

## 激光与光电子学进展

## 直线型 Sagnac 光纤语音传感器及语音降噪的研究

熊新中<sup>1</sup>, 万生鹏<sup>1,2\*</sup>, 刘恒<sup>1</sup>, 尹玺<sup>1</sup>, 肖登<sup>1</sup>, 董德壮<sup>1</sup>, 孙继周<sup>1</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>南昌航空大学无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063

**摘要** 光纤语音传感器具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高和传感距离远等优势, 但用其进行语音探测时往往存在较大的噪声, 极大影响了语音信号的质量。为了对语音信号进行降噪处理, 针对光纤语音传感系统提出了一种基于端点检测的多窗谱估计谱减法。通过端点检测判断噪声帧与语音帧, 以实现噪声平均幅值的估计。搭建的直线型 Sagnac 光纤语音传感实验结果表明, 相比传统谱减法及多窗谱估计谱减法, 本方法对背景噪声的抑制效果更好, 降噪后语音信号的信噪比可提高 2~3 dB。

**关键词** 测量与计量; Sagnac 效应; 声音传感; 谱减法; 端点检测; 语音降噪

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1106002

## Research on Linear Sagnac Optic Fiber Speech Sensor and Noise Reduction

Xiong Xinzong<sup>1</sup>, Wan Shengpeng<sup>1,2\*</sup>, Liu Heng<sup>1</sup>, Yin Xi<sup>1</sup>, Xiao Deng<sup>1</sup>,  
Dong Dezhuang<sup>1</sup>, Sun Jizhou<sup>1</sup><sup>1</sup>Jiangxi Engineering Laboratory for Optoelectronics Testing Technology, Nanchang Hangkong University,  
Nanchang, Jiangxi 330063, China;<sup>2</sup>Optical Fiber Sensing and Optical Fiber Communication Key Laboratory of Jiangxi Province,  
Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

**Abstract** Optical fiber speech sensors have the advantages of anti-electromagnetic interference, high sensitivity, and long sensing distance. However, there are often much noise when using them for speech detection, which greatly affects the quality of speech signals. To reduce the influence of noise on the speech signal, a multiwindow spectrum estimation spectrum subtraction method based on endpoint detection for the optical fiber speech sensor system is proposed in this paper. Through endpoint detection, it is determined whether the signal is a speech frame to realize the estimation of the average noise amplitude. The constructed linear Sagnac optical fiber speech sensing experiment results show that compared with traditional spectral subtraction and multiwindow spectrum estimation spectrum subtraction methods, the method has a better suppression effect on background noise, and the signal-to-noise ratio of the speech signal can be increased by 2-3 dB.

**Key words** measurement and metrology; Sagnac effect; sound sensing; spectral subtraction method; endpoint detection; speech noise reduction

**OCIS codes** 060.2370; 070.1060; 120.5790

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-10-24; 录用日期: 2020-11-05

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

# 1 引言

光纤语音传感器具有灵敏度高、结构尺寸小、前端无源、不易受电磁干扰、易实现分布式架构等优点,被广泛应用于声探测、语音通信以及光声光谱等领域<sup>[1-3]</sup>。国内研究人员已经设计了多种类型的光纤语音传感器,如基于 Mach-Zehnder、Michelson 及 Sagnac 的干涉型分布式光纤语音传感器<sup>[3-6]</sup>、基于光纤布拉格光栅(FBG)及光纤 Fabry-Perot(F-P)腔的单元式语音传感器<sup>[7-8]</sup>。基于 Mach-Zehnder 的光纤语音传感器在实际应用中存在零光程差问题,且需要对偏振态进行控制。基于 Michelson 的光纤干涉型语音传感器的干涉信号会被反射进激光光源,影响系统的稳定性。基于 FBG 的光纤传感器体积小、结构简单,但其信号解调时需要结合波长检测技术。相比 Mach-Zehnder、F-P 光纤干涉仪, Sagnac 光纤干涉仪的干涉光路是互易的对称结构,可采用宽带光源,成本更低、系统更稳定<sup>[9-12]</sup>。

