

数字全息声场成像测量技术综述(特邀)

钟志^{1,2}, 王琛^{1,3}, 刘磊^{1,2**}, 孙岩¹, 刘彬^{1,2}, 单明广^{1,2*}¹哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;²黑龙江省先进智能感知技术协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 声场测量技术是研究与评估声学现象的重要手段,可以帮助人们了解声音在空间中的分布和传播规律。通过测量声场的声压等各种参数,能够研究声音在特定环境下的传播特性、声音的质量、声波的相互作用等。相较于传统声场测量技术,数字全息声场测量技术将相机的像素点转化为高精度传感器,利用干涉原理记录声场引起的全息图,以数字方法恢复被声场调制的光场相位信息,进而利用声光效应实现声场定量成像重建,以视频图像方式可视化声波在介质中的真实传播特性,具有非侵入、全视场、高空间分辨率等优点。本文主要从数字全息声场测量技术的基本原理、当前主要测量方法和声场相位恢复方法三个方面展开介绍和分析,并对数字全息技术在声场测量中的应用前景进行了展望。

关键词 声场成像测量; 数字全息; 声光效应; 相位恢复

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240577

Review of Digital Holographic Sound-Field Imaging Measurement Technology (Invited)

Zhong Zhi^{1,2}, Wang Chen^{1,3}, Liu Lei^{1,2**}, Sun Yan¹, Liu Bin^{1,2}, Shan Mingguang^{1,2*}¹College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;²Heilongjiang Collaborative Innovation Center for Advanced IntelliSense Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China;³Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

Abstract Sound-field measurement technology is an important means of studying and evaluating acoustic phenomena as it clarifies the distribution and propagation laws of sound in space. By measuring various parameters such as sound pressure in the sound field, researchers can study the propagation characteristics and quality of sound as well as the interaction of sound waves in a specific environment. Compared to traditional sound-field measurement technology, digital holographic sound-field measurement technology converts the pixel points of a camera into high-precision sensors, exploits the interference principle to record the hologram created by the sound field, and digitally recovers the phase information of the light field modulated by the sound field. These processes quantitatively reconstruct an image of the sound field using acousto-optic effects. The real propagation characteristics of sound waves in the medium can be noninvasively viewed as a video with a full field of view and high spatial resolution. This review focuses on the basic principles of digital holographic sound-field measurement technology, conventional measurement methods, sound-field phase reconstruction methods, and the application prospects of digital holography technology in sound-field measurements.

Key words sound-field imaging measurement; digital holography; acousto-optic effect; phase reconstruction

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-03-12; 录用日期: 2024-05-14; 网络首发日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(62375063)、国家重点研发计划(2022YFF0705802)、黑龙江省自然科学基金(LH2023F027)、航天科技集团应用创新计划(6230113010)、哈尔滨工程大学特色学科基础研究稳定支持专项(KYWZ220240805)

通信作者: *smgsir@gmail.com; **liulei2020@hrbeu.edu.cn

1 引言

声场测量能够将声学特性不可见的时空分布可视化,有助于人们了解声源和声场并理解声学现象,是解决声音工程应用问题尤其噪声问题的有效工具,已成为声学测试领域的研究热点及技术难题^[1-4]。目前,最广泛应用的声场测量技术是以麦克风作为传感器的侵入式声场测量技术^[5-7]。然而麦克风本身会对待测声场产生干扰,因此不利于对近场或狭小范围声场的高精度成像测量。光学声场测量技术由于具有非侵入式的特性,已成为声音测量的替代选择。光学声场测量技术利用声光效应或声光相互作用^[8-9],将声压或声粒子速度转换为探测光的振幅和/或相位变化,通过观测声压对介质折射率变动来全面描绘声学现象的方法,有效解决了传统麦克风测量方法的诸多问题。因此,许多研究致力于开发各种光学方法,包括纹影法^[8-11]、激光多普勒测振法(LDV)^[12-15]、电子散斑干涉法^[16-19]等。由于光学方法的非接触性质,它们有望开启声音测量的新应用,并被认为是解释声学领域至今尚无法解释现象的有效手段。然而这些光学声场测量技术仍旧存在很多缺点:纹影法的测量精度受到待测声场频率的限制,随着待测声场频率的降低而降低,因此仅对超声声场的测量有较好的效果;LDV对声场的测量精度较高,但该方法仅能实现单点测量,对于声场测量需要进行扫描操作,无法实现全视场的同步测量,因此只能测量稳定的单频声场;电子散斑干涉法能够实现对声场的全场测量,但通常需要多幅图才能得到一帧的声场信息,因此仍旧存在实时性不高的问题。随着对声场测量需求的不断增加,声场测量领域需要实时性更好、精度更高并且更能直观反映声波传播状态的测量手段。

数字全息技术基于物光和参考光干涉生成全息图,利用数字相机记录全息图,并利用计算机获取待测物体的相位,进而通过解析待测物理量和光相位之间的联系实现定量成像^[20-23]。该技术具有灵敏度高、全场非接触、数字自聚焦、像差数字自补偿等能力,已被广泛应用于微细加工、生物检测和材料工程等领域,并被不断拓展至新的领域^[24-26]。随着计算机技术以及高速相机的不断发展,数字全息技术在声场测量领域也开始得到应用。作为一种先进的声学测试技术,数字全息声场测量技术旨在实现对声场的全方位、高精度、高效率的测量和分析。该技术以声光调制原理为基础,利用光的干涉提取由声场调制的光相位,并利用数字图像传感器将声场全息图直接记录成可被计算机存储和处理的数字文件,然后将其数值重建以达到声场可视化的目的。因此,通过分析由声场调制的光相位,利用声光效应可以实现对声场的空间和时间分布成像测量。数字全息声场测量技术的测量精度不受声场频率影响,且该技术直接使用扩束后的光斑照明声场,无

需扫描操作,具有较高的精度与实时性,是实现声场测量与分析的有效手段。

本文将重点讲述数字全息声场测量技术的主要技术手段及其发展与应用,包括声场测量原理、声场测量方法以及声场提取方法,并且对数字全息声场测量的应用前景进行了展望。

2 数字全息声场测量原理

当声波在介质中传播时,介质的密度和折射率发生改变,使得探测光发生散射或衍射现象,而声光效应的实质就是研究光通过声波扰动的介质时发生的相位或振幅变化。数字全息声场测量技术以声光效应为基础,利用声音对光相位的调制,通过提取声场引起的物光相位变化,从而实现对声场的可视化测量。为了获得光相位变化,数字全息技术利用一束参考光与物光在高速 CCD 相机靶面发生干涉,并且记录声场全息图序列 $I(x, y, t)$, 表示为

$$I(x, y, t) = I_r(x, y) + I_s(x, y, t) + 2\sqrt{I_r(x, y)I_s(x, y, t)} \cos[\varphi(x, y, t)], \quad (1)$$

式中: $I_s(x, y, t)$ 和 $I_r(x, y)$ 分别代表物光和参考光的强度; $\varphi(x, y, t)$ 代表声场对光相位的调制。进而,利用相移法或者傅里叶变换法等数字全息相位重建方法,即可从声场全息图中解析出被声场调制的光相位信息。

为了从被调制的光相位中提取声场信息,需要利用几何光学近似以及声光理论将声场中的光传播过程公式化。假设整个过程为绝热过程,声压 p 与介质密度 ρ 之间的关系由下式给出

$$\frac{p + p_0}{\rho_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\gamma, \quad (2)$$

式中: p_0 和 ρ_0 分别代表静态条件下介质的压力和密度; γ 为比热比。根据格拉德斯通-戴尔关系,气体的密度与折射率的关系可表示为

$$\frac{N - 1}{\rho} = C_{\text{const}}, \quad (3)$$

式中: N 代表介质的折射率; C_{const} 代表常数。结合式(1)和(2),介质的折射率可以表示为

$$N = (N_0 - 1) \left(1 + \frac{p}{\rho_0}\right)^{1/\gamma} + 1. \quad (4)$$

当 $p/p_0 \ll 1$ 时,式(3)可以近似转化为

$$N = N_0 + \frac{N_0 - 1}{\gamma \rho_0} p, \quad (5)$$

式中: N_0 代表静态条件下介质的折射率。在数字全息声场测量中,通常声音的波长远大于光的波长,因此可以用几何光学近似来描述光在声场中的传播。此时,被声场调制的光波前相位可表示为

$$\varphi = k \int_L N dr = k \frac{N_0 - 1}{\gamma \rho_0} \int_L p dr, \quad (6)$$

式中: L 表示声场探测光路。

从式(6)可以看到,被声场调制的光波前相位与沿光路方向的声压线积分相关。由于被声场调制的光相位 φ 可以通过数字全息声场测量技术直接测得,因此在确定介质内光的传播路径信息的情况下,根据式(5)可精确地推导出待测声场的声压分布 p 。需要注意的是,数字全息技术利用光波无侵入成像探测声场,无需将任何设备直接置于声场之中,整个测量过程不会对声场原有的信息产生任何影响,从而保证声场信息获取的完整性和准确性。

3 数字全息声场测量结构

数字全息声场测量是数字全息技术和声场测量技术的有机结合。数字全息技术基于物光和参考光干涉生成全息图,利用数字相机进行记录并获取待测样本的相位,进而通过解析待测物理量和光相位之间的联系实现定量成像测量。近些年来,随着高速相机技术的不断进步,数字全息技术已经逐渐在声场成像领域有了崭新的发展。在数字全息声场测量中,声场信息通过光学干涉原理获取成为声场全息图,然后对其进行数值重建处理,将其转化为可视化的形式。因此,可以利用声光效应,通过测量声场引起光的相位变化来实现声场的时空分布成像。下面将根据光路结构的不同,分别介绍现阶段数字全息声场测量方法的研究进展。

