

# 超波束处理方法的快速实现及试验验证

王永丰<sup>1</sup>, 王昭辉<sup>2</sup>

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 康涅狄格大学电子与计算机工程系, 美国康涅狄格州 06269)

**摘要:** 提出了超波束处理方法在主动声纳中的快速实现方法。通过对阵元信号进行下变频降采样, 并采用阵元信号先匹配滤波再波束形成的步骤, 降低了信号处理的计算复杂度, 使超波束处理方法易于在实时信号处理系统上实现。使用湖试数据处理结果验证了实现方法的正确性, 并对超波束处理方法的性能进行了比较。

**关键词:** 超波束; 波束形成; 匹配滤波

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0522-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.015

## Fast implementation of hyper beam method and its performance evaluation

WANG Yong-feng<sup>1</sup>, WANG Zhao-hui<sup>2</sup>

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Electrical & Computer Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA)

**Abstract:** A fast implementation of the hyper-beamforming method is proposed. Rather than performing the hyper-beamforming with the received signal directly, we first downshift the received signal from passband to sideband, and pass the sideband signal through a matched filter operating at a lower sampling rate. The hyper-beams are then formed by using the matched filter output. Compared with traditional implementation of the hyper-beamforming method, the proposed method enjoys less computational complexity, hence the easiness to implement in the real systems. Extensive lake-trial results are presented to validate the performance of the proposed method.

**Key words:** hyper-beam; beamforming; matched filter

## 0 引言

对于声纳接收机来说, 通常期望波束主瓣更窄、旁瓣更低, 以提供更好的信号检测能力和更精确的参数估计性能。这可以通过增大阵列孔径来实现, 但在实际中, 阵列的物理尺寸一般会受到限制, 因此希望通过改善信号处理方法取得比常规波束形成更窄的主瓣和更低的旁瓣。经典的半波束(又称分裂波束, split beam)处理方法即属于此<sup>[1]</sup>, 通过利用一对共向半波束进行相位比较, 半波束处理可获得比全波束处理更高的空间分辨率。超波束(hyper beam)处理方法<sup>[2]</sup>在半波束处理方法的基础上, 通过增加左右半波束的和波束与差波束的非线性求和步骤, 使性能进一步提升<sup>[3,4]</sup>。

由于超波束处理中采用了非线性求和操作, 其输出不能直接进行传统的匹配滤波处理, 限制了其

在主动声纳中的应用。对此, 文献[5]提出了一种修正的方法, 在非线性求和之前对和差波束分别进行 Hilbert 变换和匹配相关处理。该方法解决了超波束处理与匹配滤波共用的问题, 但实现起来较复杂。

本文综合考虑主动声纳接收机波束形成和匹配滤波处理的实现, 提出了一种快速的实现方法。与文献[5]相比较, 调整了信号处理次序, 在阵元域进行匹配滤波, 省去了对超波束输出信号进行修正的计算; 并通过下变频处理降低信号采样率, 进一步减小了计算量。最后, 利用湖试数据对该方法进行了性能验证。

## 1 超波束

超波束处理的步骤如图 1 所示。接收阵列被分为左、右两个子阵, 对同一个波达方向以常规波束形成方法生成共向半波束对, 然后按式(1)对其求和与求差, 并进行非线性求和操作。

$$s_{\text{Hyper}}(t) = [(|s_L(t)| + |s_R(t)|)^n - |s_L(t) - s_R(t)|^n]^{1/n} \quad (1)$$

