

双基地声纳矢量传感器直达波抑制技术^①邹吉武^② 孙大军 师俊杰 兰华林

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要 针对双基地声纳系统应用中存在直达声波干扰的问题,提出了矢量双基地声纳的概念。将矢量传感器的自然指向性以及指向性锐化思想引入双基地声纳系统。以单矢量传感器作为双基地声纳接收基地,利用电子波束旋转扫描技术,将指向性零点对准发射基地,完成了声源强干扰屏蔽下的目标探测。水池试验与湖上试验结果表明,单矢量传感器配合自体姿态信息,可完成对强声源干扰的抑制。此研究作为矢量双基地声纳系统设计奠定了理论与试验基础。

关键词 水声学, 双基地声纳, 矢量传感器, 直达波抑制

0 引言

水声传感器技术的发展,通常会带来声纳系统工作体制上的变革,也会推动信号处理技术的进步。自 1918 年法国物理学家 Langevin 发明了第一个压电式换能器以来,声纳系统的研究是围绕声场声压信息展开的。配合声压阵列信号处理技术,声纳系统解决了科学实践中的大量问题^[1,2]。

近年来,水下安静型潜艇的出现,对依托于声压传感器阵列的反潜声纳系统提出了新的挑战。美国于 20 世纪 90 年代建造的海狼级核潜艇在甚低频段外的自体辐射噪声已低于海洋环境噪声。俄罗斯的基洛级潜艇的辐射噪声可淹没于一级海况之下^[3]。但由于自体结构的原因,安静型潜艇在甚低频的辐射噪声很难降低。因此对安静型潜艇的探测技术,势必朝着主动、低频与小型化方向发展,如双/多基地反潜声纳网络^[4-8]。为在低频段获得大的空间增益与尖锐的指向性,势必需选用大规模的声压水听器阵列。而这在如声纳浮标这样的小尺寸声纳平台上,显然是无法实现的。

矢量传感器可空间共点拾取声压与水质点振速信息^[9]。由于振速通道响应的是质点振速在其轴上的投影,故矢量传感器具有不随频率变化的余弦指向性,且可方便电子旋转。通过声压、振速联合信息处理技术,可以形成锐化的指向性图。矢量传感器

这一优良特性,极适用于低频段的小尺寸声纳平台。双/多基地声纳由于收发分置,因而兼具主动声纳与被动声纳的特点,在反隐身、反水声对抗等方面具有很大的潜在优势,是未来对抗水下非合作目标的重要手段。双/多基地声纳工作时,接收基地会受到声源的强干扰,将声矢量传感器应用于双基地声纳接收基地,可利用其自然指向性消除声源强干扰。本文从基本理论出发,结合外场湖上试验的结果,分析论证双基地声纳矢量传感器抑制强声源干扰的算法的可行性。

1 单矢量传感器指向性

单个矢量传感器,其声压水听器为无指向性;振速传感器具有偶极子指向性。在海洋波导中,在垂直方向为驻波场,所以考察水平方向的二维指向性是合理的^[10]。下面从矢量振速投影模型出发,给出矢量传感器指向性的一般表达式。

1.1 单矢量传感器基本指向性

声压 $p(t)$ 为无指向性的,设

$$p(t) = x(t) \quad (1)$$

由声场欧姆定律,得

$$v(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \quad (2)$$

式中 ρ 为介质密度, c 为声速。对于行波,振速与达波方向相同或相反,故式(2)应为矢量表达式。由于

① 国防科技重点实验室基金(9140C2002020602)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:矢量声系统与矢量声信号处理;联系人, E-mail: zoujiwu@gmail.com (收稿日期:2009-09-03)

通常声速 c 不按矢量方法表示(顶箭头式),且不影响理解,故式(2)表示为标量形式。下同。

设 α 为质点振速与 z 轴正向夹角, θ 为其与 x 轴正向夹角,则按投影关系不难得到

$$\begin{cases} v_x(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \cos \theta \cos \alpha \\ v_y(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \sin \theta \cos \alpha \\ v_z(t) = \frac{1}{\rho c} x(t) \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

为简化叙述,不失一般性,定义式(3)中声阻抗 ρc 为 1。在二维水平面内,又有俯仰角 α 为 0,则式(3)简化为

$$\begin{cases} p(t) = x(t) \\ v_x(t) = x(t) \cos \theta \\ v_y(t) = x(t) \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中 $x(t)$ 为声压波形, θ 为水平方位角, $v_x(t)$ 与 $v_y(t)$ 为正交的振速分量,具有偶极子指向性。

