

激光与光电子学进展

基于法布里-珀罗微腔结构的光纤声传感系统研究

尹玺¹, 万生鹏^{1,2*}, 熊新中¹, 董德壮¹, 刘恒¹, 肖登¹, 雷盈¹

¹南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学无损检测与光电传感技术及应用国家地方联合工程实验室, 江西 南昌 330063

摘要 对基于法布里-珀罗(F-P)微腔结构的光纤声传感系统进行研究。传感头由具有高熔点、低热膨胀系数的氧化锆(ZrO_2)管贴合氧化石墨烯(GO)薄膜制作而成。测试结果显示,F-P微腔的腔长为 $92.943\ \mu\text{m}$,反射谱的干涉对比度达25 dB。对传感头的声音传感性能进行测试,结合多帧比较法,实现了语音前导无话帧的自动识别。运用基于小波包变换的维纳滤波方法对采集到的信号进行去噪,相比单纯运用维纳滤波的方法,信噪比提高了1.5 dB,从而提高了语音质量。整个系统结构简单、成本低、实用性高,应用场景广泛。

关键词 测量; 光纤声传感; 法布里-珀罗; 氧化锆; 氧化石墨烯; 小波包变换; 维纳滤波

中图分类号 TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0312003

Study of a Optical Fiber Acoustic Sensing System Based on F-P Microcavity Structure

Yin Xi¹, Wan Shengpeng^{1,2*}, Xiong Xinzhong¹, Dong Dezhuang¹, Liu Heng¹, Xiao Deng¹,
Lei Ying¹

¹Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China;

²National Engineering Laboratory for Nondestructive Testing and Optoelectric Sensing
Technology and Application, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract In this paper, a optical fiber acoustic sensing system based on the Fabry-Perot (F-P) microcavity structure is studied. The sensor head composed of a zirconia (ZrO_2) tube with a high melting point and low thermal expansion coefficient bonded to graphene oxide (GO) diaphragm. Test results show that the cavity length of the F-P microcavity is $92.943\ \mu\text{m}$. Further, the interference contrast of the reflection spectrum is 25 dB. Additionally, the sound sensing performance of the sensor head is tested. Combined with the multiframe comparison method, the automatic recognition of speech leading to silent frames is realized. The Wiener filtering method based on wavelet packet transform is used to denoise the collected signals. Moreover, the signal-to-noise ratio of this method improves by 1.5 dB compared with that of the Wiener filtering method only, thus improving the quality of the speech. The attributes of the entire system include a simple structure, low cost, high practicability, and wide application scenarios.

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2020-07-03; 录用日期: 2020-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(61465009)、江西省主要学科学术和技术带头人资助计划(20172BCB22012)、江西省自然科学基金重点项目(20202ACBL202002)

*E-mail: sp_wan@163.com

Key words measurement; fiber optic acoustic sensing; Fabry-Perot; ZrO_2 ; GO; wavelet packet transformation; Wiener filtering

OCIS codes 120.2230; 280.4788; 070.1060

1 引言

声波是信息和能量的载体。随着信息技术发展日新月异,对传感器探测声信号时的灵敏度和带宽提出了越来越高的要求。近年来,光声传感技术逐渐成为声传感研究的热点之一。

光纤声传感技术在 20 世纪 70 年代产生并迅速发展起来,相比传统的电声传感器,由于光波检测精度高、光纤工作频带宽、传输损耗小等优势,光纤声传感器具有灵敏度高、信噪比高、频带响应宽、动态范围大等优点^[1]。由于不受电磁干扰,加上各类新型光纤材料(如蓝宝石光纤、塑料光纤)的出现,光纤声传感器可用于传统电声传感器难以正常工作的高温、高压、强辐射、强电磁等环境。因此,光纤声传感器在国防安全^[2]、核电站安全监控^[3]、医疗诊断^[4]、油气分离检测^[5]等领域有广泛应用。

