

第五讲 新型光纤水听器和矢量水听器*

孙贵青[†] 李启虎 杨秀庭 孙长瑜

(中国科学院声学研究所信号与信息处理实验室 北京 100080)

摘要 光纤水听器和矢量水听器作为当前水声研究领域最具有代表性的两大技术倍受业界关注. 光纤水听器的重要贡献在于, 从一个全新的角度出发, 试图解决传统的水声传感和声纳数据传输一体化设计和实现的一系列问题, 这有助于改善声纳系统的可靠性, 并且有可能降低其制造、使用和维护的总成本. 矢量水听器则由于其特有的指向性和矢量-相位处理方法, 在低频和甚低频水声微弱目标探测方面具有潜在的优势. 经过不懈的努力, 光纤水听器和矢量水听器系统已经从实验室逐渐进入到工程应用阶段. 这些对未来声纳系统的发展会产生相当重要的影响. 文章尝试从声纳设计的角度对这两者的技术现状进行简要综述, 包括它们各自的物理基础、工作原理、关键技术和应用领域.

关键词 光纤水听器, 矢量水听器

A novel fiber optic hydrophone and vector hydrophone

SUN Gui-Qing[†] LI Qi-Hu YANG Xiu-Ting SUN Chang-Yu

(Signal and Information Processing Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Fiber optic and vector hydrophones are two major types of hydrophones that are of great importance to underwater acoustics. The chief advantage of the former is that problems related to the integration of traditional underwater acoustic sensing and sonar data transmission can be resolved from an entirely new perspective, thus improving the reliability and possibly decreasing the total cost of manufacture, operation and maintenance of the sonar system. Because of its inherent directivity and unique vector-phase processing, the vector hydrophone possesses potential advantages in the detection of quiet underwater acoustic targets emitting low frequency and ultra-low frequency noise. Engineering applications for both types of hydrophone have gradually emerged from the research laboratory, and will play an active role in the development of future sonar systems. A brief overview is presented of these two state-of-the-art hydrophones from the viewpoint of sonar design, including the basic physics, principle of operation, key techniques, and applications.

Keywords fiber optic hydrophone, vector hydrophone

1 引言

声波作为一种机械波,可以在海水中进行远程能量传递,而其他类型的能量场在水中衰减很快,如以无线电波和光波为代表的电磁场.因此,至少从目前看来,还没有出现能够威胁到声场优势地位的技术,声场仍然是海洋深层信息收集、传递和处理的最

重要形式,从大尺度、全天候的全球海洋观测计划直到各种类型的声纳装备,都是这种形式的具体体现.水听器作为水下声波的接收设备是水声学最重要的声学测量仪器,一般可以分为无指向性和有指向性两大类.无指向性指的是水听器对来自于声场空间

* 国家自然科学基金(批准号 60532040/F010203)资助项目
2005-10-31 收到

[†] 通讯联系人. Email: sgq@ocean.ioa.ac.cn

各方向的声波具有相同的响应,不存在空间选择性;反之则为有指向性,即水听器只对空间某些方向的声波有响应。

自第二次世界大战之后的60年间,水声技术在军事需求的强势推动下得到了长足的发展,尤其是反潜战的切实需要。到目前为止,还没有什么技术能够像拖曳线列阵声纳那样深刻地影响现代反潜技术的发展,它是公认的20世纪水声技术最伟大的发现。到目前为止,水下拖曳声阵的水听器仍由无指向性的压电陶瓷传感器一统天下,在其他大多数声纳系统中也是类似的情况^[1]。传统的压电陶瓷水听器阵列声纳需要大量的用于信道复用和数据传输的水下电子元件,以及信号传输电缆和供电电缆,这些电子设备价格昂贵,重量不轻,往往会因为水下密封问题导致设备失效,使得系统可靠性严重恶化。随着科学技术的不断进步,光纤水听器和矢量水听器已经成为当前水声研究领域最具有代表性的两大技术而倍受业界的关注,逐渐从早期的实验室研究阶段迈向工程应用^[2-6]。

光纤水听器在声纳和石油天然气的地震勘探中已经发展了好多年。这两个应用现在都需要超大阵元数目(上千只传感器)的高度复用的传感器阵列,它们可用于一些海底阵和拖曳阵等声学探测系统中。光纤水听器作为光纤传感器的主要应用之一,早在1976年就由Bucaro等首先提出并演示^[7]。本文的光纤水听器均为无指向性的。随着光器件技术的巨大进步,由光纤水听器作为阵元构成的全光水听器阵列声纳得到了格外垂青。全光阵列在水下无任何电子元件,完全没有电子设备,在单个光纤上复用大量水听器,水听器和数据传输通道具有很强的抗电磁干扰能力。因此,系统更灵敏,重量更轻,可靠性更高,当然造价也更为经济。光纤水听器的重要贡献在于从一个全新的角度出发试图解决水声传感和声纳数据传输一体化设计和实现的问题,其目的并不是单纯地追求更高的声学性能(尽管它具有极高的灵敏度和动态范围),而是显著提升系统整机的可靠性,降低制造、使用和维护的总成本。相关系统已被英国国防研究局(DRA)、美国海军研究实验室(NRL)、日本冲电气(OKI)国防研发部,以及意大利Alenia防务系统等研究机构开发。

矢量水听器最早由Leslie等在1956年提出并演示^[8],几乎与此同时,莫斯科国立大学也在开展相应的研究工作。矢量水听器可以同步、共点测量声压标量和质点振速矢量,不同于传统的仅测量声压

