

宽带水声参量阵指向性设计与实验验证

张富东¹, 周代英¹, 陈敏², 肖越¹

(1. 电子科技大学电子工程学院, 成都 610054; 2. 电子科技大学空天科学技术研究院, 成都 610054)

摘要: 利用宽带水声参量阵可产生高指向性宽带低频声束, 推导了宽带水声参量阵生成低频声束的自解调理论模型, 对其换能器指向性进行了分析与设计, 并研制出了宽带水声参量阵样机。测试结果表明: 该样机产成的 2 kHz 声束的 -3 dB 指向性锐角约为 2.6°, 具有很好的指向性, 且旁瓣抑制效果好, 能够产生无旁瓣的高指向性低频声束。这为解决浅海水声通信的多途干扰、远程水声保密通信等问题提供了一条新思路。

关键词: 宽带水声参量阵; 低频声束; 旁瓣抑制

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-02-0140-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.02.006

Directivity design and experimental verification of underwater broadband acoustic parametric array

ZHANG Fu-dong¹, ZHOU Dai-ying¹, CHEN Min², XIAO Yue¹

(1. University of Electronic Science and Technology of China, School of Electronic Engineering, Chengdu 610054, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, Institute of Astronautics & Aeronautics, Chengdu 610054, China)

Abstract: The underwater broadband acoustic parametric array can produce a broadband audio beam at low frequencies with high directivity. In this paper, its theoretical self-demodulation model of generating an audio beam at low frequency is deduced firstly. Then, the directivity of its transducer is analyzed and designed, and prototype is also fabricated. The experimental result shows that the prototype can generate an audio beam at 2 kHz with excellent directivity performance, whose directivity acute angle at -3 dB is about 2.6°. Moreover, the prototype can produced an audio beam at low frequency without sidelobes due to its excellent performance in suppressing sidelobe, which is significant for solving the problems such as the multipath interference of the shallow-water communication and the long distance underwater secret communication.

Key words: underwater broadband acoustic parametric array; audio beam at low frequency; suppressing sidelobe

0 引言

浅海水声通信中, 多途干扰问题是导致误码高的主要原因之一。针对该问题, 有学者提出了以跳频技术解决信道延迟码间干扰^[1], 或以盲均衡技术提高信号判决正确率^[2]等方法来对误码率加以改善。声参量阵技术以其独有的能够产生低频高指向性声束的特性, 为解决浅海水声通信中的多途干扰问题提供了一条新思路, 并为实现远程水声保密通信提供了一条新途径。该技术目前在海底沉积物探寻^[3], 海底地表探测^[4-6]及远程水声保密通信^[7,8]等方面, 已受到了国内外学者的广泛重视, 并得到了一定应用, 表现出较高的工程应用价值。

本文拟对宽带水声参量阵^[9]进行研究, 着力解决其指向性设计问题, 通过宽带水声参量阵自解调理论模型进行推导及对其换能器指向性的分析与设计, 研制出水声参量阵样机, 并以实验测试该样机的指向性, 验证其旁瓣抑制效果。

1 低频声束自解调理论模型

上世纪 60 年代, Westervelt 首次提出声参量的概念, 并对双频参量阵的相关理论进行了研究^[9]。此后, Berkay 于 1965 年推出了“Berkay 远场解”^[10], 将参量阵理论拓展到了宽带信号领域。声参量阵产生原理如图 1 所示^[11]。受调制的高强度超声波信号在传播过程中, 通过非线性交互作用, 将在信道中解调产生声频信号, 并以端射方式在原信道中产生了一个新的虚拟声源——声参量阵。因声参量阵约束于超声信号传播信道产生, 所以新生成声频信号

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2010-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(60901062, 60302001)

作者简介: 张富东(1983-), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向为信息探测与获取。

通讯作者: 张富东, E-mail: zhangfudong2002@yahoo.com.cn

传播也将限制在这一区域, 得到与超声波信号相同的高指向性。

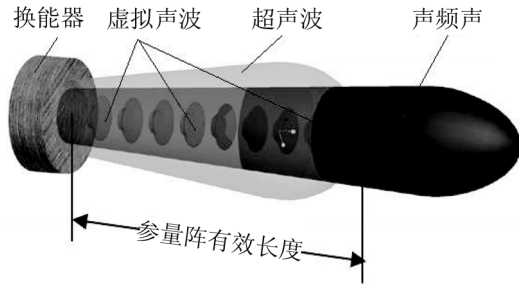


图1 声学参量阵示意图

Fig.1 Schematic diagram of broadband acoustic parametric array

根据“Berkay 远场解”, 在远场处, 参量阵输出信号(自解调信号的声压幅度)与其输入信号(原波)的幅度关系如式(1)所示:

$$p(\tau) = \frac{\beta p_0^2 S}{8\pi\rho_0 c_0^4 r \alpha_0} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} E^2(\tau) \quad (1)$$