对比各类光纤声传感器,光纤法布里-珀罗(F-P)传感结构在灵敏度、动态范围、微型化等方面优势明显^[6]。光纤 F-P 声传感器可分为本征型(IFPI)和非本征型(EFPI),其中膜片式 F-P 声传感器是 EFPI 最常见的结构,不同材料的膜片对声音有着不同的检测效果和频率响应,特质的膜片式 F-P 声传感器可检测频率小于 20 Hz 的次声信号^[7]。随着石墨烯及衍生材料的兴起,许多课题组开始研究石墨

烯及衍生材料作为声压敏感膜片制成的 F-P 声传感器。Ma 等^[8]利用石墨烯薄膜,加工得到直径为 25 μm 的 EFPI 结构,灵敏度为 39.4 nm/kPa。2016 年,Ganye 等^[9]利用石墨烯制成微型光纤声压传感器,第一次对声学超材料的声场分布进行了测试。

在此背景下,本文对具有 F-P 微腔结构的光纤声传感系统进行了研究。

2 F-P 微腔传感头原理及制作

二氧化硅、金属、硅胶聚合物、石墨烯等材料作为声压薄膜广泛应用于 F-P 光纤声传感器中^[10]。其中石墨烯的衍生材料 GO 制备工艺简单,因其良好的亲水性和分散性,可用于制备能与任意衬底集成的石墨烯薄膜^[11]。由溶液沉积法制备的 GO 薄膜的机械性能卓越,其单层的 GO 杨氏模量为 207.6 GPa,极限强度为 76.8 MPa^[12]。

将氧化锆(ZrO_2)管作为传感头载体,管中间是直径为 0.126 mm 的狭道,插入去除涂覆层的单模光纤,一端镂空,再贴上 GO 薄膜,就组成膜片式非本征型 F-P 微腔光纤声传感器,如图 1 所示。相比于传统玻璃传感头,氧化锆结构的 EFPI 具备高强度、耐高温的优良特性^[13],更适应恶劣的工作环境。

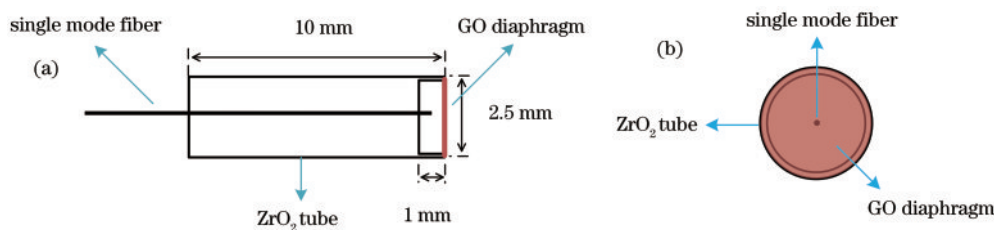


图 1 传感头结构。(a) 主视图;(b) 左视图

Fig. 1 Sensor head structure. (a) Main view; (b) left view

2.1 F-P 微腔传感原理

图 2 为 F-P 微腔传感原理图。光纤端面与 GO 薄膜形成 F-P 微腔,腔内介质为空气,折射率约为 1。光在光纤端面的反射率 R 大约为 4%,即满足 $R \ll 1$, $(1-R)^2 \approx 1$,此时多光束干涉可近似看作为双光束干涉。在光纤 F-P 微腔中,光近乎垂直入射端面,当光在光纤端面的强度与 GO 薄膜

