

基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感

王宇¹, 靳宝全^{1,2}, 张建国¹, 王东¹, 张明江¹, 王安帮¹, 王云才^{1,2*}

¹太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

²煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048000

摘要 提出了一种基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感系统, 利用外腔反馈式半导体混沌激光作为传感光源, 借助非等长的马赫-曾德尔双臂引入干涉光程差, 通过直线型 Sagnac 结构克服了环形干涉系统的互易效应, 利用频谱的零频点实现了声音信号的分布式定位。实验结果表明, 该系统可实时提取 1 kHz 的单音信号及 200~900 Hz 频率范围内的语音信号。与传统的宽带放大自发辐射激光相比, 基于混沌激光干涉的传感系统具有更好的声音频响曲线、更高的检测灵敏度以及均匀的平面指向性, 并在 12 km 长的单模光纤上实现了宽谱声音定位, 为分布式光纤声音传感系统提供了一种新的灵敏度提升方案。

关键词 传感器; 光纤光学; 混沌激光; 光纤传感; 声音检测; 激光干涉

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328016

Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing Based on Chaotic Laser Interference

Wang Yu¹, Jin Baoquan^{1,2}, Zhang Jianguo¹, Wang Dong¹,
Zhang Mingjiang¹, Wang Anbang¹, Wang Yuncai^{1,2}

¹Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng, Shanxi 048000, China

Abstract A distributed optical fiber acoustic sensing system based on chaotic laser interference is proposed, which uses the external cavity feedback semiconductor chaotic laser as the sensing light source, and the non-equal length of Mach-Zehnder arms for the introduction of the interference optical path difference. The reciprocal effect of the annular interference system is overcome by the linear Sagnac structure. The spectral null-frequency point is applied to realize the distributed location of sound signals. The experimental results show that, this system can real-time extract the single-tone signal with a frequency of 1 kHz and the voice signal in the frequency range of 200-900 Hz. Compared with the traditional broadband amplified spontaneous emission laser, this acoustic sensing system based on chaotic laser interference has a better sound frequency response curve, a higher detection sensitivity and a uniform plane directivity. Moreover, a broad-spectrum sound positioning in a 12 km single-mode fiber is achieved, which provides a new sensitivity enhancement solution for the distributed optical fiber acoustic sensing system.

Key words sensors; fiber optics; chaotic laser; optical fiber sensing; sound detection; laser interference

OCIS codes 280.4788; 060.2370; 290.5900; 040.2840

1 引 言

光纤传感系统具有体积小、质量轻、耐环境腐蚀、抗电磁干扰的优点, 作为其重要应用之一的光纤

声音传感在水声通信、语音监听、生化检测、交通监控等领域取得了一定进展^[1-4]。基于激光干涉原理的光纤声音传感技术因其结构简单、成本低廉、可分布测量等优点成为当前研究的热点之一。该技术利

收稿日期: 2017-11-01; 收到修改稿日期: 2017-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(51504161)、山西省重点研发计划社会发展项目(201703D321037)、山西省煤层气联合研究基金(2015012005, 2016012011)、山西省应用基础研究项目(201701D221115)、山西省回国留学人员科研资助项目(2016-035)

作者简介: 王宇(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: wangyu@tyut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

用迈克耳孙干涉法、法布里-珀罗干涉法^[5]、Sagnac干涉法^[6]等原理,通过声压改变探测光程及干涉条纹,借助相位解调技术实现声音信号提取。微弱声音信号提取最关键的环节是提升传感系统的灵敏度,国内外研究人员为此开展了一系列研究。吴东方等^[7]以镀铝振膜作为拾音探头,与光纤耦合器构成动态马赫-曾德尔(M-Z)干涉光路来提取频率为1 kHz的声音信号。Sun等^[8]提出了一种高灵敏度的单模-多模-单模光纤拾音探头结构,可以检测到频率在20 kHz以内的声音信号。Wu等^[9]将氧化石墨烯膜作为敏感材料用于法布里-珀罗结构的拾音探头上,在 $100\sim 2\times 10^4$ Hz之间获得了平缓的声音感知响应曲线。Huang等^[10]针对输气管线气体泄漏时发出的宽带声信号,借助相位产生载波技术实现了相位信号解调与分布式定位。Wang等^[11]提出了一种改进型的二次傅里叶解调算法以提高声音信号的分布式定位精度。Ye等^[12]采用倒谱方法进行时延估计,可实现信号的分布式多点定位。

针对光纤拾音探头的提升方案具有灵敏度高、频响特性好等优点,但其与传统的声学传感器类似,均为点式检测,测量距离相对较短,且存在不易利用光缆或光纤结构进行推广的问题。分布式光纤传感技术具有多点检测、测量距离长等优点,但灵敏度相对较低的缺陷限制了其工程应用。