3.1 马赫-曾德尔干涉结构

2014年,日本学者Matoba等^[27]首次将数字全息技术应用于声场测量领域,通过马赫-曾德尔干涉结构实现了对声场的成像记录。该方法的原理如图1(a)所示,由激光器发出的探测光经过分束器后被分成两束,分别准直扩束后,其中一束光作为物光,通过声波引起的介质折射率变化对其相位分布进行调制,另一束光为参考光。这两束光随后通过另一个分束器合并,并在相机靶面上以一定的角度会聚并发生干涉,最终生成离轴声场全息图。图1(b)展示了从声场全息图恢复声波信号的过程。通过对采集到的声场全息图序列进行相位恢复,得到声场相位图序列。进而在重建相位分布的每个像素处获得声场时间相位分布信号,该信号可以被认为与待测声信号相同。

图2为该方法对440 Hz音叉产生的声场测量结果。其中,图2(a)展示了待测声场的时间相位分布信息。从图中可以明显地看到,声音信号呈现为正弦曲线,并且平均相位随着时间的变化而减小。为了改善相位分布,通过对局部平均相位进行减法运算,得到了图2(b)所示的结果。对图2(b)进行傅里叶变换后,得到的频谱如图2(c)所示。可以清楚地看到,在440 Hz处出现了峰值,与音叉的频率相同,说明了该方法能够准确地测量声场信号及其频率。由于具有结构简单、易于搭建的优点,基于马赫-曾德尔干涉结构的离轴数

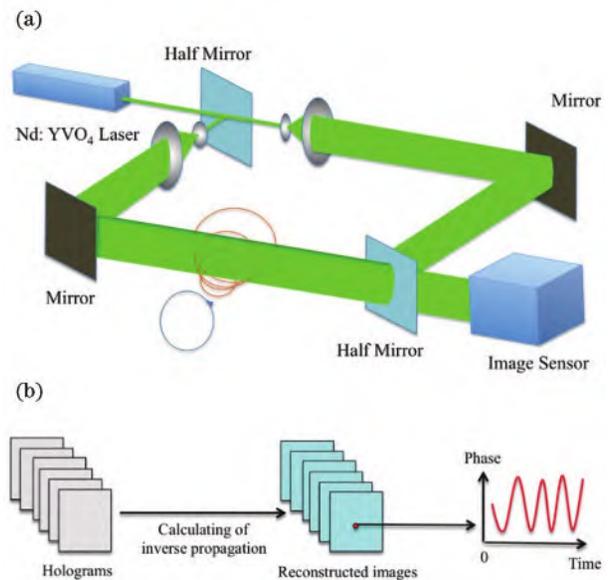


图1 基于马赫-曾德尔干涉结构的离轴数字全息声场测量方法原理^[27]。(a)系统结构;(b)声场重建过程

Fig. 1 Principle of off-axis digital holographic sound-field measurement method based on Mach-Zehnder interference structure^[27]. (a) System structure; (b) sound-field reconstruction process

字全息声场测量方法一经提出,就被 *Nature Photonics* 专门报道^[28]。

在此基础上,Takase等^[29]引入了并行相移数字全息技术,通过单次曝光记录多个相移全息图,进而通过四步相移法重建待测声场相位信息。与离轴数字全息声场测量方法相比,并行相移数字全息可以充分利用相机的空间带宽积,然而该方法需要高速偏振相机作为传感器,因此系统成本较高。

需要说明的是,基于马赫-曾德尔干涉结构的声场测量方法物光和参考光的传播路径不同,虽然可以实现声场的定量测量,但存在一些限制:首先,物光和参考光的路径不同,不仅结构庞大,而且系统的空间和时间稳定性容易受到影响。为了保持系统的稳定性和准确性,需要采取措施来补偿路径不同导致的光程差,这会增加系统的复杂性和调试难度。其次,为了避免声场对参考光的影响,需要在物光和参考光路之间额外添加隔音装置,这不仅增加了系统的复杂性,还限制了系统在近场或狭窄空间的声场测量中的应用。

3.2 斐索干涉结构

众所周知,共光路数字全息结构的物光和参考光经过相同的传播路径,呈现出单光束探测成像的特性。与传统的分光路结构相比,这种设计不仅使得系统结构更为紧凑,还大大提高了系统的稳定性。Hermawanto等^[30]提出了一种基于斐索干涉结构的反射式并行相移声场测量方法,该方法采用了共光路结构,将斐索干涉仪与高速偏振相机相结合。图3为该

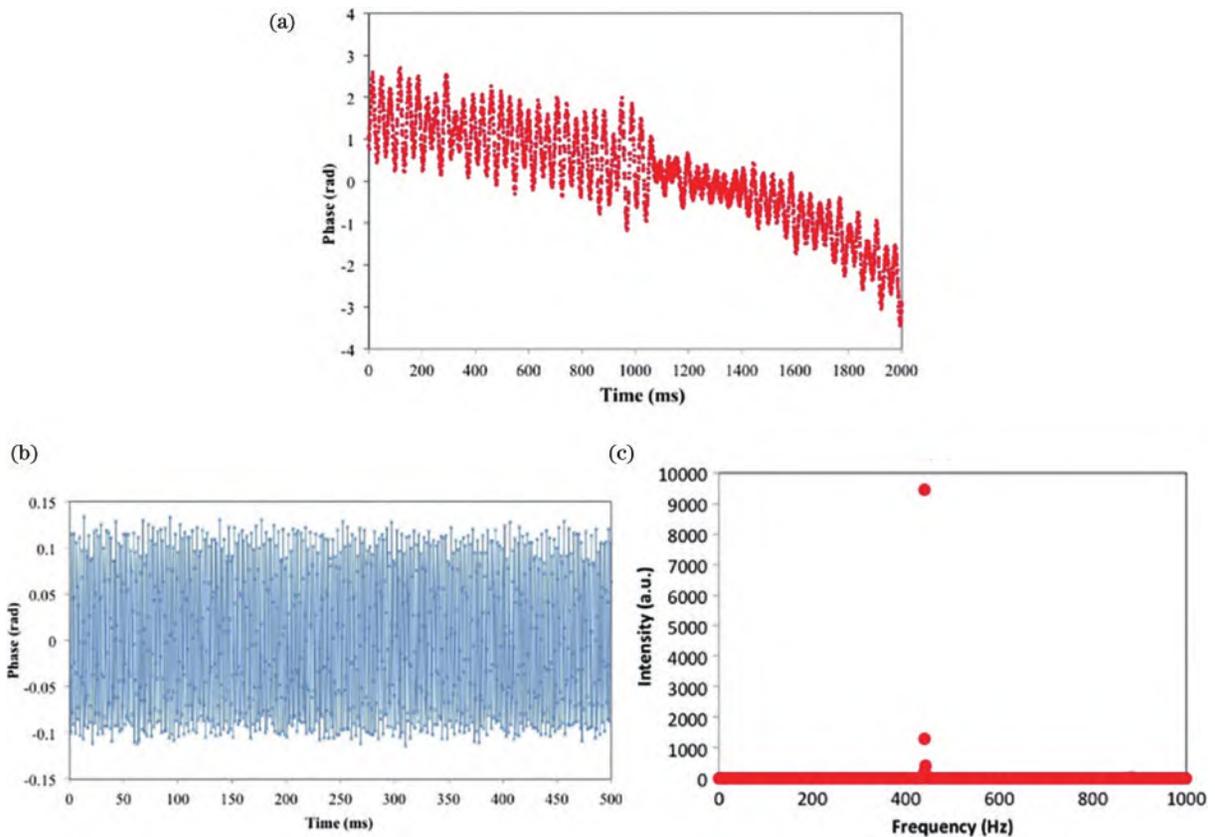


图 2 基于马赫-曾德尔干涉结构的离轴数字全息声场测量方法的声场重建结果^[27]。(a)声场时间相位分布;(b)处理后的声场时间相位分布;(c)声场频谱

Fig. 2 Sound-field reconstruction results of off-axis digital holographic sound-field measurement method based on Mach-Zehnder interference structure^[27]. (a) Sound-field time phase distribution; (b) sound-field time phase distribution after processing; (c) sound-field spectrum

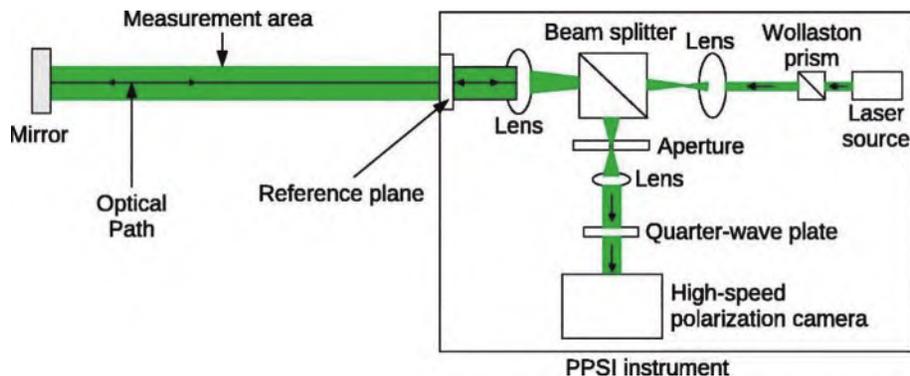


图 3 斐索干涉结构示意图^[30]