式(1)中, β 为非线性系数, p_0 为原波声压幅值, S 为声源面积, r 为声波传播距离, $E(\tau)$ 为调制包络函数(被调制的原波信号), $\tau = t - r/c_0$ 为延迟时间。

由式(1)可知, 宽带声参量阵输入信号可为一宽带信号, 以调制包络的形式存在, 克服了双频声参量阵只能以双频率输入信号产生一个差频信号的缺点。以最为简单的 DSB 双边带调制为例^[12], 其调制包络函数为 $E(\tau) = 1 + m \sin(\omega\tau)$, (式中 m 为调制系数, $\sin(\omega\tau)$ 为低频信号), 将其代入式(1)有

$$p(\tau) = \frac{\beta p_0^2 S}{8\pi\rho_0 c_0^4 z \alpha_0} (2m^2 \omega^2 \cos(2\omega\tau) - 2m\omega^2 \sin(\omega\tau)) \quad (2)$$

式(2)即为宽带声参量阵的自解调理论模型。它表明参量阵的输出信号存在谐波失真, 即输入一个频率为 ω 的信号, 会产生频率分别为 ω 、 2ω 的信号。而在 DSB 方法中, 可通过调整调制参数 m 来降低谐波失真。同时, 新生成信号幅值强度与频率成正比。

2 换能器指向性分析与仿真

在水下环境中, 超声波声束的指向性取决于换能器的指向性。根据前述声参量阵与超声波信号同指向性原理, 水声参量阵的指向特性也将由换能器的指向性决定。现代声纳多采用换能器阵, 相比于单个换能器, 其拥有高功率, 小体积, 良好的旁瓣抑制功能及更优化的指向性等优点。

以 $M \times N$ 个相同圆形活塞水声换能器组成的矩形水声参量阵, 采用同相声源耦合辐射, 其指向性

函数可表达为式(3)的形式^[13,14]。

$$D(\alpha, \theta) = \frac{\sin[2\pi Ma \cos \alpha \sin \theta(d/\lambda)]}{M \sin[2\pi a \cos \alpha \sin \theta(d/\lambda)]} \cdot \frac{[2J_1(ka \sin \theta)]}{|ka \sin \theta|} \cdot \frac{\sin[2\pi Na \cos \alpha \sin \theta(d/\lambda)]}{N \sin[2\pi a \cos \alpha \sin \theta(d/\lambda)]} \cdot \frac{[2J_1(ka \sin \theta)]}{|ka \sin \theta|} \quad (3)$$

式(3)中, a 为换能器半径; α 、 θ 为波瓣空间指向角; λ 为所发声波波长; d 为单个换能器中心距。

拟采用半径 $a = 2.1 \text{ cm}$ 的单个圆形换能器, 以相互中心间隔 $d = 4.8 \text{ cm}$ 组成 3×3 的矩形水声换能器阵。以发送 40 kHz 超声波载波对其进行仿真预测。以该设计指标得到 $a/\lambda = 1.2$, $d/\lambda = 1.37$ 。依据式(3), 仿真得到此条件下超声波信号声束的空间指向性如图2所示。

