

激光与光电子学进展

激光远距离语音探测技术进展

芮小博¹, 孔欣玥¹, 李磊霞², 伍洲^{3,4*}, 王永彪³, 王亚慧³, 徐立鑫¹, 张宇¹, 张文喜^{3,4}¹天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;²中国科学院重大科技任务局, 北京 100864;³中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用激光可以在非接触、远距离的情况下实现语音信号的探测。激光远距离语音探测技术在侦听、多模监控、入侵检测、搜救、激光麦克风等领域具有广泛的应用前景。从激光远距离测振系统和探测信号的分析处理方法两个方面综述了激光远距离语音探测技术的研究进展,并展望了该技术的未来。

关键词 激光语音探测; 微振动探测; 激光多普勒测量; 语音增强

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230527

Advances in the Remote Laser Speech Signal Detection Technology

Rui Xiaobo¹, Kong Xinyue¹, Li Leixia², Wu Zhou^{3,4*}, Wang Yongbiao³, Wang Yahui³,
Xu Lixin¹, Zhang Yu¹, Zhang Wenxi^{3,4}¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University,
Tianjin 300072, China;²Bureau of Major R&D Programs Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;³Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Usually, lasers can be used for speech signal detection in non-contact and long-distance scenarios. Consequently, the remote laser speech detection technology has broad application prospects in laser interception, multi-mode monitoring, intrusion detection, search and rescue operations, laser microphones, and other fields. In this paper, we review research advances in the remote laser speech signal detection technology from the perspectives of remote laser vibration detection systems and detected signal analysis and processing methods; moreover, we expound the future development prospects of this technology.

Key words laser speech detection; micro-vibration detection; laser Doppler measurement; speech enhancement

1 引言

语音是人类之间信息传递的重要载体,人类生活的方方面面都涉及语音探测与采集的需求。但由于语音信号在空气中传播时声压会快速衰减,常见的动圈式麦克风和电容式驻极体麦克风的探测距离较短。目前,长距离语音探测方法主要包括抛物面麦克风、枪式麦克风、从视频中重构语音信号^[1]、多普勒微波雷达^[2]、激光远距离语音探测技术等。枪式麦克风通过干涉管

实现了探测的指向性,抛物面麦克风通过抛物面反射器对目标声音进行指向性的探测与放大,其能规避部分环境噪声的影响实现较长的探测距离,但声信号仍易受探测路径上噪声的干扰。视频中重构语音信号这种被动式语音探测方法容易受到环境光干扰,并且探测距离受限于目前的图像采集技术。多普勒微波雷达和激光远距离语音探测方法通过探测声压作用下物体的振动来获取语音信号,不易受到探测路径上的噪声影响,具有较好的远距离探测语音信号的潜力,其中,

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-02-18; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(62103297)、中国科协青年人才托举计划(YESS20210078)

通信作者: *wz@aircas.ac.cn

激光探测方法已被证明可以实现数百米至公里级距离的语音探测^[3-4]。

本文对激光远距离语音探测技术近年来的发展历程和研究现状进行综述,介绍应用于该领域的干涉式和非干涉式两种不同的激光远距离测振系统,分析影响探测语音信号质量的因素,简述探测语音信号处理方面的研究,最后对激光远距离语音探测技术未来发展进行展望。

2 激光远距离测振系统

2.1 激光远距离语音探测原理

激光远距离语音探测的原理如图 1 所示,激光远

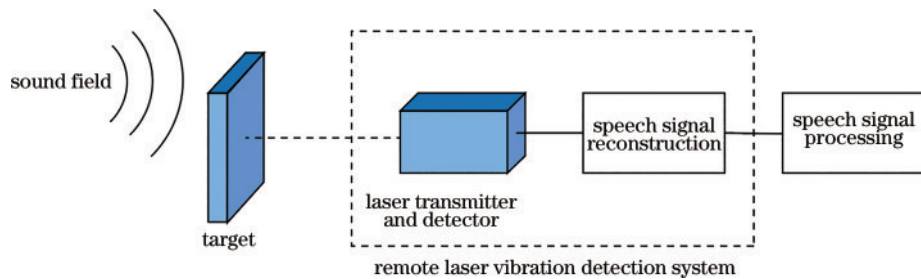


图 1 激光远距离语音探测原理框图

Fig. 1 Block diagram of the principle of remote laser speech detection

2.2 非干涉式探测系统

非干涉式探测系统的测量原理为激光照射到目标物表面,目标物表面振动主要是倾斜运动对反射光方位的调制使得接收端的光强或散斑图像发生变化,借此测量目标物表面微振动,实现远距离声信号探测,测量原理示意图如图 2 所示。

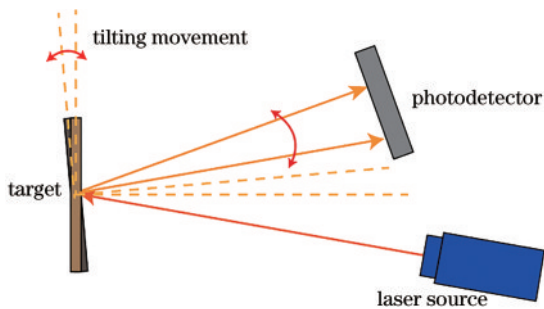


图 2 非干涉式激光远距离测振系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of non-interferential remote laser vibration detection system

2.2.1 接收端的设计

非干涉式系统可采取单点式或阵列式光电探测器作为接收端。当接收端为单点式光电探测器时,通过测量回光方位变化导致的探测器探测光强的变化来测量物体表面振动,即重构声信号^[5-7]。这种设计结构简单、装置成本低、采样率较高且能够实时通过探测器产生光电流的大小重构声信号。但在实际情况下,由于激光散斑效应,接收端的激光光斑通常是散斑式的,会

距离语音探测系统由激光测振系统与非合作测振目标组成,测振系统将激光发射到声源附近易在声压作用下产生振动的物体上,回光受到调制携带振动信息,经一定的探测与解调方法可以重构振动信号。应用于远距离语音探测的激光微振动探测系统根据回光的探测方式可分为非干涉式与干涉式探测系统。

经测振系统探测和重构得到的探测信号中包含了环境与仪器引入的复杂噪声,此外,由于探测的实质上是目标的振动信号,探测目标在声压作用下的振动特性也会对测量结果产生影响。因此,通常还需对探测信号进行后处理来降低噪声的影响,提高探测语音信号的质量与可懂度。