Fig. 3 Schematic of Fizeau interferometer structure^[30]

方法的结构示意图,激光发射的单色光透射出分光棱镜后,经过一个半透半反平面被分成两束光。其中一束光继续透射出去,作为物光光束;另一束光则被半透半反平面反射,作为参考光束。这两束光在传播过程中共享相同的路径,因此具有共光路特性。随后,这两束光在干涉过程中发生相互作用,形成干涉图样。通过利用并行相移干涉原理,在高速偏振相机上同步获取多个具有不同相移量的干涉子图。这些干涉子图包含了声场的信息,可以用于进一步分析和处理,从而实

现声场成像测量。

图 4 为基于斐索干涉结构的并行相移声场测量方法的声场成像结果。其中,图 4(a)为高速偏振相机采集到的原始声场图像,将相同相移量的像素提取后进行插值,得到四幅等间隔的相移全息图,如图 4(b)所示。最后,利用四步相移法进行相位恢复得到最终的声场相位图,如图 4(c)所示。可以看到,声波的传播形态清晰可见。

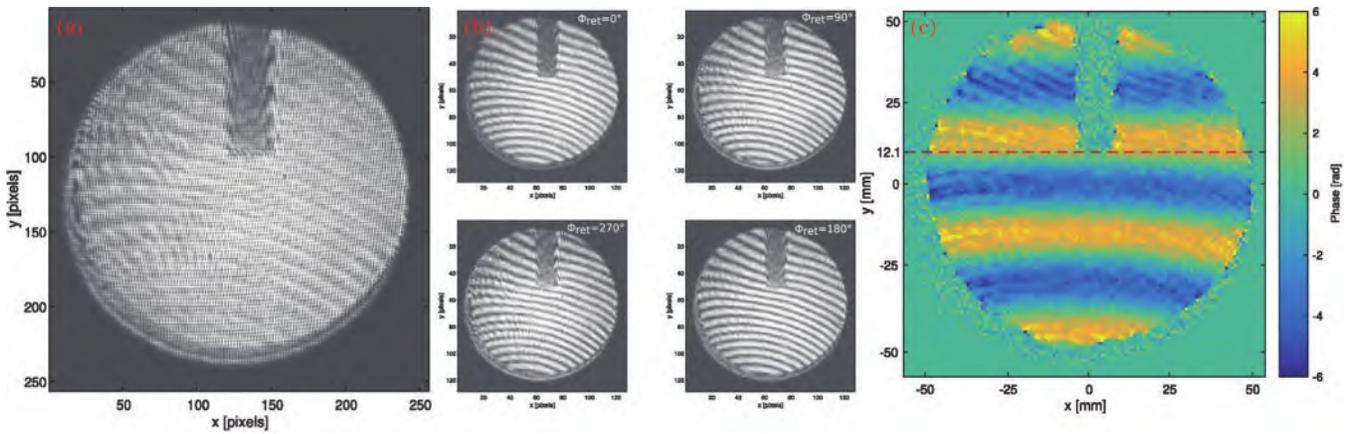


图 4 斐索干涉结构的声场成像结果^[30]。(a)原始声场图像；(b)相移全息图；(c)声场相位图

Fig. 4 Sound-field imaging result of Fizeau interferometer structure^[30]. (a) Original sound field image; (b) phase-shift holograms; (c) phase of sound field

基于斐索干涉结构的并行相移声场测量方法的系统结构由于物光光路与参考光光路沿同一方向传播,有效地解决了分光路结构由于物光和参考光受环境干扰不同而引入噪声的问题。然而,由于斐索干涉结构中的半透半反平面调节十分困难且不稳定,因此系统的搭建和调节较为困难。

3.3 共路点衍射干涉结构

为了解决斐索干涉结构元器件复杂、调节困难的问题,Rajput等^[31]提出了基于共路点衍射干涉结构的数字全息声场测量方法。该方法的测量系统结构以点衍射技术为基础,通过在装置中放置倾斜的分光棱镜作为分光元器件,实现了共光路离轴数字全息结构对声场的测量,其基本原理如图5所示。由激光器发出的光被声场调制后经过透镜聚焦,并被倾斜放置的分光棱镜分成相同的两束光,被放置在透镜傅里叶平面上的双孔滤波器调制,其中一个孔为窗口可以将原光束完整通过作为物光,而另一个孔为针孔滤波器,其大

小通常为艾里斑直径的一半,焦点位置的光被点衍射成为不含物体信息的参考光,最后两束光在相机平面干涉形成全息图。

图6为频率为1440 Hz的声场测量结果。图6(a)为一帧记录的声场全息图,其傅里叶变换如图6(b)所示。图6(c)为图6(a)全息图的重建相位图像。从所有重建声场相位图像序列中选取相同位置的像素点来获得时间相位轮廓,声场的时间相位分布如图6(d)所示。之后对图6(d)中的测量结果进行傅里叶变换,得到其频谱图如图6(e)所示。可以看出,频谱的峰值为1440 Hz,证明了该方法对声场频率测量的准确性。

该结构采用的分光元件简单,但由于利用分光棱镜分光面两侧进行物光和参考光分离,对分光棱镜的倾斜角度控制严格,因此系统调节依旧困难,而且由于分光面自身厚度及工艺误差,极易引入相位噪声,从而造成全息图对比度较差,进而影响相位恢复结果。

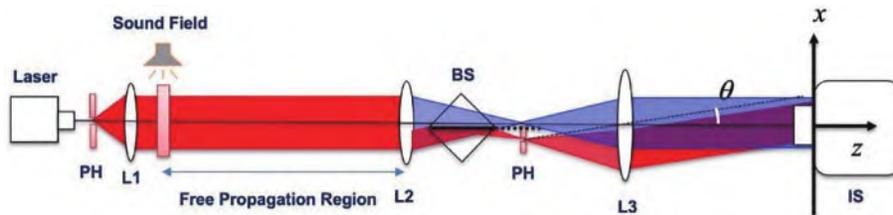


图 5 点衍射共路离轴数字全息的声场测量系统结构^[31]

Fig. 5 Point diffraction common path off-axis digital holography sound-field measurement system structure^[31]

在此基础上,本团队Zhong等^[32]提出了一种光栅离焦共路离轴数字全息声场测量方法,如图7所示。该方法以点衍射数字全息技术为基础,改进了倾斜的分光棱镜分光结构,利用4f系统第一透镜后的离焦光栅进行分光,实现了对声场的高稳定成像测量。其中,傅里叶平面0级和+1级衍射光之间的间隔距离 p 与光栅离焦位移 Δf 成正比。因此,可以通过线性移动光栅和/或双孔滤波器来灵活地将两

个光束与双孔滤波器匹配,因此系统调节过程更加简单。

综上所述,数字全息声场测量方法以光的干涉原理为基础,利用扩束后的光斑直接对声场进行采集成像,进而提取被声场调制后的光相位信息。与传统声场测量方法相比,该方法无需任何扫描操作,仅通过单幅全息图即可实现单个时刻的声场成像测量,因此具有更高的时间与空间分辨率。此外,该方法的测量精

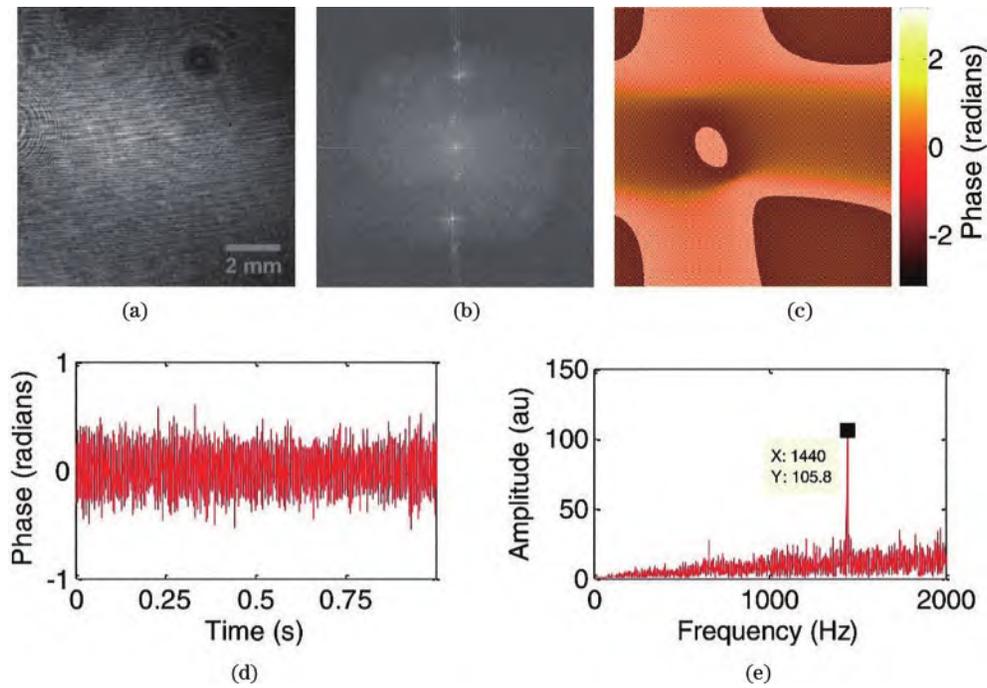


图6 1440 Hz声场的记录和测量结果^[31]。(a)记录的全息图之一;(b)全息图的傅里叶变换,(c)重建的相位图像;(d)时间相位分布;(e)频谱

Fig. 6 Results of the recording and measurement of 1440 Hz sound field^[31]. (a) One of the recorded holograms; (b) Fourier transform of hologram; (c) reconstructed phase image; (d) time phase distribution; (e) spectrum