反射的光强相同时,反射光强可表示为

$$I_R = 2R(1 - \cos \frac{4\pi L}{\lambda}) I_0, \quad (1)$$

式中: L 为微腔腔长; λ 为光源波长; I_R 为反射光强; I_0 为入射光强。

声波引起 GO 薄膜振动,从而引起腔长 L 改变,由(1)式可知, I_R 就会发生改变,只要检测 I_R 的变化

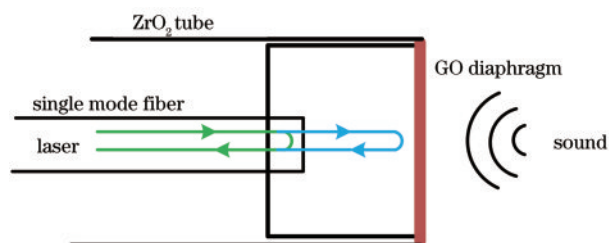


图 2 F-P 微腔传感原理图

Fig. 2 Schematic of F-P microcavity sensing

就可以解调出声音信号。

2.2 传感头制作

首先利用溶液沉积法制作面积为 0.25 cm^2 的正方形的 GO 薄膜^[14], 如图 3 所示, 将其置于去离子水中。采用体积比为 150 mL/L 的 GO 水溶液, 制成的薄膜厚度在 340 nm 左右。在配置 GO 水溶液时, 应注意要使用纯净去离子水且使 GO 充分溶解, 这样制成的 GO 薄膜才更稳定, 不易散。



图 3 制作的 GO 薄膜

Fig. 3 Fabricated GO diaphragm

用去掉涂覆层的单模光纤清除 ZrO_2 管内细小灰尘, 然后将镂空的一端用纯乙醇擦拭干净, 用镊子夹住 ZrO_2 管缓慢向下移动, 使悬浮的 GO 薄膜贴在 ZrO_2 管端面的正中央。当水分蒸发后, 由于范德瓦耳斯力, 薄膜会紧紧贴合在 ZrO_2 管上。

将去掉涂覆层并切割好的单模光纤插入固定在安装座上的 ZrO_2 管中, 去除涂覆层部分的光纤长度控制为 10 mm, 以免裸露光纤暴露在空气中, 容易断裂。光纤后端固定在型号为 Zolix APFP-XYZL 的位移台上, 通过调节距离, 精确控制微腔腔长。宽带光源发出的光束进入环形器到达 F-P 传感器, 将光纤的另一端接入光谱仪, 实时观测最佳的干涉对比度, 确定合适的腔长。当干涉对比度达到最高时, 将适量无机高温胶涂在光纤和 ZrO_2 管插口处, 缓慢调整位移台, 消除胶水风干时造成的光纤微小移动, 使干涉对比度始终保持最大。

由图 4(a) 光谱仪所示, 干涉对比度为 25 dB, 相邻两波峰分别为 $\lambda_1 = 1540.90 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1553.78 \text{ nm}$ 。根据条纹计数法^[15]公式:

$$L = \frac{\lambda_n \lambda_{n+1}}{2(\lambda_n - \lambda_{n+1})}, \quad (2)$$

可得该传感头腔长 $L = 92.943 \mu\text{m}$ 。

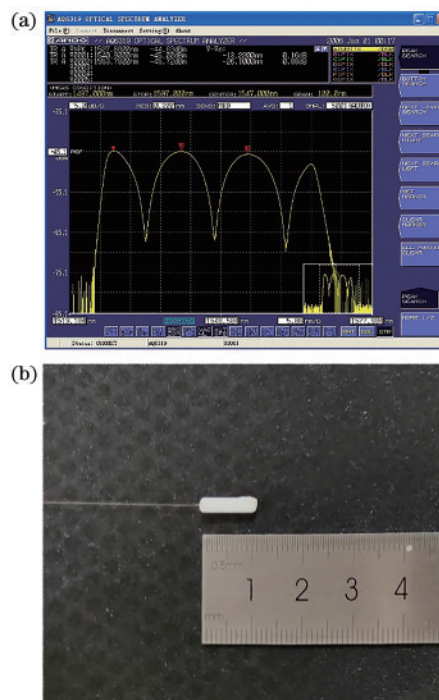


图 4 传感头封装。(a) 干涉对比度最大时的光谱仪显示;
(b) 封装好的 F-P 传感头

Fig. 4 Packaged sensor head. (a) Spectrometer display at the maximum interference contrast; (b) encapsulated F-P sensor head