对探测器探测光强造成影响,破坏振动与光强变化之间的线性关系^[8]。这个问题能够得到一定程度上的解决,2011年, Veber 等^[9]提出的远距离物体微小振动测量方法以光电二极管作为接收端,通过在透镜和光电二极管之间放置空间滤波器(光阑)或掩模将散斑的移动转换为光电二极管上光通量的变化,在 50 m 的测量距离下灵敏度达到 100 nm,如图 3 所示。

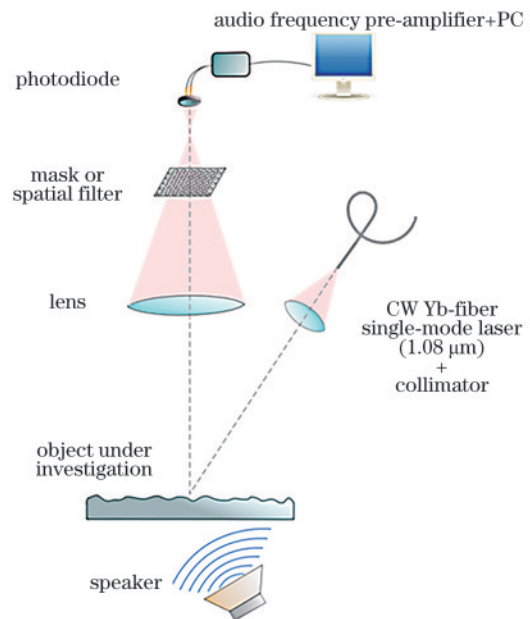


图 3 光电二极管结合空间滤波器激光远距离测振方法^[9]

Fig. 3 Remote laser vibration detection method combined photodiode with spatial filter^[9]

当接收端为阵列式光电探测器时,目标物表面的振动通过序列散斑图像测得,该设计使得测振系统对粗糙表面具有较强的适应性。对比接收端使用单点式光电探测器的设计,该设计通过图像处理算法重构目标物表面振动,具有更高的精度和灵敏度,但使用阵列式光电探测器导致采样率降低,此外对散斑图像方法而言,声音信号的重构也更加复杂。2009年,Zalevsky等^[10]首次提出了在目标物表面投射激光,通过测量接收端散斑图案的移动来实现声信号探测的方法。Zalevsky等^[10]提出的测量系统如图3所示,据此讨论了相机轻度离焦和重度离焦两种情况,在物体振动为刚体运动和振动极微小的前提下,在轻度离焦的情况下,面内运动和轴向运动对散斑图像的影响可以忽略不计,而倾斜运动会使散斑图像彻底改变;在重度离焦的情况下,同样面内运动和轴向运动对散斑图像的影响可以忽略不计,而倾斜运动会使相机采集到的散斑图像发生较为明显的平移。因此,在重度离焦的情况下,可采用测量散斑图像位移来进行测振的方案。 F 为焦距, Z_2 和 Z_3 如图4所示,估算出倾斜角 α 和散斑图像位移 d 的转换关系为

$$d = \frac{Z_2 F}{Z_3} \alpha. \quad (1)$$

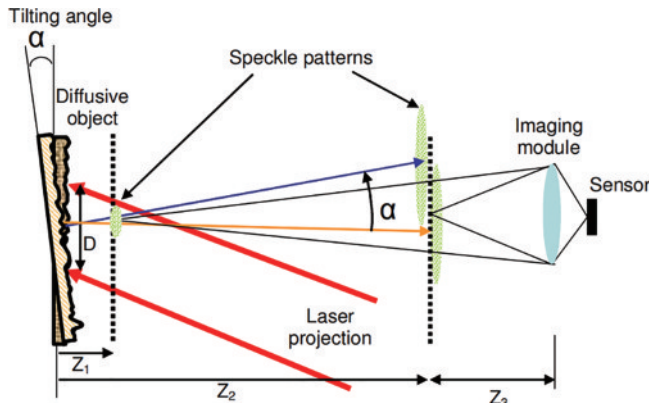


图4 激光散斑微振动测量原理^[10]

Fig. 4 Schematic diagram of laser speckle micro-vibration measurement^[10]

对比采集二维散斑图像,使用线阵 CCD 或 CMOS 作为光电探测器可以提高帧率,进而提高测振系统的最高采样率^[11-12]。2019年,Bianchi等^[4]开发的以线扫描 CCD 作为探测器的激光远距离声音信号探测系统如图5所示,激光散斑被牛顿望远镜的抛物面镜采集,由凹透镜准直后经柱面镜聚焦到线扫描 CCD 上,柱面镜将二维散斑图案挤压到一条线上从而将探测强度增加了一千倍,该系统用 500 mW 的激光器实现了 300 m 距离的语音信号探测。

2.2.2 阵列式光电探测器方案下的声信号重构方法

接收端为阵列式光电探测器的设计方式通过序列图像处理重构目标物表面振动,测得声信号。为了获

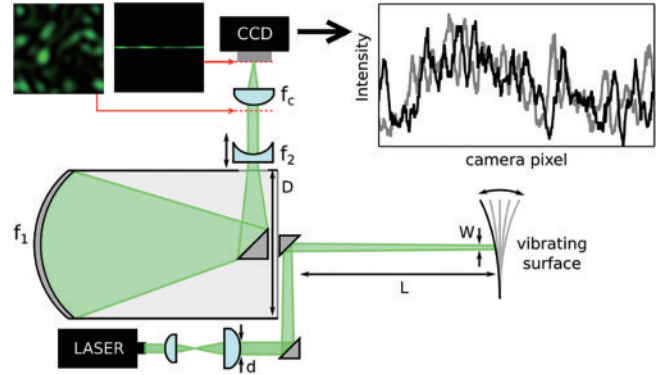


图5 线扫描 CCD 远距激光散斑微振动测量^[4]

Fig. 5 Remote laser speckle micro-vibration measurement with line-scan CCD^[4]

