

基于 Notch 窄带波束形成的俯仰角估计仿真

黄鹏¹, 梅新华²

(1. 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;

2. 中国船舶重工集团有限公司鹏力(南京)大气海洋信息系统有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要 波束形成最重要的目的是定向, 线列阵的波束形成技术在水声领域中作为接收和检测信号的基本方法已被广泛运用。由于方位估计需要大孔径基阵, 而在水中兵器中, 为解决小平台目标俯仰角估计问题, 提出一种基于线列阵的 Notch 窄带波束形成方法。主要介绍了基于线列阵的 Notch 窄带波束形成的结构、概念和实现方法, 以及基于实测数据条件下的目标俯仰角估计仿真。

关键词 线列阵; 波束形成; Notch

中图分类号 TJ430.1

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2020)02-0171-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.02.014

Estimation Resolution Simulation of Pitch Angle Based on Notch Narrow-band Beam Forming

HUANG Peng¹, MEI Xinhua²

(1. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China;

2. CSIC PRIDE (Nanjing) Atmospheric and Oceanic Information System Co., Ltd, Nanjing 210000, China)

Abstract As the most important purpose of beam forming is orientation, beam forming technology for linear array has been widely used as basic method to receive and detect signals in underwater acoustic field. Azimuth estimation requires large aperture array, on this account, a novel narrow-band beam forming method based on linear array is proposed. This paper introduces the construction, concept and implementation of Notch narrow-band beam forming based on linear array and estimation resolution simulation of pitch angle based on the measured data.

Key words linear array; beam forming; Notch

0 引言

目前, 目标俯仰角估计多采用水下传感器阵列多波束形成或高分辨方位估计技术^[1], 需要大孔径基阵或者复杂矩阵运算。在小尺度平台, 如水中兵器或水下无人飞行器上实现有困难^[2]。Notch 滤波器具有频率跟踪、相位估计的特性和自身调节参数的能力, 并且窄带波束能对特定频段进行捕捉^[3]。因此, Notch 窄带波束形成比普通的波束形成方法

具备更好的噪声或者干扰抑制的能力^[4]。本文主要介绍基于应用于水下小平台的六元线列阵的 Notch 窄带波束形成的概念、结构和实现方法, 以及在实测数据的仿真条件下与常规波束形成在目标俯仰角估计精度上的差异。

1 Notch 滤波窄带波束形成概念

自适应 Notch 滤波器波束形成是先对输入信号进行自适应 Notch 滤波, 获得正弦、余弦 2 个权

值,然后通过这2个权值分别乘以与滤波器参考信号频率相同的正弦和余弦信号,重构出“干净”的输入信号^[5]。重构时的正弦和余弦信号可设定任意幅度与相位,非常方便地对声压振速各通道的灵敏度与相位进行补偿^[6]。自适应 Notch 滤波器波束形成的优点是不需要 90°相移的窄带滤波器,以不高的采样频率对输入信号实现任意相移或时延,同时实现带宽极窄的窄带滤波,且运算量较小^[7]。

自适应 Notch 滤波器的传输函数示意图如图 1 所示^[8]。

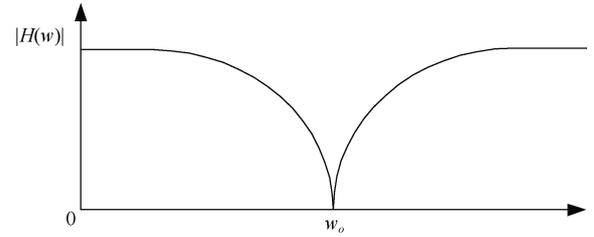


图 1 自适应 Notch 滤波器的传输函数示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the transfer function of adaptive Notch filter

