

一种基于 Notch 滤波器的恒定束宽波束形成技术

付 彦¹, 刘劲军²

(1. 北京长城电子装备有限责任公司, 北京 100082; 2. 解放军某代表室, 北京 100082)

摘要: 对于存在不同线谱成分的宽带信号而言, 提取这些线谱成分进行恒定束宽波束形成, 可以达到增强信号的目的。自适应陷波器(Notch 滤波器)具有频率跟踪和相位估计的特性, 基于此提出了一种自适应恒定束宽波束形成技术。对于基阵接收到的信号, 以其各阵元之间的相位差为媒介, 在 Notch 滤波器离线重构相移波束形成中提取“低频慢变化”的相位信息, 对其进行补偿, 使输出的重构信号具有“高频快变化”的相位信息, 以此将不同频段的信号进行恒定束宽波束形成。以舰船辐射噪声为例, 通过仿真和实验研究证实了该方法的有效性。

关键词: 自适应陷波器; 恒定束宽; 波束形成

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-01-0050-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.01.012

Constant beamwidth beamforming based on adaptive filter

FU Yan¹, LIU Jin-jun²

(1. Beijing Great Wall Electronic Equipment Co. Ltd., Beijing 100082, China; 2. PLA Representation Office, Beijing 100082, China)

Abstract: For the line spectrum of different frequencies existing in a wideband signal, the constant beamwidth beamforming can strengthen the signal. Based on the characters of an adaptive Notch filter in tracking frequency and estimating phase, a new technique of constant beamwidth beamforming is proposed. For the signal received by an array, the Notch filter forms a set of input signals through phase delays between different unit sensors. In beamforming, the adaptive Notch filter changes the “slow-varying phase information in low frequencies” into the “fast-varying phase information in high frequencies” for the output reconstructed signals by compensating phase delays. This process can be done in different frequency bands in order to realize the constant beamwidth beamforming. In this paper, the ship noise is taken as an example to simulate and test the effectiveness of the method.

Key words: adaptive notch filter; constant beamwidth; beamforming

0 引言

在水声信号处理中, 无论是主动声纳的回波信号, 还是被动声纳的目标辐射信号, 基阵系统接收到的往往都是宽带信号。宽带信号与窄带信号相比具有更多的信息特征, 如目标回波信息量大, 混响背景相关性弱, 有利于目标检测、参量精确估计和目标特征明确等。我们所需要的信息往往隐含在这些宽带信号中。对于某些目标, 它的频谱往往又集中于某些特定的频段。如果能准确跟踪和捕捉到这些特征频率, 就可以很好地识别目标。按一定频率信号对应的半波长布阵的确定基阵, 对于不同频率入射信号而言, 只有当主波束对准信号入射方位时, 各频点上的响应是相同的; 当波束没有对准信

号波达方向时, 即在主波束宽度内的其他方向上时, 不同频点对同一信号的响应是不同的, 导致信号发生失真^[1]。这种信号失真对于信号处理中的能量接收、波形分析和信号识别等都有影响, 并且对于这些频点, 波束的宽度也因为频率的不同而不同。恒定束宽波束形成可以解决这个问题。通过恒定束宽波束形成使不同频率的波束具有相同的波束宽度, 各频率波束叠加, 达到增强信号的目的。

本文介绍了 Notch 滤波器的工作原理, 以及在 Notch 滤波器的基础上建立离线重构相移波束形成, 利用 Notch 滤波器对输入可“离线重构”的特性, 讨论恒定束宽窄带波束形成的方法。

1 自适应陷波器

1.1 自适应陷波器原理

自适应陷波器又名 Notch 滤波器, 具有自身调节参数的能力。将滤波器通过一个恰当的自适应过

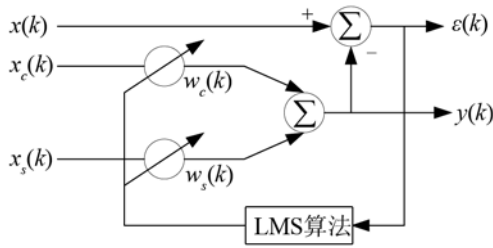
收稿日期: 2011-12-09; 修回日期: 2012-03-10

作者简介: 付彦(1981—), 女, 河北人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为水声通信及水下信号处理。