具有宽频谱、类噪声、无周期特性的混沌激光近年来已在保密通信、随机数产生、波分复用无源光网络(WDM-PON)等领域得到了应用^[13-16]。混沌系统对初始状态敏感,研究人员尝试将其与光纤传感技术结合来提升检测性能,并取得了重要进展。Mimuro等^[17]借助混沌光纤环形腔中周期性混沌同步技术,实现了对外界环境温度的感知。Jáuregui等^[18-19]分析了混沌光纤环形腔中混沌吸引子的数学模型对外界参数的依赖性,得到该结构可以用于应变、光纤折射率及衰减等多参数传感的结论。单超

等^[20-21]利用偏振混沌光纤环形激光器,将传感光纤作为混沌光源的一部分,利用相邻两帧混沌波形的互相关运算检测外界入侵的扰动。上述研究表明,混沌激光在提升光纤传感检测的性能方面具有广阔的应用前景。

本研究提出了一种基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感系统,利用非等臂长的M-Z结构引入双路混沌激光的干涉光程差,通过直线型Sagnac结构克服了传统环形干涉系统的互易效应,实验研究了该系统的灵敏度和频响范围的提升效果,并对系统的声音指向性能和定位性能进行了分析,研究结论为分布式光纤声音传感系统提供了一种新的灵敏度提升方案。

2 传感系统与原理

2.1 混沌激光干涉系统

图1所示为用于声音传感实验的混沌激光干涉系统,主要包括混沌光纤激光器与声音传感系统,图中虚线框内为混沌激光源的结构图。分布式反馈(DFB)激光器生成中心波长为1549.27 nm的连续混沌激光,随后用偏振控制器(PC)调整激光的偏振态,再用50:50的光纤耦合器(FC)将光束一分为二,一束光作为激光器的输出注入到传感系统,另一束光用于实现激光器内的光反馈。可变光衰减器(VOA)可以通过光纤反射镜(M)调整反射后的反馈光强度,最后利用光隔离器(OI)避免后向散射光进入到激光发射器中,从而增加激光光源输出的稳定性。

混沌激光经 3×3 耦合器注入非等臂长的M-Z结构中,其中一条臂由4 km长的延迟光纤组成,另一条臂由光纤跳线组成,从而造成两路激光的干涉光程差。探测光经 2×1 耦合器进入传感光纤中,最后通过 1×2 耦合器返回到 3×3 耦合器,形成直线型Sagnac结构,克服了传统环形干涉系统的互易效

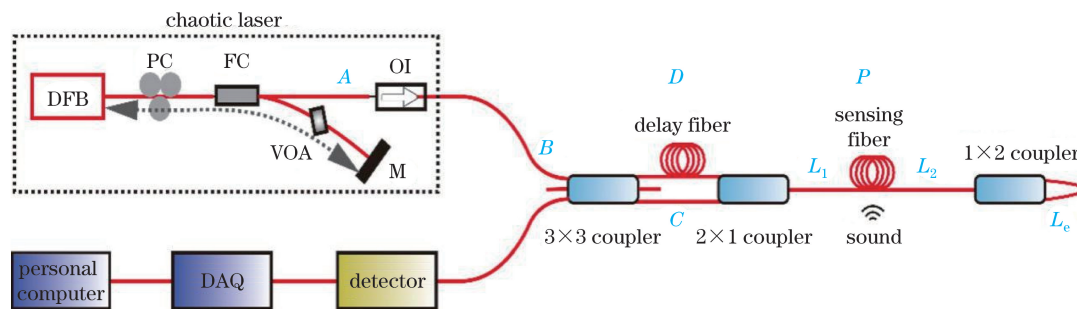


图1 声音传感实验装置

Fig. 1 Experimental setup of acoustic sensing

应。当传感光纤的某一部分受到外界声波信号的影响时,光纤中传输光的相位将会被调制,从而携带外界声音信号的有效信息进入信号解调系统中。光电探测器会检测到光相位的变化,并由数据采集卡(DAQ)转换为数字信号,最终由上位机系统实现待测声音的提取与存储。

通过调节 VOA 改变反射后的反馈光强度,使激光系统的状态依次发生周期、倍周期、混沌的状态变化^[22]。利用时滞系统表征混沌激光电场:

$$\dot{E}(t) = -\alpha E_0(t - \tau_0), \quad (1)$$

式中 α 为 VOA 的衰减系数, E_0 为 DFB 激光器输出的激光电场, t 为时间, τ_0 为激光在反射过程中引入的随机时延。通过改变衰减系数和时延均可使系统进入混沌态,系统呈现类噪声的波形分布。