得高信噪比的声信号以及实现系统探测的实时性,研究者们针对声信号重构算法开展了许多研究。

Zalevsky等^[10]证明了可以通过测量散斑位移来测振,通过散斑图像的帧间互相关方法得到散斑图像的位移^[4,10]。2020年,Barcelona等^[13]对6种通过光学散斑图像序列重构声音信号的算法进行比较分析,包括差分处理法、平均强度法、单像素法、互相关法、机器学习法和基于复数可操纵金字塔的模型参考自适应控制(MIT)法^[1],除第一种方法外,其他方法都获得了质量较好的重构信号,而权衡计算成本和性能互相关法表现最佳。一些研究者通过融合多像素点灰度值变化的方法重构目标物表面振动,Chen等^[14]和Zhu等^[15]通过选取一些灰度值随散斑图像位移线性变化的像素点,检测序列图像的灰度值变化并将各点获得的信息进行融合来测量散斑图像的位移以重构声信号的方法;Dai等^[11]将来自线阵 CMOS 各像素点的有效的光强随时间变化信号进行融合以重构声信号,这类方法比较简单,运算量小,但对散斑的大小和对比度要求高。此外,Wu等^[16-18]提出使用光流法^[19]来分析散斑图像的运动,该方法精度较高且在小图像面积和相机线扫描模式的情况下都取得了较好的声音信号探测效果。

2.3 干涉式探测系统

干涉式探测方法的原理为激光照射到目标物表面,目标物表面沿光轴方向的位移给回光引入了相位/频率的变化,使用干涉技术方法测量频移/相移实现远距离微振动测量,原理示意图如图6所示。

2.3.1 基于激光多普勒测振技术的远距离声信号探测

激光多普勒测振方法基于激光的多普勒效应,通过测量目标物表面振动导致的测量激光的多普勒频移来探测声音信号。激光多普勒测量技术起源于1964年Yeh^[20]关于流体流速测量的论文。20世纪80年代,已经出现了Polytec、Dantec、Ometron、Brüel&Kjær等4个著名的仪器供应商,证明了激光多普勒测量技术的日益成熟^[21]。激光多普勒测振技术作

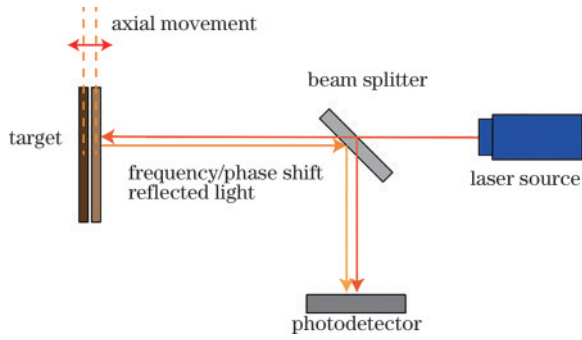


图 6 干涉式激光远距离测振系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of remote vibration detection system based on laser interferometry

为一种较成熟非接触振动测量技术,应用于声学器件性能检测^[22]、事件检测^[23]、地雷定位^[24]、结构健康监

测^[25]、声场重建^[26]等领域。

激光多普勒测振仪(LDV)的典型测量原理示意图如图 7 所示,采用马赫-曾德尔外差干涉仪结构,频率为 f_0 的发射光经分束器分为参考光束和测试光束,参考光束经声光调制器(AOM)产生 f_{IF} 的频移,测量光束经振动的被测物表面反射后产生 f_d 的频移, f_d 与被测物表面振动速度 V_r 的关系为

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \cos \theta, \quad (2)$$

式中: λ 为发射光波长; θ 为光束与振动速度之间的夹角。频移后参考光束与测量光束经混频后被光电探测器接收得到以 f_{IF} 为载波频率, f_d 为调制频率的调频信号,再经同相正交(I/Q)解调^[27]、相位产生载波(PGC)解调^[28]等方法解调以重构声音信号。

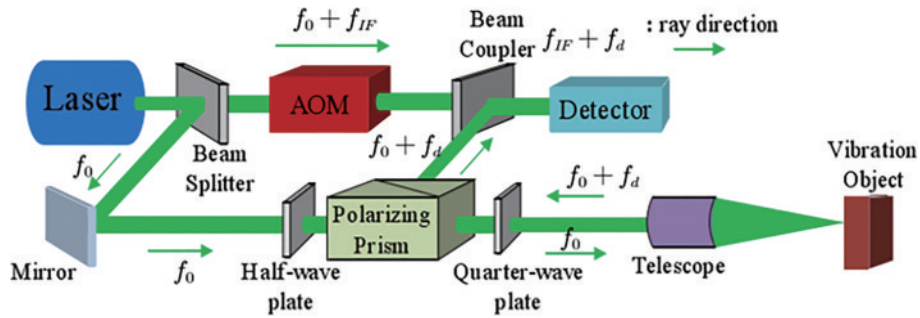


图 7 马赫-曾德尔干涉仪结构 LDV 原理图^[29]

Fig. 7 Schematic diagram of Mach-Zehnder interferometer structure LDV^[29]

纽约市立大学 Zhu 的团队^[3]2006 年用德国 Polytec 公司生产的 LDV 进行了远距离语音探测,目标物未贴反射胶带时可以在 100 m 的距离经信号处理后获取可辨识的语音,粘贴反射胶带后该距离可达 300 m,后来该团队将 LDV 与 PZT 相机等结合对远距离多模监视系统进行了研究^[30-31]。2011 年,Avargel 等^[32]提出的远距离语音探测系统中,用声学传感器进行语音探测,而将 MetroLaser 公司生产的 LDV 用作辅助语音增强传感器。

然而,商用激光多普勒测振仪为了保证低频振动测量的准确性,大多采用空间光结构,这使光学系统的体积和质量增大^[29],而光纤 LDV 系统具有轻便、小体积、结构更坚固的优势,更能适用于远距离声音信号探测复杂多变的应用场景。2009 年,尚建华等^[33]研发了一套全光纤外差 LDV 系统,结构示意图如图 8 所示,该系统能透过玻璃实时采集 25 m 范围内的语音信号。2012 年, Li 等^[34]基于全光纤 LDV 实现远距离测量需要长相干长度(短线宽)激光从而导致系统成本较高,提出了短相干长度激光器与可调节光学延迟补偿技术结合的替代方案,该系统在探测距离为 3 m 的声信号探测实验中表现较好。2017 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所吕韬等^[27,35]搭建了一个全光纤 LDV 来检测远距离语音信号,虽然该系统可以获得超过 120 m 的可理解的语音信号,但由于全光纤 LDV 采