通讯作者: 付彦, E-mail: fuyan886@tom.com

程加以控制,一般都能将噪声或干扰抑制到用直接滤波难以达到的程度。Notch 滤波器有着较深的零点,可以滤掉某一频率的信号。即使参考频率做缓慢变化时,自适应过程也能调整对消所需的正确相位关系,所以,零点的深度一般都优于固定滤波器的零点深度^[2]。其优点为,能提供易于控制的带宽,极其深的零点,以及具有自适应精确跟踪干扰的频率和相位的能力。

为了在仿真和实际信号处理的过程中保证信号的收敛性,自适应 Notch 滤波器调整权值的核心算法采用 LMS 算法,滤波器通过不断的学习,根据最小均方误差准则调整权值。Notch 滤波器的简化示意图如图 1 所示。



我们所需要的有用信号 $y(k) = x_c(k)w_c(k) + x_s(k)w_s(k)$, 为滤波器的输出。在硬件采集系统对接收到的有用信号 $s(t)$ 以 τ 为周期进行同步采样后,离散形式 $s(k)$ 表示为

$$s(k) = A \cos \omega_0 k \cos \varphi(k) - A \sin \omega_0 k \sin \varphi(k) \quad (1)$$

其中 $\tau = \frac{1}{f_s}$, $\varphi(k) = [\omega(k) - \omega_0]k\tau + \varphi_0$, f_s 为系统采样率, φ_0 为初始相位。

自适应滤波器的输出 $y(k)$ 为

$$y(k) = w_s(k) \sin \omega_0 k + w_c(k) \cos \omega_0 k \quad (2)$$

比较式(1)和式(2),可以得到

$$w_s(k) = -A \sin \varphi(k) \quad (3)$$

$$w_c(k) = A \cos \varphi(k) \quad (4)$$

信号的瞬时相位为

$$\varphi(k) = -\text{tg}^{-1} \left[\frac{w_s(k)}{w_c(k)} \right] \quad (5)$$

根据 $\varphi(k) = [\omega(k) - \omega_0]k\tau + \varphi_0$, 可知

$$\varphi(k) - \varphi(k-1) = [\omega(k) - \omega(k-1)]k\tau + [\omega(k-1) - \omega_0]\tau \quad (6)$$

若输入的载频是慢变化的,则 $\omega(k-1) \approx \omega(k)$, 式(6)右边的第一项可以忽略,简化为

$$\varphi(k) - \varphi(k-1) \approx [\omega(k) - \omega_0]\tau \quad (7)$$

则有

$$\omega(k) = \omega_0 + \frac{1}{\tau} [\varphi(k) - \varphi(k-1)] \quad (8)$$

$$f(k) = f_0 + \frac{1}{2\pi\tau} [\varphi(k) - \varphi(k-1)] = f_0 - \frac{1}{2\pi\tau} \left[\text{tg}^{-1} \frac{w_s(k)}{w_c(k)} - \text{tg}^{-1} \frac{w_s(k-1)}{w_c(k-1)} \right] \quad (9)$$

式(5)中, $\varphi(k)$ 是信号的瞬时相位,是 k 的函数。对于频率确定的信号,它并不包括由于时间推移带来的相位的变化,而仅仅反映了初相位的变化。正是这样的特性才使得计算瞬时频率成为可能,因为相位上的变化才是由于频率的变化而产生的。Notch 滤波器可以测得瞬时频率的这一特性使得 Notch 滤波器的中心频率可以自动调节到信号的频率上。对于中心频率为 f_1 的信号,如果 Notch 滤波器初始中心频率在 f_2 , 且 $f_1 \neq f_2$, 通过若干次滤波后可以将 Notch 滤波器的中心频率自动调整到 f_1 , 从而达到实时跟踪信号频率的目的。