声音信号在产生、传输和接收过程中,会受到外界其他环境噪声及光电接收机噪声(散粒噪声、热噪声等)的干扰。常见的语音降噪法有最小均方误差法<sup>[13]</sup>、小波变换法<sup>[14]</sup>、谱减法<sup>[15-19]</sup>等。最小均方误差法可适用于信噪比(SNR)较大的语言信号,但计算量较大;小波变换法可以很好地结合其他算法,具有多分辨特性,但计算量也较大,不易于进行

实时语音降噪;且需要凭借经验选择小波基,自适应能力有限,难以确定阈值。谱减法的计算量较小,实现简单,且只需对噪声进行估计。Thomson<sup>[20]</sup>提出了一种基于正交窗口功率谱估计和多窗谱估计方法对分帧信号进行功率谱估计的谱减法,在环境噪声变化较小的情况下可得到噪声较小的功率谱估计值,但非平稳情况下的噪声谱变化较大,相邻语音帧的关联较小,估计误差较大,语音质量也较低。

针对上述问题,本文提出了一种结合直线型 Sagnac 光纤语音传感器与语音降噪的一体化设计。在多窗谱估计的谱减法中引入端点检测方法,以实现光纤传感器检测信号噪声功率的平滑估计,减小功率谱估计误差。通过调整增益因子抑制谱减法中产生的音乐噪声,达到提高语音质量的目的。

# 2 直线型 Sagnac 光纤语音传感器

直线型 Sagnac 光纤语音传感器系统的结构如图 1 所示,其中,PD 为光电探测器,PC 为接收端。该系统由放大自发辐射(ASE)宽带光源、一个 3×3 耦合器、2 个 2×2 耦合器、两个 PD、数据采集卡(DAQ)、PC 端及若干单模光纤组成。信号光在光纤链路中的 4 条传播路径:A-B-D-E-F-E-D-C-A (I)、A-C-D-E-F-E-D-B-A (II)、A-B-D-E-F-E-D-B-A (III)、A-C-D-E-F-E-D-C-A (IV)

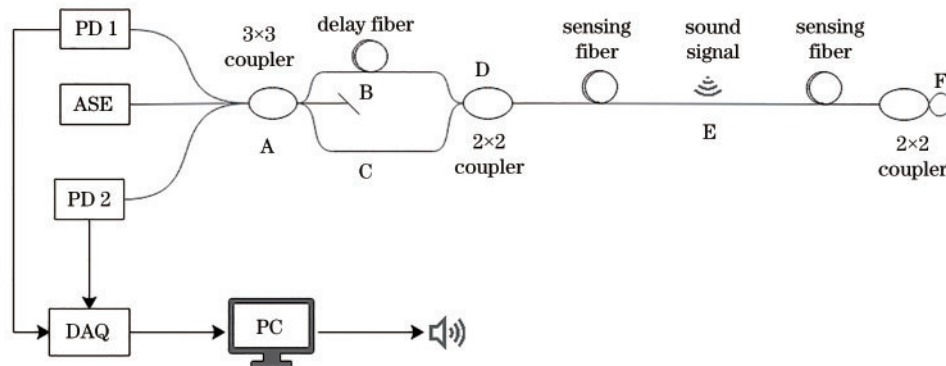


图 1 直线型 Sagnac 光纤语音传感系统

Fig. 1 Optical fiber speech system based on linear Sagnac

当在 E 点对传感光纤施加一个声音振动信号时,弹光效应导致振动信号对经过该处的光相位发生变化,从而影响干涉光的强度。只有路径 I、II 中传播的信号光光程差近似相等,满足干涉条件。而路径 III、IV 中传播的信号光光程相差太大,超出光源的相干长度,不能发生干涉,只能形成直流背

