

# 基于混沌激光互相关峰值实现脂肪乳液内 异质物的检测

杨永强<sup>1</sup>, 杨玲珍<sup>1,2\*</sup>, 吕艺辉<sup>1</sup>, 王娟芬<sup>1</sup>, 张朝霞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>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

**摘要** 利用混沌激光互相关峰值实验实现了脂肪乳液内部异质物的检测。在脂肪乳液内放置异质物,以自相关函数具有 delta 函数特征的混沌激光作为光源,将混沌激光分成两路,一路入射到带有异质物的脂肪乳液内,通过脂肪乳液后经光电探测器接收、输出后作为探测信号;另一路经光电探测器输出,作为参考信号。将混沌激光参考信号与经过脂肪乳液的混沌激光进行互相关,混沌激光的互相关峰值反映了脂肪乳液及其内部异质物的光学信息。结果表明,混沌激光相关检测法具有很强的抗干扰性。

**关键词** 激光光学; 医学检测; 相关检测法; 混沌激光; 脂肪乳液; 光纤激光器

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0614001

## Foreign Object Detection in Intralipid Solution Using Cross-Correlation Peak of Chaotic Laser

Yang Yongqiang<sup>1</sup>, Yang lingzhen<sup>1,2\*</sup>, Lü Yihui<sup>1</sup>, Wang Juanfen<sup>1</sup>, Zhang Zhaoxia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Herein, foreign object detection in the intralipid solution has realized by the cross-correlation peak of chaotic laser. The foreign objects are put inside the intralipid solution. Chaotic laser with delta characteristics of autocorrelation function is used as the detection source and divided into two parts. The first part is used to illuminate the intralipid solution, wherein the detection signal is received and output by the photoelectric detector through the intralipid solution. The second part passes through the photoelectric detector as the reference signal. The reference signal is cross-correlated with the chaotic laser passing through the intralipid solution. The optical informations of the intralipid solution and its internal foreign objects are reflected by the cross-correlation peak of the chaotic laser. Results show that the correlation detection method of chaotic laser has a strong anti-interference.

**Key words** laser optics; medical test; correlation detection method; chaotic laser; intralipid solution; fiber laser

**OCIS codes** 140.1540; 140.3510; 100.4550; 170.3880

## 1 引 言

随着激光技术的不断发展,光学检测在很多领域发挥着重要作用,例如,水中颗粒物的检测<sup>[1]</sup>、溶液中颗粒的检测<sup>[2]</sup>等。相关检测技术是利用信号周期性和噪声随机性的特点,通过自相关或互相关运算去除噪声的一种技术。互相关函数度量两个随机

过程间的相关性,是表示两组数据间依赖关系的相关统计。早在 1981 年 Phillies<sup>[3]</sup>就提出适用于高浓度溶液内颗粒测量的互相关光谱法,即 90°互相关法;1988 年, Pine 等<sup>[4]</sup>提出了扩散光谱法,利用光子在介质中的充分扩散来获得颗粒的粒径信息。随着研究的不断深入,互相关技术逐渐得到了发展和应用,比如扩散光谱技术<sup>[5]</sup>、互相关光谱技术<sup>[6]</sup>以及在

收稿日期: 2018-12-16; 修回日期: 2019-01-28; 录用日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61575137,61675144)、山西省高等学校中青年创新拔尖人才培养计划、山西省科技厅社会发展项目(20140313023-3)