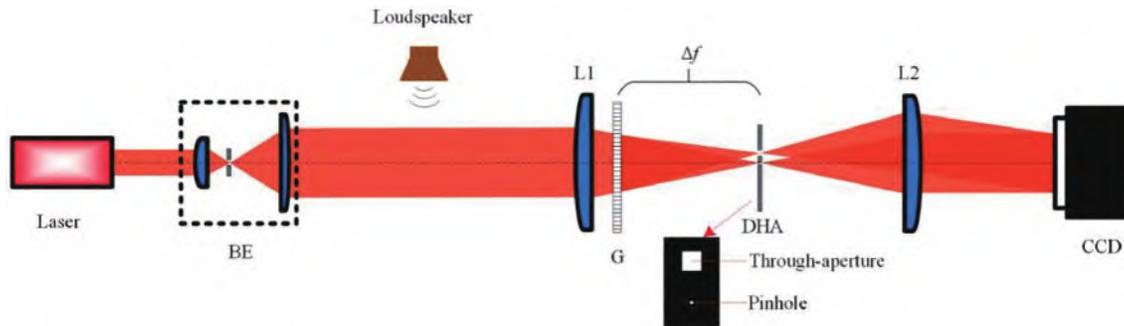


图7 光栅离焦共路离轴数字全息声场测量结构^[32]

Fig. 7 Sound-field measurement system structure of grating defocused common path off-axis digital holography^[32]

度与待测声场频率无关,因此在低频声场测量领域也具有很高的应用价值。

4 数字全息声场相位恢复方法

利用数字全息声场测量方法获得声场全息图序列后,需要对其进行相位恢复的处理,进而获得待测声场信息。与传统静态样本相位恢复不同,在声场测量过程中,由于相机采样的速率较高,需要进行大量的全息图处理。此外,由于声场对光相位的调制很小,声场往往会被埋在背景相位中不可见,因此背景相位的去除也是至关重要的步骤。基于上述限制,国内外研究人员对数字全息声场相位恢复方法开展了研究。本节将以离轴数字全息声场相位恢复为例进行介绍与分析。

4.1 传统声场相位恢复方法

传统声场相位恢复方法是指将每一帧声场全息图

单独进行相位恢复与背景相位去除的方法,是获得声场相位分布的最标准方法。当考虑使用离轴数字全息来观测声场时,声场的相位分布 φ_n 是时变的,因此相机记录的全息图也是随时间变化的。然而,在大多数情况下,背景相位分布 σ 是静态相位,与时间无关。因此,测得的声场全息图可以表示为

$$I_n(x, y, t) = B(x, y) + A(x, y) \cos[\varphi_n(x, y, t) + \sigma(x, y) + 2\pi f_x x], \quad (7)$$

式中: B 代表零级项; A 代表条纹的幅度; f_x 代表载波频率。对于离轴数字全息技术,由于载频项 $2\pi f_x x$ 的存在,零级项和 ± 1 级项可以在傅里叶平面上分离。因此,可以使用傅里叶方法来重建声场相位。图8为传统声场相位恢复方法的方案示意图,作为离轴数字全息相位恢复的最标准方法,该方法能够有效实现声场的相位恢复。

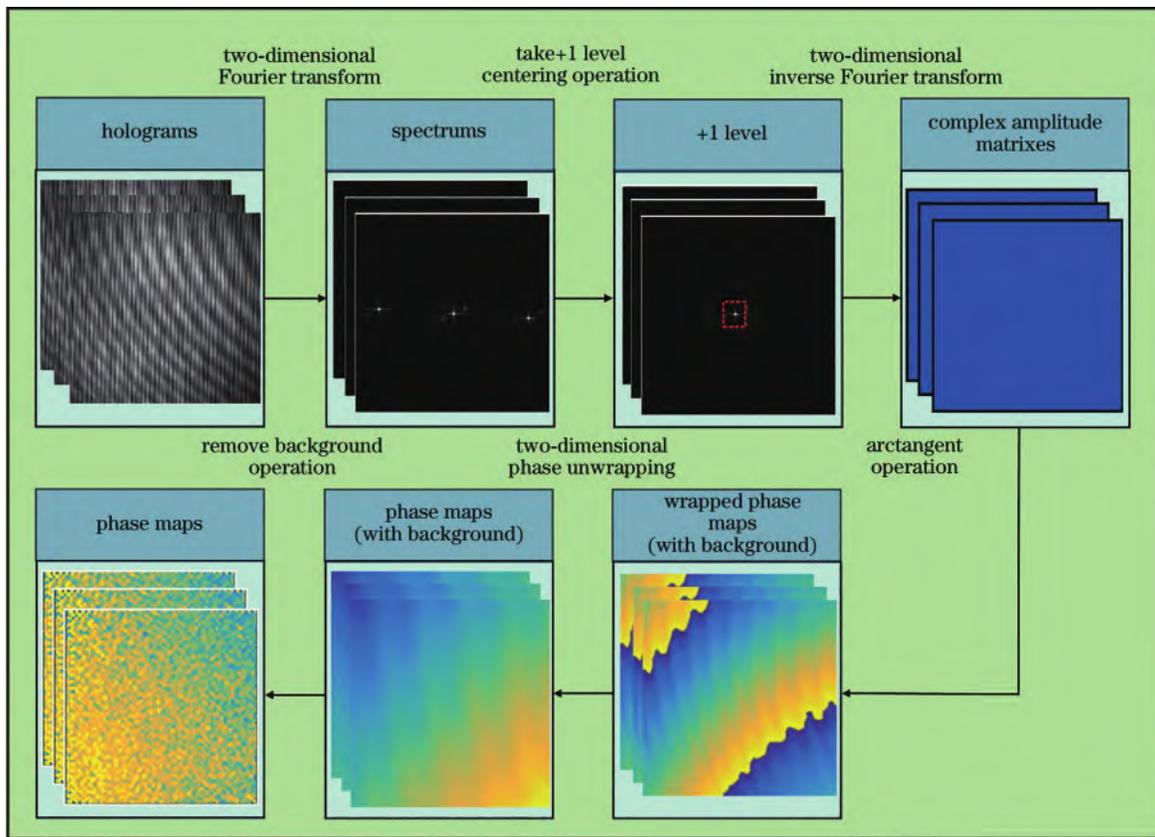


图 8 传统声场相位恢复流程

Fig. 8 Traditional sound-field phase reconstruction process

该方法利用离轴声场全息图零级频谱与 ± 1 级频谱能够完全分开的特性,通过单幅全息图即可实现对探测光波前相位的提取。然而,在相位恢复过程中背景相位的影响会导致相位包裹问题,因此需要额外使用相位解包裹算法逐帧进行相位解包裹运算,大大增加了系统的计算量。此外,为了去除静态背景相位,需要额外采集静态背景全息图,这在实际测量中十分不便,甚至在某些情况下该操作无法实现。

4.2 时间方向滤波法

Yatabe 等^[33]提出了一种时间方向滤波法,能够从包含包裹的背景相位中提取待测声场相位,克服了传统声场相位恢复方法中相位解包裹过程以及额外采集背景相位操作。图 9 为时间方向滤波法的方案示意图,该方法通过提取第 n 帧与第 $n-1$ 帧包裹相位 $W[\varphi_n(x, y, t) + \sigma(x, y)]$ 与 $W[\varphi_{n-1}(x, y, t - \Delta t) + \sigma(x, y)]$,当相机采样速率足够高时,对其做差分运算有如下关系

$$W[\varphi_n(x, y, t) + \sigma(x, y)] - W[\varphi_{n-1}(x, y, t - \Delta t) + \sigma(x, y)] = [\varphi_n(x, y, t) + \sigma(x, y)] - [\varphi_{n-1}(x, y, t - \Delta t) + \sigma(x, y)] = \varphi_n(x, y, t) - \varphi_{n-1}(x, y, t - \Delta t) = D[\varphi_n(x, y, t)], \quad (8)$$

式中: D 代表时间方向的差分操作。该方法利用了背景相位的时不变特性,进而结合时域差分去直流量的原理,在不需要进行相位解包裹和额外采集静态背景操作的情况下,有效去除背景相位对声场测量的干扰。继而利用频域高通滤波运算进行差分补偿操作,从而实现声场相位的还原,其原理可表示为

$$\varphi_n(x, y, t) = \check{h} * D[\varphi_n(x, y, t)], \quad (9)$$

式中: \check{h} 代表频域高通滤波器。

时间方向滤波法可以直接应用于含静态背景包裹的声场相位,无需使用耗时的相位解包裹过程以及采

集静态背景操作即可实现声场相位的准确重建。然而,该方法需要满足 Itoh 条件,即相邻帧的相位差足够小^[33]。因此需要采集速度较高,甚至达到待测声场频率 10 倍以上以确保声场/信息能够准确重建^[34]。在这种情况下,系统成本以及数据处理量将显著增加。

4.3 时间定向相除法

针对离轴数字全息声场相位的重建,本团队 Zhong 等^[35]提出一种时间定向相除法,其方案示意图如图 10 所示。与时间方向滤波法相比,该方法并不直接对含背景的包裹相位进行差分操作,而是利用光波前复振幅指数项运算原理,将相邻帧复振幅做除法运

