

一种新型的滤波器组在水声应答器中的应用

彭会斌

(海军驻上海水声导航军代室, 上海 201108)

摘要: 针对某型水声应答器中处理信号频带变宽, 信号中叠加了多个频率分量以及实时性要求高的问题, 提出一种基于频域信道化技术的滤波器组方法。首先给出该滤波器组的理论推导, 并对滤波器组进行加窗处理, 给出了 FFT 的长度和移动重叠点数等参数对该滤波器组的影响, 最后进行了数值仿真, 并进行了湖试试验数据处理。结果证明该方法可有效解决信号的信道串漏问题, 验证了该滤波器组的正确性和可行性。该方法通过对信号信道化处理, 减小了滤波处理的运算量, 提高了数据的信噪比, 便于后续的目标检测。该滤波器组算法简单、易实现、运算量小, 在水声应答器信号处理中有一定的工程借鉴价值。

关键词: 滤波器组; 水声应答器; 信道化; 加窗

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-03-0326-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.03.019

Application of a new type of filter group in underwater acoustic transponder

PENG Hui-bin

(Office of Military Delegation at Shanghai Underwater Navigation, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to solve the problem that the bandwidth of receiving signal is widened and superimposed by more frequency components and to satisfy the higher real-time requirement for a certain type of underwater acoustic transponder, a filter group method based on channelized technique is proposed. This paper introduces the theoretical derivation process of the filter group, and then gives the proof of this method in solving the problem of data channel leakage through analyzing the filter group with weighting treatment. Next, the influences of the length of FFT and moving overlap points on the filter group are presented. Finally, the results of numerical simulation and lake trial data show that the proposed algorithm is effective and feasible. The method can weaken the requirement of the subsequent processing speed, and increase the data signal to noise ratio, which contributes to subsequent signal detection. This algorithm is easy to realize with small amount of computation.

Key words: filter banks; underwater acoustic transponder; channelization; weighting

0 引言

随着水声技术的快速发展, 应答器因其具有体积小, 操作方便, 成本低等众多优点而被广泛应用。在应答器系统中, 接收的信号形式为宽带复杂信号, 目前常见的信号检测方法是接收到的信号通过多个滤波器, 各个滤波器中心频率不同, 带宽相同, 通过滤波分析判断出信号所在的频段, 然后再作后续处理。这种做法运算量大, 对信号处理平台的运算能力要求高。因此, 寻找一种算法较简单并且实用的滤波器组设计方法十分有必要。

信道化技术的基本原理是对接收带宽范围内

的全频带信号进行分割, 即用一组性能相同的带通滤波器组将全频带划分为一系列的子频带^[1]。滤波器组对各个子频带的输出反映了信号的频率信息, 且采用滤波器组的方法能够提高每个信道内信号的信噪比, 有利于信号检测和信号特征分析。这种方法已在雷达宽带数字接收机中广泛应用^[2]。研究将这种基于频域信道化的滤波器组应用到水声应答器中具有实际意义。

1 滤波器组的理论分析与实现

某应答器系统的组成结构如图 1 所示^[3]。目标检测是该应答器的重要部件。对于应答器系统, 需要从接收到的数据中判决出信号是否存在, 如果存在, 则需要对采集到的信号进行相应的处理, 并及

收稿日期: 2012-01-02; 修回日期: 2012-05-11

作者简介: 彭会斌(1974—), 男, 河北藁城人, 工程师, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 彭会斌, E-mail: bernou@163.com

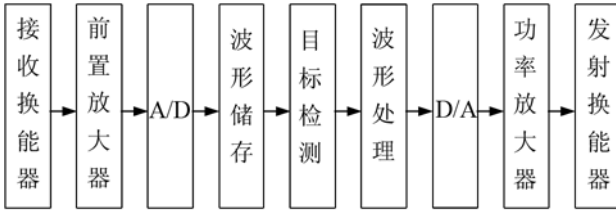


图 1 某应答器系统结构组成图
Fig.1 Block diagram of a transponder system

时做出响应。可供利用的目标信息包括信号的能量，如果接收到的信号能量超过某一门限，则可认为目标的存在；另外一个可利用信息是频谱，对于目标所发射的信号的频率范围是预先获知的，故而可以通过分析接收信号的频谱来判断目标的存在与否。