混沌激光注入 3×3 耦合器后经过两条可干涉光路,并最终在 3×3 耦合器处产生干涉。所经过的光程包括混沌激光输出端的引导光纤光程(A)、 3×3 耦合器输入端的引导光纤光程(B)、光纤跳线光程(C)、延迟光纤光程(D)、首端传输光纤光程(L_1)、拾音探头光纤光程(P)、末端传输光纤光程(L_2)、反射光纤光程(L_e)。具体路径包括混沌激光路径 1($A-B-D-L_1-P-L_2-L_e-L_2-P-L_1-C$)和混沌激光路径 2($A-B-C-L_1-P-L_2-L_e-L_2-P-L_1-D$)。

因而,探测器处可感知到的电场的表达式为

$$E_1 = -\alpha E_0(t - \tau_0) \exp\{j\omega_c(t - \tau_0) + j\Delta\phi(\omega_s)[\sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_1) + \sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_2)] + j\psi_1\}, \quad (2)$$

$$E_2 = -\alpha E_0(t - \tau_0) \exp\{j\omega_c(t - \tau_0) + j\Delta\phi(\omega_s)[\sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_3) + \sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_4)] + j\psi_2\}, \quad (3)$$

式中 ω_c 为光载波的角频率, ω_s 为声波信号的角频率, $\Delta\phi(\omega_s)$ 为经声波信号调制的相位信号幅值, ψ_1 和 ψ_2 均为光载波的任意相位角, $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ 为时延。设 n 为光纤折射率, c_0 为光速,则(2)式与(3)式中的时延分别表示为

$$\tau_1 = n(A + B + D + L_1 + P)/c_0, \quad (4)$$

$$\tau_2 = n(A + B + D + L_1 + 2P + 2L_2 + L_e)/c_0, \quad (5)$$

$$\tau_3 = n(A + B + C + L_1 + P)/c_0, \quad (6)$$

$$\tau_4 = n(A + B + C + L_1 + 2P + 2L_2 + L_e)/c_0. \quad (7)$$

根据(2)~(7)式,探测器接收到的干涉总光强可以表示为

$$I = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = 2\alpha^2 E_0^2(t - \tau_0) \{1 + \cos[\Delta\phi(\omega_s)[\sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_1) + \sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_2) - \sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_3) - \sin\omega_s(t - \tau_0 - \tau_4)]] + (\psi_1 - \psi_2)\}, \quad (8)$$

式中 $*$ 表示取共轭。

由于两路激光经过的光纤长度相等且环境影响相同, ψ_1 与 ψ_2 可近似相等。定义 $\tau_T = \tau_1 + \tau_4 = \tau_2 + \tau_3 = n(2A + 2B + C + D + 2L_1 + 3P + 2L_2 + L_e) \div c_0$, 则(8)式中的干涉项可以简化为

$$I_{int} = 2\alpha^2 E_0^2(t - \tau_0) \cos\left[4\Delta\phi(\omega_s)\cos\omega_s\left(t - \tau_0 - \frac{\tau_T}{2}\right)\right] \times \sin\omega_s\left(\frac{\tau_3 - \tau_2 + \tau_4 - \tau_1}{4}\right) \cos\omega_s\left(\frac{\tau_3 - \tau_2 - \tau_4 + \tau_1}{4}\right). \quad (9)$$

设 $\tau_d = (\tau_3 - \tau_2 + \tau_4 - \tau_1)/2 = n(D - C)/c_0$ 为光在延迟光纤中传播的时间, $\tau_x = (\tau_3 - \tau_2 - \tau_4 + \tau_1)/4 = n[L_2 + (P + L_e)/2]/c_0$ 为光从声源传播到末端反射光纤的时间。由于混沌激光内部反射光经过的光程较短,随机时延 τ_0 与声波频率 ω_s 的乘积趋近于零,因而 $\sin\omega_s\tau_0 \approx \omega_s\tau_0$ 。由声音信号调制而成的相位信号 $\phi_s(t)$ 可进一步简化为

$$\phi_s(t) = \left[4\Delta\phi(\omega_s)\sin\omega_s\left(\frac{\tau_d}{2}\right)\cos\omega_s\tau_x\right] \times \left[\sqrt{1 - (\omega_s\tau_0)^2}\cos\omega_s\left(t - \frac{\tau_T}{2}\right) + \omega_s\tau_0\sin\omega_s\left(t - \frac{\tau_T}{2}\right)\right]. \quad (10)$$