1.2 Notch 滤波器离线重构相移波束形成

Notch 滤波器可以得到恢复的信号,在波束形成中,对各路恢复的信号进行不同的相位补偿,就可能使得各路信号同相叠加,得到基于 Notch 滤波器的相移波束形成,其基本框架如图 2 所示。

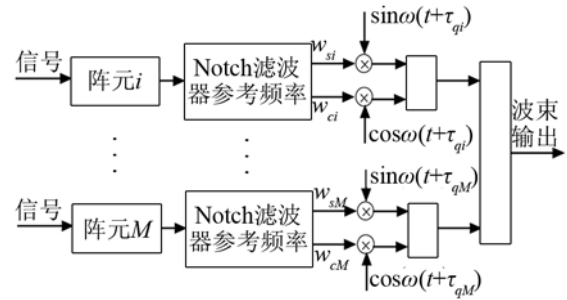


图 2 Notch 滤波器离线重构相移波束形成框架图
Fig.2 The block diagram of phase-shift beamforming by Notch filter

对于窄带输入信号,让阵元接收的各路信号分别通过各自的 Notch 滤波器,当 Notch 滤波器的中心频率调整为输入信号的中心频率时,得到各路信号相对应的权值 w_{si} 和 w_{ci} , $i=1, \dots, M$, M 表示阵元个数,利用这些权值通过公式(2)重新构建信号,在构建的过程中加入补偿相位 τ_{qi} ,得到的重构信号如式(10)所示。

$$x_{qi}(t) = w_{si}(t) \sin[\omega(t + \tau_{qi})] + w_{ci}(t) \cos[\omega(t + \tau_{qi})] \quad (10)$$

设 f_0 为信号的入射频率,令 $\omega = 2\pi f_0$, q 表示波束号, $\tau_{qi} = (i-1)\tau'_q$, τ'_q 为 q 号波束对应的单位引导方位时延差, $\tau'_q = d \cos \theta_0 / c$ 是随预成波束方位 θ_0 的改变而改变的时延值。当 θ_0 正好对准信号的波达方位时,各波束同相迭加,输出最大。

基于上述分析,自适应 Notch 滤波器离线重构相移波束形成实际上就是利用测得的相位来重新构建信号,在波束形成的过程中通过补偿不同的相

位差使得各路信号同相叠加。

2 恒定束宽波束形成

由于 Notch 滤波器具有相位估计的作用, 利用这一特性, 可以测得相邻阵元的相位差。对于一定的基阵, 不同频率的入射信号, 相同的入射方位会产生不同的相位差, 但是它们对应的相邻阵元上的时延差是相同的^[3], 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 时延 $\tau = d \cos \theta / c$, 时延值只和信号的入射方位 θ 、阵元间距 d 以及声速 c 有关, 在 Notch 滤波器离线重构相移波束形成中所补偿的相位就是这个相位差。如果以相位差为媒介, 就可以实现在不同的频率之间的转换, 即可以将低频的入射信号重构时调整到较高的频率, 从而实现恒定束宽波束形成。

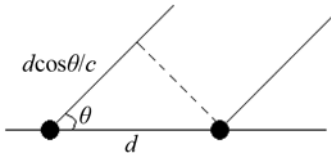


图 3 相邻阵元相位差示意图

Fig.3 Phase difference between two neighboring array units

对于单个窄带目标, 假定 f_0 为半波间距对应的频率, f_1 为阵的工作频率, 要得到的窄波束对应应有 $f_1 \geq f_0$ 成立, 令式(10)中的 $\omega = 2\pi f_1$, 将 τ_{qi} 调整为式(11)的形式:

$$\tau_{qi} = (i-1)\tau'_q - (i-1)\bar{\tau}(f_1 - f_0)/f_1 \quad (11)$$

式(11)中: τ'_q 为 q 号波束对应的单位引导方位时延差, $\bar{\tau}$ 是实测时延 τ 的均值, 式(10)的具体展开式为

$$x'_{qi}(t) = w_{si}(t) \sin \left[\frac{2\pi f_1 t + (i-1)2\pi f_1 \tau'_q - (i-1)2\pi f_0 \bar{\tau} \frac{f_1 - f_0}{f_0}}{f_0} \right] + w_{ci}(t) \cos \left[\frac{2\pi f_1 t + (i-1)2\pi f_1 \tau'_q - (i-1)2\pi f_0 \bar{\tau} \frac{f_1 - f_0}{f_0}}{f_0} \right] \quad (12)$$