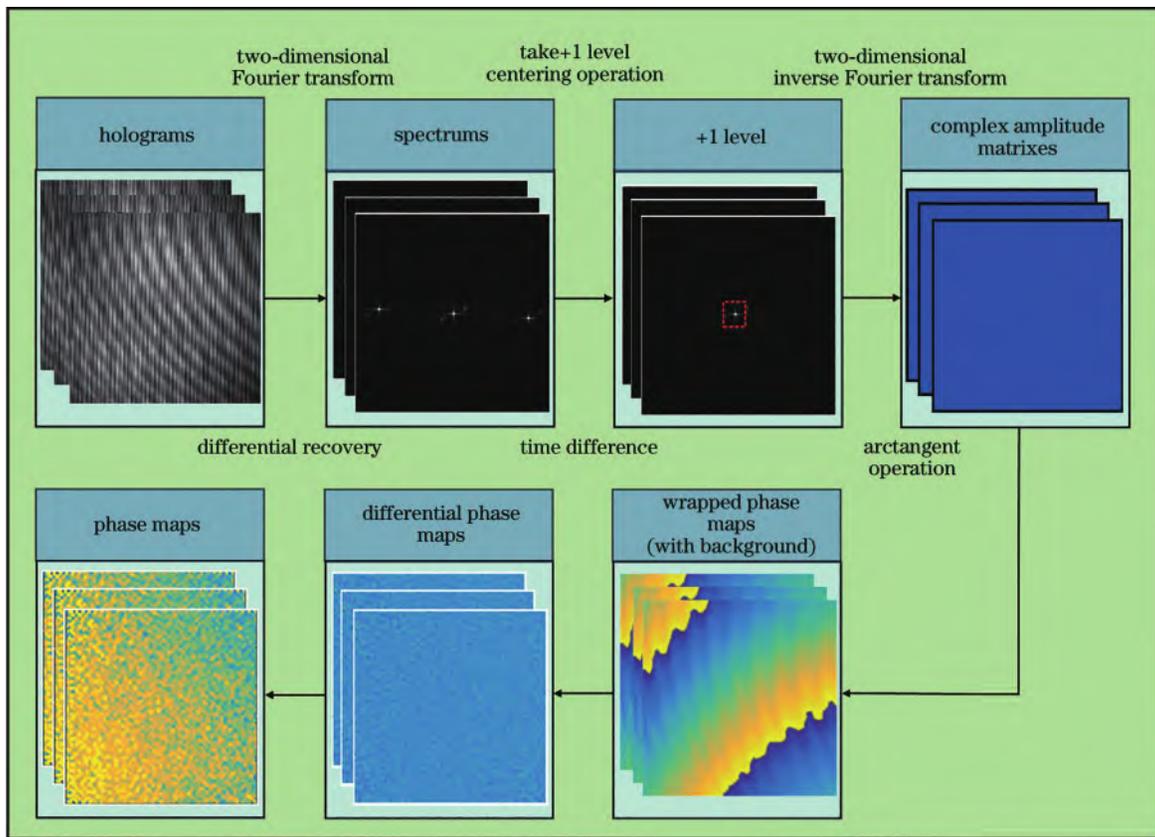


图9 时间方向滤波法流程

Fig. 9 Time direction filtering method process

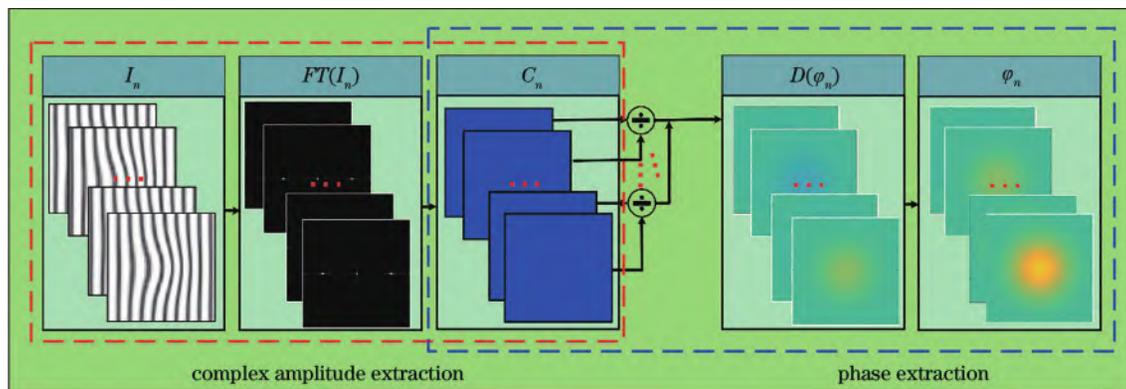


图10 时间定向相除法流程

Fig. 10 Time directional division process

算,再进行声场相位提取。相邻帧复振幅之间的差别只有指数项中的 $\varphi_n(x, y, t)$, 因此可以很容易地将声

场相位之外的其他项去除,利用复振幅的时频性质对相邻帧之间的复振幅做除法,得到如下关系式

$$\frac{C_{n+1}(x, y, t + \Delta t)}{C_n(x, y, t)} = \frac{0.5A(x, y) \exp[i\varphi_{n+1}(x, y, t + \Delta t) + i\sigma(x, y) + 2\pi f_x x]}{0.5A(x, y) \exp[i\varphi_n(x, y, t) + i\sigma(x, y) + 2\pi f_x x]} = \exp[\varphi_{n+1}(x, y, t + \Delta t) - \varphi_n(x, y, t)], \quad (10)$$

式中: C_n 和 C_{n+1} 分别代表第 n 帧和第 $n+1$ 帧的光波前复振幅。

值得注意的是,时间定向相除法可以通过使用该操作以直接的方式提取声场相位差 $\Delta\varphi_n(x, y, t)$ 。该

方法在执行反正切操作之前,利用复振幅相除原理有效地去除静态背景相位与载频项,无需考虑相位包裹问题。在这种情况下,只要差分相位 $\Delta\varphi_n(x, y, t)$ 在 $-\pi$ 到 π 的范围内即可实现声场相位的准确恢复,不需

要很高的相机采样率,在实际声场测量当中很容易实现。

5 数字全息声场测量技术的应用

数字全息声场测量技术由于其灵敏度高、非接触、实时性高等优点,近些年来已逐渐在声场成像测量领域展现出巨大的潜力。接下来将着重介绍数字全息声场测量技术的应用发展,具体包括光学音频加密、乐器原理的研究、气动声学的研究、水下声场测量以及三维(3D)声场重建。

5.1 光学音频加密

声音是人们日常信息交互的重要手段,随着现代通信技术的快速发展,音频信息提供高水平安全性的需求急剧增加。在音频的传输、存储等过程对其进行加密,可以有效地保护机密音频信息不被非法获取、篡改和窃取。传统的音频加密仅对一维音频信号进行操作,因此安全性有限。光学图像加密是光信息处理技术的一个重要领域,由于其独特的优势(例如,计算速度快和多维操作能力)而引起了一

些研究人员的兴趣并加以应用,其中包括水印技术以及身份验证等^[36-37]。数字全息声场测量技术由于其独特的声场成像能力,能够将音频信息转化为图像信息,因此可以应用于光学图像加密中,实现对音频的光学加密,从而为音频加密技术提供了更加行之有效的选择。

Rajput 等^[36]将数字全息声场测量技术与光学图像加密技术相结合,实现了光学音频加密其基本原理如图 11 所示。首先利用马赫-曾德尔结构将待测音频信息记录为全息图序列,进而利用光学 $4f$ 系统在傅里叶变换域中使用双随机相位编码,从而实现音频的加密。图 12 为该方法对音频加密的实验结果,其中图 12(a)、(b)分别为待测音频信号的时域和频域信息,图 12(c)、(d)分别为其对应的加密结果。从实验结果可以看出,待测音频信息被有效加密,证明了该方法的可行性。后来,该团队改进了加密方法,将双随机相位编码应用在分数傅里叶变换域以及菲涅耳变换域^[37],进一步提高了录音的安全级别,为声音信息的保密和安全传输提供了新的解决方案。

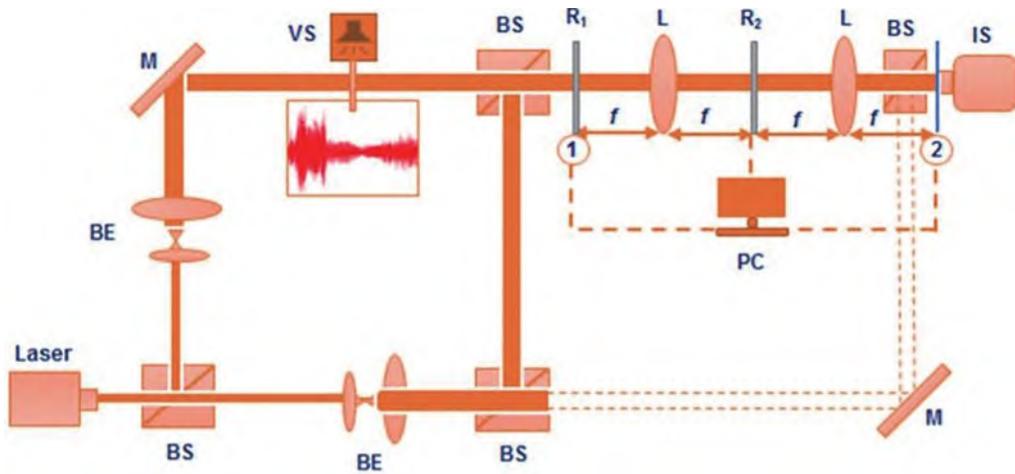


图 11 数字全息光学音频加密原理^[36]