由于干涉信号 I_{int} 是余弦函数,其相移 $\phi_s(t)$ 为零时,附近的信号检测灵敏度最低,而且无法识别相移的正负,故须要进行相位偏置^[23]。受混沌激光随机时延 τ_0 的影响,系统静态工作点的相移不再为零,实现了静态工作点的偏置,从而可使系统的灵敏度得到提升。

2.2 混沌激光的特性

在图 2(a)所示的时序图中,混沌激光时域特征呈现出类噪声的无规则波动形态。在图 2(b)所示的频谱图上,当峰值功率下降 10 dBm 时,激光带宽约为 8.16 GHz;在 0~25 GHz 的频率范围内,混沌信号同基底噪声存在明显的功率差异。在图 2(c)所示的光谱图上,混沌激光的中心波长约为 1549.272 nm,线宽约为 0.19 nm。在图 2(d)所示的自相关曲线中,可以观察到显著的“图钉”型函数特征,且噪声水平较低,具有低自相关噪声的特性。

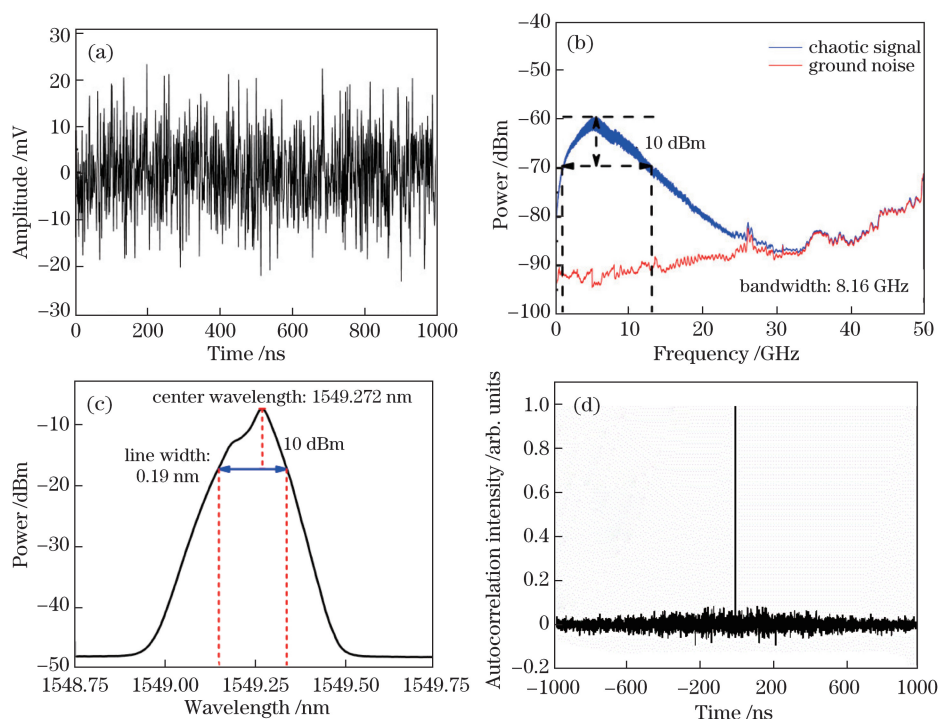


图 2 混沌激光。(a)时序图;(b)频谱图;(c)光谱图;(d)自相关图

Fig. 2 Chaotic laser. (a) Time series; (b) power spectrum; (c) optical spectrum; (d) autocorrelation

3 实验结果与分析

3.1 声音的时频特性

实验中的传感光纤由三段单模光纤构成,第一段为 12 km 长的光纤,第二段为缠绕于圆筒外壁的长度可调的光纤探头,第三段为 100 m 长的尾纤。通过扬声器向 10 m 长的光纤探头播放固定频率的单音信号及青年男性的语音信号,由上位机系统存储声音的时域波形,并求出其对应的频谱,结果如图 3 所示。图 3(a)所示为检测到的频率为 1 kHz 单音信号的时域及频域波形,图 3(b)所示为青年男

性语音信号的时频曲线。可以看出,男性语音的频率范围为 200~900 Hz,包含在人类正常发音的频率范围 $100\sim 1.1\times 10^3$ Hz 之内。

3.2 声音感知性能的对比

为了进一步研究光纤声音传感系统的频率响应特性,用声压计记录光纤探头位置处的声压强度,通过调节扬声器播放声音的强度以保证探头处的声压保持为 88 dBA(dBA 为声音 A 计权单位)。随后改变扬声器播放的声音频率,获取不同频率下的声音信号的输出电压的峰峰值,如图 4 所示,其中蓝色曲线反映基于混沌激光的声音传感系统的频率响应,