标量的水听器。因此,矢量水听器可以切实改善声纳系统的声学性能,如阵列增益、定向精度等^[9]。矢量水听器也可以由光纤传感器构成,也是当前水声传感器的研究前沿之一。

本文尝试从声纳系统(不仅仅是水听器本身)的角度出发对光纤水听器和矢量水听器的技术现状进行简要综述,包括其物理基础、工作原理、关键技术和应用领域。

2 光纤水听器

光纤水听器是复杂的光、机、电一体化传感器,其在各种声纳应用中的潜能已被认识到,而且它已达到可与压电水听器相媲美的地步。其最大特点是具有足够高的声压灵敏度,通常比压电陶瓷水听器高3个数量级(60dB)。尽管现在开发了多种不同的光纤水听器,如强度调制型、偏振调制型、波长调制型和相位调制型,但最有前景的是基于相位调制的干涉型光纤水听器。它的成功和发展都依赖于水听器设计与光器件发展水平的相互结合。大多数高通道数光纤水听器阵列的研发工作都是据此开展的,因为它能够提供高声学灵敏度和强复用能力的最佳组合,是当前光纤水听器研究的成功范例。

2.1 物理和信号处理基础

光纤水听器是复杂的光机电系统,既需要物理知识阐述隐藏其中的自然规律,也需要信号处理手段进行实际应用,两者相辅相成。

干涉型光纤水听器是利用声波对单模光纤线圈中光的相位进行调制,光纤线圈即构成水听器的传感单元。在时分复用(TDM)系统中,水听器常由单个光纤线圈构成,但在频分复用(FDM)系统中,水听器常含有两个线圈,声信号是两个线圈之间的相位差。在这类设计中,必须安排一个线圈对声不敏感,或者声信号在两个线圈上产生反相变化(即推挽式工作模式)。图1给出了单线圈TDM系统的简单水听器设计。光纤缠绕在芯轴上,用环氧树脂或聚氨酯之类的材料密封。作用在芯轴上的声波引起芯轴结构形变,这些形变被传递到光纤线圈中(其中声波的波长远大于水听器尺寸,即可以视为点接收器)。

2.1.1 物理基础

当单模光纤受到轴向的机械应力作用时,光纤长度、芯径和纤芯折射率都将发生变化,这些变化将导致光波的相位变化。当光波通过长度为 L 的光纤

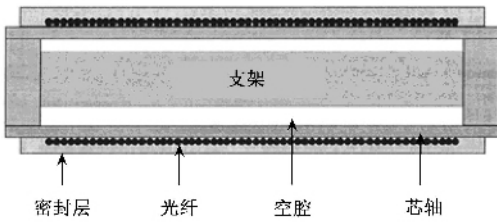


图1 芯轴型光纤水听器的传感结构

后,出射光波的相位延迟为

$$\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \beta L,$$

式中 $\beta = n_{\text{eff}}k$ 为光波在光纤中的传播波数 k 为光波在真空中的传播波数 $\lambda = \lambda_0/n_{\text{eff}}$ 是光波在光纤中的传播波长 λ_0 为光波在真空中的传播波长 $n_{\text{eff}} = 1.465$ 为光纤的有效折射率。那么,光波在外界因素作用下的相位变化为

$$\Delta\phi = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial\beta}{\partial a} \Delta a,$$

式中 a 为光纤芯半径,第一项表示光纤长度变化引起的相位延迟(应变效应),第二项表示感应折射率变化引起的相位延迟(光弹效应),第三项表示光纤半径改变所产生的相位延迟(泊松效应),由于其值相对较小,一般可忽略不计。因此,在长度为 L 的光纤中,声压变化 ΔP 产生的相位变化(或称为归一化灵敏度)由下式给出:

$$\frac{\Delta\phi}{\phi\Delta P} = \frac{1}{\Delta P} \left\{ \varepsilon_z - \frac{1}{2} n_{\text{eff}}^2 k L \left[\varepsilon_r (p_{11} + p_{12}) + \varepsilon_z p_{12} \right] \right\},$$

其中 ε_r 和 ε_z 分别是应变的轴向和径向分量 p_{11} 和 p_{12} 是 Pockel 系数 $\phi = n_{\text{eff}}kL$ 是总相位 $\varepsilon_r (p_{11} + p_{12})$ 对应光纤长度变化的贡献 $\varepsilon_z p_{12}$ 是光弹效应引起折射率变化所带来的贡献。

光波是电磁波,与无线电波同属一类。我们知道,无线电波可以在示波器上直接显示,但光波的频率远高于无线电波,示波器的扫描速度远远跟不上这样的高频振荡,因而无法显示光波的波形。实际上,光检测器所给出的读数,都只能是光强度在一段时间内的平均值,这段时间远大于光波振动周期。一般可以利用双光束干涉得到光的相位信息。典型的双光束干涉仪是 Michelson 和 Mach - Zehnder 干涉仪,两者区别在于前者只使用了一个耦合器,而后者需要两个耦合器。