图 2 是基于 Notch 滤波器波束形成方法的框图^[9]。

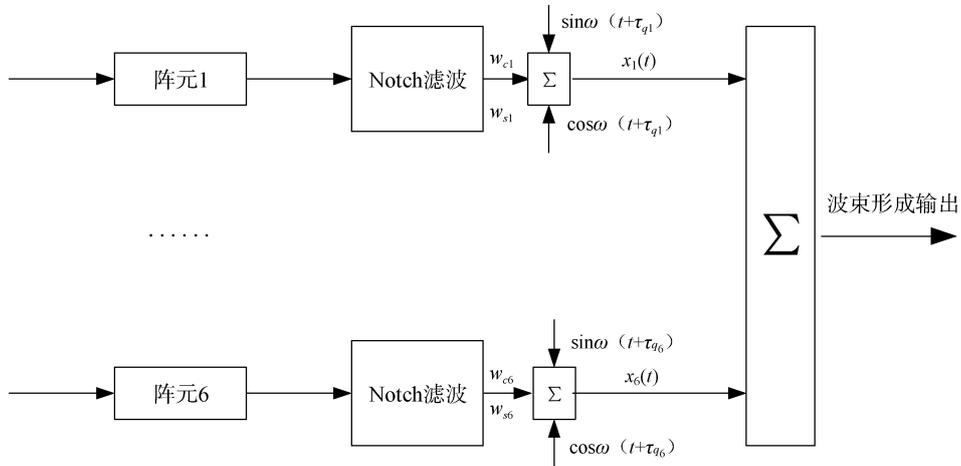


图 2 基于 Notch 滤波器的波束形成方法
Fig. 2 Beam forming method based on Notch filter

本文以六元直线阵为例,先将原始输入信号进行低通滤波,再进行带通滤波,最后通过与参考信号的加权迭代后得到最终输入信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$... $x_6(t)$ 。

Notch 自适应的迭代算法如下。

1) 对权向量赋初值。

$$\mathbf{w}_i = [\mathbf{w}_{ci}, \mathbf{w}_{si}]^T = [0, 0]^T, i = 1 \sim 6$$

2) 两路正交的参考输入信号与权向量相乘,得到输出信号。

$$y_i(t) = \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_{ri}(t)$$

式中: $\mathbf{x}_{ri}(t) = [\mathbf{x}_{ci}(t), \mathbf{x}_{si}(t)]^T, i = 1 \sim 6$ 是 6 路不同频率的参考信号。

$$\mathbf{x}_{ci}(t) = \cos(2\pi f_0 t)$$

$$\mathbf{x}_{si}(t) = \sin(2\pi f_0 t)$$

3) 求输入信号与输出信号的差值。

$$e_i(t) = x_i(t) - y_i(t)$$

4) 更新权向量。

$$\mathbf{w}_{ci} = \mathbf{w}_{ci} + 2\mu e_i(t) \mathbf{x}_c(t)$$

$$\mathbf{w}_{si} = \mathbf{w}_{si} + 2\mu e_i(t) \mathbf{x}_s(t)$$

如此可以得到每个采样点信号的权值。

算法的步长 μ 是一个比较关键的参量,对于仅有 2 个权的窄带 Notch 滤波器而言,可以取得稍大一些^[10]。最后可以得到 Notch 自适应滤波后的重构输入信号:

$$\mathbf{x}q_i = \mathbf{w}_{ci} * \cos(2\pi f_0(t + \tau_i)) + \mathbf{w}_{si} * \sin(2\pi f_0(t + \tau_i))$$

式中: τ_i 为输入信号的时延; i 为第 i 路信号,本文中试验数据共 6 路^[11]。

将 Notch 滤波后的输出信号相加求和平方并归一化后得到其波束形成^[12]:

$$XQ = \int_t \left(\sum_{i=1}^6 xq_i \right)^2 dt$$

$$YQ = XQ / XQ_{\max}$$

2 测试信号窄带波束形成目标俯仰角估计精度

假设入射信号为 $\sin(2\pi f_0 t)$, 无噪声。

仿真时取中心频率 $f_0=c/2d$ 、阵元间距 $d=0.9745\text{ m}$ 、声速 $c=1500\text{ m/c}$ 、阵元数为 6。

利用 Notch 滤波求权迭代的方法, 得到不同方向 (线阵正前方为 0° 方向) 目标俯仰角估计精度如图 3-7 所示。

仰角估计精度高, 而在大角度情况下目标俯仰角估计精度会变低, 符合常规俯仰角估计精度变化规律。

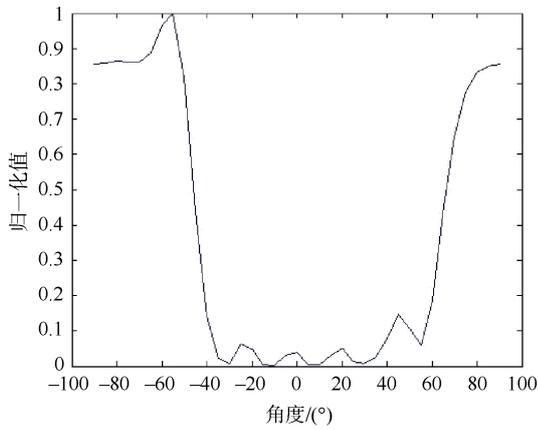


图 3 -60° 方向的目标俯仰角估计精度

Fig. 3 Estimation accuracy of the pitch angle in -60°

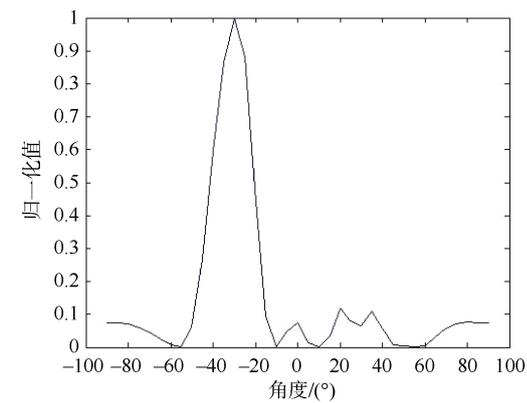


图 4 -30° 方向的目标俯仰角估计精度

Fig. 4 Estimation accuracy of the pitch angle in -30°

由图 3-7 可以看出, 在小角度情况下目标俯

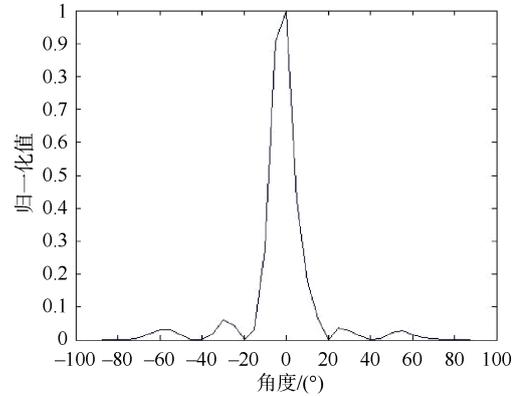


图 5 0° 方向的目标俯仰角估计精度

Fig. 5 Estimation accuracy of the pitch angle in 0°

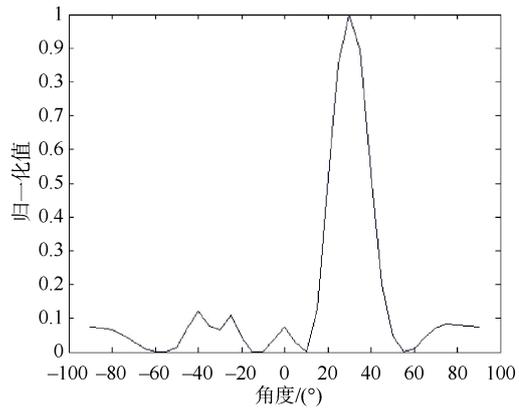


图 6 30° 方向的目标俯仰角估计精度

Fig. 6 Estimation accuracy of the pitch angle in 30°

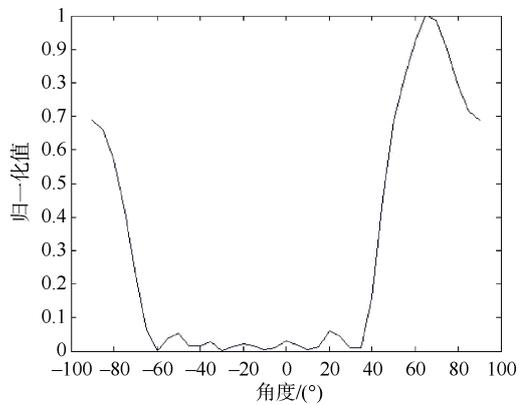


图 7 60° 方向的目标俯仰角估计精度

Fig. 7 Estimation accuracy of the pitch angle in 60°

3 实测数据仿真分析

下面就相同实测数据，采用延时求和的常规波束形成与 Notch 窄带波束形成两种算法，进行目标俯仰角估计精度仿真分析，以探讨这两种算法的优劣。

实测数据仿真条件：

阵元距 $d=0.9745\text{ m}$ ；

声速 $c=1500\text{ m/s}$ ；