用光纤环形器隔离发射光与回波光,会存在发射光串扰进回波光的现象,对系统的语音探测性能造成影响,为解决此问题,吕韬等^[36]提出了部分光纤结构的 LDV,采用波片联合偏振棱镜的方式来隔离发射光与回波光,与全光纤 LDV 的对比实验证明其可以有效抑制串扰,部分光纤 LDV 系统如图 9 所示。2019 年,吴世松等^[37-38]设计了全光纤脉冲式 LDV 系统,用脉冲电压驱动 AOM 以发射激光脉冲,该系统根据尾纤断面寄生反射和测量回波的时域分布差别,通过全数字距离门控信号处理方法实现了寄生反射和振动信号之间的分离,研究者们搭建了原型机并在实验室环境进行了 23 m 和 120 m 的语音侦听实验。中科院空天院光学精密测量技术团队 2017—2019 年研制了双移频固定式激光外差干涉测量系统,可实现数百米目标物表面微弱振动信号的检测,2019—2020 年,该团队^[39-40]提出了在传统 LDV 光路中增加一条校正光路的多光束混合外差干涉微振动测量方法,该方法能实现对探测微振动信号的增强,提高系统的测量灵敏度,在实验中观测到了最大 146 倍的增强效果,在远距离语音信号探测领域具有一定的应用前景。

2.3.2 基于激光自混合干涉方法的远距离声信号探测

激光自混合干涉技术通过让远距离目标的一部分

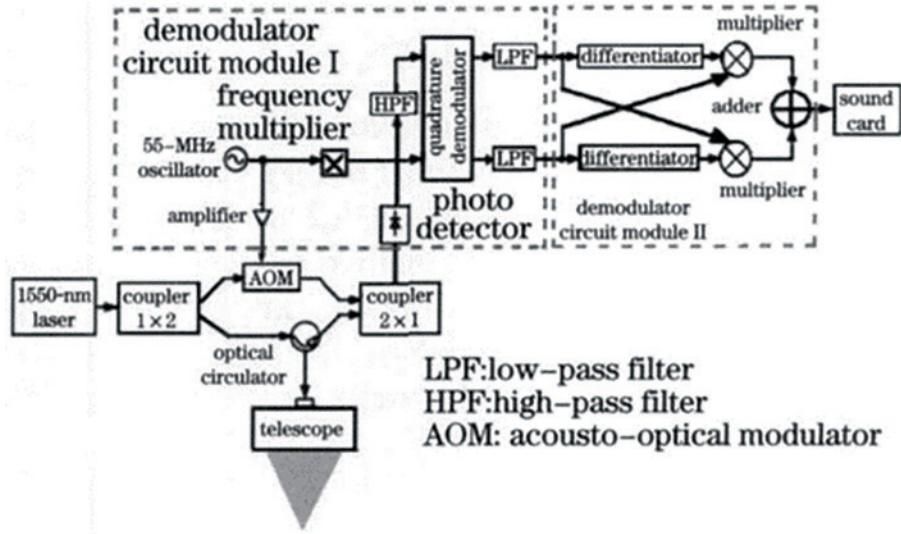


图 8 全光纤外差 LDV 系统结构图^[33]

Fig. 8 Schematic diagram of all-fiber heterodyne LDV system^[33]

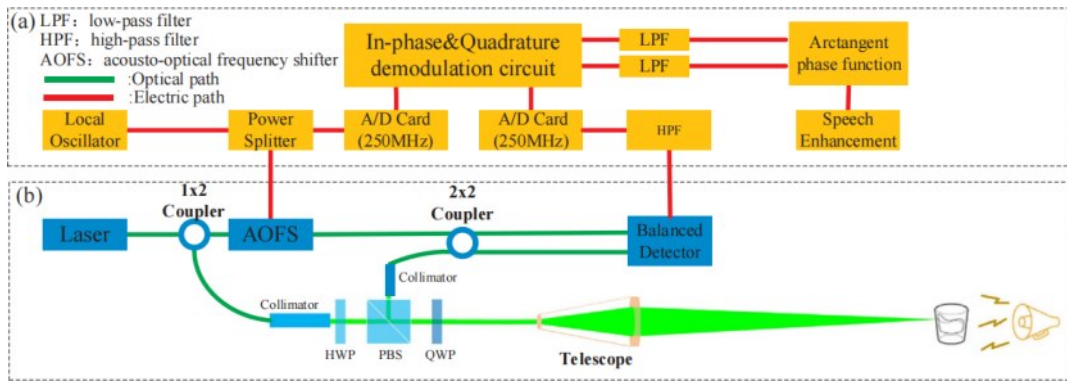


图 9 部分光纤 LDV 系统结构图^[36]. (a) 电路部分; (b) 光路部分

Fig. 9 Schematic diagram of partial-fiber LDV system^[36]. (a) Electrical unit; (b) optical unit

反射光重新进入激光谐振腔中引起对激光场幅度与频率的调制来测量目标的位移、速度、振动和距离^[41]。激光自混合干涉测振系统体积小, 具有高灵敏度, 可以使

用较低功率的激光器进行远距离声音信号探测。用于远距离语音信号探测的移频式激光自混合测量系统示意图, 如图 10 所示^[42]。

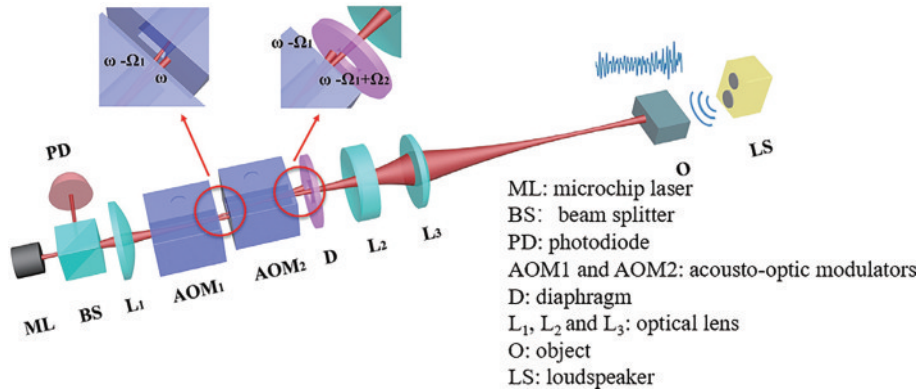


图 10 移频式激光自混合测量系统示意图^[42]

Fig. 10 Schematic diagram of frequency-shifted laser self-mixing measurement system^[42]

在测振目标静止状态下, 出射的初始光角频率为 ω , 经 AOM1 产生 -1 阶布拉格衍射, 角频率变为 $\omega - \Omega_1$, 又经 AOM2 产生 +1 阶布拉格衍射, 角频率变为