2.1.2 信号处理基础

在上文涉及的物理基础中,强调的是声波对光相位的调制机理,本节的信号处理基础则偏重于从光相位中解调出声波信息,即将光变换到通常的电

压量上以方便显示、存储和计算。这两个部分相互呼应,共同完成光纤水听器的“感”“传”功能。

首先,回顾干涉型光纤水听器的基本工作原理。一般情况下,双臂干涉仪的输出强度由下式给出:

$$I = I_0 [1 + V \cos\phi(t)],$$

其中 I_0 是平均接收强度, V 是干涉条纹可见度。在光纤干涉仪中,待测量引起干涉仪一个臂上的光相位变化 $\phi_s(t)$ 。但是,环境扰动(如温度、压力等)往往引起不可预测的缓慢变化的相移 $\phi_d(t)$,因此,干涉仪相位可表示成 $\phi(t) = \phi_s(t) + \phi_d(t)$ 。扰动相移的不可预测性迫使光纤水听器使用询问方法以提取信号的相位。使用最广泛的是外差法和频率调制相位载波(FM PGC)或路径匹配差分干涉仪相位载波(PMDI PGC)。鉴于该问题的重要性和复杂性,它连同与其联系紧密的复用问题在下一节中专门阐述,本节仅对信号偏振衰落进行简要的评述。

使用偏振光源询问的干涉型光纤传感器所面临的共同问题都是偏振引起的信号衰落。标准的单模光纤都存在微小的线性双折射,环境扰动将改变这种双折射,使得光纤干涉仪出射光束的偏振态变化难以预测,往往导致干涉条纹可见度不可预知的损失。在最坏的情况下,出射光束的偏振态相互正交(对应于条纹可见度 $V = 0$),此时传感器信号消失。这一问题已在许多复用系统的实验中观察到,可以导致一个或多个水听器通道随机退化。对于单通道系统,输出端的干涉系数可通过输入偏振的主动控制来稳定,但在多通道系统中,这变得更为复杂,在所有通道同时达到良好的干涉系数格外困难,也是全光阵列的一个主要技术难题。尽管可以使用正交共轭镜(即法拉第旋转镜)或保偏光纤等办法,但是成本太高。解决这一问题并兼顾传感器复用的最佳方法是在光电检测器之前使用偏振分集接收器,因为对于三个独立的偏振器,若它们的轴彼此之间相差 60° ,则完全的衰落不会同时出现,即总可以从一个偏振器中观测到非零的可见度。

2.2 复用和询问

光纤水听器阵列必须作为一个统一整体进行设计,因为询问和复用不仅仅是面向阵列设计的,而且对水听器本身的设计和性能也有相当重要的影响。在常规的压电声纳系统中,水听器首先被设计,然后再开发复用技术构成阵列,前后两个过程彼此之间可以相对独立。用最少的光纤寻址多个传感器的能力,或并联或串联,是实现大型高效复用阵列的本质

要求. 复用方法的主要特点是复用传感器的性能应与单个传感器性能类似. 当前干涉传感器的复用技术正在被广泛、深入研究.

在干涉型水听器方案中, 声传感器由光纤线圈组成, 它形成干涉仪的一个臂, 作用在光纤上的声信号引起线圈中光的相位变化, 它可用适当的问询技术进行远程检测. 许多问询技术都能使它们自身适合于高效复用, 从而可使大量水听器复用到单个光纤上. 这对于现代多通道大规模声纳系统至关重要. 几种主要的复用/问询方案: 频分复用(FDM)、扩频复用、时分复用(TDM)等得到了相当多的关注. 值得注意的是, 复用技术对于确定系统的许多基本参数非常重要, 如系统噪声背景、工作频带和动态范围. 非复用系统的噪声背景比深海零级海况还要低 30dB, 动态范围超过 120dB, 指标远超过了绝大多数常规的压电水听器. 但是, 复用系统的相应指标通常有显著降低, 主要因为所采用的复用方法不同. 一般情况下, 复用系统的典型设计指标是要求系统噪声背景达到深海零级海况, 这也是大多数常规声纳系统所必须达到的. 本节着重介绍使用频度较高的频率复用、时分复用和时分复用/密集波分复用.

2.2.1 频率复用(FDM)

频率复用是通信行业术语, 在光学中一般称为波分复用. 基于源正弦调制的相位载波技术(PCG)特别适合于频率复用. 当水听器数目具有整数平方根时, 频率复用方法最有效. 激光频率引起的相位分辨率为 $1.8 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$, 传感器串扰级为 -60dB . 复用率被限制的原因: 一是由于光的损耗, 二是分离滤波器带宽. 但是对于 32×32 系统, 2kHz 带宽是实用的(即 1024 个通道, 32 个源). 这一系统框架被 NRL 在诸多演示项目中所采用, 包括 49 元舷侧阵和拖曳线列阵, 其中每个阵都使用 7 个光源, 16 个阵元以及 4 个光源的海底固定式垂直线阵. 这些系统的噪声背景比深海零级海况低 10dB.

2.2.2 时分复用(TDM)

时分复用是最早演示的技术, 作为最简单和最有效的方法得到了相当多的关注. 一般可分为两个主要的阵列类型: 透射型和反射型, 以及两个主要的问询方案: 平衡和非平衡. 问询通常多采用外差技术. 系统输出脉冲串, 每个脉冲对应一个水听器通道, 对脉冲解调得到声信号. 非平衡系统由 DRA 与 GEC - Marconi 合作开发, 路径差为 100—200m, 必须使用高相干长度的激光源, 该类系统中的相位噪声可用阵列中的参考水听器来降低. 平衡系统方案