\* E-mail: office-science@tyut.edu.cn

90°互相关法基础上改进后的双波长互相关法<sup>[7]</sup>等。光子相关技术基于散射光进入不同的探测器,通过两个相关光电探测器分别接收相应的散射光强信号,然后将接收到的散射信号送入数字相关器中进行互相关运算。对于生物光学成像,利用光的散射可以实现对生物组织体的测量<sup>[8]</sup>以及对乳腺癌<sup>[9-11]</sup>和脑功能的检测<sup>[12-13]</sup>。早在1977年,研究人员就将连续光通过生物组织体后的光强变化记录下来,用以表征生物组织体的光学性质<sup>[14]</sup>。随着信息技术的发展,研究人员使用CCD通过时间门和偏振门来完成生物组织体内异质物的检测<sup>[15-16]</sup>。这些测量方法容易受到外界环境的影响,导致信噪比受到一定限制。伪随机码在时序上与噪声类似,可以用来调制激光,已被应用于诸多领域<sup>[17-18]</sup>。以伪随机码调制的激光作为光源,使用相关法对生物组织体内的异质物进行测量,解决了噪声干扰和信噪比低的问题<sup>[19]</sup>,这种方法获得了越来越多的关注。但伪随机光脉冲序列需要利用电随机码来对激光进行调制,它受限于随机码的码率和调制速度,因此,伪随机码相关法的系统性能并未得到明显改善。混沌激光由于存在时序随机性及delta函数的自相关特征而在测距、传感等领域具有广泛应用<sup>[20-22]</sup>。本论文以混沌激光作为激光光源对脂肪乳液进行探测,利用混沌激光互相关函数峰值与混沌信号传播损耗有关的特性,实现了脂肪乳液内异质物的检测,克服了伪随机码带宽的限制以及电调制过程中可能引入的噪声影响,提高了信噪比。

## 2 实验装置

当一束光强为 $I_i$ 的混沌激光平行入射到脂肪乳液时,由于脂肪乳液的散射、吸收等作用,出射光的光强会变成 $I_o$  ( $I_o \leq I_i$ ),出射光时序也会由于混沌光与脂肪乳液的相互作用而发生变化。当对脂肪乳液进行检测时,提取不同位置的光强信息,或者将出射光信号与参考光信号做互相关,提取相关函数峰值,就可以得到脂肪乳液和内部异质物对入射光的衰减信息,从而实现脂肪乳液内异质物的检测。

如图1所示,本实验所使用的掺镱混沌光纤激光器包含一个种子源(I)和功率预放大器(II)。种子源由976 nm的半导体激光器(LD-1)、波分复用器(WDM-1)、掺镱光纤(YDF)、单模光纤(SMF)、90:10的光耦合器(OC-1)、偏振控制器(PC)、偏振无关隔离器(ISO-1)构成一个环形腔。

利用光纤的非线性效应通过调节偏振控制器实现混沌激光器的输出。输出的混沌光通过波分复用器(WDM-2)进入掺镱光纤,采用976 nm的半导体激光器(LD-2)作为抽运源实现混沌激光的放大,实现波长为1069 nm、输出功率为70 mW的混沌激光的输出。

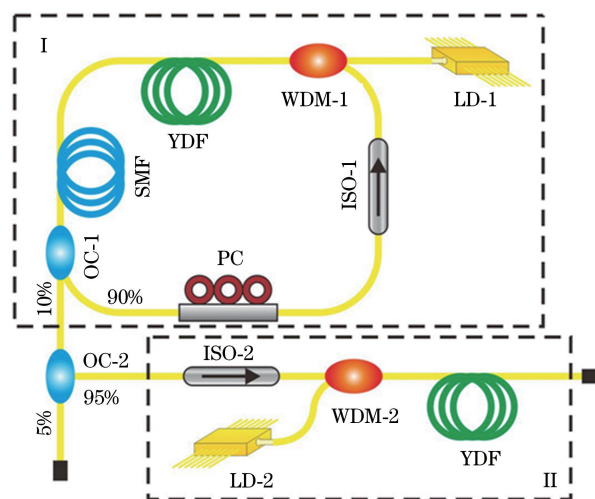


图1 掺镱混沌光纤激光器示意图

Fig. 1 Diagram of  $\text{Yb}^{3+}$  doped chaotic fiber laser

实验装置如图2所示,将混沌激光作为光源对脂肪乳液及其内部异质物进行探测。混沌激光的波长为1069 nm,输出功率为70 mW。95:5光耦合器将输出的混沌光信号 $x(t)$  ( $t$ 为时间)分成两路,其中一路通过光纤准直器(COL)输出准直激光入射到脂肪乳液,对含有异质物的脂肪乳液进行探测,出射光信号由光电探测器接收,作为探测信号 $y_1(t)$ ;另一路经光纤准直器后直接由光电探测器接收,作为参考信号 $y_2(t)$ 。光电探测器输出的两路混沌电信号通过采样示波器(OSC)输入到计算机进行数据处理。通过互相关函数峰值的变化可以得到混沌信号通过脂肪乳液的传输特性。

