

锁定放大技术在参量接收阵中的应用

黄 淳^{1,2}, 李颂文^{1,2}

(1. 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 为抑制泵波影响, 提取参量接收阵中的微弱差频信号, 根据微弱信号探测原理, 设计了一个基于锁定放大技术的参量接收阵系统。简要介绍了参量接收阵原理, 详细描述了锁定放大技术, 以及所设计的参量接收阵系统的工作过程, 给出泵波比差频高 130 dB 时的仿真数据。结果表明, 采用锁定放大技术后的参量接收阵系统可对接收的差频信号优化约 5dB。

关键字: 锁定放大技术; 参量接收阵; 微弱信号探测

中图分类号: O427.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0180-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.018

Application of lock-in amplifier technique in parametric acoustic receiving array

HUANG Chun^{1,2}, LI Song-wen^{1,2}

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Shanghai 201108, China;
2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to suppress the effect of pump signal on picking up the weak difference-frequency signal in the parametric acoustic receiving array, and according to the principle of weak signal detection, a new kind of parametric receiving system is designed on the basis of lock-in amplifier technique. The principle of parameter acoustic receiving array is described briefly, and the Lock-in amplifier technique as well as the procedure of the designed system is described in detail with the presented simulation data that pump to difference-frequency signal ratio reaches 130dB. The result indicates that the use of lock-in amplifier technique in the parametric acoustic receiving array can optimize the difference-frequency signal by 5 dB.

Key words: lock-in Amplifier technique; parametric acoustic receiving array; weak signal detection

0 引言

声波在介质中传播的过程中, 会产生非线性作用, 这是声学参量阵的理论基础, 由韦斯特维尔特在 1963 年发表于美国声学协会杂志的著名论文《Parametric Acoustic Array》中首次提出^[1]。水声参量放大接收技术就是一种利用非线性效应, 对低频信号获得高指向性接收并提高对弱信号的接收增益的技术^[2], 并在 1972 年的外场实验中得到证实^[3]。参量接收阵具有高指向性和小尺寸的特点^[3-6], 具有广阔的应用空间。但是常规参量接收阵的灵敏度较低, 对弱信号的检测能力不足^[7]。锁定放大技术基于相干检测技术原理, 通过相敏检测器和低通滤波器完成互相关运算来检测微弱信号^[8]。本文主要研

究锁定放大技术在参量接收阵系统中的应用, 并设计优化的参量接收阵系统。

1 参量接收阵概述

在参量接收阵中, 待测的低频信号波(频率为 f_2 , 在泵换能器 T 中心处的声压幅值为 p_{20})作为非线性互作用的原波之一, 在本地用一个泵换能器 T 辐射高频泵波波束(频率为 f_1 , 在距泵换能器 $r_0=1\text{m}$ 处的声压幅值为 p_{10})。信号波和泵波在共同作用的区域内作非线性调制, 产生和频波(声压幅值为 p_+)及差频波(声压幅值为 p_-)。在泵波 T 的声轴上用水听器 H 接收差频波(频率为 f_1-f_2)或和频波(频率为 f_1+f_2), 用晶体滤波器滤掉泵波, 从而检测出低频信号。如图 1 所示, θ 是入射波方向和 T、H 连线的交角。

参量接收阵的接收声压幅值为

收稿日期: 2012-12-16; 修回日期: 2013-03-29

作者简介: 黄淳(1988-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 黄淳, E-mail: pure0304@sina.com

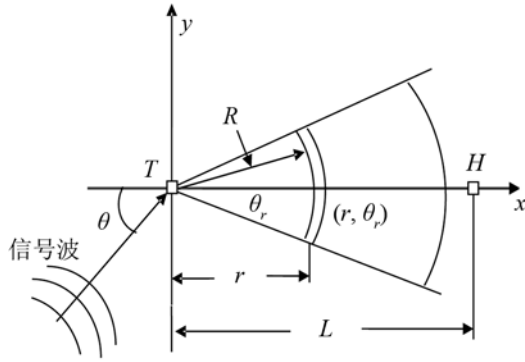


图 1 参量接收阵原理图
Fig.1 PARRAY functional diagram

$$p_{\pm}(L, 0; \theta) = \frac{(\omega_1 \pm \omega_2) \beta p_{10} p_{20} r_0}{2 \rho_0 c_0^3} e^{-\alpha_{\pm} L} \cdot \frac{\sin[k_2 L (1 - \cos \theta) / 2]}{k_2 L (1 - \cos \theta) / 2} \quad (1)$$