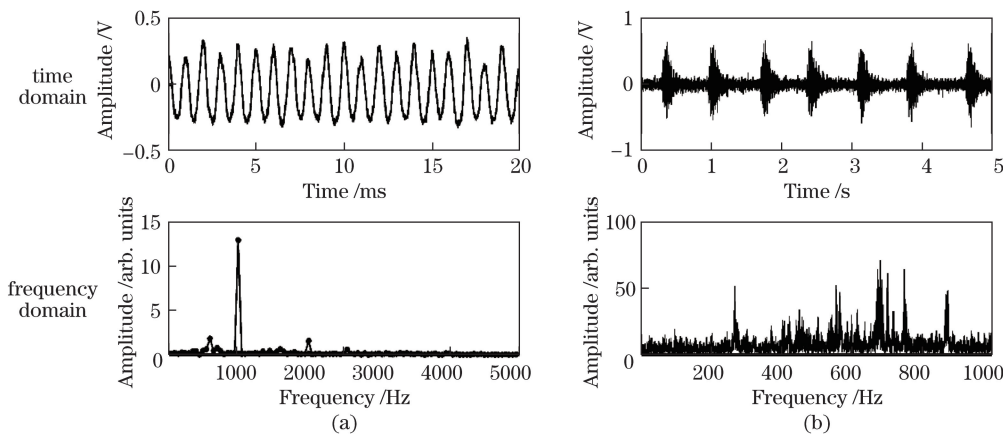


图 3 时域与频域曲线。(a) 1 kHz 单音信号;(b) 青年男性语音信号

Fig. 3 Time and frequency domain curves. (a) Single-tone signal with frequency of 1 kHz; (b) voice signal of young male

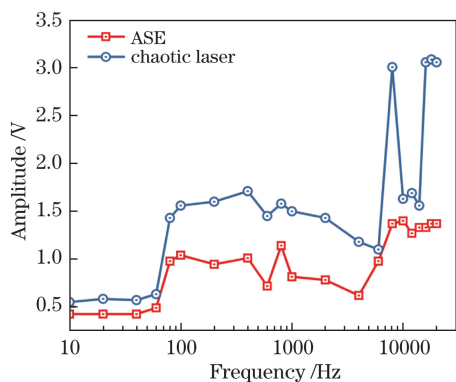


图 4 频率响应曲线

Fig. 4 Frequency response curve

红色曲线反映基于放大自发辐射(ASE)光源的声音传感系统的频率响应。在 80 Hz 以内,基于两类激光光源的声音传感系统的输出电压幅值均在 0.75 V 以下。在 80~1×10⁴ Hz 频率范围内,基于 ASE 光源的输出电压幅值以 1 V 为中心进行波动,而基于混沌激光的输出电压幅值以 1.5 V 为中心进行波动。从 10 kHz 起至实验检测的上限频率 20 kHz,ASE 光源系统的输出电压幅值曲线上升缓慢,约在 1.25 V 左右波动;而混沌激光系统的输出电压在部分频率时可增大至 3 V。整体上,在相同实验条件下,混沌激光系统的频率响应幅值均大于 ASE 光源系统的,表明在人耳可听的声波频率范围(20~2×10⁴ Hz)内,基于混沌激光的系统可输出更高强度的声音信号。

灵敏度可体现声音传感系统将声压转化为电平的能力,高灵敏度的系统会输出高电平,从而不须要后续电路进行性能增益。为了进一步对比基于混沌激光与 ASE 激光的声音传感性能,将拾音探头处的声压强度统一为 94 dBA,扬声器输出频率为 1 kHz 的单音信号,并改变拾音探头光纤的长度(5, 10, 15 m)。基于混沌激光与基于 ASE 光源的传感系统的声音传感灵敏度的对比图如图 5(a)所示,可以看到,基于 ASE 光源的传感系统的灵敏度整体在 200 mV/Pa 以下,而基于混沌激光的传感系统的灵敏度可达 600 mV/Pa,约为前者的三倍左右,进一步证明基于混沌激光的系统可有效提升声音的感知能力。

由图 5(a)也可观察到,系统的灵敏度与探头光纤长度呈现正相关性,为了验证这一结论,针对基于混沌激光的声音传感系统,在 0.5~15 m 范围内改变探头光纤的长度,并在每一长度下进行 20 组重复实验。图 5(b)所示为不同的探头光纤长度所对应