式(12)表明, 该恒定束宽的方法就是通过利用 Notch 滤波器测得相邻两阵元接收的中心频率为 f_0 的信号实测时延值。通过式(11)将其变换为中心频率为 f_1 时信号的时延差。实际上, 此方法的工作原理是 Notch 滤波器通过权值的不断调整, 提取“低频慢变化”的相位信息, 对其进行补偿, 使输出的重构信号具有“高频快变化”的相位信息, 以此对不同的低频信号进行恒定束宽, 得相同宽度的窄波束。

3 仿真及实验结果

仿真条件: 五元矢量水听器线列阵, 阵元间距

$d=0.75$ m, 入射信号 $f_0=350$ Hz, 恒定束宽频率 $f_1=1000$ Hz, 信噪比为 12 dB。恒定束宽后的主波束宽度明显变窄, 而且矢量阵波束形成对于左右舷模糊的部分的伪主峰限制得更好。图 4 为恒定束宽仿真结果。

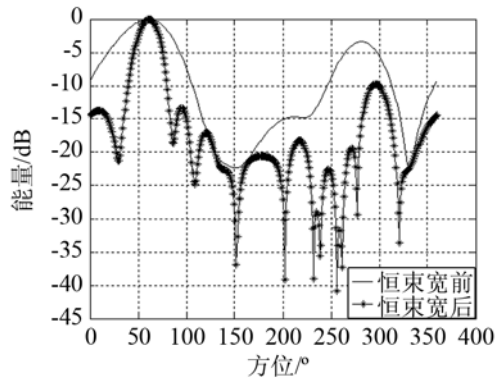


图 4 矢量阵恒定束宽仿真

Fig.4 Simulation of constant beamwidth beamforming for vector array

对于舰船辐射噪声, 其频带是很宽的, 通常在看似杂乱无章的噪声中存在一定的线谱成份, 提取这些线谱往往可以检测目标。对于宽带的舰船辐射噪声, 首先进行一定频段的划分, 然后利用 Notch 滤波器进行各个频段上的分频滤波, 以减少各线谱成份之间的干扰。图 5 为湖试数据 1 的处理结果, 实验所用基阵为阵元间距为 0.3 m 的两元阵, 并以 2500 Hz 半波长布阵, 信号为带宽 400 Hz、中心频率为 2000 Hz 的舰船辐射噪声。由图 5 可见, 恒定束宽后主波束明显变窄, 达到了恒定束宽的效果。

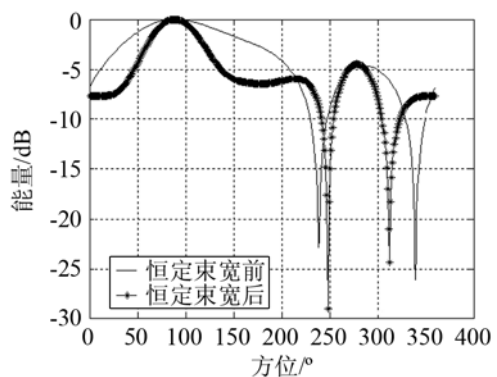


图 5 湖试数据 1 恒定束宽波束形成前后对比图

Fig.5 Comparison of beamforming with and without constant beamwidth

图 6 为湖试实验数据 2, 基阵为两元阵, 阵元间距为 2.5m, 本实验数据有三个目标, 目标一为 180° 附近的发电站大坝干扰, 目标二是轨迹为之字形的目标, 目标三为穿梭于其中的小目标。处理结果如图 6 所示。其中图 6(a)是两元阵时延波束形成的结果, 由于阵型较小, 目标分辨受到瑞利限的约束, 较为模糊。大坝目标的噪声较弱, 所以基本上