景信号,可通过带通滤波器滤除。声音振动信号可表示为

$$f(t) = \sum_m B_m \sin(\omega_{sm}t), \quad (1)$$

式中,  $\omega_{sm}$ 、 $B_m$  分别为  $m$  点处声音振动信号的频率和幅值。声音振动信号引起的相位差变化可表示为<sup>[21]</sup>

$$\Delta\phi \propto \phi_1(t) - \phi_2(t) = \sum_m B_m [\sin \omega_{sm}(t - \tau_1) + \sin \omega_{sm}(t - \tau_2) - \sin \omega_{sm}(t - \tau_3) - \sin \omega_{sm}(t - \tau_4)] = 4 \sum_m B_m \cos\left(\omega_{sm} \frac{\tau_4 - \tau_3 + \tau_2 - \tau_1}{4}\right) \sin\left(\omega_{sm} \frac{\tau_3 + \tau_4 - \tau_1 - \tau_2}{4}\right) \cos\left[\omega_{sm} t - \frac{\omega_{sm}(\tau_2 + \tau_3)}{2}\right], \quad (2)$$

式中,  $\propto$  为正比例符号,  $\tau_1$  为信号光沿路径 A-B-D-E 传播所需的时间,  $\tau_2$  为信号光沿路径 A-B-D-E-F-E 传播所需的时间,  $\tau_3$  为信号光沿路径 A-C-D-E 传播所需的时间,  $\tau_4$  为信号光沿路径 A-C-D-E-F-E 传播所需的时间。其中,  $\tau_2 + \tau_3$  为定值, 表示光在光纤传感链路中传输一个周期的时间。对  $\Delta\phi$  积分可得到带噪语音振动信号  $f(t)$ , 对带噪语音信号进行降噪处理, 可得到增强后的语音信号。

### 3 基于端点检测的多窗谱估计谱减法

传统周期图法只用一个数据窗, 而多窗谱估计用多个正交数据窗分别得到同一数据序列的直接谱, 然后求平均得到谱估计, 从而减小估计方差。多窗谱可表示为

$$S(\omega) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{L-1} S_k(\omega), \quad (3)$$

式中,  $M$  为窗的数量,  $L$  为序列长度,  $S_k(\omega)$  为第  $k$  个

数据窗的谱, 可表示为

$$S_k(\omega) = \left| \sum_{n=0}^{N-1} a_k(n) y(t) \exp(-j\omega n) \right|^2, \quad (4)$$

式中,  $y(t)$  为数据序列,  $N$  为序列长度,  $a_k(n)$  为第  $k$  个数据的窗函数, 且多个数据窗之间相互正交, 可表示为

$$\begin{cases} \sum a_k(n) a_q(n) = 0, & k \neq q \\ \sum a_k(n) a_q(n) = 1, & k = q \end{cases} \quad (5)$$

数据窗是一组相互正交的离散椭圆序列 (DPSS), 也被称为 Slepian 窗。谱减法是一种复杂性最低且最容易实现的语音增强法<sup>[22]</sup>, 通过减去输入连续信号中的估计噪声获取增强的语音信号。文献[18-19]用多窗谱估计法估计语音信号的功率谱, 以获得谱减增益。在此基础上, 引入对数频谱距离的端点检测<sup>[23]</sup>, 对噪声帧与语音帧进行判断, 得到更合适的噪声估计值并对功率谱进行平滑处理, 本方法的具体框架如图 2 所示, 具体步骤如下。