最早由斯坦福大学提出, 在系统输入端或输出端使用参考干涉仪达到路径平衡, 可以显著降低对光源的苛刻要求. TDM 系统的复用首先受到有限光功率所制约, 其次受制于采样率. 因为随着通道数的增加, 由每个通道返回的光功率随之减小, 使系统噪声背景恶化. 对于典型的源级, 从单个光纤上驱动大约 30 个水听器是可能的, 在确保系统噪声级不超过深海零级海况的前提下. 这样的系统覆盖的频率可达 5kHz. 目前, 公开发表的文章所宣称的最大通道数是基于零差和 PGC 的方法(无光放大器), 每个波长可以支持 64 个传感器, 相位分辨率低于 $40 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$, 串扰级低于 -67dB . 相当多的研究表明, 时分复用可以达到相位分辨率、串扰和复用增益的最佳结合. 通过在传感器阵中使用掺铒放大器(EDFA)解决耦合损耗问题, 从而可以进一步增加复用传感器的数目. 例如, 在 10 个传感器构成的阵列中, 基于放大 TDM 方法的相位分辨率约为 $6 \mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$, 它的复用增益仍受限于传感器采样率, 即采样率与传感器总数成反比.

图 2 给出两种可能的 TDM 架构. 基于定向耦合器的内嵌 Michelson 可能是最简单的结构, 在图 2(a)中, 每个传感器仅用单个耦合器. 定向耦合器分离每个传感器, 在输出端的镜子得到入射脉冲的反射光, 镜子反射率一般大于 80%. 其他耦合器端口的匹配指数可以防止多个途径反射引起的串音. 在输出端, 脉冲串构成每个传感器的干涉信号. 每个脉冲的数字采样或电子控制信号对传感器信号进行外差或相位载波解调. 通过改变耦合系数, 使每个传感器返回的激光功率相等. 另一方法, 称为渐近阶梯结构, 如图 2(b)所示. 阶梯结构由横挡上的传感器构成. 入射到阵中的单个脉冲在每个传感器上产生干涉脉冲, 使用小路径平衡可以对传感器信号进行 FM PGC 提取. 这种前向耦合设计可使 10 个阵元传感器阵列中每个传感器返回的光波功率相等. 当 $k_{in} = k_{out} = 0.05$ 时 $k_i = 0.2$ $i = 1, 2, \dots, 10$. 精确匹配脉冲高度的代价是增加约 3 倍的定向耦合器数量.

2.2.3 时分复用/密集波分复用(TDM/DWDM)

提高复用增益另一个有前途的方法是时分复用和密集波分复用两种方法的联合, 复用传感器总数是 TDM 传感器数目(典型值约 30)与波长数目的乘积. 研究表明, TDM/DWDM 方法是最有价值的方法之一, 它仅用商业化的元器件就可以满足所有必要的指标. 如图 3 所示, 波长从 λ_1 到 λ_m 的脉冲入射到传输光纤中, 光纤加/减复用耦合器分配每个波长到

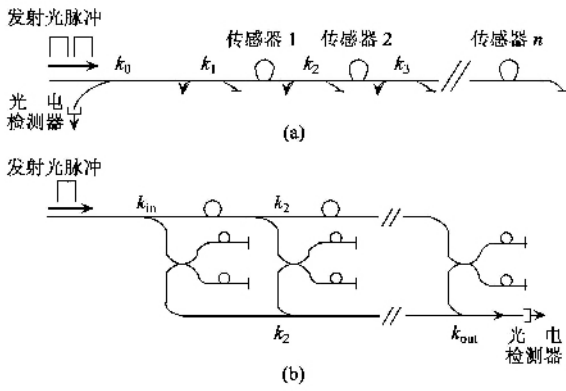


图2 基于迈克尔逊干涉仪的两种时分复用结构 (a)内嵌式; (b)渐进阶梯式

每个 TDM 子阵中,此法使用相互独立的发送和接收光纤,可以避免通道内串扰问题.图中虚线框设备表示可供选择.由两个子阵总共 96 个传感器的内嵌 Michelson 结构被成功实现,频率 500Hz 处的相位分辨率约为 $100\mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$,相应的声压分辨率约为 47.5dB(参考值为 $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$),并主要受环境噪声和激光源噪声限制.

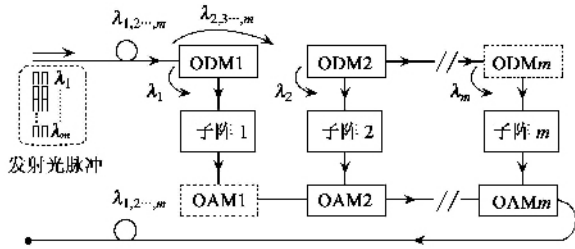


图3 时分/密集波分复用结构 (ODM 为光减法复用器,OAM 为光加法复用器)

2.3 水听器设计

光纤水听器设计原则就是最大化声信号所产生的应变以达到更好的灵敏度(即增敏处理),同时确保其他的指标符合要求,如平坦的频响、良好的动态范围、良好的波束图和合理的静压力冗余.满足相关特定应用噪声背景的水听器灵敏度(通常用 rad/Pa 表示)由单位长度灵敏度和传感光纤的长度所决定.单位长度灵敏度由水听器结构所确定,可通过选择水听器材料和各种机械放大手段来实现灵敏度最大化.一些设计方法使用极高顺性结构,使得只用很短的光纤就能达到预定的单位长度灵敏度.但是,过高的灵敏度往往导致水听器不能承受足够的静水压力而压缩了动态范围.另外一种方法是在 DRA 和 NRL 所采用的方案中,使用相当长的光纤(100 多米),这能产生很高的水听器灵敏度:对于 108m 长