看不到。图 6(b)是两元阵分频段处理的结果,在初始阶段,对各个频段进行 $0\sim 180^\circ$ 的全方位搜索,不同频段分别判断信号是否到来。对于确定有信号的频段开启跟踪模块,只对主波束和其左右若干跟踪波束进行波束形成,以便判断信号是否发生方位改变,对于跟踪波束外的范围不再进行波束形成。因为对于目标二和目标三接收的均为舰船辐射噪声,故在低频段会存在分量较强的线谱成分,分频段后提取这些较强的线谱分量,并将这些频率统一恒定束宽到某一工作频率,得到相同的主波束宽度,便于结果的显示。由于在不同的频段进行处理,大坝

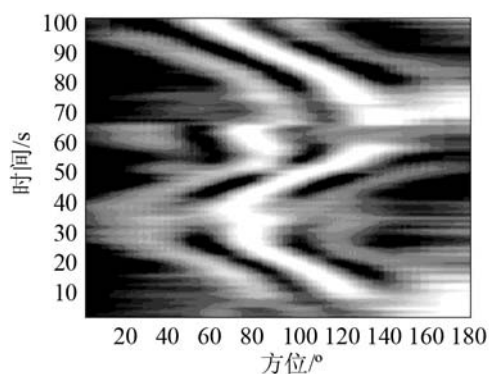
这一低频干扰成份被凸现出来,故此明显地看到三个目标,处理效果优于图 6(a)。对于目标二和目标三,水听器接收的是目标辐射噪声,在不同的频段内通过 Notch 滤波器搜索相对较强的线谱成分,恒定束宽到统一的频点上,增强了目标信号。由于目标频率有起伏,三个目标频谱之间会有覆盖,所以在两目标交叉的地方彼此之间的干扰是难免的。

4 结 论

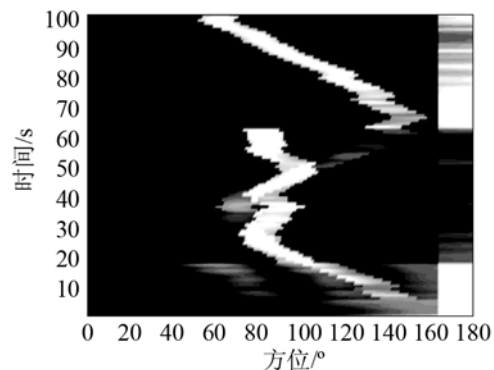
本文利用自适应 Notch 滤波器可以捕捉线谱成分和跟踪频率的特性,利用调整的权值将有用信号恢复出来,并结合相移波束形成,提出了一种新的基于自适应滤波器的离线重构相移波束形成算法,并以此算法为基础,以舰船辐射噪声为研究对象,以相位差为媒介,实现宽带信号在不同的频率之间的转换,即可以将低频的入射信号重构时调整到较高的频率,从而实现恒定束宽波束形成。

参 考 文 献

- [1] 唐建生,孙超,杨益新. 全设计频段束宽恒定的低旁瓣时域波束形成[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 331-335.
TANG Jiansheng, SUN Chao, YANG Yixin. Time domain low-sidelobe beamforming with constant beamwidth within the entire required frequency band[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4): 331-335.
- [2] 沈福民. 自适应信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001, 144-147.
SHEN Fumin. Adaptive signal process[M]. Xi'an: Xi Dian Technology University Publishing House, 2001, 144-147.
- [3] 田坦,刘国枝,孙大军. 声纳技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000, 63-66.
TIAN Tan, LIU Guozhi, SUN Dajun. Sonar technology[M]. Harbin: Harbin Engineering University Publishing House, 2000, 63-66.



(a)时延波束形成瀑布图



(b)分频段融合瀑布图

图6 湖试实验数据2处理

Fig.6 Processing results of lake test data2