3 基于 F-P 微腔结构的光纤声传感系统搭建

用手机播放一段诗歌朗诵音频, 放在正对传感头 0.1 m 位置处。单频激光器输出的 1550 nm 激光经光纤环形器到达 F-P 微腔传感头, 光纤端面的反射光与 GO 膜片的反射光发生双光束干涉效果, 干涉光经光纤环形器进入光电探测器。由现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 控制的模数转换 (AD) 芯片采集光电探测器的输出电压, 并将其暂存在先进先出存储器 (FIFO) 中, 再通过 UART 串口读取 FIFO 数据并向上位机发送数据, 上位机利用 LabVIEW 开发软件接收数据并调用 MATLAB 程序联合编程进行语音信号处理, 系统框图如图 5 所示。

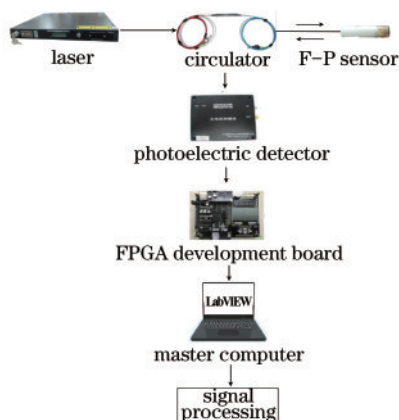


图 5 基于 F-P 微腔结构的光纤声传感器系统

Fig. 5 Optical fiber acoustic sensor system based on F-P microcavity structure

采集系统选用型号为 EP4CE10F17C8 的 FPGA 芯片, AD 采集芯片型号为 AD7606, 系统采样率设置为 11025 Hz。AD7606 位数为 16, 最高位为符号位, 实际数据位有 15, 采集的模拟电压为 $-5 \sim 5$ V, 采样精度为 0.153 mV。

选取一段系统采集的语音信号, 并进行幅值归一化处理, 如图 6 所示。

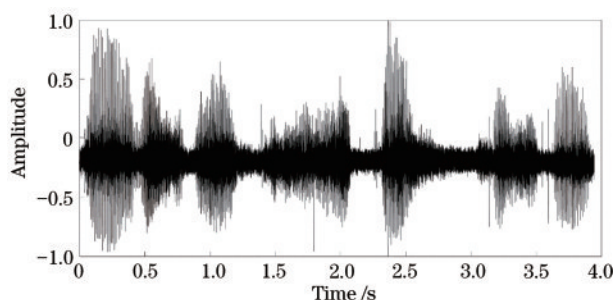


图 6 系统采集的语音信号

Fig. 6 Speech signals collected by the system

4 基于小波包的维纳滤波语音信号处理

本系统运用改进后的基于小波包变换的维纳去噪算法进行语音信号处理。小波分析^[16]把信号 X 分解成低频信息 a_1 和 高频信息 d_1 两部分, 在分解过程中, 低频信息 a_1 中失去的信息由高频信息 d_1 捕获; 在下一层的分解中, 又将 a_1 分解成低频 a_2 和 高频 d_2 两部分, 低频 a_2 中失去的信息由高频 d_2 捕获; 依此类推, 可以进行更深层的分解。但是, 小波分析仅仅对每一层的低频信号进行进一步分解, 而高频信号则被保留, 这使得小波分析后的信号频率分辨率随着频率的升高而降低。