其中： β 、 ρ_0 和 c_0 分别表示介质的非线性系数、密度和声速； α_{\pm} 分别表示介质对和频波及差频波的吸收系数； k_2 表示信号波的波数； L 表示参量接收阵的阵长。

参量接收阵的接收声压级为

$$SPL_{\pm} = 20 \log(p_{\pm} / p_{ref}) \quad (2)$$

其中， p_{ref} 表示参考声压，在水中取 $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。

在传统的参量接收阵系统^[3,4]中，一般用两级滤波放大滤除泵波，从而检测出差频信号或和频信号，再绘制信号的波束图。图 2 为常规参量接收阵系统框图。



图 2 常规参量接收阵系统框图
Fig.2 Diagram of a regular PARRAY system

通常，由于待测信号波的能量较小，为增强非线性作用，发射的泵波能量很强。非线性作用得到的差频信号能量不大，且淹没在强泵波信号中，其声压级与泵波相比将会很小。在很多实际系统中，可能会比泵波低 160dB^[9]。经过滤波放大后得到的差频信号中含有未被滤除的泵波残留成分，因此常规参量接收阵的灵敏度不高。因此，希望根据微弱信号检测技术，设计一种更有效的参量接收系统。

2 锁定放大基本原理

锁定放大器(Lock-In Amplifier, LIA)是一种基

于相干检测技术原理，在强噪声背景下检测微弱信号幅值和相位的微弱信号检测仪器，主要由信号通道、参考通道、相敏检测器(Phase Sensitive Detector, PSD)和低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)组成。

正交矢量型锁定放大器应用普遍，可利用两个正交的分量计算出信号的振幅和相位，其基本结构如图 3 所示^[10]。

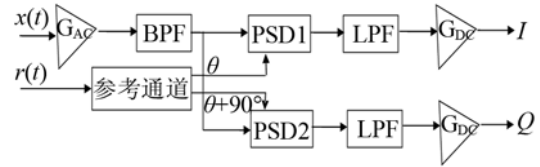


图 3 正交矢量型锁定放大器结构
Fig.3 The structure of lock-in amplifier

设输入信号是伴有噪声的正弦信号：

$$x(t) = A \sin(2\pi f_s t + \theta) + n(t) \quad (3)$$

其中，设 $s(t) = A \sin(2\pi f_s t + \theta)$ 是待测信号，振幅为 A ，频率为 f_s ，相位为 θ ； $n(t)$ 是随机噪声。

设参考信号是正弦信号：

$$r(t) = B \sin(2\pi f_0 t) \quad (4)$$

其中， B 为参考信号振幅。

将输入信号和参考信号通过相敏检测器 PSD：

$$R = x(t) \times r(t) = (A \sin(2\pi f_s t + \theta) + n(t)) \times B \sin(2\pi f_0 t) = n(t) \times B \sin(2\pi f_0 t) + AB [\cos(2\pi(f_s - f_0)t + \theta)] / 2 - AB [\cos(2\pi(f_s + f_0)t + \theta)] / 2 \quad (5)$$

设置低通滤波器的截止频率为 f_{stop} ，使 $f_{stop} < f_s + f_0$ ，这样可以滤除频率为 $f_s + f_0$ 的项。在实际情况下，噪声是高频的，只要低通滤波器的截止频率 f_{stop} 适当小，噪声项也可被滤除。特别地，当参考频率 $f_0 = f_s$ 时，经过低通滤波后，式(5)可写为：

$$R = x(t) \times r(t) = AB \cos \theta / 2 \quad (6)$$

可以看出，经过频谱搬移后，将有用信号变成直流，降低了对 A/D 采样频率的要求，利于后续信号处理；并且极大地避免了高频噪声的不利影响。

在正交矢量型锁定放大器中，采用了两个 PSD 相敏检测系统。这两个相同的系统具有同样的信号输入 $x(t)$ ，但参考输入则存在 90° 的相位差。经过频谱搬移和滤波放大后，正交矢量型锁定放大器的输出分别为：