的光纤,NRL 得到的响应为 6.2dB(参考值为 $1\text{rad}/\text{Pa}$)而 DRA 达到的指标为 6.5dB(参考值为 $1\text{rad}/\text{Pa}$),但反射结构中所用的传感光纤长度为 200m.这些足以使光纤水听器达到深海环境噪声背景或低于典型复用系统的噪声背景.单位长度灵敏度的最大化首先可由优化密封参数来达到.好多文章已经证明,最好的灵敏度可使用极低体积模量的密封得到.灵敏度的进一步显著增加可通过在水听器结构中结合空气来达到,要么是空腔,要么是泡沫层.这些空气可显著增加水听器的灵敏度,但存在水下耐压问题.好的耐压能力和较高单位长度灵敏度的有机结合,可使用压力平衡式水听器来达到,代价是增加水听器的复杂度.水听器物理尺寸的限制是由光轴的最小弯曲半径和整个光纤体积所决定的.标准的单模光纤最小弯曲半径在 1300nm 时为 2.5cm,在 1550nm 时为 3.5cm.但是,现有的特殊光纤,如 Corning Payout 光纤,弯曲半径在 1300nm 时为 0.5cm,有可能得到直径很小的水听器.NRL 已经研制出直径为 1cm 的水听器,DRA 使用直径小于 2.5cm 的水听器.水听器可制成不同形状,以适合于所有主要的声纳应用.依据所采用的设计,平坦的频响可达 6kHz.

英国研制的光纤海底阵(fiber-optic bottom mounted array, FOBMA)所使用的光纤水听器如图 1 所示.这是使用塑料芯轴的空气背腔芯轴设计,换能器直径 23mm,长度 160mm,水听器设计响应是 -128dB (参考值为 $1\text{rad}/\mu\text{Pa}$),即 $0.4\text{rad}/\text{Pa}$.水听器由 80m 长的单模光纤构成,所用光纤纤层直径为 $80\mu\text{m}$,包层直径为 $165\mu\text{m}$,数值孔径(NA)为 0.21.使用这一光纤是因为它比标准的通信光纤(NA 约 0.11)可以缠绕出更小的直径.光纤用紫外线固化丙烯酸盐缠绕的,并在线圈上浇注聚氨酯防水薄层.工作频带为 20Hz—1kHz,可在很宽的水深范围内工作.

2.4 光器件

现代光纤水听器阵列是复杂系统,它不但含有光源、光放大器,还需要其他各种光器件,如光开关、频率转换器、相位转换器、耦合器、反射器和接收器,还有偏振控制或分离器件.光纤水听器系统的许多光器件都得益于通信产业的巨大推动.本节主要介绍在光纤水听器系统中扮演重要角色的光源和光放大器.

2.4.1 光源

在任何光纤水听器阵列中,最重要的单个元件可能就是光源.所需的光源类型与复用方案和阵列

尺寸有关,两个最主要的指标是相干长度和光功率。依赖于高度平衡干涉仪的光纤水听器阵列通常使用二极管激光,因为它们便宜、可靠。这些源也用在相干复用系统中,在这样的系统中,实际上要求相干长度小于水听器的2个光路长度之差。对类似于DRA这种大路径非平衡结构的系统,需要一个很长的相干长度。二极管抽运Nd:YAG激光最适合于这类系统。确实,高功率(可达300mW)和紧凑的尺寸使它们成为许多光纤传感器阵列最有用的光源。即使在全平衡系统中,现在的趋势是使用相干长度更长的光源(如二极管抽运和DFB激光),因为它减小了光路平衡性的过高要求。这使得生产过程相当简单。对于未来,光纤激光正在走向市场,它们可以提供最好的价格、功率和相干长度相结合的产品。

在实际的非平衡光纤传感器系统中,相位分辨率常依赖于激光源在低频时的频率和强度的稳定性。激光源的功率起伏或强度噪声直接转化为光电检测器的噪声电流,它恶化了相位分辨率。一般为确保频率噪声贡献小于 $1\mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$,需要激光频率稳定度小于 $16\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 。掺铒分布反馈(DFB)光纤激光源(EFL)可达到稳健的单个纵向模式和单个偏振模式,输出功率几百微瓦,尺寸小,设计简单,生产期间可以精确设置波长,发射线宽窄,与传输介质有良好兼容性,发射频率有较低的温度灵敏度(约 $10\text{pm}/\text{K}$)。DFB EFL的噪声特性研究表明,隔声隔振是降低激光频率噪声的最有效手段。

2.4.2 光放大器

水听器复用的一个原则性限制是光功率有限,这限制了光纤水听器可被远程驱动的距离。但光放大器可使水听器阵列突破这样的限制,它直接增加光纤或半导体介质中的光信号,无需先转换到电子域上。DRA和南安普敦大学合作研究在水听器系统中使用光放大器这一课题,研究表明,把光放大器放置在光纤水听器系统的不同位置上,至少都可以增加一倍的水听器数目。原则上对于40dB光放大器,1mW激光源可推动140个水听器。实际上,在一个光放大系统中限制复用的主要是采样率,而不是激光功率。

现在用得最多的是掺铒放大器(EDFA)。在光纤链路中嵌入EDFA需要提供电功率以支持抽运激光。但为了维持一个无电子设备的阵列,抽运光由远程激光提供,它位于船载或岸基的询问电路中,这样的放大器称为远程抽运掺铒放大器(RP EDFA)。远程抽运掺铒放大器可以显著增加光纤链路的传输距