由于信号所覆盖的带宽很宽，预先无法获知具体在哪段频带中，现有的做法是用一组中心频率不同、带宽相同的滤波器将全频带划分为一系列子频带，信号依次通过多个滤波器来处理信号。这种做法运算量大，对处理器的运算速度要求很高，寻找一种运算简单并实用的算法十分有必要。基于频域信道化的滤波器组正好能够满足此需求。信道化有多种结构和不同的实现方法，但是最终都是归结于等效成多个滤波器对频段进行滤波分割。

1.1 用频域抽取实现频域信道化

一个 256 点的 FFT 可写成

$$X(k) = \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (1)$$

式中 $n=0\sim 255$ ， $k=0\sim 255$ 。FFT 输出结果可以看作是一个滤波器组，每个滤波器是中心频率为 $e^{j\frac{2\pi nk}{N}}$ 的带通相关滤波器，输入信号中位于该频段内的信号将被滤波器滤出。

假设需 32 个通道输出的滤波器组，则对 256 点的 FFT 输出结果进行 8 倍抽取，即每 8 个输出数据保留一个，这个输出结果为 $k=0, 8, 16, \dots, 248$ ，总共有 $32(256/8)$ 个输出。得到的输出结果可写成

$$\begin{aligned} X(0) &= \sum_{n=0}^{255} x(n) \\ X(8) &= \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 8n}{256}} \\ X(16) &= \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 16n}{256}} \\ &\vdots \\ X(248) &= \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 248n}{256}} \end{aligned} \quad (2)$$

任选其中的两个频率分量 $K=16$ 和 $K=248$ ，并以一种稍有不同的形式重写。结果如下：

$$\begin{aligned} X(16) &= \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 16n}{256}} = \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 2n}{32}} = \\ &[x(0)+x(32)+x(64)+\dots+x(224)]+ \\ &[x(1)+x(33)+x(65)+\dots+x(225)]e^{-j\frac{2\pi \times 2}{32}} + \\ &[x(2)+x(34)+x(66)+\dots+x(226)]e^{-j\frac{2\pi \times 2 \times 2}{32}} + \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &[x(31)+x(63)+x(95)+\dots+x(255)]e^{-j\frac{2\pi \times 2 \times 31}{32}} \\ X(248) &= \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 248n}{256}} = \sum_{n=0}^{255} x(n)e^{-j\frac{2\pi \times 31n}{32}} = \\ &[x(0)+x(32)+x(64)+\dots+x(224)]+ \\ &[x(1)+x(33)+x(65)+\dots+x(225)]e^{-j\frac{2\pi \times 31}{32}} + \\ &[x(2)+x(34)+x(66)+\dots+x(226)]e^{-j\frac{2\pi \times 31 \times 2}{32}} + \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &[x(31)+x(63)+x(95)+\dots+x(255)]e^{-j\frac{2\pi \times 31 \times 31}{32}} \\ \text{现定义一个变量 } y(n) : \\ y(n) &= x(n)+x(n+32)+x(n+64)+ \\ &\dots+x(n+224) = \sum_{m=0}^7 x(n+32m) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $n=0\sim 31$ ，每个 $y(n)$ 包含 8 个数据，将式(5)代入式(3)和式(4)，经过整理可得

$$X(8k) = \sum_{n=0}^{31} y(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{32}} \quad (6)$$

式中， $k=0\sim 31$ ， $n=0\sim 31$ 。式(6)表示一个 32 点的 FFT 是 256 点 FFT 经过 8 倍抽取后的结果。通过做 N/M 点 FFT 可实现 N 点 FFT 结果的 M 倍抽取。

图 2 给出了抽取出的 32 个滤波器中的 8 个的频率响应图。每个滤波器的输出用一个辛格函数来表示，最高的旁瓣只比主瓣低 13 dB。信道间的隔离度差，不利于信号的检测。