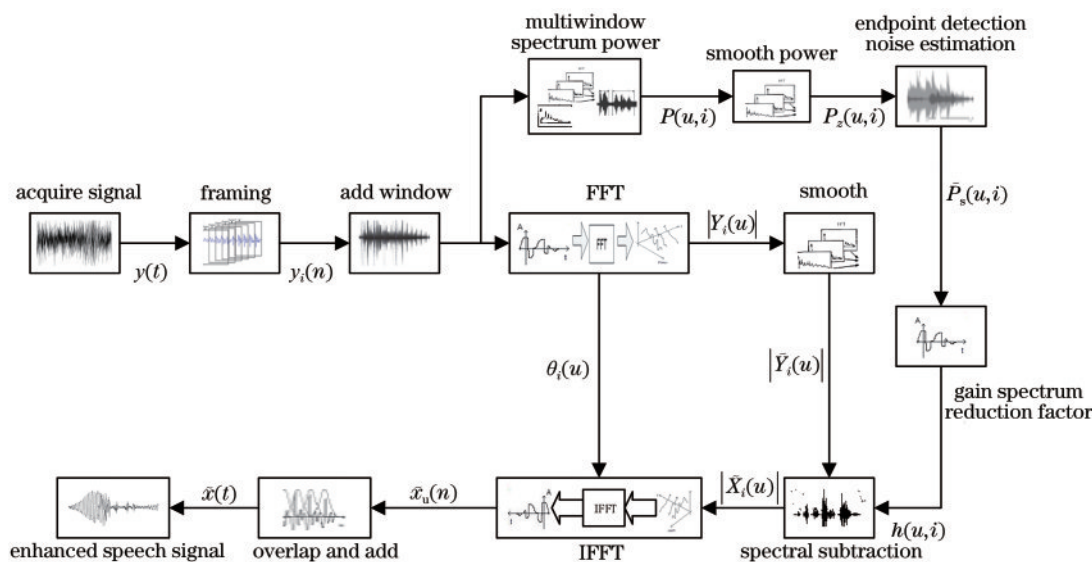


图 2 基于多窗谱估计改进的谱减法框图

Fig. 2 Block diagram of improved spectral subtraction method based on multiwindow spectral estimation

1) 设带噪语音为  $y(t)$ , 加窗分帧后的语音信号为  $y_i(n)$ ,  $i$  为帧数, 相邻帧之间的重叠率为 50%。

2) 对  $y_i(n)$  进行快速傅里叶变换 (FFT), 并得到其幅度谱  $|Y_i(u)|$  和相位谱  $\theta_i(u)$ 。以第  $i$  帧为中心, 前后各取  $L$  帧 (通常取  $L=1$ ) 进行平滑处理, 得到的平均幅度谱  $|\bar{Y}_i(u)|$  可表示为

$$|\bar{Y}_i(u)| = \frac{1}{2L+1} \sum_{j=-L}^L |Y_{i+j}(u)|. \quad (6)$$

3) 对  $y_i(n)$  进行多窗谱估计, 得到其功率谱密度  $P(u, i)$  为

$$P(u, i) = X_{\text{pwm}}[y_i(n)], \quad (7)$$

式中,  $X_{\text{pwm}}$  为窗函数,  $u$  为幅度。

4) 对  $P(u, i)$  进行帧间平滑处理, 得到其平滑功率谱密度  $P_z(u, i)$  为

$$P_z(u, i) = \frac{1}{2L+1} \sum_{j=-L}^L P(u, i+j), \quad (8)$$

式中,  $j$  为选取的前后帧数。

5) 对无语音段信号的寂静段进行噪声估计, 得到其功率谱密度  $P_s(u, i)$  为

$$P_s(u, i) = \frac{1}{X_{NIS}} P_z(u, i), \quad (9)$$

式中,  $X_{NIS}$  为选取的寂静段帧数。

6) 判断每帧数据的端点为噪声帧还是语音帧, 若为噪声帧, 则更新噪声平均幅值, 可表示为

$$\bar{P}_s(u, i) = \frac{X_{Noise} + X_{Signal}}{Z+1}, \quad (10)$$

式中,  $X_{Noise}$  为本帧信号前的噪声平均幅值,  $X_{Signal}$  为本帧信号的幅值,  $Z$  为常数, 一般取 9。

7) 谱减因子可表示为

$$h(u, i) = \begin{cases} [P_z(u, i) - \alpha \bar{P}_s(u, i)] / P_z(u, i), & P_z(u, i) - \alpha \bar{P}_s(u, i) \geq 0 \\ \beta \bar{P}_s(u, i) / P_z(u, i), & P_z(u, i) - \alpha \bar{P}_s(u, i) < 0 \end{cases}, \quad (11)$$

式中,  $\alpha$  为过减因子,  $\beta$  为增益补偿因子。选择适当的  $\alpha$  可以有效抑制音乐噪音,  $\alpha$  太大则会引起语音失真。