$$I = AB \cos \theta / 2 \quad (7)$$

$$Q = AB \sin \theta / 2 \quad (8)$$

根据这两路输出，可计算出待测信号 $s(t)$ 的振幅和相位：

$$A = 2 \sqrt{(I^2 + Q^2) / B^2} \quad (9)$$

$$\theta = \arctan(Q/I) \tag{10}$$

3 基于锁定放大的参量接收阵系统

将正交矢量型锁定放大器应用于参量接收阵系统中，对滤波后的信号进行锁定放大处理，可较好地提取出微弱差频信号，抑制强泵波信号产生的影响。设计系统框图如图 4 所示。

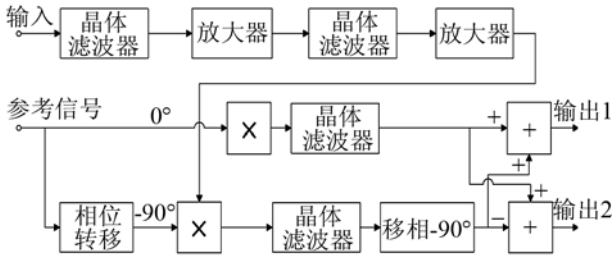


图 4 采用锁定放大的参量接收阵系统框图
Fig.4 Diagram of PARRAY system with lock-in amplifier

输入端输入水听器接收到的信号，经过两级带阻滤波和低频放大处理，该处理过程在放大微弱信号的同时滤除大部分的泵波信号和噪声，产生一个具有双边带特性的输出，即包含有和频信号和差频信号的输出；该输出与两路正交参考信号分别通过乘法器，得到的两路信号再分别经过低通滤波器，经过移相相加后得到两路输出信号。

根据正交矢量型锁定放大器的原理，该系统输出 1 的输出信号的声压幅值为和频信号声压幅值 p_+ 与参考信号声压幅值 B 之积，输出 2 的输出信号的声压幅值为差频信号声压幅值 p_- 与参考信号声压幅值 B 之积。

由于在参量接收阵中，泵波信号由本地发射，其频率振幅等信息均为已知。因此，可设置该参量接收阵系统中的参考信号频率与泵波频率相同。根据频谱搬移原理，通过低通滤波器后，得到的输出信号的频率实际为信号波的频率。这样，若信号波频率未知，也可以检测出该未知信号波的频率。

4 实验仿真

采用 MATLAB 软件分别对常规参量接收阵系统和基于锁定放大的参量接收阵系统进行仿真。

设系统仿真环境为水介质，参量接收阵的泵波信号频率 $f_p=200\text{ kHz}$ ，声源级 $SSL=217\text{ dB}$ (泵换能器 1 m 处)；信号波频率 $f_1=40\text{ kHz}$ ， $SPL=110\text{ dB}$ (泵换能器中心处)；参量阵长 $L=1\text{ m}$ ，与信号源距离 $R=4\text{ m}$ ；信号源 S 以距离 R 绕泵换能器 P 做圆弧运动，角度 θ 为从 $30^\circ\sim 0^\circ$ 。如图 5 所示。

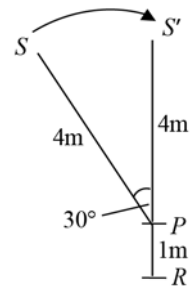


图 5 参量接收阵示意图
Fig.5 Sketch of PARRAY

泵波主要由带阻晶体滤波器抑制，其衰减特性在 $200\pm 1\text{ kHz}$ 时为 10 dB ， $200\pm 0.5\text{ kHz}$ 时为 30 dB 。根据式(1)和式(2)，得到常规参量接收阵得到的差频波声压级和采用锁定放大参量接收阵得到的差频波声压级分别如图 6 和图 7 所示。其中，实线表示理论值，虚线表示仿真值。

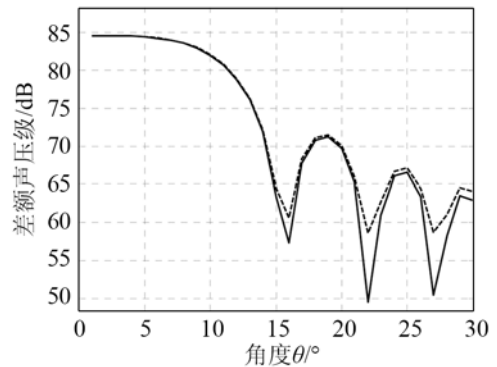


图 6 常规参量接收阵差频波声压级
Fig.6 SPL of difference frequency acoustic signal SPL from a traditional PARRAY