$\omega - \Omega_1 + \Omega_2 = \omega + \Omega$, 经物体反射的返回光再依次经过 AOM2 和 AOM1, 最终, 移频反馈光的角频率为 $\omega + \Omega + \Omega_2 - \Omega_1 = \omega + 2\Omega$ 。反馈光引起的对发射光

光强的调制 ΔI ^[42] 可表示为

$$\frac{\Delta I(2\Omega)}{I} = \sqrt{\kappa} G(2\Omega) \cos(2\Omega t - \varphi + \phi), \quad (3)$$

式中: I 为无反馈情况下的稳定状态激光输出功率; κ 为有效反馈水平; ϕ 为固定相移; $G(2\Omega)$ 为与移频频率有关的增益系数, 移频频率 2Ω 越接近弛豫振荡频率时该系数越大, 可达 $10^{6[43]}$; φ 为与外腔长度有关的相位。外腔长度的变化即目标物表面振动引起的光轴方向位移 ΔL 可表示为

$$\Delta L = \frac{\lambda \cdot \Delta \varphi}{4\pi}. \quad (4)$$

Otsuka 等^[44] 2003 年使用移频式自混合激光干涉测量系统通过探测扬声器表面微振动实时重构了扬声器播放的音乐, 2014 年^[45] 基于薄片 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ 激光器搭建自混合激光干涉测量系统, 激光通过 2.5 km 单模光纤后入射到扬声器表面进行实时远距纳米级振动测量。2018 年, 中国科学院空天信息创新研究院团队^[46] 搭建了测量声致微振动的自混合激光干涉侦听系统。2021 年, Xu 等^[42] 提出了基于自混合干涉的激光侦听系统, 该系统从 200 m 外的纸盒上探测并重构出了可理解的语音信号。

3 激光远距离语音探测信号的分析与处理

3.1 激光远距离探测语音信号质量影响因素

激光远距离语音信号探测具有多种不同的噪声来源, 除激光测振仪器引入的噪声、测振目标物附近的其他声源引入的噪声之外, 由于系统需要实现远距离探测以及具有非合作探测目标, 很容易受到环境扰动而引入噪声。基于光强探测和散斑图像分析的探测方法, 温度的变化和大气扰动会对光束的强度和方向产生影响, 引起探测误差。激光多普勒干涉的探测方法中, 大气扰动^[38] 引起的光束抖动与相位起伏、非合作目标与探测器的相对运动^[47] 使得光束照射到的物体表面发生变化, 会导致回光散斑模式发生动态变化, 进而引入散斑噪声。动态散斑引入的噪声包括时域内起伏的宽带噪声和表现为冲击噪声的信号衰落^[48]。

激光远距离语音探测方法通过探测目标物表面振动获取语音信号, 声场中目标物的振动响应与其材质、结构等有关。一般来说, 远距离语音探测场景中的目标测振物不像专门为接收语音信号而设计的麦克风振膜, 其在语音频段具有平坦的频率响应。2011 年, Li 等^[49] 建立了物体表面在声场作用下的振动模型, 并对声场中不同材料和结构的目标物的表面振动进行了仿真与实验, 根据在语音段频率响应曲线的拐点数目分为 3 个类别。研究者们进行远距离语音探测实验常采用的在语音频段声压响应灵敏度较高的测振目标物如纸盒^[50]、塑料瓶^[51] 等, 在语音高频段响应灵敏度降

低, 会导致探测语音高频部分缺失, 对语音信号的可懂度和自然度造成一定的影响。2015 年, Peng 等^[52] 提出了一种新的语音频带拓宽的算法, 用于由 LDV 和一个辅助麦克风组成的探测系统的语音频带拓宽。2020 年, Cai 等^[53] 用深度神经网络实现了 LDV 探测语音信号的高频成分重构。

3.2 远距离语音探测信号的降噪处理

远距离语音探测最终需要得到能被人类听觉或机器识别的语音信号, 远距离语音探测由于引入来自外界环境与探测系统的混合噪声, 会降低获取的语音信号的可听性与可懂度, 这些噪声的频带分布与语音信号的主要频带分布(约 300~3000 Hz) 部分重合, 不能简单通过传统滤波器滤除, 因此需要进一步对探测语音信号进行处理。国内外的研究者们主要针对冲击噪声和非平稳的宽带噪声开展去噪研究。

3.2.1 宽带噪声的去除

宽带背景噪声的处理一般应用语音增强技术, 即将纯净语音信号从背景噪声中分离出来。语音增强可以通过短时谱估计法、子空间法等基于信号处理的噪声抑制算法, 以及传统机器学习方法、深度学习方法等实现。

短时谱估计语音增强方法基于噪声的时频分布特征, 通过含噪语音信号的短时幅度谱估计出纯净语音信号的短时幅度谱, 经典算法包括: 谱减法、维纳滤波法、最小均方误差估计法(MMSE) 等^[54]。2006 年, Li 等^[3] 提出用高斯带通滤波器和维纳滤波器对 LDV 获取的远距离语音探测信号进行降噪。考虑到 LDV 远距离探测信号背景噪声的非平稳性, Lü 等^[55-56] 和 Chen 等^[51] 采用了 Cohen 等^[57] 提出的能快速追踪非平稳噪声的最优对数谱估计(OM-LSA) 算法对探测信号进行降噪。

除短时谱之外, 还可以通过其他信号时频分析方法分解信号, 例如小波变换和经验模态分解(EMD) 等, 再进一步实现降噪。屈直等^[58] 改进了小波阈值降噪算法的阈值函数, 并将其应用于激光侦听的语音信号增强中。2016 年, Chen 等^[59-60] 提出用感知小波包阈值降噪的方法和对探测信号进行经验模态分解, 判断出含噪模态并进行阈值滤波的方法对毫米波雷达探测的语音信号进行降噪, 毫米波雷达探测语音信号的方法与使用 LDV 探测语音信号的方法类似。

语音增强可被看作是一个有监督学习的问题, 进而可通过深度学习的方法实现。深度学习具有多层人工神经网络算法结构, 能自动提取特征, 近年来, 深度学习的引入和发展显著增强了有监督学习的表现^[61]。基于深度学习的语音增强技术以深度神经网络(DNN), 包括前馈多层感知器(MLP)、卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN) 和生成对抗网络(GAN) 等作为学习机^[61]。2019 年, 白涛等^[62] 采用深度循环网络(DRNN) 对 LDV 探测语音进行降噪处理, 用