8) 由增益因子  $h(u, i)$  和平均幅度谱  $|\bar{Y}_i(u)|$  得到谱减幅度谱

$$|\bar{X}_i(u)| = h(u, i) \times |\bar{Y}_i(u)|. \quad (12)$$

将相位谱  $\theta_i(u)$  与  $|\bar{X}_i(u)|$  结合进行快速傅里叶逆变换 (IFFT), 得到增强后的语音信号  $\tilde{x}_u(n)$

$$\tilde{x}_u(n) = X_{IDFT} [|\bar{X}_i(u)| \exp(j)\theta_i(u)]. \quad (13)$$

得到信噪比 (SNR) 分别为 0 dB、5 dB、10 dB 的三种带噪语音信号。对三种不同 SNR 的语音信号进行降噪, 对比不同谱减法的降噪效果。用 SNR<sup>[24]</sup> 分别评价基本谱减法、多窗谱谱减法和本方法降噪后的语音信号, 结果如表 1 所示。可以发现, 对相同 SNR 的带噪语音信号降噪时, 本方法得到的语音信号 SNR 最高。三种降噪方法对 SNR 为 5 dB 的带噪语音信号进行语音增强后的波形如图 3 所示。

表 1 三种降噪方法的 SNR

Table 1 SNR of three noise reduction methods unit: dB

Original image	Basic spectrum reduction	Multi-window spectral	Ours
0	10.8031	11.0864	12.5445
5	13.5648	14.7374	16.2280
10	15.8611	17.3395	19.3395

## 4 实验结果与分析

### 4.1 数据测试与分析

首先对用 Audacity 录制的单通道语音数据进行测试, 录制语音信号采样频率为 15000 Hz, 采样时间约为 9 s。向录制语音信号中加入不同的白噪声,

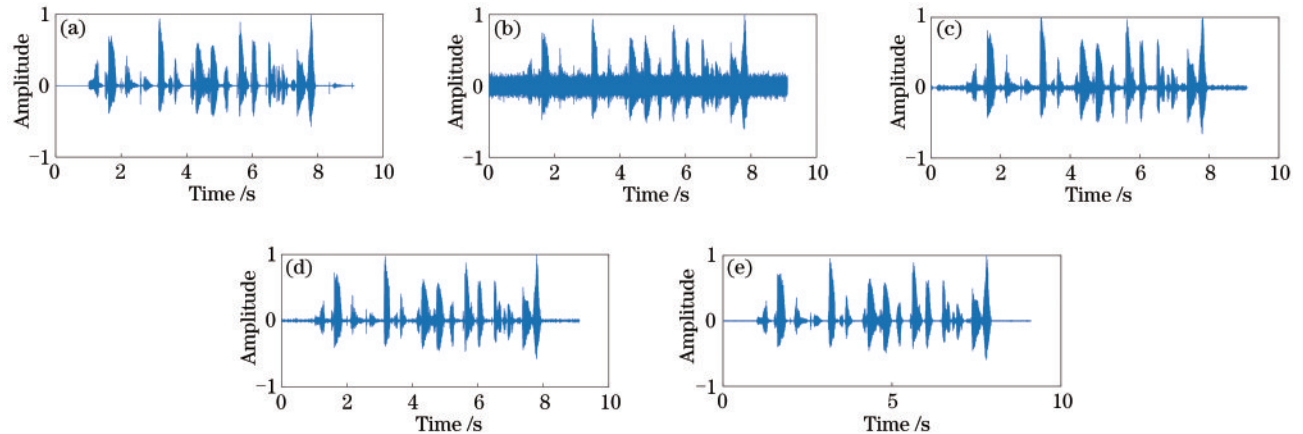


图 3 不同方法降噪后的语音信号波形 (SNR 为 5 dB)。(a) 原始语音信号波形; (b) 加噪后的语音信号波形; (c) 基本谱减法;

(d) 多窗谱估计谱法; (e) 基于端点检测的多窗谱估计谱法

Fig. 3 Speech signal waveforms after different methods of noise reduction (SNR is 5 dB). (a) Original speech signal waveform; (b) speech signal waveform after adding noise; (c) basic spectrum subtraction; (d) multiwindow spectrum estimation method; (e) multiwindow spectrum estimation method based on endpoint detection



### 4.2 实验测试

图 4 为按图 1 搭建的直线型 Sagnac 光纤语音传感系统,使用的光源是中心波长为 1550 nm 的 ASE 宽带光源,光功率为 5.06 mW;光电探测器由 PIN 型光电管、放大电路及滤波电路组成;光纤为 G652 普通单模光纤。实验过程中将裸光纤绕制若干圈作为传感环,如图 5 所示,并在其附近用手机播放录制的音频,作为语音激励信号。实验环境为嘈杂的室内,有风扇及其他设备的运行噪声,信号采样频率为 15000 Hz,采样时间约为 8 s。