Fig. 11 Digital holography optical audio encryption principle^[36]

5.2 乐器原理的研究

音乐声学是声学领域中的一个分支,主要研究与音乐相关的声学原理和现象。音乐声学涉及到各种乐器,这些乐器受到不同文化和技术背景的影响,因此在结构和原理上存在很大的差异。许多乐器的原理至今仍未被完全揭示,因此了解乐器声辐射的物理机制对于乐器的设计和制造至关重要。为了测量来自乐器的声音,通常使用麦克风阵列来获得声压、频谱和辐射方向等声学特性。但麦克风阵列的空间分辨率受到限制,因为麦克风之间的距离不能小于麦克风的直径,因此很难在空间上解析精细结构乐器的声场特性。数字全息声场测量技术具有高空间分辨率以及全场成像测量能力,能够成为各种乐器设计和制造的有力工具。

Ishikawa 等^[38]利用数字全息声场测量技术对乐器的发声机理进行了研究,实验测量了响板的声辐射状态。图 13(a)展示了敲击响板瞬间的声场传播状态,能够看到,此时响板的声音主要是由壳体表面的振动发出。图 13(b)展示了敲击响板 2 ms 后的声场传播状态,可以看出壳体表面声场变化较小,此时声音主要由壳体之间的缝隙发出。随后,对这两种声音传播现象进行分别提取以及频谱分析,最终实现了对响板的发声机理的充分探究,从而为该乐器的设计与改进提供了技术基础。

5.3 气动声学的研究

气动声学是建立在空气动力学和声学基础上的一门交叉学科,主要研究流动与声的相互作用问题。深入研究和了解气动声学的物理过程能够有效减小由螺

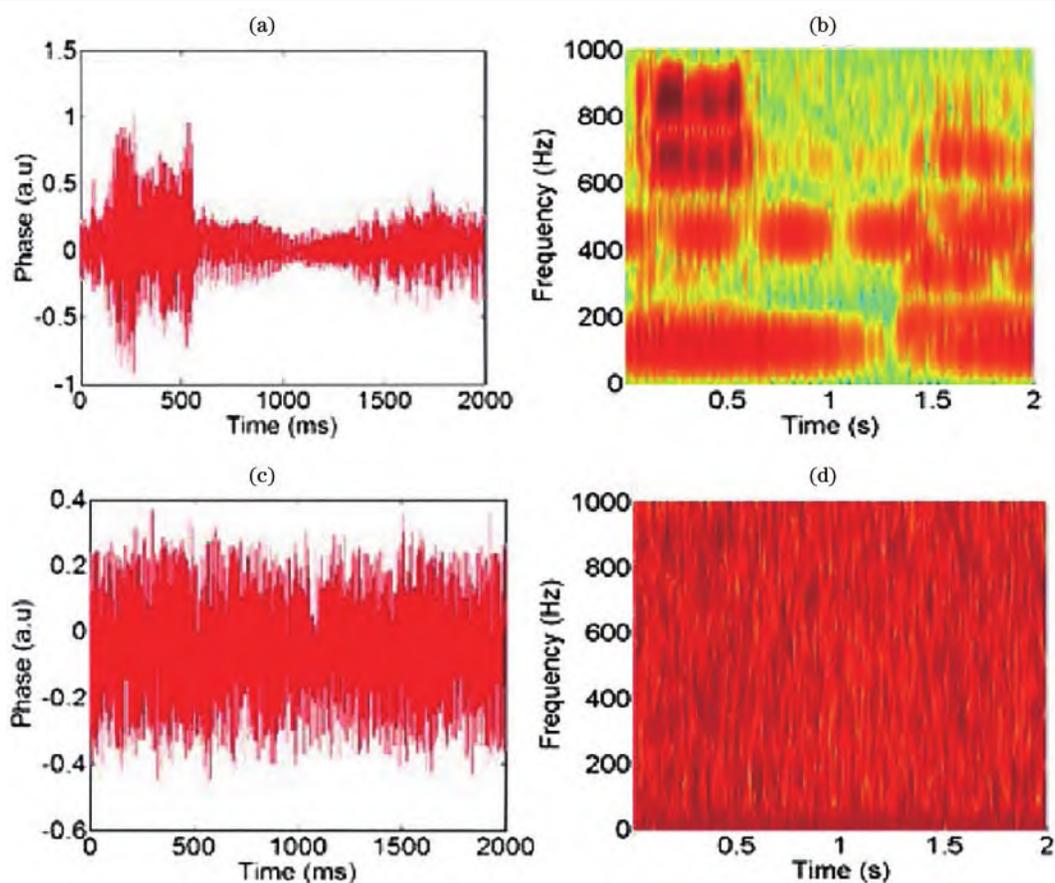


图 12 音频加密结果^[36]。(a)数字全息记录的音频信息;(b)与图(a)对应的频谱图;(c)加密后音频信息;(d)与图(c)对应的频谱图
Fig. 12 Audio encryption results^[36]. (a) Audio information recorded by digital holography; (b) spectrogram corresponding to Fig. (a); (c) encrypted audio information; (d) spectrogram corresponding to Fig. (c)

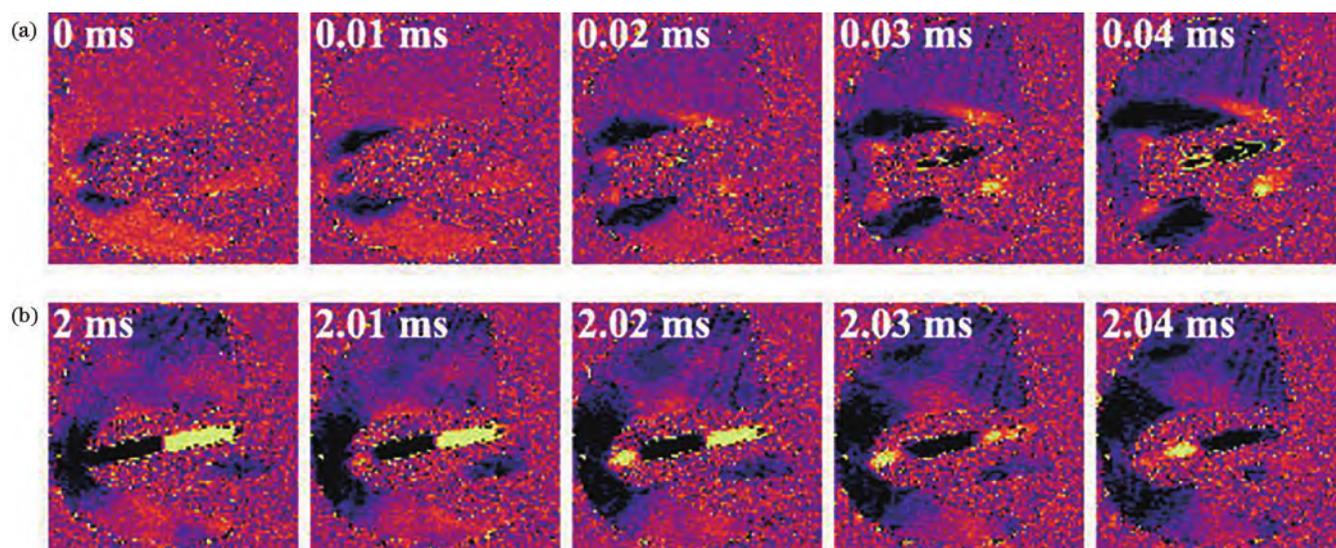


图 13 响板的成像结果^[38]。(a)敲击瞬间;(b)敲击 2 ms 后
Fig. 13 Imaging results of castanet^[38]. (a) Moment of tapping; (b) after 2 ms of tapping

旋桨、涡轮等引起的气动噪声,在航空航天、交通运输等领域具有重大的意义。在传统的测量方法中,气流和声音采用粒子图像测速和麦克风阵列方法进行分别测量。尽管这种测量方法能够测得远场声压,但由于麦克风与气流之间的相互干扰,直接观察到流体和声

音的相互作用十分困难,这也导致了流体内部和附近的声场难以被捕获。而数字全息声场测量技术能够直接观察到流体和声音的相互作用,为气动声学的深入研究提供可靠的数据支持,便于实现更加准确合理的气动噪声控制。

Ishikawa 等^[39]利用数字全息声场测量技术对气动声学进行了测量研究,实验对哨子产生的气流和声场进行成像,不仅捕捉到了气流附近的声场传播形态,还成功获取了相关的频谱信息。图 14 为实验的测量结果,气流的传播形态清晰可见,气流引起的哨腔内的共振声波也清晰可见。实验结果证明了数字全息