组合两正交的振速分量 $v_x(t)$ 、 $v_y(t)$, 得到组合振速 $v_c(t)$ 与 $v_s(t)$ 为

$$\begin{cases} v_c(t) = v_x(t) \cos \phi + v_y(t) \sin \phi \\ v_s(t) = -v_x(t) \sin \phi + v_y(t) \cos \phi \end{cases} \quad (5)$$

式中 ϕ 为引导方位。联立式(4)、(5),整理得

$$\begin{cases} v_c(t) = x(t) \cos(\theta - \phi) \\ v_s(t) = x(t) \sin(\theta - \phi) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明 $v_c(t)$ 、 $v_s(t)$ 仍具有偶极子指向性,引导方位 ϕ 就是 $v_c(t)$ 的极大值方向,也是 $v_s(t)$ 的指向性零点方向。改变 ϕ 的值,可对矢量传感器的指向性电子旋转,或者制成全向的多波束扫描。而将 $v_s(t)$ 的指向性零点方向对准双基地声纳的发射基地,则可抑制声源强干扰。

1.2 单矢量传感器单边指向性

单矢量传感器输出的声压与振速量,可以组合成多种指向性形式,以满足不同情况下的需要。下面给出一种最大附加增益较大的单边指向性表达式^[10]。考虑单边指向性 $(p + v_c)v_c$ 的形式

$$[p(t) + v_c(t)]v_c(t) = x^2(t) \cos(\theta - \phi) [1 + \cos(\theta - \phi)] \quad (7)$$

相应的指向性为

$$R(\theta) = \cos^2 \frac{\theta - \phi}{2} \cos(\theta - \phi) \quad (8)$$

下一节,将就上文提及的两种指向性图,将理论结果与试验结果进行对比分析,说明矢量传感器对主动基地声源干扰的抑制作用。

2 试验结果分析

2008 年 6 月,哈尔滨工程大学声纳系统研究室在声纳系统环境实验室消声水池,对自研的同振式三维矢量传感器进行了指向性测量。试验水深 2.5m,声源距矢量传感器 2.3m。发射信号选用单频连续波。采用声源固定,接收器旋转的方式测量。最小角度间隔 0.5°。图 1 为单矢量传感器按式(8)得出的理论自然指向性(双“8”字型指向性),图 2、图 3 分别为 400Hz 激励信号下消声水池实测得到的 x 轴与 y 轴的自然指向性。通过对比可知,矢量传感器由于自身的物理特性,具有理想的余弦指向性。

图 4 为式(8)给出的“ $(p + v_c)v_c$ ”型组合指向性理论仿真结果;图 5 为消声水池实测数据按式(8)组合而成的指向性图。实测结果与理论结果吻合较好,联合处理后,具有较理想的单边指向性。