阵元数 $N=6$ ；

采样频率 $f_s=50\text{ kHz}$ ；

中心频率 $f_0 = \frac{c}{\lambda} = c/2d \approx 770\text{ Hz}$ ；

带宽 $500\sim 5000\text{ Hz}$ ；

降采样频率 $FS=5\text{ kHz}$ ；

信号入射角度 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 。

3.1 航速 8.35 m/s 实测数据的仿真情况

采用延时求和和常规波束形成方法进行仿真的结果如图 8 所示。由图 8 可以看出目标正横方向上的俯仰角约为 53° 。目标从远处到正横方向历时约为 340 s ，故正横方向上的探测距离为 $340\text{ s}\times 8.35\text{ m/s}=2839\text{ m}$ 。

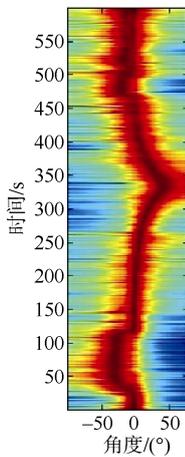


图 8 航速 8.35 m/s 常规波束形成目标俯仰角估计云图
Fig. 8 Nephogram of estimation accuracy of the pitch angle based on conventional beam forming at 8.35m/s

图 9 为航速约 8.35 m/s 的 Notch 窄带滤波算法仿真结果，由图 9 可以看出目标正横方向上的俯仰角约为 50° 。目标从远处到正横方向历时约为 340 s ，正横方向上的探测距离为 $340\text{ s}\times 8.35\text{ m/s}=2839\text{ m}$ 。其中带宽分别为 $300\sim 1200\text{ Hz}$ 、 $500\sim 1000\text{ Hz}$ 、 $600\sim$

900 Hz 、 $700\sim 800\text{ Hz}$ 。图 9 中，在 $450\sim 500\text{ s}$ 之间俯仰角的变化有断层，分析可能是受到外界的干扰所致。

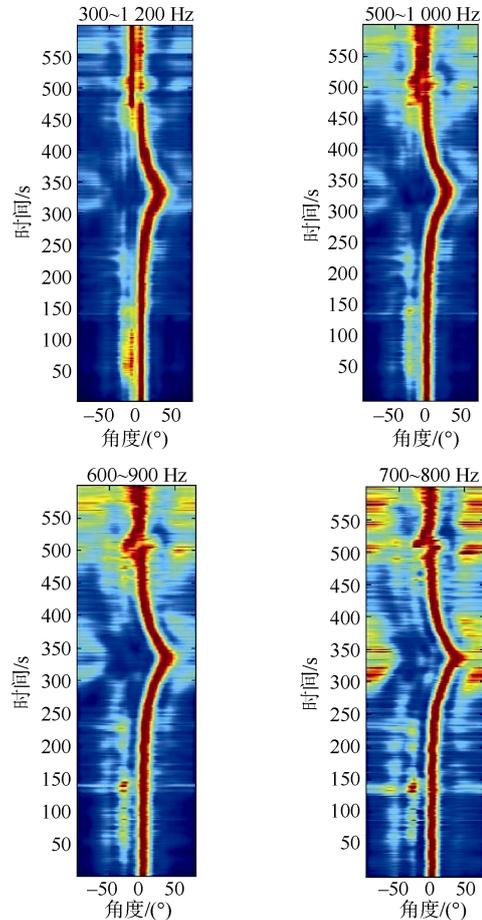


图 9 航速 8.35 m/s 不同带宽下窄带波束形成目标俯仰角估计云图

Fig. 9 Nephogram of estimation accuracy of the pitch angle based on different narrow-band beam forming at 8.35 m/s