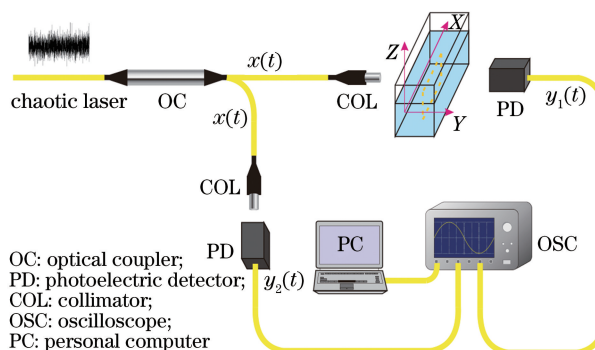


图2 混沌相关探测实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for chaotic correlation detection

实验选用一个 50 mm×50 mm×80 mm 的透明石英杯为容器,放入调配好的脂肪乳液。混沌光入射到脂肪乳液内的异物物上时,在异物物的不同位置有不同的透过率。采用的光电探测器为两个相同的自由空间高速光电探测器;采用的光纤准直器和光电探测器分别固定在位移平台上,可以方便地进行光路准直以及对脂肪乳液进行扫描测量。

### 3 实验结果与讨论

当混沌激光入射到脂肪乳液中没有异质物的区域时,混沌激光的损耗小,且损耗仅与脂肪乳液的吸收、散射有关;当遇到异物物时,由于混沌激光在不同位置异物物处的损耗不同,导致不同位置处输出的混沌激光的强度不同。为了实现利用混沌相关峰值对脂肪乳液内的异物物进行检测,首先将三维(3D)异物物放入脂肪乳液中,通过提取示波器的电压幅值以及参考激光与出射激光互相关函数峰值,提取出探测区域内脂肪乳液对混沌激光的损耗分布。图 3 为采用 3D 打印制备的不同形状的透光圆板,用来模拟异物物。对于示波器电压幅值的探测,利用通过脂肪乳液的光强的衰减与电压幅值有关的特性来实现。图 4(a)为异物物为圆板时,提取探测区域不同位置处的示波器电压幅值图。对于示波器检测的混沌激光的时序相关峰值,利用混沌激光互相关峰值与光强衰减有关的特性来实现探测,

图 4(b)为异物物为圆板时相关函数峰值的探测图。从图 4(a)~(b)中可以看出混沌激光在圆板不同区域的透过率分布情况,根据透过率分布图可以得到圆板和小孔的尺寸信息,实现脂肪乳液内异物物位置、大小的检测。图 5(a)为混沌激光通过无圆板区域中点(8 mm,13.6 mm)处出射光信号和参考光信号的互相关函数图,相关函数的峰值为 0.928。图 5(b)为混沌激光穿过圆板区域中点(9.2 mm,11.2 mm)处出射光信号和参考光信号的互相关函数图,相关函数的峰值约为 0,此时输出的激光与参考混沌激光没有相关性,通过互相关将探测区域分为相关和不相关两个区域。图 5(a)~(b)的相关函数峰值在时间  $t=2.5$  ns 位置处,这是由于参考混沌激光和经过脂肪乳液后的光程差引起了时间延迟。