实际应用中，信道划分的多少并不是关键问题，往往是每个信道的滤波器形状更为重要，信道间的隔离度高也有利于信号的检测^[4]。

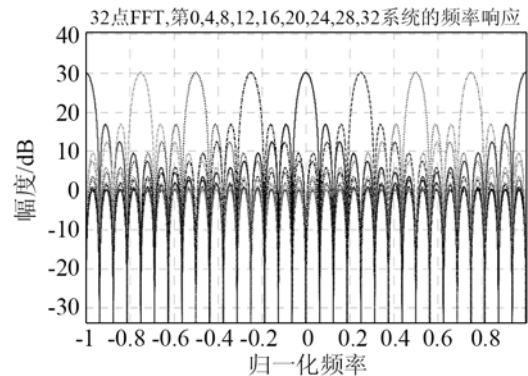


图 2 抽取出的 8 个滤波器的频率响应图
Fig.2 The frequency response diagram of extracted eight filters

1.2 滤波器组通道间信号泄漏的抑制方法

为了在展宽单个滤波器频带的同时并压缩旁瓣，可对输入数据进行加窗处理。本文使用的是汉明窗。它的特性是旁瓣比主瓣低 41 dB。过渡带宽为 $0.8\pi/N$ 。未加窗处理的数据相当于是对数据加矩形窗处理，矩形窗的旁瓣比主瓣低 13 dB，过渡带宽为 $0.4\pi/N$ 。加窗处理后式(5)改写成如下形式

$$y(n) = \sum_{m=0}^7 x(n+32m)h(n+32m) \quad (7)$$

图 3 给出了经过加窗处理后抽取的 8 个滤波器的频率响应。与图 2 对比可以看出，带宽展宽，并且旁瓣也降低了，解决了频域泄漏的问题。

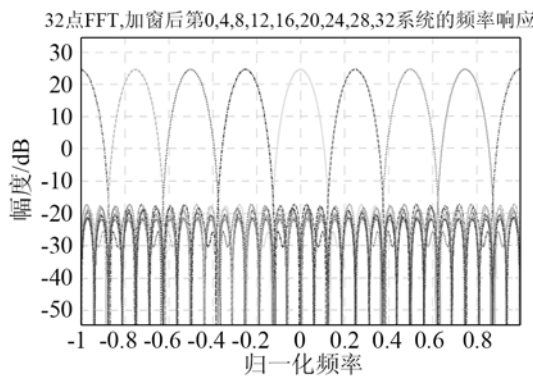


图 3 抽取出的 8 个滤波器加窗后的频率响应图

Fig.3 The frequency response diagram of extracted eight filter with weighting

1.3 滤波器组的具体实现

图 4 给出了 $N=32$ 滤波器组的实现方法。输入信号 $x(n)$ 共有 256 个数据， $h_i(n)$ 为汉明窗函数。 $y(n)$ 整理为公式(7)的形式。 $X_i(n)$ 是信号经过滤波器组的输出结果^[5]。

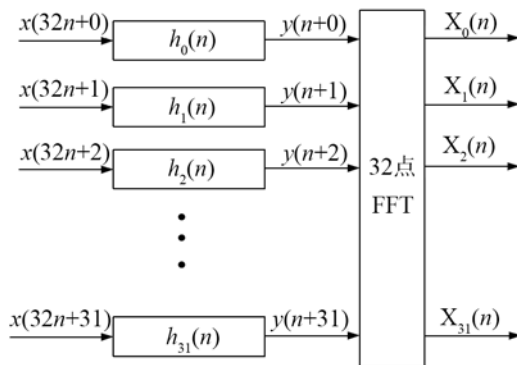


图 4 滤波器组的实现框图

Fig.4 Block diagram of the filter group

2 仿真验证

该滤波器组有两个重要的参数：FFT 的长度和移动点数，分别对应最小脉宽和时间分辨率。下面

介绍如何确定各个参数。

假设采样率为 $F_s=250$ kHz，信号频率范围 25~56 kHz，根据降采样要求，须满足 $F_s/M \geq 2 \times F_{max}$ ，因而降采样 $M \leq 2.23$ ，选取 $M=2$ 。若要求各滤波器间的带宽间隔为 2.5kHz，先将数据重采样， F_s 变成 320 kHz。FFT 决定了滤波器中心频点的间隔， $320/2.5=128$ 点，因此每次运算的 FFT 时间长度 $N=128 \times M=256$ 点。