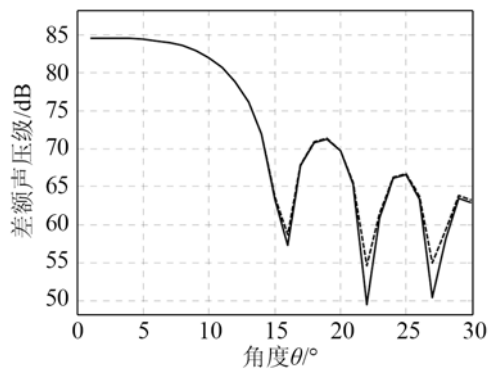


图 7 锁定放大参量接收阵差频波声压级
Fig.7 Difference frequency acoustic signal SPL from a PARRAY with lock-in amplifier

可以看出，在常规参量接收阵系统中，由于泵波不能被完全滤除，接收到的差频波包含未被滤干净的泵波成分，随着信号源偏离声轴方向的角度越大，其声压级与理论值相比偏差增大；在采用了锁定放大技术之后，将差频波的频谱搬移低频处，再通过低通滤波器，极大地避免了泵波的干扰，得到

更为“干净”的差频波信号,其声压级值与理论值的一致性较好。

端射方向上(即 $\theta=0^\circ$ 时)输出信号 2 功率谱图如图 8 所示。可以看出,输出信号的频率为 40kHz,与信号波频率相同,说明该系统可检测出信号波的频率。

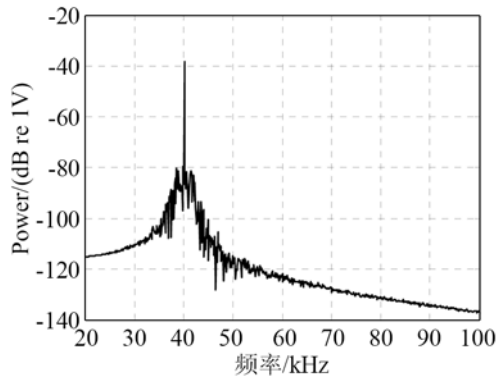


图 8 锁定放大参量接收阵信号的功率谱图

Fig.8 Power spectrum of signal for the PARRAY with lock-in amplifier

5 结束语

一般情况下,由于待测信号能量较小,非线性效果不明显,产生的差频信号较弱,滤波后的信号中含有强泵波的残留成分。文中提出的基于锁定放大技术的参量接收阵系统,与常规参量接收阵系统相比,可较好地抑制强泵波残留的影响,提取出声压级与理论值的一致性较好的差频信号。此外,还可得出待测信号波的频率,实现了对未知频率信号

源的探测。该系统可用于处理信号源强度弱、干扰信号强的参量接收阵,并得到该信号源的频率。

参 考 文 献

- [1] Westervelt P J. Parametric Acoustic Array[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1963, 35(4): 535-537.
- [2] 何作镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
HE Zuoyong, ZHAO Yufang. The base of acoustic theory[M]. Beijing: Industry of National Defense Press, 1981.
- [3] Barnard G R, Willette J G, Truchard J J, et al. Parametric Acoustic Receiving Array[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1972, 52(5): 1437-1441.
- [4] Berktaay H O, Shooter J A. Parametric receivers with spherically spreading pump waves[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1973, 54(4): 1056-1061.
- [5] McDonough R N. Long-aperture parametric receiving arrays[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1975, 57(5): 1150-1155.
- [6] James J Truchard. Parametric acoustic receiving array--theory and experiment[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1975, 58(6): 1141-1150.
- [7] Bjorno L, Christoffersen B, Schreiber M P. Some experimental investigations of the parametric acoustic array[J]. Acustica, 1976, 35.
- [8] 赵吉祥, 陈超婵, 王欢, 等. 微弱电信号检测方法回顾[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(3): 201-210.
ZHAO Jixiang, CHEN Chaochan, WANG Huan, et al. A review on weak electrical signal detection[J]. Journal of China University of Metrology, 2009, 20(3): 201-210.
- [9] Rohde D F, Goldsberry T G, Olsen W S, et al. Band elimination processor for an experimental parametric acoustic receiving array[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 1979, 66(2): 484-487.
- [10] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
GAO Jinzhan. Dection of weak signals[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2004.