的灵敏度。因此,可根据具体的灵敏度需求来选择合适的探头光纤长度。

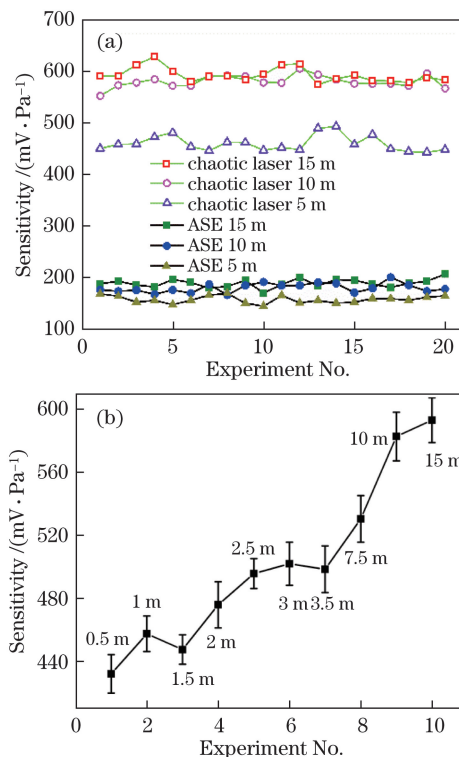


图 5 (a)基于混沌激光与基于 ASE 光源的传感系统的声音传感灵敏度的对比图;(b)不同长度的光纤探头的灵敏度变化曲线

Fig. 5 (a) Sound sensing sensitivity comparison of sensing systems based on chaotic laser and ASE light source;

(b) sensitivity variation curves of fiber probes with different lengths

吴东方^[24]报道的系统灵敏度达到 500 mV/Pa,杜江^[25]报道的光纤麦克风的灵敏度为 100 mV/Pa,王巧云^[26]研发的光纤法布里-珀罗声波传感器的灵敏度为 31 mV/Pa、李瑞等^[27]报道的光纤声传感器的灵敏度为 16 mV/Pa。而基于混沌激光的传感系统的灵敏度可达 600 mV/Pa,说明基于混沌激光的系统可有效提升声音的感知能力。

3.3 声音指向性

指向性也是声音传感系统的一项重要参数,可描述系统在空间各个方向上拾取声音的能力。图 6 所示为基于混沌激光的光纤声音传感系统的声音指向性的测试装置及分布图。图 6(a)中探头光纤的长度选取为 10 m,扬声器仍输出频率为 1 kHz 的单音信号。扬声器头部距拾音探头边缘的距离固定为 20 cm,并沿实验台上绘制的圆周,每隔 12° 进行位置调整与输出电压测试。图 6(b)所示为拾音探头处声压等级为 98 dBA 与 108 dBA 时对应的指向性

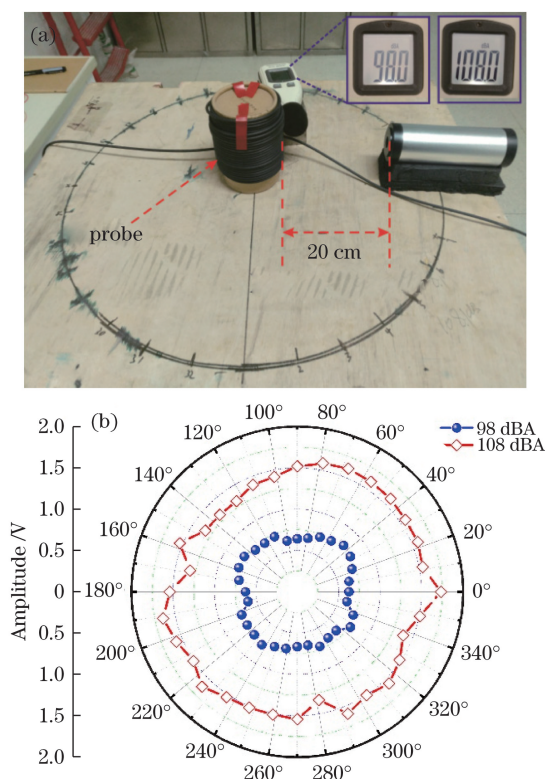


图 6 声音指向性的(a)测试装置和(b)分布图
Fig. 6 (a) Testing device and (b) distribution map of sound directivity