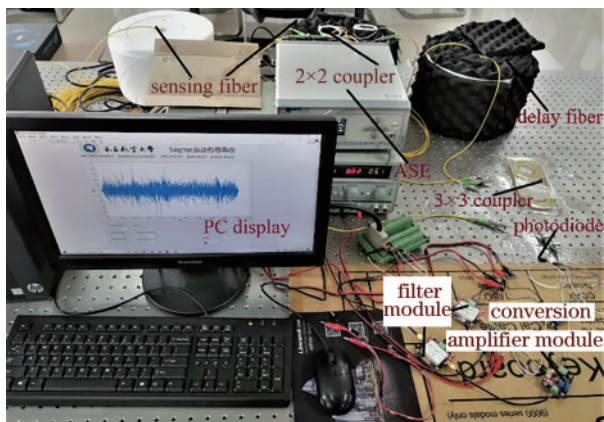


图 4 实验装置图

Fig. 4 Diagram of the experimental setup

将采集卡采集的信号传输到上位机,图 6 为实际采集的语音信号以及用不同方法降噪后语音信

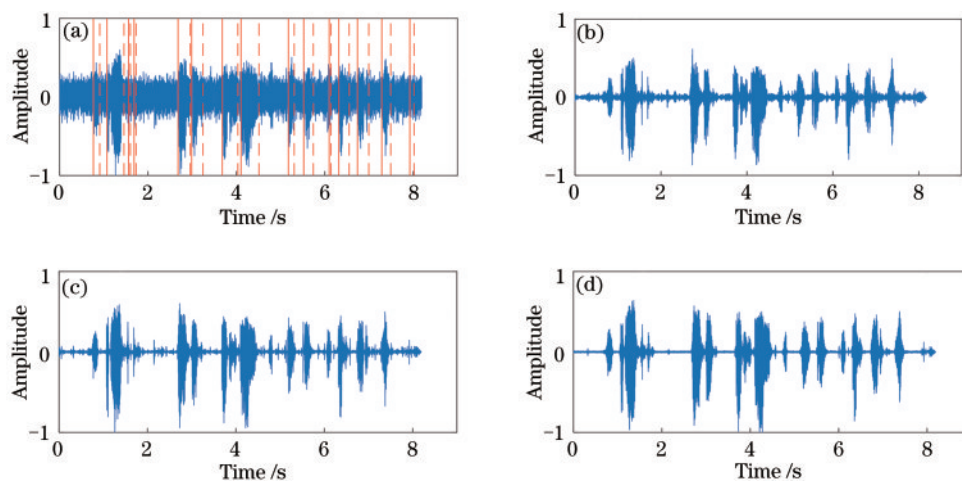


图 6 语音信号的时域波形。(a)原始语音波形;(b)基本谱减法;(c)多窗谱估计谱法;(d)基于端点检测的多窗谱估计谱法  
Fig. 6 Time-domain waveform of speech signal. (a) Original speech waveform; (b) basic spectral subtraction method; (c) multiwindow spectrum estimation method; (d) multiwindow spectrum estimation method based on endpoint detection

## 5 结 论

基于端点检测的多窗谱估计谱减法对直线型



图 5 传感环的实物图

Fig. 5 Physical image of the sensing ring

号的时域波形。对其进行端点检测标明语音位置,实线为起始位置,虚线为结束位置。可以看出,传感器输出的语音信号存在较多的噪声。

图 7 为图 6 对应的语谱图,可以发现,三种方法一定程度上都对采集信号起到了降噪效果。但传统谱减法与多窗谱估计谱减法对采集信号降噪增强后,残留的噪声较多,端点检测多窗谱估计谱减法的噪声去除效果更好。用耳机分别听处理后的增强语音,结果表明,基本谱减法与多窗谱谱减法引入了较多的音乐噪声,且基本谱减法处理后的噪声更多。基于端点检测的多窗谱估计谱减法增强后的语音信号清晰,信号未缺失,对噪声的抑制效果较好且基本没有引入音乐噪声。