带噪语音的对数功率谱作为输入,预测出纯净语音的对数功率谱,再结合带噪语音的相位信息实现降噪后的语音信号重构。2020年,Cai等^[53]提出基于时域波形的激光麦克风探测语音信号增强方法,利用DNN实现端到端的噪声抑制与高频重构,噪声抑制应用CNN,高频重构应用RNN,其实现原理图如图11所示。

2021年,Liu等^[63]提出的激光麦克风语音增强方法中使用了基于长短期记忆(LSTM)网络的多目标学习框架估计纯净语音的幅度谱,使用Unet生成对抗网络(UNetGAN)^[64]和时域卷积神经网络(TCNN)^[65]估计相位谱,将幅度和相位估计值结合起来重构最终的降噪信号。

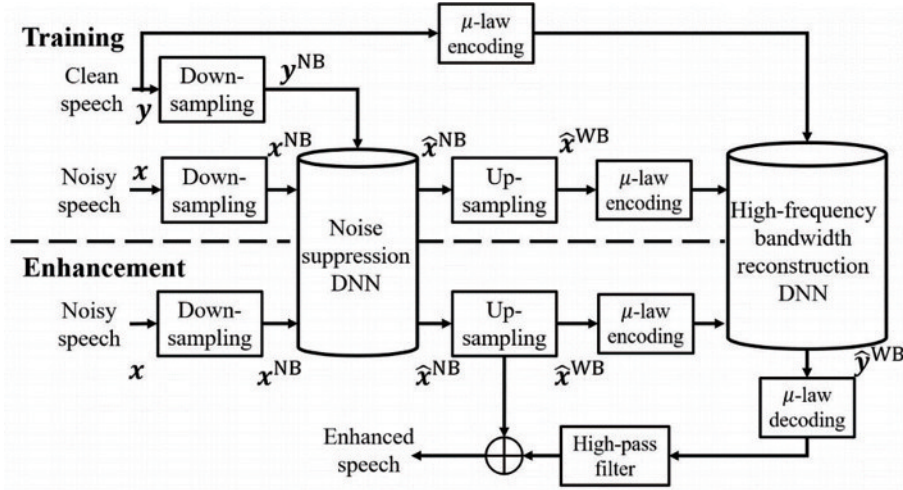


图 11 基于DNN的端到端激光麦克风探测语音增强原理框图^[53]

Fig. 11 Block diagram of DNN-based end-to-end speech enhancement method for laser microphone^[53]

3.2.2 冲击噪声的去除

对LDV探测系统而言,探测光照射到探测目标物上的位置受到扰动时,动态散斑效应有可能会使探测引入表现为冲击噪声的散斑噪声,其时频特征如图12所示。研究者们通过检测信号出现高能量尖峰的位置并用预测值替代的方式来去除这类噪声。2019年,Lü等^[47]将语音信号进行分帧,计算每帧信号经阈值处理前后峰度值的比率来判断该帧信号是否存在冲击噪声,若存在冲击噪声,则采用线性预测算法估算并替代

含有冲击噪声的信号帧。2021年,中国科学院空天信息创新研究院团队^[66]在对激光侦听语音信号进行处理时设计了基于双边线性预测编码的定位器和插值器,用于检测和替换冲击噪声。微波多普勒雷达探测语音信号时也会出现类似的冲击噪声。2021年,Xiang等^[2]提出了根据频域特征区分一帧语音内是否存在冲击噪声,并基于字典学习去除冲击噪声的算法来处理微波雷达探测的语音信号。

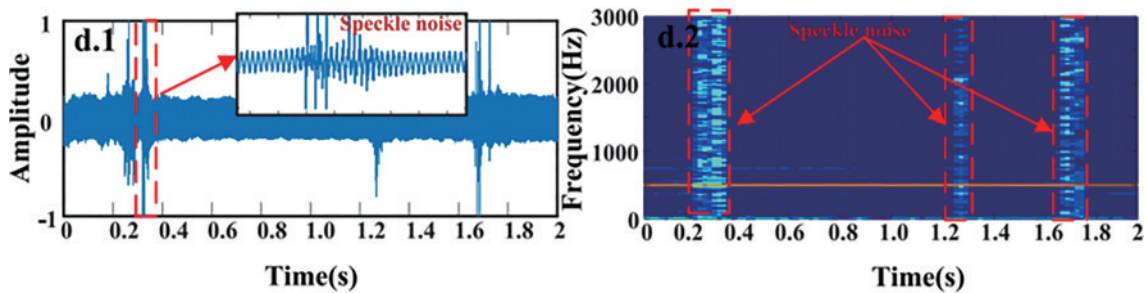


图 12 散斑噪声时频特征^[47]

Fig. 12 Time-frequency characteristics of speckle noise^[47]

4 总结与展望

激光远距离语音探测具有在侦听、多模监控、入侵检测、搜救、激光麦克风等众多领域的应用前景。近年来,对激光远距离测振并重构语音信号方法的研究取得可观的发展和突破,此外,研究者们也成功将多种语音信号处理方法应用到远距离语音探测领域,促进了

激光远距离语音探测技术的发展。近年来,该领域的主要研究内容,如表1所示。

总体看来,激光远距离语音探测未来的研究趋势:

1) 系统的测量性能方面。在长距离语音信号探测中,考虑到安全和隐蔽因素激光发射功率受到限制,提高系统长距离测量性能可以通过提高测量系统灵敏度和信噪比实现,据此对探测系统的探测方式、组件、

表 1 激光远距离语音信号探测近年主要研究内容

Table 1 Main research content of remote laser speech signal detection in recent years

| Research direction | Research content | Reference |
|---|--|--------------------------------------|
| Non-interferential remote vibration measurement | Single photodiode detection system optimization | [9] |
| | Area array/line array CCD detection system and signal reconstruction algorithm | [4],[10],[11-12],[16-18] |
| Interferential remote vibration measurement | LDV audio detection application | [30-32],[35] |
| | LDV system optimization | [33-34],[36-37],[39-40] |
| | Laser self-mixing vibration detection | [42-46] |
| Detected signal processing | Broadband background noise reduction(application of speech enhancement techniques) | [2-3],[51],[53],[55-56],[58-60],[63] |
| | Impact noise reduction | [2],[47],[66] |
| | High frequency compensation | [52-53] |