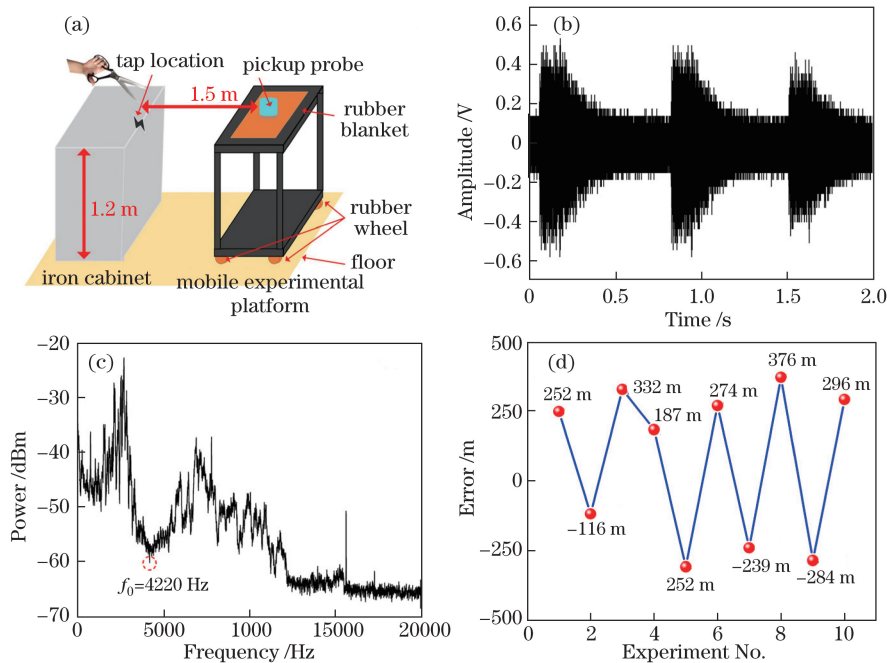


图 7 (a)空间分布图;(b)敲击声音信号的时序图;(c)敲击声音信号的频谱图;(d)误差分布图
Fig. 7 (a) Spatial distribution; (b) time sequence diagram of knocking signal;
(c) power spectrum of knocking signal; (d) error distribution chart

4 结 论

设计了一种基于混沌激光干涉的分布式光纤声

分布极坐标图,其中圆周上的角度表示扬声器沿圆周的偏转角度,可以看出,基于混沌激光的光纤声音传感系统在水平平面内的指向性分布较为均匀,可从所有方向均衡地拾取声音,这为工程应用提供了便利。

3.4 声音定位研究

基于直线型 M-Z-Sagnac 光路结构的系统可利用零频点位置对外界宽谱的相位调制信号进行定位^[10]。为此,利用剪刀规律敲击铁质橱柜上表面,产生类冲击的声音信号,空间分布图如 7(a)所示。剪刀敲击处距地面高为 1.2 m,与右侧放置了拾音探头光纤的可移动实验台水平相距 1.5 m。同时,利用拾音探头下厚度约为 2 mm 的橡胶垫与橡胶质地的滑轮,有效排除敲击振动信号在固体介质中产生的干扰。检测到的声音信号的时域特性如图 7(b)所示,可观察到较大环境噪声下规律的声音信号。图 7(c)所示为信号的频谱,可以在频率 $f_0 = 4220$ Hz 处得到一个明显的零频点,利用距离公式 $L = c_0 / 4nf_0$ ^[10] 可以求得对应的声源位置为 11.848 km,与利用光时域反射仪测得的拾音探头距末端的实际距离(12.1 km)相差 252 m。图 7(d)所示为重复性实验所得的误差分布图,可以看出误差在 ± 400 m 以内。

音传感系统,利用混沌信号的随机时延可进行相位偏置的特点,结合直线型 M-Z-Sagnac 光路结构,实现了人类语音信号的高灵敏采集与宽谱声音信号的

分布式定位。与传统的 ASE 光源相比,基于混沌激光干涉的声音传感系统具有更高的灵敏度、更好的频率响应以及均匀的平面指向性,从而为分布式光纤声音传感系统提供了一种新的灵敏度提升方案,在特殊环境下微弱声音信号的提取应用中有一定的推广前景。