FFT 的移动点数 nm 影响滤波器输出的时间分辨率为 nm/F_s ，由于信号的最大周期是 17.8us，根据 Nyquist 采样定理，移动点数 nm 最大为 2，对应的时间分辨率 $nm/F_s=6.25$ us。

仿真中，信号由一个中心频率为 30kHz，带宽为 1 kHz 的线性调频信号和两个频率分别为 40 kHz 和 42.5kHz 的单频组成的，信噪比为 10dB。采样率为 250kHz。通过变采样处理，得采样率为 320kHz 的信号。图 5 给出了该信号的时域图和频谱图。将该信号通过本文设计的滤波器组，其参数为：FFT 长度 $N=256$ ，抽取数 $M=2$ 。FFT 的移动点数 $nm=2$ 。

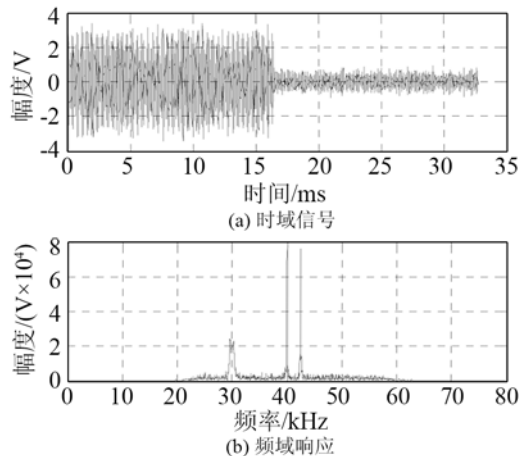


图 5 输入信号的时域图以及频谱图

Fig.5 The time waveform and frequency spectrum of input signal

信号经过未加窗的滤波器组后的输出信号如图 6 所示。从图中可以清晰地看出信号出现在 30 kHz、40 kHz 和 42.5 kHz 这三个通道中。27.5 kHz 和 37.5kHz 通道中有串漏。主要原因是频响中旁瓣过高，约为 -13 dB。图 7 给出了信号经过加窗处理后的滤波器组的输出信号结果。本文使用的是 $N=32$ 的汉明窗。从图中可看出，对滤波器系数加窗可改善滤波器的频率响应，有效解决了频率串漏的问题。