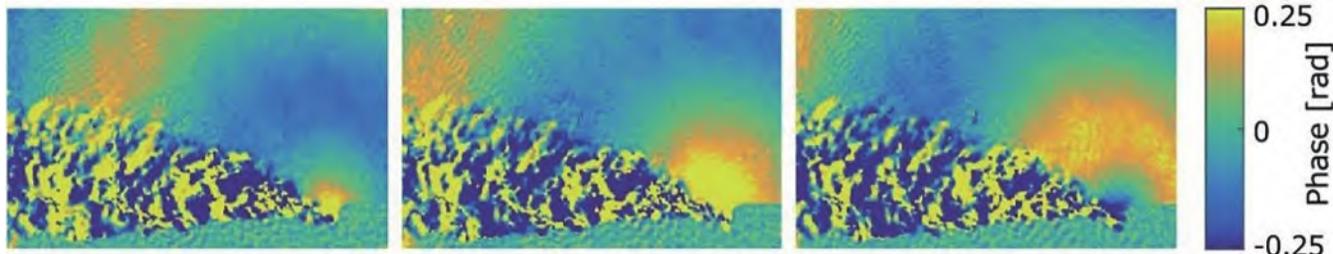


图 14 哨子产生的气流和声场测量结果^[39]

Fig. 14 Airflow and sound-field measurements produced by the whistle^[39]

5.4 水下声场测量

水下声场测量技术作为当前主要的水下目标探测手段,一直发挥着不可或缺的作用。这一技术的实现,通常依赖于精密的水听器设备。然而,尽管水听器在探测中有着广泛的应用,但仍暴露出一些难以忽视的问题。首先,水听器属于侵入式测量设备,它在探测过程中会对声场产生干扰,从而影响声场的自然状态。这意味着,在使用水听器进行探测时,我们获得的数据可能并非声场的真实反映。其次,水听器的测量精度受到声场频率的显著影响。在低频声场中,水听器的测量效果并不理想,这限制了其在某些特定环境下的应用。相较于传统方法,数字全息声场测量技术展现出了独特的优势。它采用非侵入式测量方式,能够避免对声场产生干扰,确保探测数据的真实性和可靠性。同时,数字全息声场测量技术具有全场高分辨的特点,能够全面、细致地捕捉水下的声场信息,为后续的目标识别和分析提供了更为精确的数据基础。

Yoshida 等^[40]利用并行相移数字全息技术实现了水下声场的可视化测量,并且探测到水下声波的速度信息,进而利用声速与介质的关系估算出水下的温度。图 15 为实验对水下声场可视化结果,从图中可以清晰地看到,数字全息声场测量技术能够捕捉到声场的传播形态和细微变化。与传统的水听器测量方法相比,数字全息声场测量技术不仅在准确识别声音频率等参数方面表现出色,还在全场高分辨的声场形态识别方面展现出显著的优势。这无疑为水下探测开辟了新的道路,也为深海研究提供了更为精确和深入的工具。

5.5 三维声场重建

数字全息声场测量技术作为一种创新的声学测量方法,通过检测声音引起的介质密度变化,实现了非侵入性的声学观察。与传统的麦克风测量方法相比,数字全息声场测量技术具有明显的优势。然而,该技术

声场测量技术在气动声学领域的应用价值。该技术能够实现流体与声场的同步可视化测量,为气动声学的研究提供了强有力的工具。通过该技术,研究者们可以更加直观地观察和理解流动与声的相互作用,从而为气动噪声的控制和降低提供更为精确的数据基础。

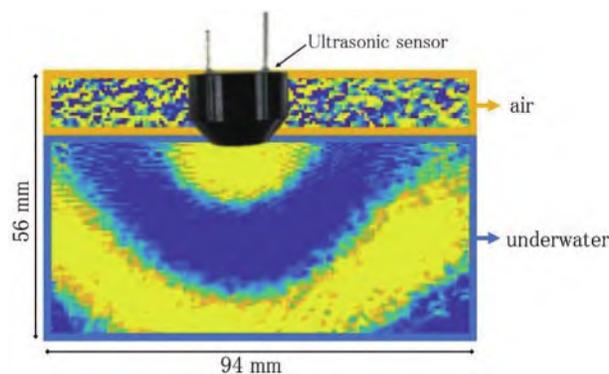
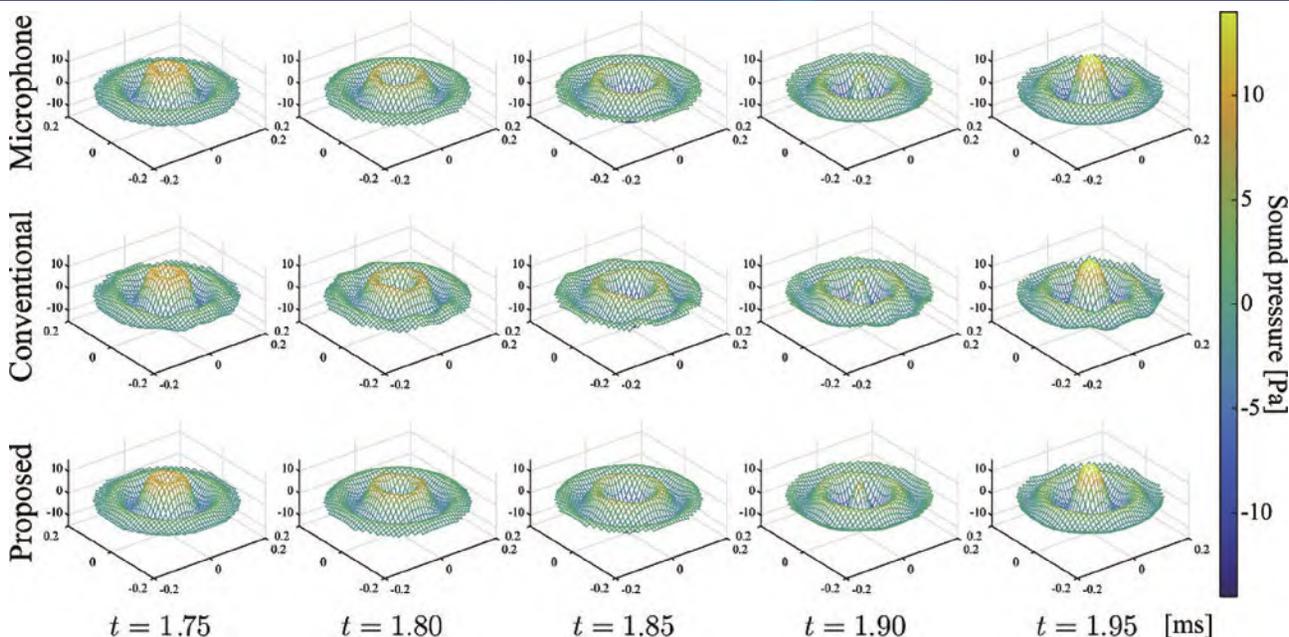


图 15 水下声场可视化结果^[40]

Fig. 15 Underwater sound-field visualization result^[40]

也有其局限性。由于声音的振动会影响光路上的每一个点,该技术只能观察到声压的空间积分,而无法直接获取声场的逐点信息。这意味着我们无法得到每个空间位置的精确声压值。为了克服这一局限性,需要对测量结果进行后处理操作。通过一系列复杂的数学和计算方法,可以从空间积分的结果中反推出任意一点的声压信息,从而为声学研究提供更为精确的数据。

在数字全息技术中,计算机断层扫描技术通常被应用于重建透明样本的折射率分布。因此,Yatabe 等^[41]以此为基础,将数字全息声场测量技术与计算机断层扫描技术相结合,成功实现了空间三维声场的重建。图 16 展示了数字全息声场重建结果与麦克风测量结果的对比,实验假定空间声场为轴对称声场,通过使用球坐标中的亥姆霍兹方程对声场进行建模。从图中可以看到,使用数字全息声场测量技术重建的声场与麦克风测量的声场在形态和分布上都非常相似。这一结果表明,该技术可以准确地实现空间三维声场的可视化,为空间三维声场重建方面的应用和发展奠定了基础。

图 16 三维声场重建结果^[41]Fig. 16 3D sound-field reconstruction results^[41]

6 数字全息声场测量技术的展望

数字全息技术通过获得物光波的振幅与相位信息,为介质中声场的传播形态或介质折射率分布提供一种高分辨、快速、无损测量手段。数字全息声场测量技术扩大了声场测量的应用场景与范围,有望通过观察声场的空间分布来揭示声学现象并创造更好的声学环境。为了进一步发展对所提出的方法,应研究以下两个主题的改进。

1) 三维声场的测量。全息声场测量方法基于积分效应,得到的是声场在空间的三维投影,尽管在理论上可以对空间三维声场进行模拟重建,但目前仅限于完美轴对称声场。如果能够实现对任意三维声场的瞬时、定量、非接触测量,那么就可以记录声场在空间原本的形态。这样,所有声学量都可以根据记录的数据计算出来。为了实现这一点,可以采用两种方法:改进测量系统和开发信号处理。对于测量系统,可以考虑利用多个数字全息系统的同时操作,或者探测光束的高速扫描以及多个投影数据的时间、空间的复用^[42]。

2) 从观察到的声场数据中提取有意义的声场参数是数字全息声场测量技术面临的重要挑战之一。数字全息技术能够提供高分辨率的声场空间信息,这使得人们能够通过图像或视频的方式直观地观察和理解声学现象。然而现阶段数字全息声场参数测量仍局限于声压值,对科学界、工业界普遍关注的质点振速、声场矢量表示、声功率等声学参数尚未给出有效解析模型^[42]。而这些参数对于科学分析和工业领域的应用至关重要,通过准确测量和分析这些参数,可为科学研究

和工业生产中的声场分析、噪声控制、设备监测和维护提供有效的支持。因此,如何发展有效的数据分析方法,从测量得到的声场数据中提取有用的信息,是数字全息声场测量技术应用的关键。