式中  $n$  为设计参数, 用以调整输出波束主瓣宽度和旁瓣高度, 通常取  $n \in [0.3, 1]$ 。

收稿日期: 2011-09-28; 修回日期: 2011-11-01

作者简介: 王永丰(1978-), 男, 甘肃民勤人, 博士后, 研究方向为信号处理。

通讯作者: 王永丰, E-mail: wyf@mail.ioa.ac.cn

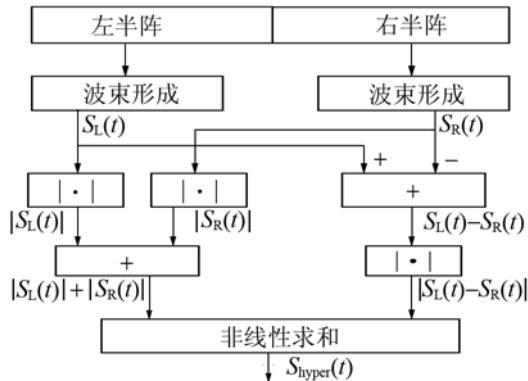


图 1 超波束处理方法示意图

Fig.1 Block diagram of hyper-beam processing method

## 2 快速实现

### 2.1 处理次序

在传统声纳系统中, 通常先进行波束形成再进行匹配滤波处理, 这有两个原因, 一是为了与被动检测部分兼容(对于主被动两用声纳), 二是由于波束数通常小于阵元数, 在波束域进行匹配滤波处理具有更高的计算效率。事实上, 匹配滤波器可看作是有限冲激响应(FIR)滤波器的一个特例, 滤波操作并不影响阵元信号之间的相对相位关系。因此, 可以交换两种处理的次序, 在阵元域对信号进行匹配滤波, 然后再做波束形成。这样即可避开超波束处理输出非线性的问题, 而且由于超波束束宽窄, 波束数大于阵元数, 改变处理次序后计算效率更高。

先波束形成后匹配滤波的处理步骤可表示为

$$y(t) = \left[ \sum_{m=1}^{m=M} r_m(t) * \delta(t - \tau_m) \right] * x(T-t) \quad (2)$$

其中:  $r_m(t)$  为阵元  $m$  的接收信号,  $\tau_m$  为阵元  $m$  所对应的延时补偿,  $x(t)$  为主动声纳探测波形复本,  $y(t)$  为单个波束输出。应用卷积交换律, 处理步骤变为

$$y(t) = \sum_{m=1}^{m=M} [r_m(t) * x(T-t)] * \delta(t - \tau_m) \quad (3)$$

### 2.2 下变频

直接对阵元信号进行匹配滤波, 滤波器抽头数为脉宽与阵元信号的采样频率的乘积, 所需的存储和运算量较大, 不利于实时实现。因此, 在匹配滤波之前对信号进行下变频和降采样处理, 以减小匹配滤波的计算复杂度。下变频操作对所有阵元通道进行了相同的移相, 其相对相位关系没有改变, 因此不影响后续波束形成处理。设探测波形带宽为  $B$ , 原始中心频率为  $F_c$ , 则下变频本振频率设为  $F_{shift} = F_c - B/2$ , 在实际中  $F_{shift}$  要减去一个保护频带,

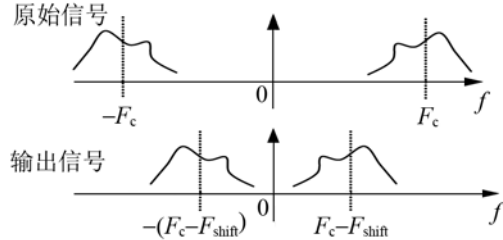
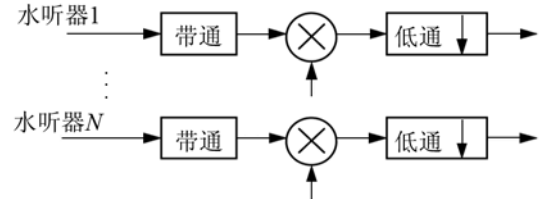


图 2 下变频处理示意图

Fig.2 Frequency downshifting

以留出多普勒容限和避免直流分量影响。经下变频处理后, 信号的采样率可降至接近  $2B$ , 减小了匹配滤波和波束形成处理的复杂度。下变频处理与信号频谱变化如图 2 所示。

另一种选择是采用正交载波对信号进行解调, 好处是可以得到单边的复信号, 使采样率可降至接近  $B$ 。但从实现角度考虑, 利用实信号在频域的共轭对称性, 在处理时可以只计算单边频率, 两者所需的计算量相同, 而单载波方法不需要生成正交载波, 整体上更简单。

### 2.3 频域实现

在时域计算式(3)需要很高的采样率才能达到离散化延时  $\tau_m$  所需的精度, 效率很低。经下变频处理后, 信号采样率降至接近  $2B$ , 在频域实现式(3)更为合理, 即有

$$Y'(k) = \sum_{m=1}^{m=M} [R'_m(k) \cdot X'^*(k)] \cdot e^{-j2\pi(f_k + F_{shift})\tau_m} \quad (4)$$

式中:  $Y'(k)$ 、 $R'(k)$ 、 $X'(k)$  为频域信号, 分别表示波束处理输出、接收阵元信号下变频输出, 以及探测波形复本的下变频输出。根据式(4)分别计算半波束  $s_L(t)$  与  $s_R(t)$ , 然后在时域计算式(1), 即得到最终检测输出。

计算式(4)时需要特别注意两点, 一是各通道之间的相位差要根据原始频率计算, 而非下变频之后的信号频率; 二是实际实现时必须分帧计算, 在进行数据重叠保留或相加时要同时处理滤波和相移部分所对应的点数。