参 考 文 献

- [1] Tang B, Huang J B, Gu H C, *et al.* Frequency response characteristics of sound pressure sensitivity of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0406001.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器的声压灵敏度频率响应特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0406001.
- [2] Furstenau N, Horack H, Schmidt W. Extrinsic Fabry-Perot interferometer fiber-optic microphone[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(1): 138-142.
- [3] Tsai C L, Fann C S, Wang S H, *et al.* Paramagnetic oxygen measurement using an optical-fiber microphone[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2001, 73(2/3): 211-215.
- [4] Konlel H J, Paschereit C O, Röhle I. A fiber-optical microphone based on a Fabry-Perot interferometer applied for thermo-acoustic measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(1): 209-213.
- [5] Fan Z, Wang S, Liu T G, *et al.* Research of optical fiber Fabry-Perot acoustic vibration sensing demodulation system based on dual tunable lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 042801.
樊茁, 王双, 刘铁根, 等. 基于双可调谐激光器的光纤法布里-珀罗声振动传感解调系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 042801.
- [6] Wang X Z, Jiang J B, Li Y, *et al.* Influence of impact on the performance of Sagnac fiber interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0706003.
王晓章, 蒋军彪, 李毅, 等. 冲击对 Sagnac 光纤干涉仪性能的影响[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0706003.
- [7] Wu D F, Jia B. Theoretical and experimental research of all-fiber microphone based on M-Z interferometer[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(7): 1528-1530.
吴东方, 贾波. 基于 M-Z 动态干涉仪的全光纤麦克风研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(7): 1528-1530.
- [8] Sun A, Semenova Y L, Farrell G. A novel highly sensitive optical fiber microphone based on single mode-multimode-single mode structure[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2011, 53(2): 442-445.
- [9] Wu Y, Yu C B, Wu F, *et al.* A highly sensitive fiber-optic microphone based on graphene oxide membrane[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(19): 4344-4349.
- [10] Huang S C, Lin W W, Tsai M T, *et al.* Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 570-579.
- [11] Wang B J, Pi S H, Jia B, *et al.* Location performance fading for multiple disturbances in distributed Sagnac optical fiber interferometer[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2015, 57(10): 2294-2298.
- [12] Ye Z, Wang J, Wang C, *et al.* A positioning algorithm realized multilateration for distributed fiber-optic sensor[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2016, 58(12): 2913-2917.
- [13] Wang Y C. Generation and applications of chaotic laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(4): 13-21.
王云才. 混沌激光的产生与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(4): 13-21.
- [14] Yan S L. Theoretical studies on chaotic semiconductor laser dual-directional secure communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(11): 1503-1509.
颜森林. 半导体激光器混沌双向保密通信系统理论研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1503-1509.
- [15] Yang H B, Wu Z M, Tang X, *et al.* Influence of feedback strength on the characteristics of the random number sequence extracted from an external-cavity feedback semiconductor laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 084204.
杨海波, 吴正茂, 唐曦, 等. 反馈强度对外腔反馈半导体激光器混沌熵源生成的随机数序列性能的影响[J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 084204.
- [16] Jiang N, Liu D, Zhang C F, *et al.* Modeling and simulation of chaos-based security-enhanced WDM-PON[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2013, 25(19): 1912-1915.
- [17] Mimuro M, Suzuki K, Imai Y. Coherence effect on temperature sensing based on periodic chaos synchronization using optical fiber ring resonators[C]. *SPIE*, 2005, 5855: 795-798.
- [18] Jáuregui C, López-Higuera J M, Cobo A, *et al.* Multiparameter sensor based on a chaotic fiber-ring resonator[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, 23(10): 2024-2031.
- [19] Jáuregui C, Quintela A, Lomer M, *et al.* Optical fiber sensor based on a chaotic fiber ring resonator[C]// *Proceedings of 2005 IEEE/LEOS Workshop on Fibres and Optical Passive Components*, 2005, 23(10): 329-334.

- [20] Shan C, Fang N, Wang L T, *et al.* Chaotic fiber fence system and intrusion location method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 335-339.
单超, 方捻, 王陆唐, 等. 混沌光纤围栏系统及其入侵定位方法[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 335-339.
- [21] Fang N, Qin H J, Wang L T, *et al.* Experimental investigation of sensitivity improvement of chaotic fiber ring laser sensing system with embedded Sagnac interferometer[C]. SPIE, 2014, 9233: 92330M.
- [22] Yue H H. Investigation of secure communication and waveform recognition based on chaos[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 8-10.
岳荷荷. 基于混沌的保密通信和波形识别的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 8-10.
- [23] Tan J, Chen W M, Wu J, *et al.* Study on long distance pipeline destruction alarm technology based on Sagnac/Mach-Zehnder interferometers[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(01): 67-72.
谭靖, 陈伟民, 吴俊, 等. 基于萨格奈克/双马赫-曾德干涉原理的长途管道破坏预警技术研究[J]. 光子学报, 2008, 37(1): 67-72.
- [24] Wu D F. Study on Sagnac interferometric fiber optic sensor and its location technology Sagnac[D]. Shanghai: Fudan University, 2008: 63-64.
吴东方. 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: 63-64.
- [25] Du J. Design and implementation of fiber-optic probe for fiber optic microphone detection system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 31-33.
杜江. 用于光纤麦克风探测系统的光纤探头设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015: 31-33.
- [26] Wang Q Y. Fiber Fabry-Perot acoustic wave sensor and its application[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 61-62.
王巧云. 光纤法布里-珀罗声波传感器及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 61-62.
- [27] Li R, Xiao W, Yao D. Experimental system research of fiber acoustic sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 131-134.
李瑞, 肖文, 姚东. 光纤声传感器的实验系统研究[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 131-134.