Sagnac 光纤语音传感系统进行了研究,结果表明,相比传统谱减法,本方法对语音信号的降噪效果及对音乐噪声的抑制效果更好,提高了降噪语音信号

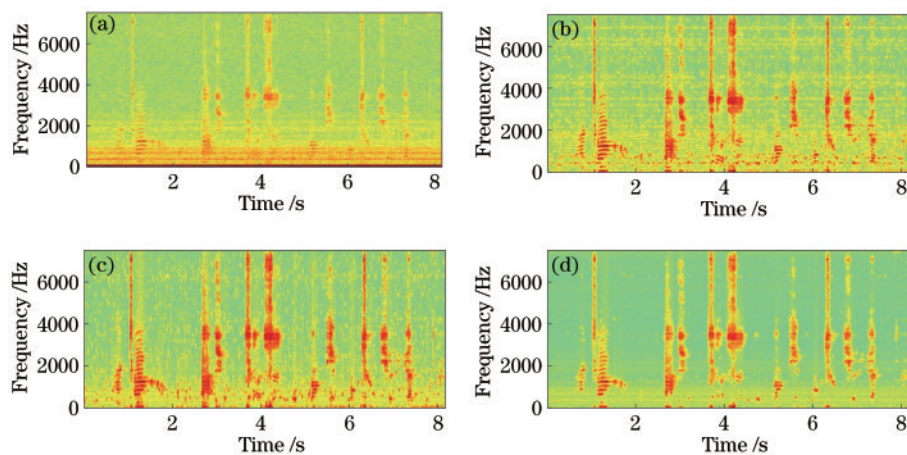


图7 不同方法得到的语谱图。(a)原始语谱图;(b)基本谱减法;(c)多窗谱估计谱法;(d)基于端点检测的多窗谱估计法  
Fig. 7 Spectrograms obtained by different methods. (a) Original spectrogram; (b) basic spectral subtraction method; (c) multiwindow spectrum estimation method; (d) multiwindow spectrum estimation method based on endpoint detection

的SNR。实验时以裸光纤绕环作为传感单元,若用裸光纤制作传感探头预计可得到更好的传感信号。由于手机播放声音信号距离光纤环较近,实验没有对距离远近进行测试。此外,虽然基于端点检测的多窗谱估计谱减法能对音乐噪声起到抑制作用,但低SNR情况下不能完全消除噪声,下一步还需结合其他降噪方法处理得到更好的降噪语音信号,并对声源定位进行实验探索。

### 参 考 文 献

- [1] Rao Q M, Zhang Q, Xin X J, et al. Fiber acoustic sensor resisting temperature interference[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1306002.  
饶俏萌, 张琦, 忻向军, 等. 抗温度干扰光纤声传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1306002.
- [2] Shen S, Wei H M, Wang J, et al. 3D printing optical fiber Fabry-Perot cavity acoustic emission sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906004.  
沈诗, 魏鹤鸣, 王俊, 等. 3D打印光纤法布里-珀罗腔声发射传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906004.
- [3] Ma H Y, Wang X X, Ma F, et al. Research progress of  $\Phi$ -OTDR distributed optical fiber acoustic sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130005.  
马皓钰, 王夏霄, 马福, 等.  $\Phi$ -OTDR型分布式光纤声波传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130005.
- [4] Kruger L, Theron H J. Optical fibre Mach-Zehnder microphone[C]//2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, October 29-November 1, 2007, Salvador, Brazil. New York: IEEE Press, 2007: 389-391.
- [5] Wang Y J, Li F, Xiao H, et al. Fiber optic sound sensor based on Michelson interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1114-1117.  
王永杰, 李芳, 肖浩, 等. Michelson干涉仪式光纤空气声传感器[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1114-1117.
- [6] Zhu J F. Double balanced detection of optical fiber acoustic sensor based on Sagnac interferometer[J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(9): 47-49.  
朱剑锋. 基于Sagnac型的双光路平衡探测光纤声传感器[J]. 电子科技, 2013, 26(9): 47-49.
- [7] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for "土"-shaped beam[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106004.  
魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于"土"字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106004.
- [8] Tosi D, Braglia A, Neri A, et al. Realization of an optical fiber Bragg grating microphone[C]//2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, May 10-12, 2011, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [9] Chen Y F, Tan D S, Liu X Y. Based on the interferometric fiber optic vibration sensor[J]. Optical Instruments, 2015, 37(1): 24-27.  
陈宇飞, 谭冬生, 刘小燕. 一种基于Sagnac干涉式的光纤振动传感技术[J]. 光学仪器, 2015, 37(1): 24-27.
- [10] Wu D F. Research on Sagnac interferometric optical