## 3 试验验证

### 3.1 试验条件

试验在新安江水域进行, 所用接收阵为 85 阵

元的水平圆弧阵，使用其中 42 个阵元形成单个波束，波束宽度为 2.3°；发射阵为 24 阵元垂直平板阵，发射波束垂直开角为 5°。试验水域水深约 70m，基阵吊放于水下 25m 处，接收阵在上，发射阵在下。试验目标为  $TS=-6\text{dB}$  的仿真锚雷，距离约 850m，深度约 10 m。探测波形为脉宽 16 ms 的双曲调频 (HFM)信号，中心频率为 30kHz，带宽为 4kHz。发射声源级  $SL=216\text{dB}$ 。

### 3.2 信号处理参数

水听器信号原始采样率为 192 kHz，下变频器差频为 27.5kHz，降采样倍数为 12，低通抽取滤波器阶数为 128，二次采样频率为 16 kHz。频域处理 FFT 点数为 1024。在 $\pm 45^\circ$  探测范围内共形成 215 个超波束，相当于在阵元间隔对应的 43 个常规波束内进行了 5 倍插值，超波束处理参数  $n=0.5$ 。

### 3.3 回波输出比较

图 3 所示为同一脉冲两种不同处理方法所得到的声纳图像。由图 3 可以看出，与常规波束形成处理相比，超波束处理输出图像更为锐利，水中山体的轮廓更加清晰。

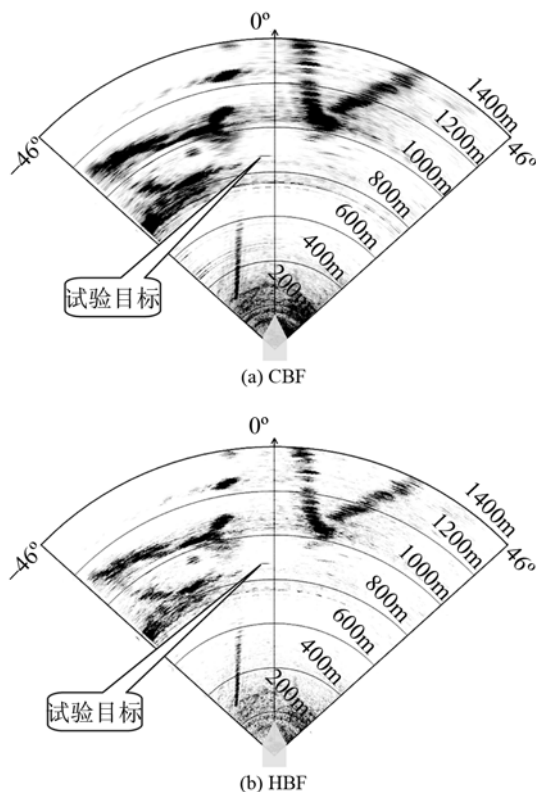


图 3 声纳回波图像比较  
Fig.3 Comparison of sonar images

为了更直观地看出两种处理方法的差异，图 4 给出了图 3 数据的目标所在波束的回波幅度显示。由图可见超波束输出的背景更低。

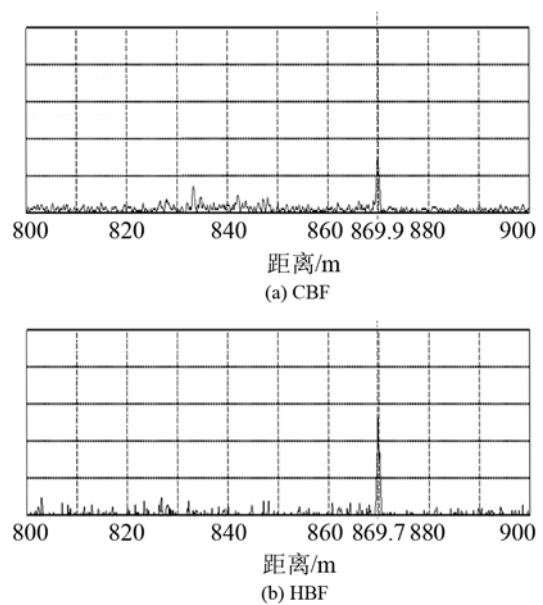


图 4 单波束回波幅度显示  
Fig.4 Echo amplitude display of a single beam

### 3.4 检测指数统计

图 5 给出了试验中连续 20 次脉冲处理所得到的检测指数<sup>[1]</sup>，从图 5 可见，超波束处理后的检测指数平均比常规波束处理方法高约 3 dB。