在这种情况下, 小波包分解的出现解决了这种缺陷, 它不仅对低频部分进行分解, 对高频部分也实施了分解, 如图 7 所示。

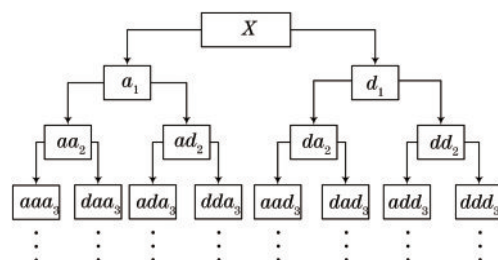


图 7 小波包分解树

Fig. 7 Wavelet packet decomposition tree

对采集的语音信号小波包进行分解时发现, 在第 2 分解层中, 语音波形显示最明显, 因此只需把小波包分解层数设定为 2。

维纳滤波是一种基于最小方均误差准则、对平稳过程进行最优估计的估计器。传统的维纳去噪算法中的前导无话帧时间需要根据主观判断进行手动设置, 在实时处理中, 前导无话帧时间随着实际情况变化而变化, 不是固定的。本文提出一种多帧比较法, 选取相邻的多帧信号的功率谱, 并对其和平均功率谱进行比较, 自动识别无话帧。如图 8

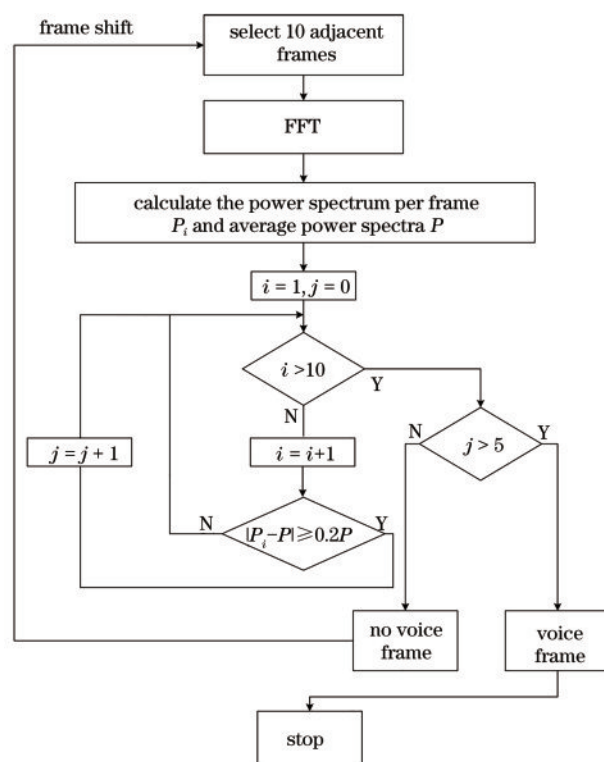


图 8 多帧比较法

Fig. 8 Multiple-frame comparison method

所示,其中,FFT为快速傅里叶变换。

当有一半及以上的信号功率谱与平均功率谱之差的绝对值大于平均功率谱的 20%,则判断选取的多帧为有话帧;当小于 20%时,则为无话帧,并帧移选取下一多帧信号进行判断,直至选出一段无话帧进行维纳滤波处理。此方法以 20% 阈值自动判别有话帧和无话帧,大大减小了偶然误差。

接下来对系统采集到的语音信号进行处理。系统在采集数据时,由于温度变化、光源抖动、电路噪声等原因,语音信号存在趋势项。针对这种现象,采用最小二乘法消除趋势项^[17],如图 9 所示。