离,无需内嵌转发器和它们相关的电子设备。RP EDFA在阵列中的最佳安装位置常依赖于有效的抽运功率、光纤衰落和信号发送功率。RP EDFA作为前置放大器靠近接收端,一般被认为是更有效的,用较低的抽运功率就可达到较高的增益,从而有效地增加链路长度。

经过多年的努力,光纤水听器系统已经进入实用阶段。对于未来的军事应用,系统可能很庞大,有几千个水听器通道,阵长可达几百公里。对于这类系统重点是发展低成本器件,这样它们就能以高可靠性生存在敌方环境下。同时,相应的基础研究仍在进行,如光纤激光、光纤放大器、集成光学和Bragg光栅,这些很可能导致系统性能显著改善。一个迷人的前景是用Bragg光栅作为传感元件替代水听器中的光纤线圈,在直径为0.25mm标准光纤芯上制造声传感器是完全可能的,这些对声纳系统的未来发展有着非同寻常的意义。

3 矢量水听器

矢量水听器作为一种新型的水声测量设备,不但可以测量声场中最常见的标量物理量——声压,而且还可以直接、同步测量声场同一点处流体介质质点振速矢量在笛卡尔坐标系下的 x, y, z 轴向投影分量,一般多用三分量和二分量的形式。在结构上它由传统的无指向性的声压传感器和偶极子指向性的质点振速传感器复合而成。质点振速传感器是核心部件,其灵敏度的高低和工作的稳定性等制约矢量水听器设计、制作、加工、装配、校准和使用等诸多环节。矢量水听器技术的主要应用领域可以覆盖水声警戒声纳、拖曳线列阵声纳、舷侧阵共形阵声纳、水雷声引信、鱼雷探测声纳、多基地声纳、水下潜器的导航定位、分布式传感器网络等。在空气声学中,矢量水听器可以用于战场警戒探测直升机和隐形飞机,噪声源识别和声强、声功率测量等。

测量声场质点振速的想法很早就有:Rayleigh于1882年就已经演示了测量声波均方质点振速的可能性,并以此确定声强,这种装置就是空气声学中常说的Rayleigh盘。此后,Olsen等人都试图测量声能流密度,但由于质点振速测量的复杂性,这些努力没有得到真正的回报。而现在水声工程中所采用的大多数矢量水听器工作原理、基本形式和主要的设计理念均基于Leslie等人的观点。

3.1 物理基础

由传统的声压水听器测量可以得到声场势能密度,这是最常用的声场能量形式,但是矢量水听器除此之外还可以得到声场动能密度和声能流密度(声场坡印廷矢量),这些概念对于正确理解矢量水听器测量结果至关重要。

对于水声学的正问题求解而言,基于速度势的简谐声场理论已经相当完善,原则上可以通过求解含边界条件的亥姆霍兹方程,只要存在速度势函数 Φ 的解析形式,就可以由下式完整地确定声压 p 和质点振速 v 的解析形式:

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad v = -\nabla \Phi$$

并由此得到如下的声场能量形式:

$$E_p = \frac{p^2}{2\rho c^2}, \quad E_v = \frac{1}{2}\rho v^2, \quad J = pv.$$

它们分别是声压势能密度 E_p ,质点振速动能密度 E_v ,瞬时声能流密度 J ,也称瞬时声强,这三者之间的关系由下面的声能守恒方程联系:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot J = 0, \quad E = E_p + E_v,$$

式中 E 为声波的机械能。

声场的绝大多数研究是集中在与声压有关的声波势能密度上,而在与质点振速有关的声波动能密度和声能流密度方面的相应研究甚少,讨论的也仅仅是一些简单的情况,如平面行波场、驻波场、球面行波场、简单波导声场等。从上述声能守恒方程可以看出,声能流密度更适合于揭示声波能量“流动”的一般性规律。为什么会出现这些现象?归结到一点,那就是缺少相应的质点振速测量设备,在矢量水听器出现之前,基于声压水听器的水声测量技术已经相当完善,这是造成许多水声学正问题求解以声压量和声压势能密度为研究对象的根本原因,因为实验测量是水声学研究的物理基础。由此推想到声纳探测等问题,出现声压水听器占据统治优势也就不足为奇。

3.2 一般分类

质点振速传感器是矢量水听器的核心部件,因此,矢量水听器的分类主要是指质点振速传感器的分类,它原则上分为声压梯度式和惯性式两种类型。惯性式是指将惯性传感器,如加速度计等对振动敏感的传感器安装在刚性的球体、圆柱体或椭球体等几何体中,当有声波作用时,刚性体会随流体介质

点同步振动,其内部的振动传感器拾取相应的声质点运动信息,因此亦称为同振式。声压梯度式多是利用空间两点处声压的有限差分的原理来近似得到声压梯度,这可以通过反相串并联的线路连接在传感器内部实现,而声压梯度与介质质点的加速度之间的关系由 Euler 公式确定,通过计算间接得到介质质点振动信息。惯性式矢量水听器是对简谐声场中介质质点振动真正意义上的直接测量。由于这两类声矢量传感器的工作机理的差异,相应的性能参数也明显地不同。一般情况下都习惯于将惯性式质点振速传感器统称为质点振速传感器。根据换能器的换能原理,质点振速传感器可以分为:压电式、动圈式、电容式、光纤式、磁致伸缩式等。目前从总体上看,压电式的质点振速传感器因其性能稳定可靠,仍占据着当前研究和应用的主导地位。