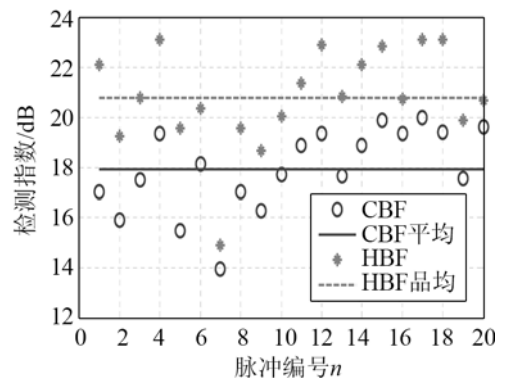


图 5 检测指数比较  
Fig.5 Comparison of detection index

### 3.4 计算量比较分析

首先，原方法对和差波束进行匹配滤波，而新方法通过调整匹配滤波和波束形成的次序，在阵元域进行匹配滤波，减少了处理的通道数目。

其次，本文方法通过下变频，降低了信号处理系统的采样率，从而进一步减小了计算量。虽然变频步骤引入了额外开销，但与降采样获得的好处相比可以忽略。

以试验系统的信号处理参数为例，假设都采用频域处理算法，仅考虑波束形成和匹配滤波步骤，忽略降采样等辅助性操作，本文方法与文献[5]中方法所需的计算复杂度如表 1 所示。

表 1 两种处理方法计算复杂度比较  
Table 1 Comparison of computational complexity

项目	原方法	本文方法
时域乘法运算/s	0	$85 \times 192K$
时域乘加运算/s	0	$85 \times 127 \times 12K$
FFT 运算/s	$8192 \times 430 \times 62.5$	$1024 \times 85 \times 62.5$
频域乘加运算/s	$42 \times 430 \times 4096 \times 62.5$	$42 \times 430 \times 512 \times 62.5$
IFFT 运算/s	$8192 \times 430 \times 62.5$	$1024 \times 430 \times 62.5$

## 4 结论

湖试数据处理结果证明本文实现方法的正确性,同时也说明超波束处理方法能够提高声纳的空间分辨率,从而降低背景,改善声纳图像质量和检测性能。

## 参 考 文 献

- [1] Waite A D. Sonar for Practising Engineers Third Edition[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd. 2002, 169-176.
- [2] Schlieter H, Eigenbrod H. Method for the formation of radiated beams in direction finder systems[P]. US Patent Number: 6,021,096. Feb 1, 2000.
- [3] Schlieter H. Passive sonar detection improvement by hyper beam technique[C]// UDT, Europe 2006, Hamburg, Germany, 2006: 7A. 2.
- [4] 聂良春. 超波束(HBF)用于波束锐化[J]. 声学技术, 2008; 27(6): 892-895.  
NIE Liangchun. Hyper beamforming (HBF) technique for beam narrowing [J]. Technical Acoustics, 2008, 27(6): 892-895.
- [5] 王昭辉, 刘云涛, 蔡惠智. 基于修正超波束技术的精确定向算法探讨[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 651-654.  
WANG Zhaohui, LIU Yongtao, CAI Huizhi. Research on the algorithms of accurate bearing estimation based on modified hyper beam technique[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 651-654.

## K&F 专业音响新技术交流会在上海召开

为了促进电声技术的学术交流,推介专业音响的最新技术成就,上海市声学学会电声专业委员会与中美亚科技有限公司,于 2012 年 9 月 13 日(星期四),在上海淀山湖红顶度假村学术报告厅,联合举办 K&F 专业音响新技术交流会。会议由中美亚科技有限公司技术总监郎军等先生主讲,着重介绍德国先进 Kling&Freitag(简称 K&F)扬声器系统与英国著名 CADAC 调音台的最新技术,深入地剖析了欧洲最大水上舞台——奥地利布雷根茨水上舞台的 BOA(布雷根茨开放式声学)音响系统的新颖设计理念,以及中美亚科技公司在新建的哈尔滨大剧院采用 K&F 专业音响和 Dante 网络及双冗余系统技术的设计思想。

上海市声学学会秘书长龚农斌教授和中美亚科技有限公司陈众执行董事亲临会场并先后热烈致辞。参加这次会议主要是上海市声学学会的会员、专家和教授,共有 30 多人。会上专家们进行了热烈的学术讨论,会后还组织专家进行了 K&F 线阵列音响系统的主观试听,普遍认为音质优美,效果良好。对这次会议内容,与会者表示一致好评。

同济大学声学研究所 梁华