3.2 航速 11.3 m/s 实测数据的仿真情况

图 10 为航速约 11.3 m/s 的宽带延时求和仿真结果，由图 10 可以看出目标正横方向上的俯仰角约为 42° 。目标从远处到正横方向的时长约为 340 s ，正横方向上的探测距离为 $340\text{ s}\times 11.3\text{ m/s}=3842\text{ m}$ 。

图 11 为航速约 11.3 m/s 的 Notch 窄带滤波算法仿真结果，从图 11 可以看出目标正横方向上的俯仰角约为 40° 。目标从远处到正横方向的时长约为 340 s ，正横方向上的探测距离为 $340\text{ s}\times 11.3\text{ m/s}=3842\text{ m}$ 。其中带宽分别为 $300\sim 1200\text{ Hz}$ 、 $500\sim 1000\text{ Hz}$ 、 $600\sim 900\text{ Hz}$ 、 $700\sim 800\text{ Hz}$ 。

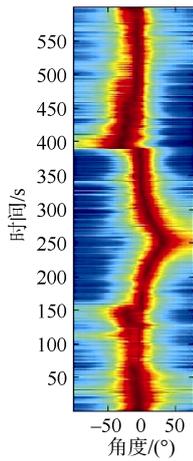


图 10 航速 11.3 m/s 常规波束形成目标俯仰角估计云图
 Fig. 10 Nephogram of estimation accuracy of the pitch angle based on conventional beam forming at 11.3m/s

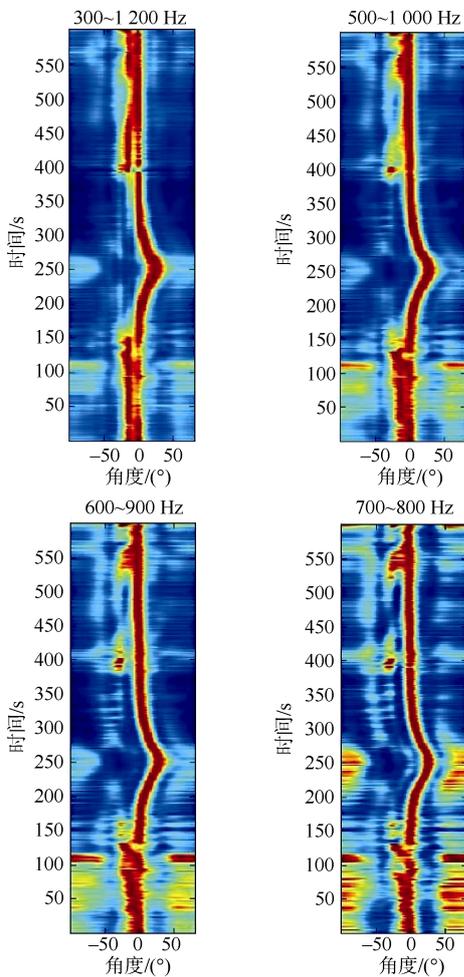


图 11 11.3 m/s 航速不同带宽窄带波束形成目标俯仰角估计云图

Fig. 11 Nephogram of estimation accuracy of the pitch angle based on different narrow-band beam forming at 11.3m/s

3.3 纯噪声实测数据分析

图 12 为纯噪声的宽带目标俯仰角估计精度图。

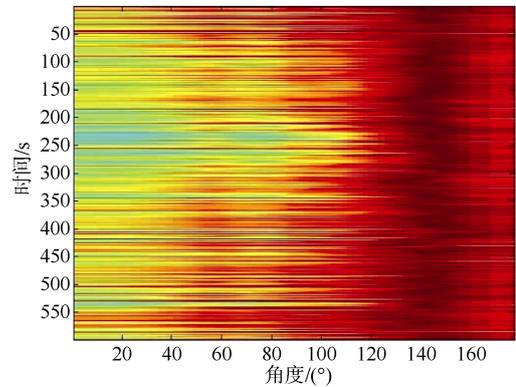


图 12 纯噪声常规波束形成目标俯仰角估计云图
 Fig. 12 Nephogram of estimation of the pitch angle based on conventional beam forming of noise