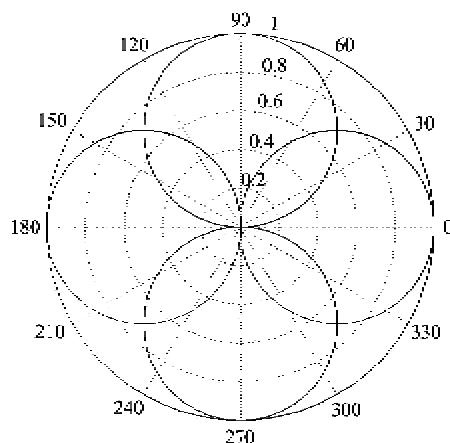


图 1 矢量传感器理论自然指向性

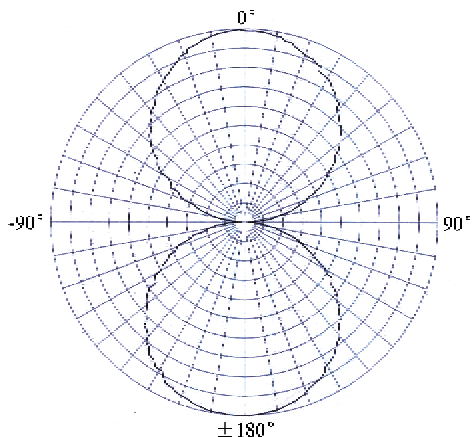


图 2 矢量传感器实测 x 轴自然指向性

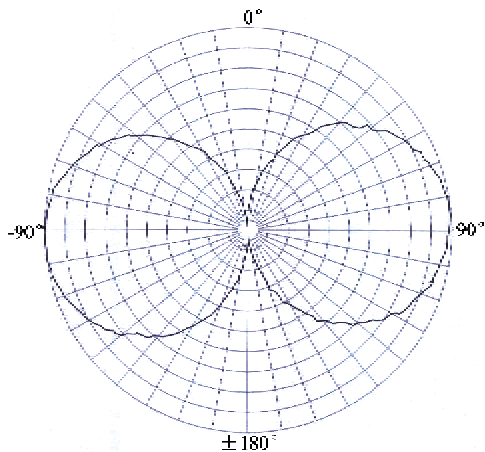


图 3 矢量传感器实测 y 轴自然指向性

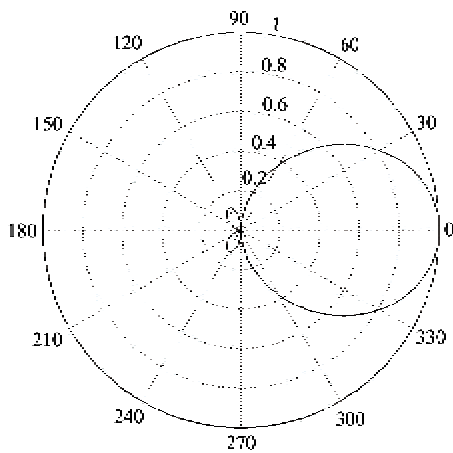


图 4 矢量传感器理论组合指向性

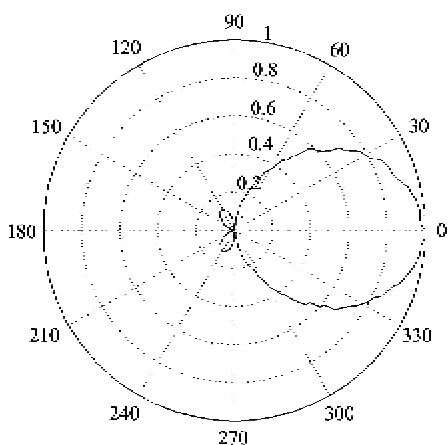


图 5 矢量传感器实测单边组合指向性

哈尔滨工程大学声纳系统研究室于 2008 年 10 月在吉林省松花湖进行了矢量双基地声纳关键技术的探索性系列试验。矢量双基地直达波抑制试验选用的是三维同振式矢量传感器。矢量传感器采用潜标工作方式,自由柔性悬挂于潜标的固定支架上。潜标体携带电子仓,内含信号采集存储设备,及三维

姿态传感器。姿态传感器可记录声矢量传感器的三维水下姿态信息。

试验点选择在开阔水域,潜标布放于水下 4m 深处,整体呈中性浮力,并锚定于湖底。声源选用低频鱼唇式弯张换能器,吊放于试验船舷侧。吊放深度为 4m,与潜标保持水平。潜标系统与声源距离为 140m。

图 6 为由低频声源模拟双基地声纳主动基地,单矢量传感器通过自然指向性电子波束旋转得到的直达波抑制空间增益分布图。潜标系统单路采样频率为 6.836kHz,振速矢量通道 3 路,声压通道 1 路,共 4 路信号。水下姿态传感器以 1 次/秒的速率记录矢量传感器的水下姿态信息。声源发射声波为频率为 400Hz 的单频连续波信号。图 6 中横轴为波束旋转角度量,每格 50°;纵轴为空间增益,即直达声波抑制增益,每格为 10dB。曲线簇中最下面实线为 4 秒钟时长,质点振速按式(5)中第 2 式归算的有效值随角度变化的结果;中间一条虚线为 8 秒钟时长结果;上面一条点线为 12 秒钟时长结果。配合试验船与潜标位置信息,以及矢量传感器水下坐标首向信息,可知当电子扫描角度 ϕ 旋转至 48° 与 228° 左右时,出现最小响应。即凹陷零点位置对准了声源方向。直达波抑制最大空间增益约为 20dB,且随着平均时间的加长略有增大。因为平均时间的增加,有利于抵消非相干噪声。试验结果与预期结果相符,矢量传感器的电子旋转技术,可用于双基地声纳的直达波抑制。