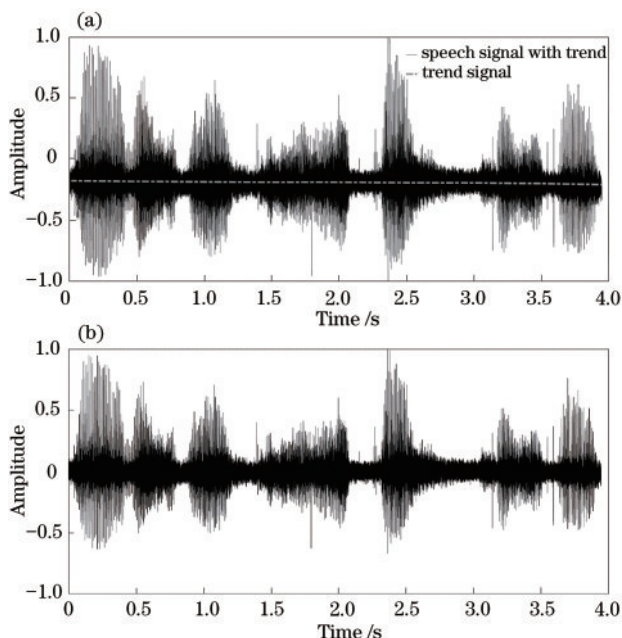


图 9 最小二乘法消除趋势项。(a) 系统采集的语音信号; (b) 消除趋势项后的语音信号

Fig. 9 Trend term eliminated by least square method. (a) Speech signals collected by the system; (b) speech signals after elimination trend terms

从图 9 可以看出,信号趋势项已基本消除。采用维纳去噪算法对已消除趋势项的语音信号进行降噪处理,如图 10 所示。

从图 10 可看出,经维纳去噪算法处理后,信号噪声明显减小,经计算,维纳去噪后语音信号的信噪比为 6.7997 dB。图 11 是消除趋势项后的语音信号经维纳去噪前后的语谱图。

语谱图反映语音信号的动态频谱特性,灰度条纹代表各个时刻的语音短时谱,颜色深浅代表数据能量大小^[18]。由图 11 可看出:维纳去噪前,语音信号的语谱图中声纹杂乱,在各个地方存在杂点;维纳去噪后,可清楚看到谐波的结构,频率分辨率好,

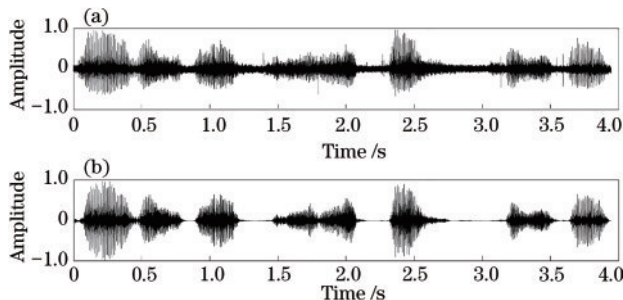


图 10 维纳去噪前后的信号。(a) 语音信号; (b) 维纳去噪后的语音信号

Fig. 10 Signal before and after Wiener denoising. (a) Speech signal; (b) speech signal after Wiener denoising

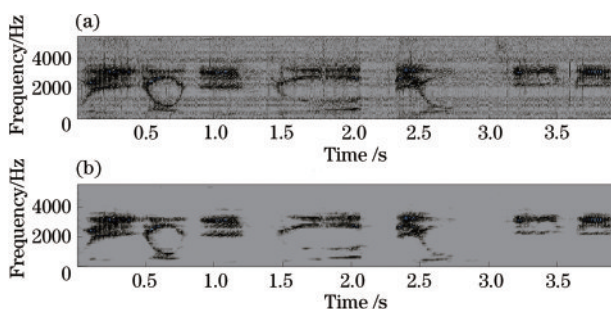


图 11 维纳去噪前后的语谱图。(a) 语谱图; (b) 维纳去噪后的语谱图

Fig. 11 Speech spectra before and after Wiener denoising. (a) Speech spectrum; (b) speech spectrum after Wiener denoising

声纹清晰。

采用基于小波包变换的维纳去噪算法对消除趋势项的语音信号进行处理,先对语音信号进行小波包分解,分解层数为 2,小波函数选用“db2”,熵标准采用“Shanon”。小波包分解后,对时间序列分解的一维小波包系数 3,4,5,6 进行重构,图像如图 12 所示。