数字全息声场测量技术不仅在声学领域具有广泛的应用,而且对流体流动、热量传递、变形和振动等复杂物理现象也具有重要意义。随着社会和科技的不断发展,跨学科研究的价值愈发凸显。通过观察和分析多种物理现象及其相互作用,数字全息声场测量技术将催生大量创新、有趣的研究课题。通过与其他领域的结合,如数据科学、数学和艺术等,可以进一步拓展该技术的应用范围和潜力,从而推动各领域的共同进步和创新。

7 结束语

数字全息声场测量技术作为声学测量领域的一种创新方法,具有巨大的潜力和影响。它不仅能够提供非接触、非侵入式的声学观察,还能实现声场的三维重建和可视化。该技术的应用范围广泛,可应用于航空航天、噪声控制、音乐录音、水下探测等多个领域,为相关行业的发展提供了强有力的支持。为了进一步发展该技术,需要声学 and 光学领域的专家共同努力,深入研究和探索,推动这一技术的不断进步和应用。相信在不久的将来,数字全息声场测量技术将在声学测量领域发挥更加重要的作用,为各行业的发展提供有力支持。

参 考 文 献

- [1] Zhang W, Samarasinghe P, Chen H C, et al. Surround by sound: a review of spatial audio recording and

- reproduction[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(5): 532.
- [2] Rahne T, Fröhlich L, Wagner L, et al. Speech perception and hearing effort using a new active middle ear implant audio processor[J]. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 2022, 279(10): 4667-4675.
- [3] 李伟, 李硕. 理解数字声音: 基于一般音频/环境声的计算机听觉综述[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2019, 58(3): 269-313.
Li W, Li S. Understanding digital audio: a review of general audio/ambient sound based computer audition[J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2019, 58(3): 269-313.
- [4] 王岩, 马宏伟, 王星. 基于数字全息干涉技术的动态超声场成像与检测[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 1125001.
Wang Y, Ma H W, Wang X. Dynamic ultrasonic wavefield imaging and detection based on digital holographic interferometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1125001.
- [5] Demyanov M A. A correlation method for acoustic sources identification using multiple-microphone measurements[J]. *Acoustical Physics*, 2022, 68(6): 594-601.
- [6] Liu F, Zhao X H, Zhu Z H, et al. Dual-microphone active noise cancellation paved with Doppler assimilation for TADS[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 184: 109727.
- [7] Gabova K, Meier Z, Tavel P. Parents' experiences of remote microphone systems for children with hearing loss [J]. *Disability and rehabilitation. Assistive technology*, 2024, 19(3): 831-840.
- [8] 陆彦邑, 刘俏俏, 赵纯亮, 等. 基于纹影法的聚焦超声声场重建算法研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(5): 742-747.
Lu Y Y, Liu Q Q, Zhao C L, et al. Reconstruction algorithm for focused ultrasonic fields based on schlieren method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5): 742-747.
- [9] Kuroyama T, Ogasawara H, Mori K. Characterization as measurement sound source of acoustic cavitation noise from bubble clusters under ultrasonic horn[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023, 62(SJ): SJ1032.
- [10] 陈皓, 徐峥, 姜学平, 等. 纹影法在超声场成像中的应用[J]. *声学技术*, 2016, 35(3): 235-238.
Chen H, Xu Z, Jiang X P, et al. Application of Schlieren method to ultrasound field imaging[J]. *Technical Acoustics*, 2016, 35(3): 235-238.
- [11] Veith S I, Friege G. Making sound visible: a simple schlieren imaging setup for schools[J]. *Physics Education*, 2021, 56(2): 025024.
- [12] 谭琪, 徐航, 杨依光, 等. 激光多普勒技术跨介质探测水声信号的研究[J]. *应用激光*, 2023, 43(3): 127-135.
Tan Q, Xu H, Yang Y G, et al. Research on cross-interface detection of underwater acoustic signals by laser Doppler technology[J]. *Applied Laser*, 2023, 43(3): 127-135.
- [13] Sugimoto K, Sugimoto T, Utagawa N, et al. Detection of resonance frequency of both the internal defects of concrete and the laser head of a laser Doppler vibrometer by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(SG): SGGB15.
- [14] Aygün H, Apolskis A. The quality and reliability of the mechanical stethoscopes and Laser Doppler Vibrometer (LDV) to record tracheal sounds[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 161: 107159.
- [15] Xiao T, Zhao S P, Qiu X J, et al. Using a retro-reflective membrane and laser Doppler vibrometer for real-time remote acoustic sensing and control[J]. *Sensors*, 2021, 21(11): 3866.
- [16] 郭佩文, 史亦韦, 卢超, 等. 超声换能器声场的激光可视化研究[J]. *计测技术*, 2018, 38(2): 13-17.
Guo P W, Shi Y W, Lu C, et al. Study on laser visualization of sound field of ultrasonic transducer[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(2): 13-17.
- [17] Worland R. Electronic speckle pattern interferometry: applications to the musical acoustics of percussion instruments[J]. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 2019, 39(1): 035010.
- [18] Chiang H Y, Huang Y H. Resonance mode and sound pressure produced by circular diaphragms of electrostatic and piezoelectric speakers[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 129: 365-378.
- [19] Huang Y H, Chiang H Y. Vibrational mode and sound radiation of electrostatic speakers using circular and annular diaphragms[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, 371: 210-226.
- [20] Zhang J W, Tang J, Zuo J L, et al. Rapid quantitative measurement of internal ultrasonic field in acousto-optic modulator via off-axis digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 171: 107793.
- [21] 杨晨遇, 王骏, 张川, 等. 基于数字全息的云中冰晶微物理参数观测方法[J]. *光学学报*, 2024, 44(6): 0601017.
Yang C Y, Wang J, Zhang C, et al. Observation method of microphysical parameters of ice crystals in cloud based on digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(6): 0601017.
- [22] 张瑞轩, 刘丙才, 岳鑫, 等. 基于巴特沃斯特征函数的数字全息聚焦成像 [J]. *中国激光*, 2024, 51(13): 1309001.
Zhang R X, Liu B C, Yue X, et al. Digital holographic focusing imaging based on butterworth feature function [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(13): 1309001.
- [23] 李俊昌, 宋庆和, 桂进斌, 等. 相干光成像理论及振铃振荡的计算研究[J]. *光学学报*, 2024, 44(4): 0405001.
Li J C, Song Q H, Gui J B, et al. Calculation of coherent optical imaging theory and ringing oscillation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(4): 0405001.
- [24] 温凯, 马英, 张美玲, 等. 高稳定性定量相位显微技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 200001.
Wen K, Ma Y, Zhang M L, et al. Quantitative phase microscopy with high stability[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 200001.
- [25] 张文辉, 曹良才, 金国藩. 大视场高分辨率数字全息成像技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 0603008.
Zhang W H, Cao L C, Jin G F. Review on high

- resolution and large field of view digital holography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603008.
- [26] Bhaduri B, Edwards C, Pham H, et al. Diffraction phase microscopy: principles and applications in materials and life sciences[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(1): 57-119.
- [27] Matoba O, Inokuchi H, Nitta K, et al. Optical voice recorder by off-axis digital holography[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6549-6552.
- [28] Graydon O. Optical voice recorder[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(2): 75.
- [29] Takase Y, Shimizu K, Mochida S, et al. High-speed imaging of the sound field by parallel phase-shifting digital holography[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): A179-A187.
- [30] Hermawanto D, Ishikawa K, Yatabe K, et al. Determination of frequency response of MEMS microphone from sound field measurements using optical phase-shifting interferometry method[J]. *Applied Acoustics*, 2020, 170: 107523.
- [31] Rajput S K, Matoba O, Kumar M, et al. Sound wave detection by common-path digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 137: 106331.
- [32] Zhong Z, Wang C, Liu L, et al. Visual measurement of instable sound field using common-path off-axis digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158: 107129.
- [33] Yatabe K, Tanigawa R, Ishikawa K, et al. Time-directional filtering of wrapped phase for observing transient phenomena with parallel phase-shifting interferometry[J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13705-13720.
- [34] Pedrini G, Osten W, Gusev M E. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(15): 3456-3462.
- [35] Zhong Z, Wang C, Du C Y, et al. Temporal division for time-varying phenomena observation using off-axis digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 166: 107585.
- [36] Rajput S K, Matoba O. Optical voice encryption based on digital holography[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4619-4622.
- [37] Rajput S K, Matoba O. Security-enhanced optical voice encryption in various domains and comparative analysis [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(11): 3013-3022.
- [38] Ishikawa K, Yatabe K, Oikawa Y. Seeing the sound of castanets: Acoustic resonances between shells captured by high-speed optical visualization with 1-mm resolution [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 148(5): 3171-3180.
- [39] Ishikawa K, Tanigawa R, Yatabe K, et al. Simultaneous imaging of flow and sound using high-speed parallel phase-shifting interferometry[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 991-994.
- [40] Yoshida S, Tanigawa R, Yatabe K, et al. Underwater sound visualization and temperature measurement using high-speed interferometer[J]. *Acoustical Science and Technology*, 2022, 43(3): 177-187.
- [41] Yatabe K, Ishikawa K, Oikawa Y. Acousto-optic back-projection: physical-model-based sound field reconstruction from optical projections[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2017, 394: 171-184.
- [42] Ishikawa K. *Studies on imaging of sound field using high-speed polarization interferometry[D]*. Tokyo: Waseda University, 2019.