3 湖试数据验证

图 8 中给出了应答器采集的某次湖试试验数据。该信号是由 30kHz、32.5kHz、52.5kHz、55kHz

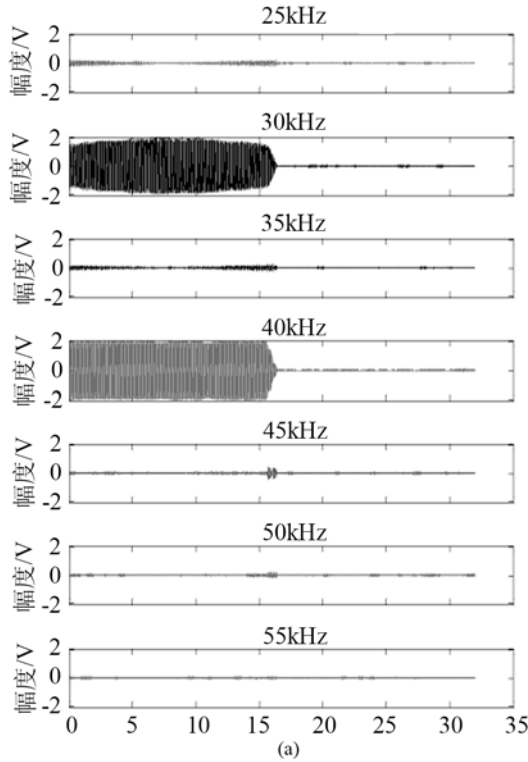


图 6 未加窗处理的滤波器组的输出信号时域图

Fig.6 The output signal of the filter group without weighting

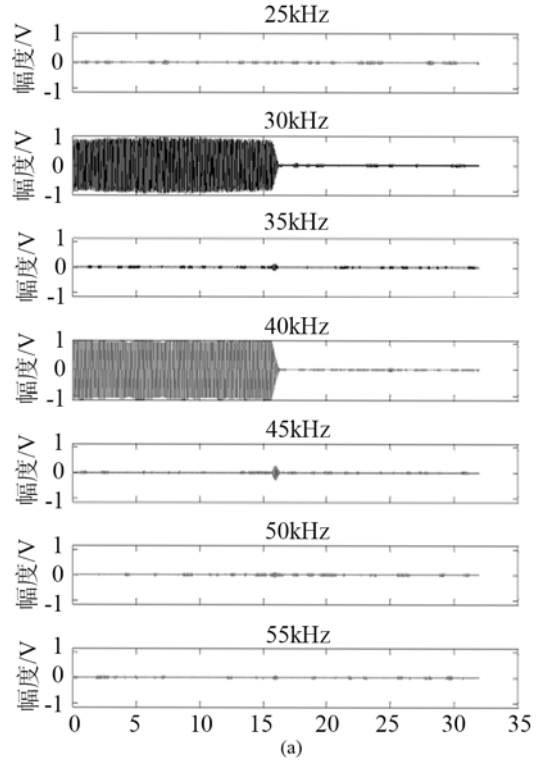


图 7 加窗处理的滤波器组的输出信号时域图

Fig.7 The output signal of the filter group with weighting

4 个频率混合叠加的。将该信号通过本文设计的滤波器组，结果如图 9 所示。由图可见，400~530ms、730~870ms 处是由 30kHz 和 32.5kHz 的信号叠加组成的。而 540~680 ms、870~1000 ms 处信号是由 52.5kHz 和 55kHz 的信号组成的。由此可以看出，该滤波器可以准确地滤出信号。

4 结论

针对某水声应答器对信号滤波处理的需求，介绍了一种基于频域信道化技术的滤波器组，通过对滤波器组进行加窗处理，解决接收的信道模糊问题。

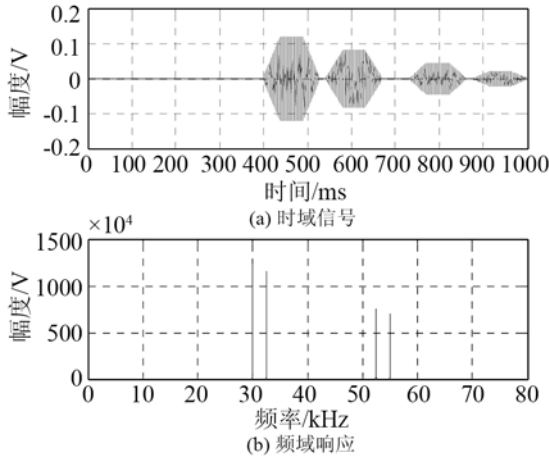


图 8 输入信号的时域图以及频谱图
Fig.8 The time domain and frequency spectrum diagram of input signal

另外分析了抽取数、FFT 长度和 FFT 的移动点数等参数对该滤波器组的影响。最后通过数值仿真以及对湖试试验数据进行处理，验证了该滤波器组结构的有效性和可行性。该频域信道化技术的滤波器组算法简单、易实现、运算量小，为水声应答器提供了一种新的滤波处理的解决方法，有一定的工程借鉴价值。

参 考 文 献

[1] 陈涛, 岳玮, 刘颜琼. 宽带数字信道化接收机部分信道重构技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(12): 1610-1616.
CHEN Tao, YUE Wei, LIU Yanqiong. Research on partial channel reconstruction technology based on a wide-band digital channelized receiver[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(12): 1610-1616.