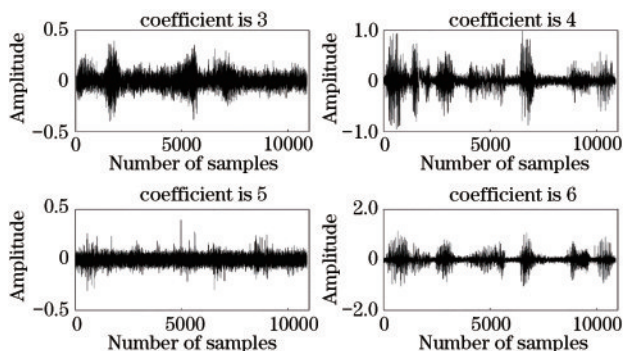


图 12 一维小波包系数重构图

Fig. 12 Reconstructed graphs of one-dimensional wavelet packet coefficient

对一维小波包系数 3, 4, 5, 6 分别进行维纳去噪处理, 结果如图 13 所示。

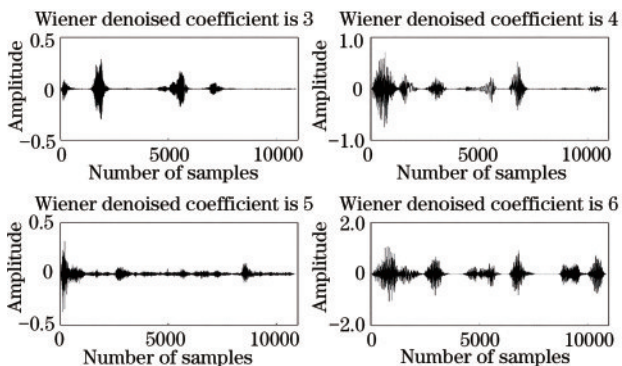


图 13 维纳去噪后的一维小波包系数

Fig. 13 One-dimensional wavelet packet coefficient after Wiener denoising

将维纳去噪后的一维小波包系数 3, 4, 5, 6 作为小波包树的底层, 对其进行一维小波包分解重构, 得到基于小波包变换的维纳去噪算法处理后的信号图和语谱图, 如图 14 所示。

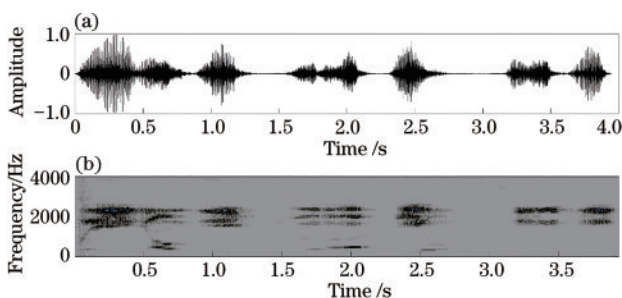


图 14 基于小波包变换的维纳去噪法处理后语音信号图和语谱图。(a) 语音信号图; (b) 语谱图

Fig. 14 Speech signal graph and speech spectrum graph obtained by Wiener denoising method based on wavelet packet transform. (a) Speech signal graph; (b) speech spectrum graph

经计算, 采用基于小波包变换的维纳去噪方法处理后的语音信号信噪比为 8.2766 dB, 相比单纯采用维纳去噪的方法, 信噪比提高了将近 1.5 dB。从图 14(b) 可看出, 经基于小波包变换的维纳去噪法处理后, 语谱图中谐波结构、频率分辨率及声纹质量都更好。从主观人耳听觉辨识度上比较, 其质量也是最好的。

5 结 论

对基于 F-P 微腔结构的光纤声传感系统进行了研究, 制作了性能优良的基于 GO 薄膜的光纤 F-P

微腔传感头。通过结合语音前导无话帧识别技术和小波包变换的维纳滤波算法, 实现了较好的语音传感效果。该传感器可望在监狱监控、石油管道泄露监控、矿井风力测试等领域获得应用。