结构等进行优化。

2) 远程探测语音信号处理方面。当面临不同测量距离、环境条件、测振目标物时,探测信号的噪声特点和信号质量会有所不同,因此应该增强信号处理算法的适应性。

3) 关于测振目标。振动目标物,包括其表面的声学特性与光学特性,对探测信号质量有着很大程度的影响,关于测振目标的选择以及如何对具有不同频响特性的目标物上测得的语音信号进行高频补偿方面都可以进行进一步研究。

4) 应用方面。改良系统结构使探测系统小型化、便携化和使探测过程智能化等。

参 考 文 献

- [1] Davis A, Rubinstein M, Wadhwa N, et al. The visual microphone: passive recovery of sound from video[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-10.
- [2] Xiang X X, Zhang X J, Chen H Z. Acquisition and enhancement of remote human vocal signals based on Doppler radar[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20348-20361.
- [3] Li W H, Liu M, Zhu Z G, et al. LDV remote voice acquisition and enhancement[C]//18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06), August 20-24, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2006: 262-265.
- [4] Bianchi S, Giacomozzi E. Long-range detection of acoustic vibrations by speckle tracking[J]. Applied Optics, 2019, 58(28): 7805-7809.
- [5] Mims III F M. Surreptitious interception of conversations with lasers[J]. Optics News, 1985, 11(11): 6-12.
- [6] 罗海俊, 朱晓. 激光窃听技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(12): 53-56.
Luo H J, Zhu X. Research on laser eavesdropping technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(12): 53-56.
- [7] 汪啸. 远距离激光振动检测技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 21-39.
Wang X. Research on long-distance laser vibration measurement technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 21-39.
- [8] Bianchi S. Vibration detection by observation of speckle patterns[J]. Applied Optics, 2014, 53(5): 931-936.
- [9] Veber A A, Lyashedko A, Sholokhov E, et al. Laser vibrometry based on analysis of the speckle pattern from a remote object[J]. Applied Physics B, 2011, 105(3): 613-617.
- [10] Zalevsky Z, Beiderman Y, Margalit I, et al. Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21566-21580.
- [11] Dai C, Liu C, Wu Y F, et al. Audio signal detection and enhancement based on linear CMOS array and multi-channel data fusion[J]. IEEE Access, 2020, 8: 133463-133469.
- [12] Huang X Y, Guo W, Yu R, et al. Real-time high sensibility vibration detection based on phase correlation of line speckle patterns[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 148: 107759.
- [13] Barcellona C, Halpaap D, Amil P, et al. Remote recovery of audio signals from videos of optical speckle patterns: a comparative study of signal recovery algorithms[J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8716-8723.
- [14] Chen Z Y, Wang C, Huang C H, et al. Audio signal reconstruction based on adaptively selected seed points from laser speckle images[J]. Optics Communications, 2014, 331: 6-13.
- [15] Zhu G, Yao X R, Qiu P, et al. Sound recovery via intensity variations of speckle pattern pixels selected with variance-based method[J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 026117.
- [16] Wu N, Haruyama S. Real-time sound detection and regeneration based on optical flow algorithm of laser speckle images[C]//2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), May 9-10, 2019, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [17] Wu N, Haruyama S. Real-time audio detection and regeneration of moving sound source based on optical flow algorithm of laser speckle images[J]. Optics Express,

- 2020, 28(4): 4475-4488.
- [18] Wu N, Haruyama S. The 20k samples-per-second real time detection of acoustic vibration based on displacement estimation of one-dimensional laser speckle images[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2938.
- [19] Farnéback G. Two-frame motion estimation based on polynomial expansion[M]//Bigun J, Gustavsson T. Image analysis. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, 2749: 363-370.
- [20] Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer[J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10): 176-178.
- [21] Rothberg S J, Allen M S, Castellini P, et al. An international review of laser Doppler vibrometry: making light work of vibration measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 99: 11-22.
- [22] Suh J G, Kim H Y, Yôiti S. Measurement of resonance frequency and loss factor of a microphone diaphragm using a laser vibrometer[J]. *Applied Acoustics*, 2010, 71(3): 258-261.
- [23] Sun W, Chen T C, Zheng J Y, et al. VibroSense: recognizing home activities by deep learning subtle vibrations on an interior surface of a house from a single point using laser Doppler vibrometry[J]. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2020, 4(3): 1-28.
- [24] Haupt R W, Rolt K D. Standoff acoustic laser technique to locate buried land mines[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 3-22.
- [25] Kessler S S, Spearing S M, Atalla M J, et al. Damage detection in composite materials using frequency response methods[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2002, 33(1): 87-95.
- [26] Zipser L, Franke H, Olsson E, et al. Reconstructing two-dimensional acoustic object fields by use of digital phase conjugation of scanning laser vibrometry recordings[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(29): 5831-5838.
- [27] Zhang H Y, Lü T, Yan C H. The novel role of arctangent phase algorithm and voice enhancement techniques in laser hearing[J]. *Applied Acoustics*, 2017, 126: 136-142.
- [28] 张勤, 张建勇, 曾华林, 等. 基于 PGC 解调的激光多普勒语音检测系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(6): 1115-1118.
- Zhang Q, Zhang J Y, Zeng H L, et al. Acoustic signal detection system using PGC demodulation algorithm and laser Doppler effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1115-1118.
- [29] 吕韬. 远距离激光相干语音信号侦测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019: 19-21, 42.
- Lü T. Research on the remote laser coherent speech signal detection technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019: 19-21, 42.
- [30] Qu Y F, Wang T, Zhu Z G. Vision-aided laser Doppler vibrometry for remote automatic voice detection[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(6): 1110-1119.
- [31] Qu Y F, Wang T, Zhu Z G. Remote audio/video acquisition for human signature detection[C]//2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, June 20-25, 2009, Miami, FL. New York: IEEE Press, 2009: 66-71.
- [32] Avargel Y, Cohen I. Speech measurements using a laser Doppler vibrometer sensor: application to speech enhancement[C]//2011 Joint Workshop on Hands-free Speech Communication and Microphone Arrays, May 30-June 1, 2011, Edinburgh, UK. New York: IEEE Press, 2011: 109-114.
- [33] Shang J H, He Y, Liu D, et al. Laser Doppler vibrometer for real-time speech-signal acquirement[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(8): 732-733.
- [34] Li R, Madampoulos N, Zhu Z G, et al. Performance comparison of an all-fiber-based laser Doppler vibrometer for remote acoustical signal detection using short and long coherence length lasers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5011-5018.
- [35] Lü T, Zhang H Y, Yan C H. Double mode surveillance system based on remote audio/video signals acquisition[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 129: 316-321.
- [36] Wu S S, Lü T, Han X Y, et al. Remote audio signals detection using a partial-fiber laser Doppler vibrometer[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 130: 216-221.
- [37] Peng S P, Wu S S, Li Y Y, et al. All-fiber monostatic pulsed laser Doppler vibrometer: a digital signal processing method to eliminate cochannel interference[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105952.
- [38] 吴世松. 中远程光纤激光多普勒微振动检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020: 57-73.
- Wu S S. Research on micro-vibration detection technology of medium and long distance fiber laser Doppler[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020: 57-73.
- [39] 孔新新, 张文喜, 才敏胜, 等. 基于多光束混合外差干涉的相位增强技术研究[J]. *物理学报*, 2020, 69(19): 190601.
- Kong X X, Zhang W X, Cai Q S, et al. Multi beam hybrid heterodyne interferometry based phase enhancement technology[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(19): 190601.
- [40] Kong X X, Xiang L B, Cai Q S, et al. Three-beam conjugate enhanced micro-vibration detection[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(10): 104104.
- [41] Giuliani G, Norgia M, Donati S, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(6): S283-S294.
- [42] Xu Z, Li J Y, Zhang S L, et al. Remote eavesdropping at 200 meters distance based on laser feedback interferometry with single-photon sensitivity[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106562.