图 13 为纯噪声的 Notch 窄带滤波算法目标俯仰角估计精度图。

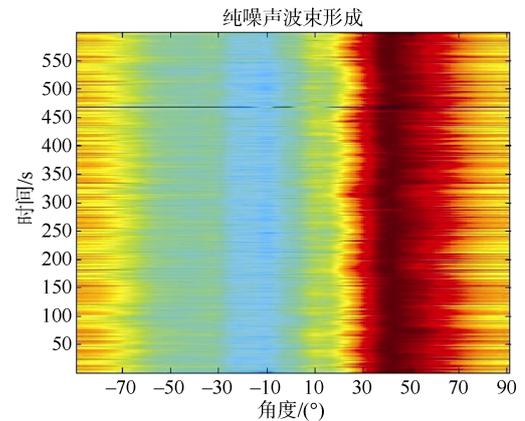


图 13 纯噪声窄带波束形成目标俯仰角估计云图
 Fig. 13 Nephogram of estimation accuracy of the pitch angle based on narrow-band beam forming of noise

从图 8、图 10 可以看出, 常规波束形成的目标俯仰角估计云图中, 目标俯仰角分布范围较大, 目标俯仰角估计精度较低。

从图 9、图 11 可以看出, 窄带波束形成的目标俯仰角估计云图中, 目标俯仰角分布范围较小, 目标俯仰角估计精度较高; 还可看出, 在窄带波束形成的目标俯仰角估计中, 带宽越宽, 目标俯仰角估计精度越高。

图 12、图 13 纯噪声目标俯仰角估计云图中未见明显的目标俯仰角信息。

4 结束语

本文主要介绍了基于线列阵的 Notch 窄带波束形成的结构、概念和实现方法。在基于天元线列阵的条件下,利用 Notch 窄带波束形成方法,对某海试数据分别进行了不同窄带带宽条件下的目标俯仰角估计;并将估计结果与常规波束形成方法得到的结果,与宽带延时求和方法得到的结果进行对比,得到以下结论。

1) 基于 Notch 窄带波束形成的俯仰角估计方法要比常规波束形成的俯仰角估计方法的精度要高。

2) 目标的俯仰角越小,目标俯仰角估计精度越高,在正横方向上目标俯仰角估计精度最高。

3) 相同采样频率条件下,Notch 自适应滤波窄带波束形成的目标俯仰角估计效果比宽带延时求和的效果更好。

4) Notch 自适应滤波窄带波束形成中,带宽越宽,目标俯仰角估计的精度越高。

参考文献

- [1] 王惠刚,杜国秀.窄带波束形成[J].水雷战与舰船防护,1999,7(4):40-45.
- [2] 朱维杰,孙进才.基于 DFT 插值的宽带波束形成器的设计[J].通信学报,2002,23(8):59-66.
- [3] 陈川,陈韶华,李琪.基于自适应 Notch 滤波器的矢量阵多目标分辨研究[J].兵工学报,2011,32(9):1131-1135.
- [4] 杨蕾.时延相移波束形成技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2004.
- [5] 蒋国庆,孙超,刘雄厚.变化时延在时域的精确实现方法[J].声学技术,2015,34(6):219-221.
- [6] 陈韶华.关于水中声源的信号检测与定向研究[D].西安:西北工业大学,2003.
- [7] 陈韶华.海洋声源信息获取与传输技术研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [8] 王世闯,王茂法,肖翔,等.被动拖曳线列阵机动过程中的频域宽带波束形成[J].声学与电子工程,2012(4):5-10.
- [9] 付彦,刘劲军.一种基于 Notch 滤波器的恒定束宽波束形成技术[J].声学技术,2013,32(1):51-53.
- [10] 孙渊,王超,张红,等.改进 Notch 滤波的全极化 SAR 数据船舶检测方法[J].中国图像图形学报,2013,18(10):1374-1381.
- [11] 赵羽,蔡平,王逸林.基于自适应陷波滤波器的窄带波束形成方法[C]//中国声学学会水声分会 2004 年学术会议.上海:《声学技术》编辑部,2004.
- [12] 冯海泓,梁国龙,惠俊英.目标方位的声压,振速联合估计[J].声学学报,2000,25(6):516-520.

(责任编辑:肖楚楚)