[2] 朱志宇, 王颖. 基于 FPGA 的信道化数字接收机的研究与仿真[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(35): 8745-8748.
ZHU Zhiyu, WANG Ying. Research on Digitized Channelized Receiver and Its Simulation Based on FPGA[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(35): 8745-8748.

[3] 蒋均齐. 鱼雷声靶技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学. 2006. 4.
JIANG Junqi. Research on the Technology of Torpedo Sonar Target[D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2006. 4.

[4] James Tsui. Digital Techniques for Wideband Receiver[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 242-260.

[5] 罗进川, 朱然刚, 邓武振. 基于宽带阵列的数字信道化接收机设计与实现[J]. 电子测试, 2012, 2(2): 78-82.
LUO Jinchuan, ZHU Rangang, DNEG Wuzhen. Practice of channelized digital receiver design based on wide-band array[J]. Electronic Test, 2012, 2(2): 78-82.

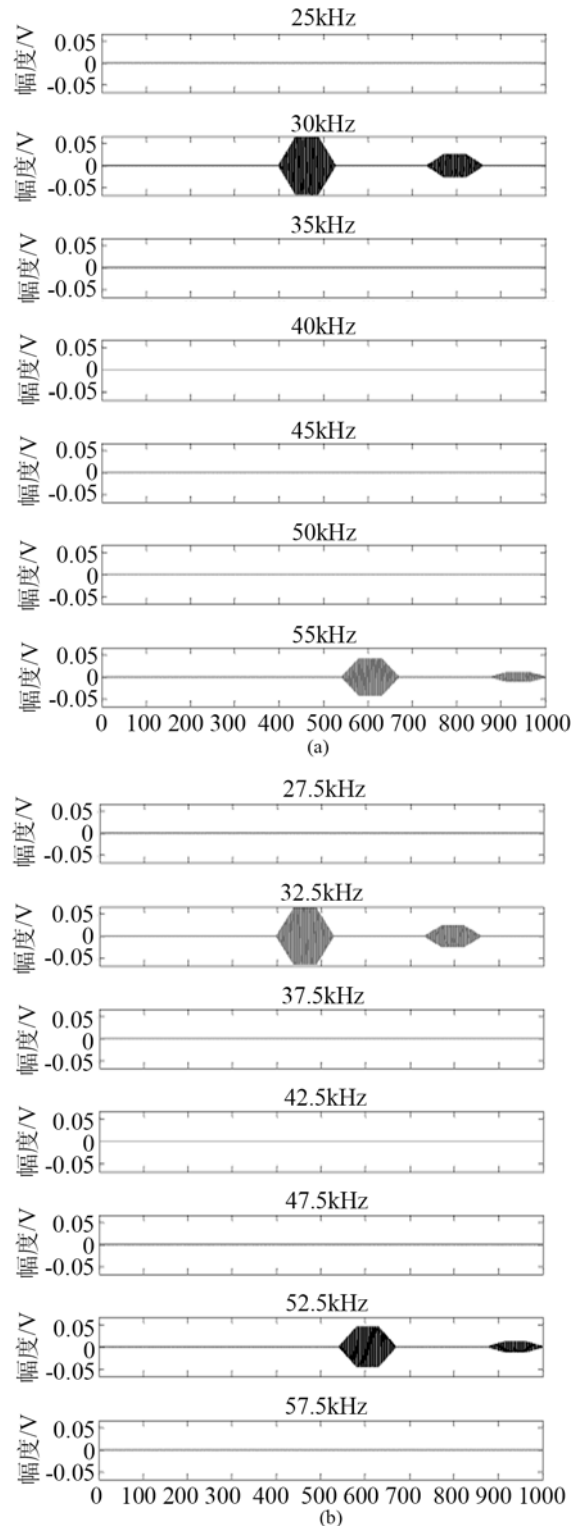


图 9 加窗处理的滤波器组的输出信号时域图
Fig.9 The output signal of the filter group with weighing