- fiber acoustic sensor and its positioning technology [D]. Shanghai: Fudan University, 2008.
- 吴东方. Sagnac 干涉式光纤声传感器及其定位技术研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- [11] He C F, Ruan L, Feng H, et al. Experimental study on pipeline security monitoring system based on ring-structure Sagnac interferometer with  $3 \times 3$  coupler[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(6): 1125-1131.
- 何存富, 阮力, 冯欢, 等. 基于  $3 \times 3$  耦合器的环型 Sagnac 干涉仪管道监测系统实验研究[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(6): 1125-1131.
- [12] Ma Y H, Ma Y H, Wang X F. Matlab-based FIR figure wave filter design and emulation[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2010, 33(11): 66-69.
- 马月红, 马彦恒, 王雪飞. 基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器设计与仿真[J]. *电子测量技术*, 2010, 33(11): 66-69.
- [13] Zhang X Q, Feng H H, Xu H D. A study of an improved minimum mean-square error speech enhancement algorithm[J]. *Technical Acoustics*, 2008, 27(2): 230-234.
- 张鑫琪, 冯海泓, 徐海东. 改进的最小均方误差语音增强算法的研究[J]. *声学技术*, 2008, 27(2): 230-234.
- [14] Lu Y. Application of improved wavelet threshold function in speech enhancement[J]. *Information Technology and Network Security*, 2019, 38(8): 38-41.
- 卢勇. 改进小波阈值函数在语音增强中的应用[J]. *信息技术与网络安全*, 2019, 38(8): 38-41.
- [15] Wu W P. Research on speech enhancement algorithm based on improved spectral subtraction[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- 吴卫鹏. 基于改进谱减的语音增强算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- [16] Yao Y, Li Y W, Bai T H. Speech enhancement based on improvement multi-window spectral subtraction[J]. *Electronic Test*, 2019(14): 40-43.
- 姚远, 李亚伟, 白天皓. 改进的多窗谱谱减法语音增强研究[J]. *电子测试*, 2019(14): 40-43.
- [17] Shen H. Speech enhancement algorithms for suppressing musical noise in spectral subtraction[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.
- 申浩. 抑制谱减法中音乐噪声的语音增强算法[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [18] Wu P P, Zhao G, Zou M. An improved spectral subtraction method based on multitaper estimation [J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, 31(12): 150-152.
- 武鹏鹏, 赵刚, 邹明. 基于多窗谱估计的改进谱减法[J]. *现代电子技术*, 2008, 31(12): 150-152.
- [19] Berouti M, Schwartz R, Makhoul J. Enhancement of speech corrupted by acoustic noise[C]//ICASSP '79. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, April 2-4, 1979, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 1979: 208-211.
- [20] Thomson D J. Spectrum estimation and harmonic analysis[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1982, 70(9): 1055-1096.
- [21] Wan S P, Zhong H H, Xiong X Z, et al. A positioning method for Sagnac fiber optic sensing under multi-point disturbance: CN11014616A[P]. 2019-08-20.
- 万生鹏, 钟海华, 熊新中, 等. 一种多点扰动下 Sagnac 光纤传感的定位方法: CN11014616A[P]. 2019-08-20.
- [22] Kaladharan N. Speech enhancement by spectral subtraction method[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2014, 96(13): 45-48.
- [23] Song Z Y. Matlab speech signal analysis and synthesis[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2017.
- 宋知用. Matlab 语音信号分析与合成[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
- [24] Wang K C. Wavelet-based speech enhancement using time-frequency adaptation[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009, 2009: 924135.