- [43] 徐众, 张西良. 基于激光移频回馈技术远距离振动测量研究[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1277-1283.
Xu Z, Zhang X L. Long-distance vibration measurement based on laser frequency-shifted feedback interferometry[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(6): 1277-1283.
- [44] Abe K, Otsuka K, Ko J Y. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: application to real-time sound reproduction[J]. New Journal of Physics, 2003, 5: 8.
- [45] Otsuka K. Long-haul self-mixing interference and remote sensing of a distant moving target with a thin-slice solid-state laser[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 1069-1072.
- [46] Wu Z, Zhang W X, Bin X L, et al. Laser interception technique with heterodyne self-mixing interferometry[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10797: 107970N.
- [47] Lü T, Han X Y, Wu S S, et al. The effect of speckles noise on the Laser Doppler Vibrometry for remote speech detection[J]. Optics Communications, 2019, 440: 117-125.
- [48] Jin Y, Li Z L. A new method for eliminating speckle noise from Laser Doppler Vibrometer signals[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2041(1): 012007.
- [49] Li R, Wang T, Zhu Z G, et al. Vibration characteristics of various surfaces using an LDV for long-range voice acquisition[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 11(6): 1415-1422.
- [50] Wang Y H, Zhang W X, Wu Z, et al. Highly-accurate and real-time speech measurement for laser Doppler vibrometers[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2022, 105(9): 1568-1580.
- [51] Chen H K, Wang T F, Wu S S, et al. Research on separation and enhancement of speech micro-vibration from macro motion[J]. Optoelectronics Letters, 2020, 16(6): 462-466.
- [52] Peng R H, Zheng C S, Li X D. Bandwidth extension for speech acquired by laser Doppler vibrometer with an auxiliary microphone[C]//2015 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), December 2-4, 2015, Singapore. New York: IEEE Press, 2016.
- [53] Cai C K, Iwai K, Nishiura T, et al. Speech enhancement for optical laser microphone with deep neural network[C]//2020 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), December 7-10, 2020, Auckland, New Zealand. New York: IEEE Press, 2020: 449-454.
- [54] 张文璐. 激光侦测系统中的语音增强技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017: 13-15.
Zhang W L. Research on the speech enhancement technique of laser detector system[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017: 13-15.
- [55] Peng S P, Lü T, Han X Y, et al. Remote speaker recognition based on the enhanced LDV-captured speech[J]. Applied Acoustics, 2019, 143: 165-170.
- [56] Lü T, Guo J, Zhang H Y, et al. Acquisition and enhancement of remote speech signals[J]. Optoelectronics Letters, 2017, 13(4): 275-278.
- [57] Cohen I, Berdugo B. Speech enhancement for non-stationary noise environments[J]. Signal Processing, 2001, 81(11): 2403-2418.
- [58] 屈直, 张伯虎. 一种改进的小波阈值算法在激光侦听中的应用[J]. 激光技术, 2014, 38(2): 218-224.
Qu Z, Zhang B H. An improved wavelet threshold algorithm applied in laser interception[J]. Laser Technology, 2014, 38(2): 218-224.
- [59] Chen F M, Li C T, An Q, et al. Noise suppression in 94 GHz radar-detected speech based on perceptual wavelet packet[J]. Entropy, 2016, 18(7): 265.
- [60] Chen F M, Li S, Li C T, et al. A novel method for speech acquisition and enhancement by 94 GHz millimeter-wave sensor[J]. Sensors, 2015, 16(1): 50.
- [61] Wang D L, Chen J T. Supervised speech separation based on deep learning: an overview[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2018, 26(10): 1702-1726.
- [62] 白涛, 吴谨, 李明磊, 等. DRNN在激光多普勒测振仪测声系统中的应用[J]. 激光技术, 2019, 43(1): 109-114.
Bai T, Wu J, Li M L, et al. Application of DRNN in voice measurement system of laser Doppler vibrometer[J]. Laser Technology, 2019, 43(1): 109-114.
- [63] Liu C, Ai Y, Ling Z H. Phase spectrum recovery for enhancing low-quality speech captured by laser microphones[C]//2021 12th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP), January 24-27, 2021, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [64] Hao X, Su X D, Wang Z Y, et al. UNetGAN: a robust speech enhancement approach in time domain for extremely low signal-to-noise ratio condition[C]//Interspeech, September 15-19, 2019, Graz, Austria.[S.l.]:[s.n.], 2019:1786-1790.
- [65] Pandey A, Wang D L. TCNN: temporal convolutional neural network for real-time speech enhancement in the time domain[C]//ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 12-17, 2019, Brighton, UK. New York: IEEE Press, 2019: 6875-6879.
- [66] Wang Y H, Zhang W X, Kong X X, et al. Two-sided LPC-based speckle noise removal for laser speech detection systems[J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2021, 104(6): 850-862.