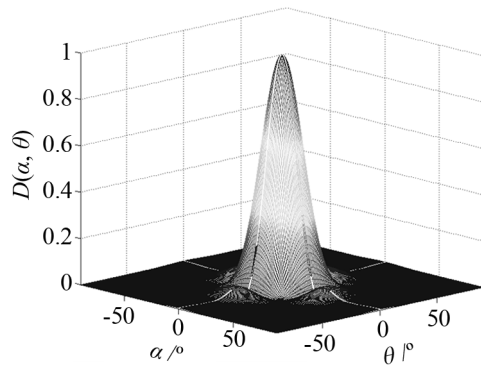


图2 3×3 换能器阵列三维方向图

Fig.2 Three-dimensional beam pattern of 3×3 plane transducer array

空间指向角 $\theta = 0^\circ$ 时, 超声波信号声束关于空间指向角 α 的平面指向图, 如图3所示。

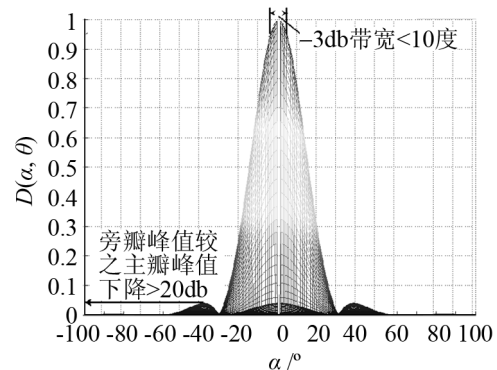


图3 $\theta = 0^\circ$ 时的剖面图

Fig.3 The selection plane for $\theta = 0^\circ$

图2、图3的仿真结果显示, 以此设计水声换能器阵发射 40 kHz 超声载波, 理论上载波信号主瓣尖锐, -3 dB 指向性锐角约为 3.6° 。旁瓣幅值抑制

作用明显, 峰值较之主瓣下降 >20 dB。根据前述原理, 水声参量阵将约束产生于超声信号信道, 新产生声频信号将具有与超声载波信号相同的传播特性。

3 指向性实验测试

依据前段理论分析与设计, 以图 4 所示结构搭建测试系统样机, 对水声参量阵传播特性进行测试。实际定制压电陶瓷 PZT 材料的水声换能器阵如图 5 所示。

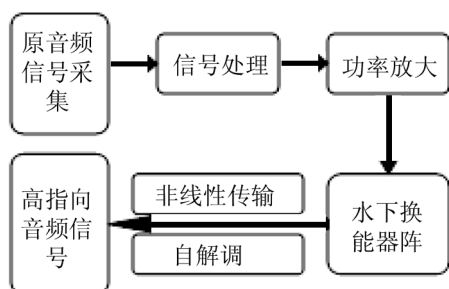


图 4 水声参量阵测试系统结构图
Fig.4 Structure of underwater parametric array testing system



图 5 换能器阵实物图
Fig.5 The aspect of practical underwater transducer array

委托中国测试计量研究院完成全频信号与自解调包络信号指向性测试。

3.1 测试方法及过程

测试目的为验证水下参量阵生成情况及输出信号全频指向性、调制包络同频信号指向性和各调制信号频响。中测院提供测试仪器及条件为：消声水池, $6.4\text{ m} \times 4.5\text{ m} \times 4.5\text{ m}$; B&K 声学测试系统 1 套; 8104 水听器 1 个; 测试距离 1.73 m , 测试水深 1.93 m (水听器入水深度)。

3.2 测试内容及结果分析

以 2 kHz 单频信号为调制包络, 40 kHz 超声波为载频, 进行全频指向性测试结果如图 6 所示。

图 6 表明, 换能器所发受调超声波由主瓣及几个旁瓣组成, 主瓣 -3 dB 指向性锐角约为 4.2° ; 主瓣幅值峰值比峰值较大的第一旁瓣约大 13 dB , 较峰值较小第二旁瓣约大 23 dB 。

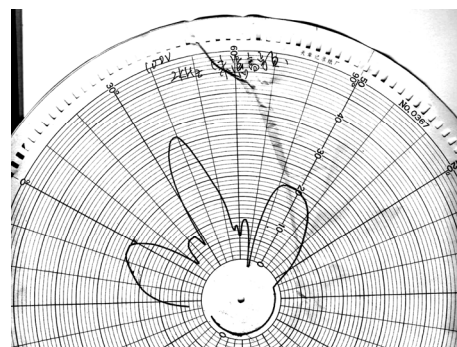


图 6 全频指向性图
Fig.6 Beam pattern for all of frequencies

分析图 6 所示结果可以得到: 全频合成声束主瓣尖锐, 实测结果与仿真结果相近, 合成声波传播表现出良好的信道约束, 高指向性特征明显。但其旁瓣幅值抑制效果起伏明显。

将水听器信号加以滤波, 滤除高频载波信号, 测试水声参量阵的生成与所发射声频声束的传播特性。测得输出 2 kHz 声频声束指向性如图 7 所示。 2 kHz 声频信号主要由主瓣组成, 无明显的旁瓣, 其 -3 dB 指向性锐角约为 2.6° , 有较好的指向性。