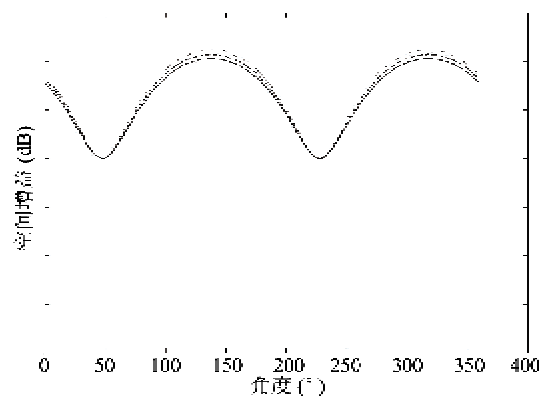


图 6 单矢量传感器电子波束旋转直达声抑制

3 结论

针对双基地声纳系统中存在的直达声波干扰问题,提出了矢量双基地声纳的概念。将矢量传感器的自然指向性以及组合指向性技术应用于双基

地声纳。通过电子波束旋转,将零陷点方向对准强干扰方向,即可实现干扰屏蔽下的回波信号检测。试验结果证明了该方法的可行性。

由于单边组合指向性的直达波抑制涉及各通道相位校准相关的技术,故本文仅提出了组合指向性的方法,未给出湖试数据结果。只给出了较简单的自然指向性的湖试结果。一般情况下,双基地声纳的直达波干扰强度通常要高出目标回波数 10dB 以上。这需要接收基地在不能在时域上区分直达波与目标反射波的情况下,具有很高的空间增益,以屏蔽直达波干扰。文中所应用的矢量传感器自然指向性抗干扰,湖试结果显示其仅提供约 20dB 的空间增益。更大的空间增益的获得,需配合矢量传感器通道一致性校准、相位校准与多阶复合指向性技术,或考虑选用矢量传感器基阵。本文在此提供了有益的思考。

参考文献

- [1] 张友文,张殿伦,田坦等.多接收基元合成孔径声纳频域数据融合算法.声学技术,2007,26(6):1094-1097
- [2] 兰华林,孙大军,卢逢春等.基于海底单应答器的水下潜器声学导航技术.哈尔滨工程大学学报,2007,28(12):1348-1351
- [3] Spain D, Hodgkiss G L, Edmonds W S, et al. The simultaneous measurement of infrasonic acoustic particle velocity and acoustic pressure in the ocean by freely drifting Swallow floats. *Oceanic Engineering*, 1991, 16(2): 195-207
- [4] 凌青,杨丽,蔡志明.双(多)基地声纳浮标系统在反潜中的应用研究.海军工程大学学报,2006,18(2):47-51
- [5] Saksena A, Benmohamed L, Dunne J, et al. Improving system-wide detection performance for sonar buoy networks using in-network fusion. In: Proceedings of the Military Communications Conference, MILCOM 2007, Orlando, USA, 2007. 4454977
- [6] Coraluppi S. Multistatic sonar localization. *Special Issue on HF/VHF Ocean Surface Radar*, 2006, 31(4): 964-974
- [7] Dasinger S B, Incze B I, Holz T A. A concept for efficient signal excess calculation for multistatic operations analysis. In: Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, ISAF, Singapore, 2006. 4393977
- [8] Hempel, C G. Adaptive track detection for multi-static active sonar systems. In: Proceedings of the OCEANS 2006, Boston, USA, 2006. 4099154
- [9] 惠俊英,刘宏,余华兵等.声压振速联合信息处理及其物理基础初探.声学学报,2000,25(4):303-307
- [10] 惠俊英,惠娟.矢量声信号处理基础.北京:国防工业出版社,2009.24-29

Vector sensor based reduction of direct wave interference for bistatic sonar systems

Zou Jiwu, Sun Dajun, Shi Junjie, Lan Hualin

(College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

In view of the problem of direct wave interference in bistatic sonar systems, the concept of vector bistatic sonar was proposed. The natural directivity and sharpening directivity of vector sensors were introduced into bistatic sonar systems. Taking single vector sensors as the R-static array, the target detection was finished under direct wave interference from the T-static with the nulling of directivity towards the T-static by using the electronic beam scanning technology. The results of the water tank and lake trial indicated that with the real time underwater self-gesture parameter, vector sensors can reduce direct wave interference from the T-static. The research established a theoretical and practical foundation for the design of bistatic sonar systems.

Key words: underwater acoustics, bistatic sonar, vector sensor, direct wave suppression