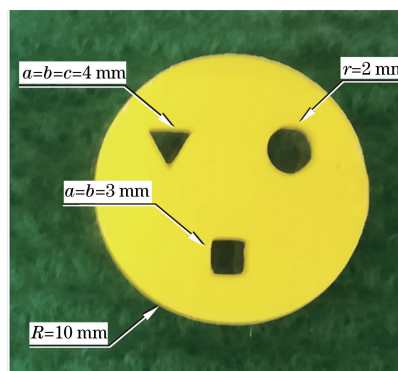


图 3 塑料圆板

Fig. 3 Plastic circular plate

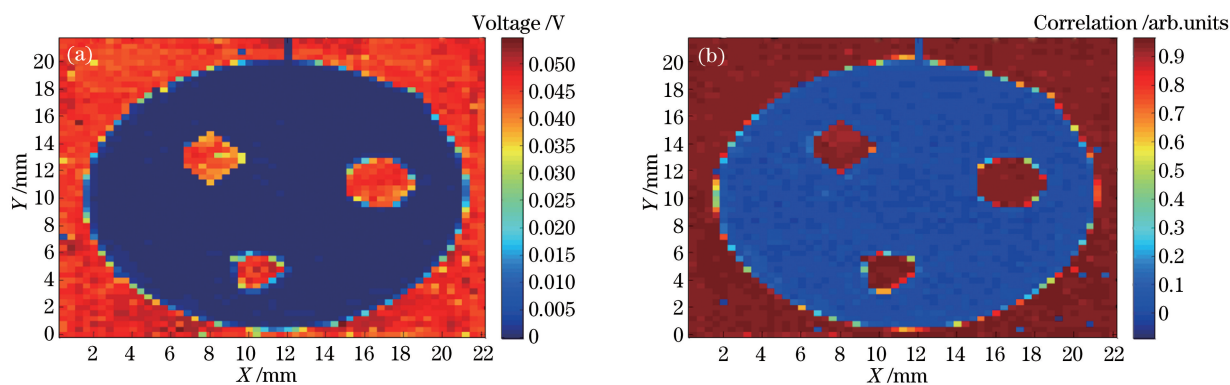


图 4 圆板异质物的探测图。(a)电压幅值;(b)相关函数峰值

Fig. 4 Detection with circular foreign object. (a) Amplitude of voltage; (b) correlation function peak

为了进一步研究混沌相关法检测异质物的分辨率能力,将异物物更换为如图 6 所示的热熔胶,采用与图 1~2 相同的实验装置和实验处理方法对图 6 所示的异物物进行探测,由于示波器的电压幅值与光在组织体中的损耗成线性关系,因此可以以电压幅值  $V$  来标定光的损耗。探测结果如图 7 所示。图 7(a)为示波器电压幅值探测图,图

7(b)为示波器时序并进行互相关的峰值探测图。热熔胶的厚度不同,混沌激光入射到热熔胶边缘会发生折射,离中心越近,折射越小,中心区域对混沌光具有发散作用。从图 7 中可以看出,热熔胶不同厚度的部分,损耗不同,厚度越大,损耗越多,探测到的光强越弱。图 8(a)为混沌激光通过无热熔胶区域时,点(2.8 mm,11.4 mm)处出射光