3.3 声压梯度传感器

声压梯度传感器通常有两种设计理念。一种设计理念认为,最自然的声压梯度传感器是两个小间距分离的无指向性传感器,反相接线会使得信号相减,这一理念作为双麦克风技术常用于空气声强和阻抗测量,但要注意到,这些只对灵敏度和相位绝对匹配的传感器有效。这种思想体现在自 20 世纪 70 年代起盛极一时的双麦克风声强探头,在水声中一般称为双水听器探头。因为在继 Rayleigh 提出测量质点振速的想法之后,所进行的尝试由于质点振速测量的复杂性和当时技术条件的限制,使得研究人员不得不暂时打消直接测量质点振速的念头,继而转向采用这样间接的方法得到质点振速和声能流密度。总体上看,这一时期的声压梯度水听器主要存在两个致命缺陷:一是灵敏度偏低,只能在信噪比较高的条件下使用,如声源的近场声强测量等;二是性能参数不稳定,严重依赖于材料、结构和制作工艺等。很自然地,这大大限制了它的工程应用。这类声压梯度水听器较成功的应用实例是航空无线电声纳 DIFAR 浮标 AN/BQQ-53。另一种声压梯度传感器的设计理念是使隔开的弯曲传感器两侧(即双迭片)都受到声波作用,使得纯的电压输出对应于穿过弯曲元件的声压之差。时至今日,还有一些研究人员在此方向继续尝试,随着材料的进步,并通过良好的设计和工艺,基本上可以保证声压梯度水听器可靠地工作。尽管如此,随着惯性式声矢量传感器的研制成功,它基本上被排斥在当前矢量水听器研究的主流之外,因为现在商业化的微型加速度计具有更高的

灵敏度和更稳定可靠的性能。

声压梯度传感器实际上是直接测量空间小尺度上的多点声压标量,然后通过线路的反相并联或串联来得到声压梯度的有限差分近似,这与直接测量质点振速和质点加速度的质点振速传感器机理有显著不同,因此,有人认为,所谓的“声压梯度”传感器不应该列入到真正的直接测量声场质点振速的质点振速传感器中,而作为它的过渡角色可能更合适。

3.4 同振式

在现代水声工程中使用频度较高的一类声矢量传感器是基于惯性传感器的同振式传感器,它的主要优点在于,本身不产生明显的声场畸变,即可以视为点接收器,因此它的指向性比固定式的要好,而且性能参数更稳定,可以用于精确测量或长时间测量,在不同的应用中,同振式声矢量传感器的平均密度为 $0.9\sim 1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 。

有关惯性式矢量水听器的工作最早是由海军军械实验室(Naval Ordnance Laboratory)Leslie等人进行的,他们推导了刚硬、均匀球体在理想水介质声场中运动的数学表达式,并证明这类中性浮力的球体在低频运动时具有与相同位置处水质点相同的振速,即

$$v_1 = v_0 \frac{3\rho}{2\bar{\rho} + \rho},$$

其中 v_1 和 v_0 分别为同振球的振动速度与质点振速, ρ 表示水介质的密度, $\bar{\rho}$ 表示水听器的平均密度。当 $\bar{\rho} = \rho$ 时 $v_1 = v_0$ 。而且他们还提出,在这样的球体中安装拾取振速的传感器,以构成对质点振速敏感的水听器,但没有考虑球体密度、流体密度和粘度以及柔性悬挂系统等对质点振速传感器的灵敏度指向性和工作频带等性能的影响。尽管如此,这些开创性的工作已经清楚地表明,此类结构的水听器易于制作和校准,性能稳定,具有良好的指向性。更重要的是,他们还给出了质点振速传感器设计的基本原则,即中性浮力且质量中心与几何中心重合,以及一些重要的设计思想和实践。时至今日,这些对矢量水听器研制的关键环节仍然有着借鉴和指导意义。除了球体之外,声矢量传感器还有圆柱体、椭球体、圆盘等多种形式,当 $\bar{\rho} = \rho$ 时,不同形状引起的性能差异可以忽略。

现在商业加速度计在 $10\text{Hz}\sim 10\text{kHz}$ 的频带上具有平坦的响应,声波对矢量水听器悬挂系统的影响可能会成为测量声质点振速的水声惯性传感器设计

的某些约束。因为实际使用时不得不将惯性传感器悬挂在某些主平台上,以确保矢量水听器悬挂系统和平台不污染测量,这对于矢量水听器精确测量非常关键,此外还要考虑流体和壳体的密度以及流体的密度和粘度所引起的效应。同振式矢量水听器对流噪声更敏感,在使用时尤其要注意。实验表明,当流足够快以至于在传感器表面形成湍流时,质点振速传感器受到的影响甚于声压传感器,但是,如果外裹橡胶层,则可以显著降低流噪声。

3.4.1 质点振速型

声波作用下质点振动特性之一是质点振速,记录它的最自然的方法是在测量点放置一个小波长尺寸且平均密度等于水介质密度的物体,此时,物体将像质点一样进行振动,通过测量物体的振动速度,可以记录场的信息。在水声中多采用动圈式结构的质点振速传感器,因为它有良好的低声频和次声频性能。