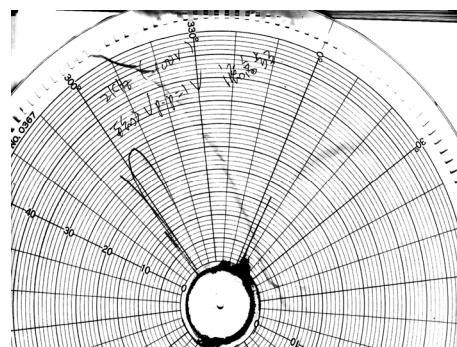


图 7 2 kHz 单频指向性图
Fig.7 Beam pattern for single frequency of 2 kHz

图 7 所示结果表明, 水声参量阵已在超声载波传输信道有效生成, 并同时“发射出”高指向的声频声束。声频信号出现在位于超声波信号传播信道中心的一个更窄的超声波信号声强最高的区域。其指向性较之全频合成声波表现更加尖锐。其指向性锐角性能参数指标相比于国外相关实验数据 (主瓣 -3 dB 指向性锐角约为 2.0° ^[15]), 其表现为稍宽。分析其原因, 国外学者在实验时, 采用 100 kHz 超声原波激励, 半径波长比变大, 因而超声载波的指向性增强。

而较之图 6 全频合成声束测试结果, 所生成声频信号表现出突出的旁瓣抑制效果。这表明合成声束中的旁瓣主要由超声载波产生。利用水声参量阵产生高指向性、无旁瓣声频声束的设计预想得到了实现, 样机在水下的实用性能亦得到了证明。

4 结 论

本文对宽带水声参量阵的指向性进行了理论分析与实验验证。实验以宽带水声参量阵原理为理论指导, 实际产生了低频高指向性声束。实验测试结果表明: 本文设计的宽带水声参量阵生成的 2 kHz 声束的-3 dB 指向性锐角约为 2.6°, 具有很好的指向性, 且旁瓣抑制效果好, 能够产生无旁瓣的高指向性低频声束。

参 考 文 献

- [1] 陶毅. 浅海水声信道抗多途跳频通信系统研究[D]. 福建: 厦门大学, 2009.
TAO Yi. Research on anti-multi-path frequency-hop-ping communication system in shallow water acoustic channel[D]. Fujian: Xiamen University, 2009.
- [2] 王英志, 章新华. 一种抵抗水声信道多途干扰的新的盲均衡算法[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 484-485.
WANG Yingzhi, ZHANG Xinhua. Underwater acoustic channel blind sparse equalization[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5): 484-485.
- [3] Stefano Fioravanti, Alain Maguer, and Arne Lovik. A synthetic aperture parametric sonar for buried object detection[J]. Acoust. Soc. Am, 1996, 100: 2636.
- [4] Moren. Per, Pihi, joergen. Sub-bottom characterization using a parametric sonar[C]// Proceedings of the 1998 Oceans Conference. 1998: 1828-1832.
- [5] Andrea Caiti. Seafloor exploration with parametric sonar systems: current issues and challenges for underwater vehicles[C]// Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications. 1998: 1074-1078.
- [6] Bjarte Berntsen, Jens M Hovem, Oddbjorn. Berm. Characterization of the seafloor using normal incidence acoustic backscattered time domain signals from a parametric sonar[C]// Proceedings of the OCEANS '99 MTS/IEEE - Riding the Crest into the 21st Century. 1999: 30-36.
- [7] ZHENG M, WANG L, Stoner R, Coates R F W. Underwater digital communication utilizing parametric sonar with M-ary DPSK modulation[C]// IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation. 1999: 213-218.
- [8] Gerard Loubet, Francois Vial, Abder Essebbbar, Laurent Kopp, Daniel Cano. Parametric transmission of wide-band signals[C]// Proceedings of the 1996 MTS/IEEE Oceans Conference. 1996: 839-844.
- [9] Westervelt P J. Parametric acoustic array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1963, 35(4): 535-537.
- [10] Berkta HO. Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications[J]. J. Sound Vib., 1965, 2(4): 435-461.
- [11] 陈敏. 声频定向系统理论与关键技术研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2008.
CHEN Min. Research on the theory and key technologies of audio directional system[D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [12] 张德银. 参量扬声器 DSB 法的互调失真研究[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 495-497.
ZHANG Deyin. Sound distortion of DSB method for parametric loudspeaker[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(4): 495-497.
- [13] Kamakura T, Aoki K, Kumamoto Y. Suitable modulation of the carrier ultrasound for a parametric loudspeaker[J]. Acustica, 1991, 73: 215-217.
- [14] Aoki K, Kamakura T, Kumamoto Y. Parametric loudspeaker-applied examples[J]. Electronics and Communications in Japan, Part-A, 1993, 76(8): 1127-1137.
- [15] Esipova I B, Popova O E, Voronin V A, Tarasov S P. Dispersion of the signal of a parametric array in shallow water[J]. Acoustical Physics(S1063-7710), 2009, 55: 76-80.