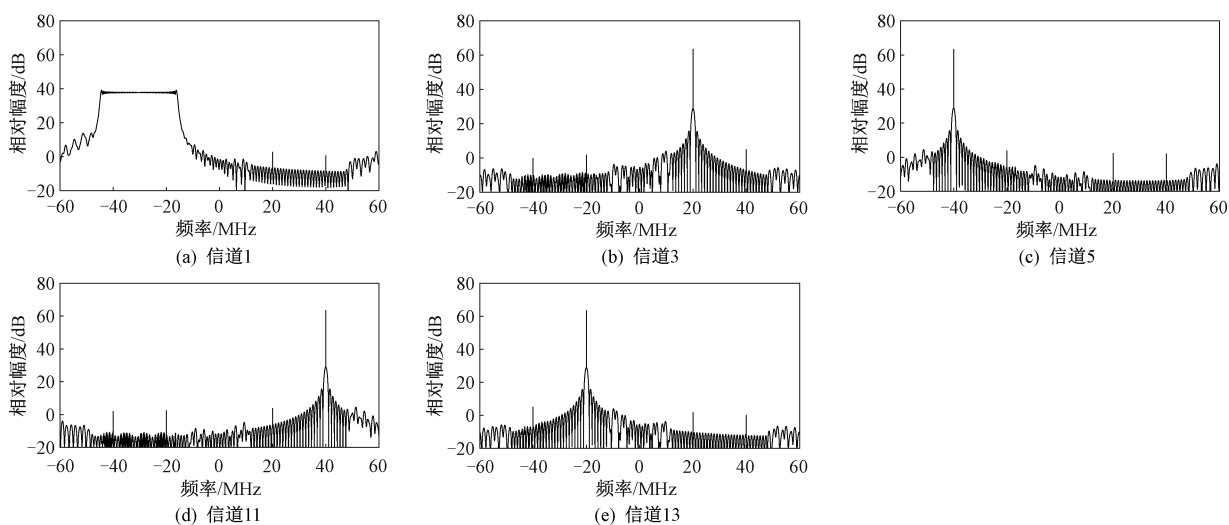


图 4 有用信号子信道输出信号幅频特性图

应的 FIR Compiler IP 核中实现。处理过程中依旧需要考虑输出结果位数对齐问题。

将上下支路屏蔽滤波器的输出结果进行相加整合,完成 FRM 滤波器输出。首先利用 Bitshare 模块与并串转换模块将滤波器输出的 16 路并行数据转换为单路串行数据,再将数据输入 IFFT 模块,最后利用串并转换模块完成单一数据对各路子信道数据的转化。

对基于 ABC 算法优化的 FRM 数字信道化结构进行 FPGA 仿真,输入的混合信号参数见表 2。对比数字信道化 Matlab 仿真结果与硬件实现结果的差异,两种方式的输入信号频谱峰值位置一致,且峰值幅度接近、幅频特性基本一致。但由于硬件仿真对输入信号进行了定点量化,因此输出数据会产生量化误差。

对基于 ABC 算法优化的 FRM 数字信道化结构与经典的未进行人工蜂群算法优化的 FRM 数字信道化结构的资源利用与时延情况进行对比,如表 3 所示。可见,基于 ABC 算法优化的 FRM 结构使用的寄存器、查找表与占用区域数量更少,电路延时更小,实现了更低的资源消耗与时延。

表 3 资源利用对比表

名称	基于 ABC 优化的 FRM	经典 FRM
寄存器	22 205	27 503
查找表	17 502	20 695
占用的区域	6 220	7 245
平均路径延时/ns	1.74	1.81

4 结 论

针对数字信道化中窄过渡带滤波器复杂度高的问题,本文提出了基于人工蜂群算法的 FRM 信道化设计方法,并进行了 Matlab 仿真和 FPGA 实现,验证了其正确性。该方法可节省寄存器的使用数量,节约了硬件资源,减小了时延。但 FRM 技术在原型滤波器的设计上具有一定的局限性。由于采用了均匀划分信道的方式,信道化接收机存在接收盲区,对于一般信号接收能力的适应性有待提高。后续可以将优化结构推广至动态非均匀信道化结构中,进一步进行资源优化。

参 考 文 献

- [1] 胡建波. 数字信道化侦察接收机的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [2] 龚仕仙, 魏玺章, 黎湘. 宽带数字信道化接收机综述[J]. 电子学报, 2013, 41(5): 949-959.
- [3] WU F Z, VILLING R. FPGA based FRM GDFT filter banks[C]// 2016 27th Irish Signals and Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 7528473.
- [4] SHARMA I, KUMAR A, SINGH G K, et al. Design of multiplierless cosine modulated filterbank using hybrid technique in sub-expression space[C]// 2016 IEEE International Conference on Digital Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 360-364.

(下转第 38 页)