第一个质点振速水听器由Kendall于1941年研制成功,并用于音频范围换能器校准,被命名为SV-1,工作频带 $70\text{Hz}\sim 7\text{kHz}$,直径 6.35mm ,灵敏度和阻抗级均比后来研制的SV-2要低一些;于1955年研制成功的低频质点振速水听器SV-2,其直径 12.7mm ,工作频带 $15\text{Hz}\sim 700\text{Hz}$,插入 500Ω 负载时的灵敏度为 -218.4dB (参考值为 $1\text{V}/\mu\text{Pa}$),它主要用于研究湖底的声学特征。这两个质点振速传感器都采用动圈型换能原理,因其灵敏度偏低,所以更适合于实验室校准和大信噪比下的水声测量工作。振速传感器与加速度传感器相比最大优势在于能够提供较高的甚低频(低于 100Hz)灵敏度,现在已经成功地用于反潜战。

3.4.2 振动加速度型

实际上,声质点振速测量除了可以使用质点振速传感器之外,还可以使用其他加速度和位移型的惯性传感器,因为在简谐波场中,它们之间的微积分关系可以转化为更清晰直观的线性关系。典型的惯性传感器是将压电加速度计埋嵌在小的刚体中,当刚体运动时,得到记录的输出电压。这种设计理念很大程度上依赖于无约束硬球在非粘无界流体介质中对声波的响应。

当前重点是研制可以应用到拖曳线列阵声纳中的微型矢量水听器,利用高灵敏度和低噪声的微型压电和光纤加速度计都是非常有可能做到的。这不但可以从根本上解决左右舷目标分辨的问题,而且会提高拖线阵的空间增益,有利于探测远程微弱目标。当然,也可能会伴随着出现一些新问题,如矢量

水听器对湍流脉动压力和振动加速度的响应,矢量水听器在拖缆中的姿态等等。

参 考 文 献

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理. 合肥:安徽教育出版社, 2002[Li Q H. Design Principle of Digital Sonar. Hefei: Anhui Education Press, 2002 (in Chinese)]
- [2] Nash P. IEE Proc. Radar, Sonar Navig., 1996, 143(3):204
- [3] Crach G A *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 2004, 115(6):2848
- [4] D'Spain G L *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(3): 1134
- [5] Shchurov V A *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1991, 90(2): 991
- [6] 孙贵青, 李启虎. 声学学报, 2004, 29(6):491[Sun G Q, Li Q H. Acta Acoustica, 2004, 29(6):491 (in Chinese)]
- [7] Bucaro J A *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1976, 60(5):1079
- [8] Leslie C B *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1956, 28(4):711
- [9] 孙贵青, 李启虎. 声学学报, 2004, 29(6):481[Sun G Q, Li Q H. Acta Acoustica, 2004, 29(6):481 (in Chinese)]

· 物理新闻和动态 ·

水在室温条件下结冰

大多数固体的表面都不是光滑的和非常平的. 如果两个物体相接触, 它们不会在外观相接触的整个面积上相接触, 而是在大量的微小的触点上相接触. 在正常的湿润的条件下, 水蒸气会在这些触点上凝聚, 产生微小的“毛细桥梁”. 这些桥梁会使两个表面粘在一起, 使之不容易相对滑动.

然而研究人员不能肯定, 如果液体被限制在两表面之间的小间隙中时, 是否还会是这样. 为了进一步研究这一问题, 研究者们用一种称作“摩擦杠杆(tribolever)”的仪器进行了一系列的实验. 这种仪器利用在一个微型的硅传感器中产生的微小的弯曲来探测小到 20pN 的力.

实验将一根细的钨丝连接到传感器上, 在干净的、高质量的石墨表面上来回扫描. 研究人员发现, 在室温条件下, 在两个表面之间形成了持续几秒钟的纳米量级的结冰的水桥. 在这种几何条件下, 水的实际作用象一种胶, 使表面间的摩擦力增加, 而不像润滑剂. 有关论文发表在 Phys. Rev. Lett. 96, 166103 (2006).

(树华 编译自 Physics Web News, 4 May 2006)

从早期宇宙以来, 粒子的质量在变吗?

众所周知, 有关物理常数的研究一直是非常重要的课题. 例如对精细结构常数 α 值是不是一个绝对常数就是前几年一直争论的焦点. α 常数定义为电子电荷的平方与光速和普朗克常数之积的比. 它是一个全面反映电磁力强度的量, 而电磁力是一个描绘原子间相结合的力. 对这个常数在物理界一直存在着两种观点, 一派认为 α 值在变化, 另一派则认为它是不变的.

现在对另一个物理常数 μ 提出了新的挑战, μ 常数是质子与电子质量之比, 其数值是 1836. 它是确立核力强度的标尺. 过去 μ 值是通过类星体中氢原子云发射出的吸收光谱线的位置来确定的. 最近位于荷兰阿姆斯特丹的 Vrije 大学的 Wim Ubachs 教授与他的同事们对 μ 常数作出了新的研究, 他们借助于超高分辨率的光谱仪极其困难地进入超紫外区域来研究实验室中的氢原子气体的谱线, 然后用这些数据与从远距离类星体中辐射来的氢原子云的吸收光谱相比较, 这些天文氢原子云的数据是由位于智利的欧洲南方观察站 (European Southern Observatory 简称为 ESO) 所提供的.

显然天文学上的氢原子云基本上是 120 亿年前存在的氢原子. 通过天文学的氢与实验室产生的氢所给出的数据对比可以为我们寻求 μ 值变化的线索. 因为特定谱线的位置是与 μ 值的大小有关的. 精确地对谱线定位就能定出 μ 的数值. 研究结果表明, 实验室所得到的 μ 值要比 120 亿年前的数值小 0.002% , 数据的统计误差是 3.5 个标准偏差.

(云中客 摘自 Physical Review Letters, 21 April 2006)