参 考 文 献

- [1] Gao C M, Nie F, Zhang P, et al. Optical fiber acoustic sensors [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(9): 180050.
高椿明, 聂峰, 张萍, 等. 光纤声传感器综述[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 180050.
- [2] Fischer B. Optical microphone hears ultrasound [J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 356-358.
- [3] Song Z R, Li X Y, Li Y X, et al. Research on the application of optical fiber sensing technology in the nuclear power plant safety monitoring [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2017, 23(3): 297-304.
宋祖荣, 李晓洋, 李懿轩, 等. 光纤传感技术在核电站安全监测中的应用研究[J]. 量子光学学报, 2017, 23(3): 297-304.
- [4] Preisser S, Rohringer W, Liu M Y, et al. All-optical highly sensitive akinetic sensor for ultrasound detection and photoacoustic imaging [J]. Biomedical Optics Express, 2016, 7(10): 4171-4186.
- [5] Ma F X, Tian Y, Chen K, et al. Technique for detection of dissolved gas in oil based on miniature photoacoustic sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0730003.
马凤翔, 田宇, 陈珂, 等. 基于微型光声传感器的油中溶解气体检测技术[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0730003.
- [6] Cai N. The simulation and demodulation of optical fiber FP sensing structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
蔡念. 光纤 FP 传感结构的仿真及解调系统设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [7] Li H Z, Wu G M, Ma Z J, et al. Preparation of fiber-optic interferometer based infrasound sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(15): 150603.
李汉正, 吴高米, 马振钧, 等. 光纤干涉次声传感器研制[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 150603.
- [8] Ma J, Jin W, Ho H L, et al. High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2493-2495.
- [9] Ganye R, Chen Y Y, Liu H J, et al. Characterization

- of wave physics in acoustic metamaterials using a fiber optic point detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(26): 261906.
- [10] Liu B. Research on key technologies of micro fiber acoustic sensor based on Fabry-Perot interferometer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 69-72.
刘彬. 基于 Fabry-Perot 干涉仪的微型光纤声压传感器关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 69-72.
- [11] Chen Z D, Li J C, Xiao S L, et al. Laser reduced graphene oxide for thin film flexible electronic devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111428.
陈招弟, 李纪超, 萧善霖, 等. 激光还原氧化石墨烯制备薄膜柔性电子器件 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111428.
- [12] Li C. Research on fiber microcavity acoustic sensors based on graphene hybrid film [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 15.
李晨. 石墨烯复合薄膜光纤微腔声波传感器件研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 15.
- [13] Lin Z H. Characteristics of zirconium oxide and its applications and development in structure ceramics [J]. *Rare Metals Letters*, 2004, 23(6): 6-10.
林振汉. 氧化锆材料的特性及在结构陶瓷中的应用和发展 [J]. *稀有金属快报*, 2004, 23(6): 6-10.
- [14] Yuan C Q. Graphene thin films with controllable fabrication and their performance, application [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016: 32-34.
苑春秋. 石墨烯薄膜的可控制备及其性能、应用研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016: 32-34.
- [15] Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(4): 273-275.
- [16] Zhang J Y, Zhang B, Jiang X Z. Analyses of feature extraction methods based on wavelet transform [J]. *Signal Processing*, 2000, 16(2): 156-162, 155.
张静远, 张冰, 蒋兴舟. 基于小波变换的特征提取方法分析 [J]. *信号处理*, 2000, 16(2): 156-162, 155.
- [17] Yun W G, Li C. Eliminating tendency processing methods of vibration signal based on MATLAB [J]. *Auto Engineer*, 2011(6): 27-29.
运伟国, 李超. 基于 MATLAB 的振动信号消除趋势项处理方法 [J]. *汽车工程师*, 2011(6): 27-29.
- [18] Wang R D, Chai P Q. Research on speech cepstral features [J]. *Computer Engineer*, 2003, 29(13): 31-33.
王让定, 柴佩琪. 语音倒谱特征的研究 [J]. *计算机工程*, 2003, 29(13): 31-33.