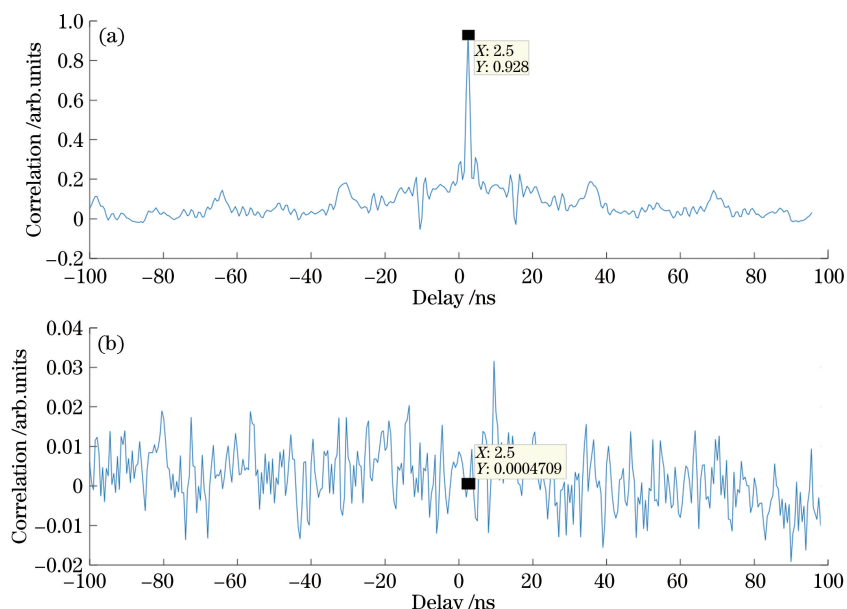


图 5 不同区域的相关函数图。(a)无圆板区域;(b)圆板区域

Fig. 5 Correlation function curve of different areas. (a) Without circular plate area; (b) circular plate area

信号和参考光信号的互相关函数图,相关函数的峰值约为 0.92。图 8(b)为混沌激光穿过热熔胶中心区域时,点(6.2 mm,6.6 mm)处出射光信号和参考光信号的互相关函数图,相关函数的峰值约为 0.80。图 8(c)为混沌激光穿过热熔胶其他区域时,点(9.8 mm,4.6 mm)处出射光信号和参考光信号的互相关函数图,相关函数的峰值约为 0。通过热熔胶实验可以看出:通过互相关探测可将热熔胶区域分为相关、不相关和部分相关 3 个区域,这是由于混沌激光互相关具有良好的 delta 特性,能够将中间厚度不同的区域探测出来。

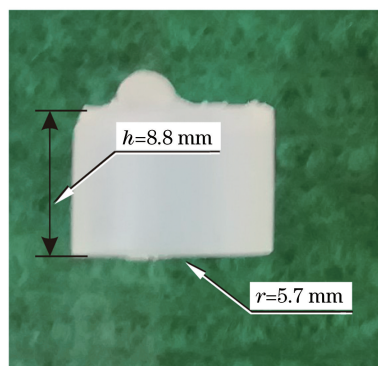


图 6 热熔胶

Fig. 6 Hot melt glue

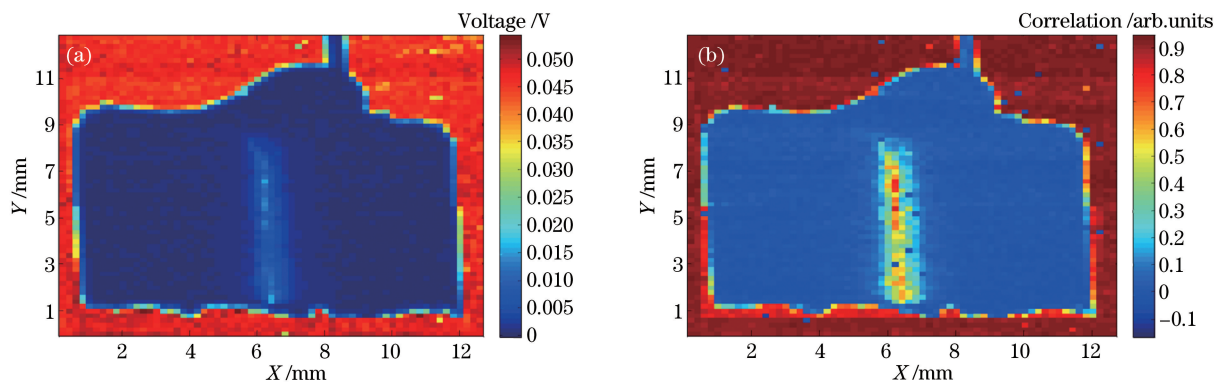


图 7 热熔胶的二维扫描图。(a)电压幅值;(b)相关函数峰值

Fig. 7 Two-dimensional scanning image of hot melt glue. (a) Amplitude of voltage; (b) correlation function peak

#### 4 讨 论

实验中将 5% 的混沌激光作为参考信号,95%

的混沌激光作为探测信号入射到脂肪乳液。在脂肪乳液内的混沌激光由于散射、吸收等会导致混沌信号减弱,参考混沌激光与经过脂肪乳液的混沌激光

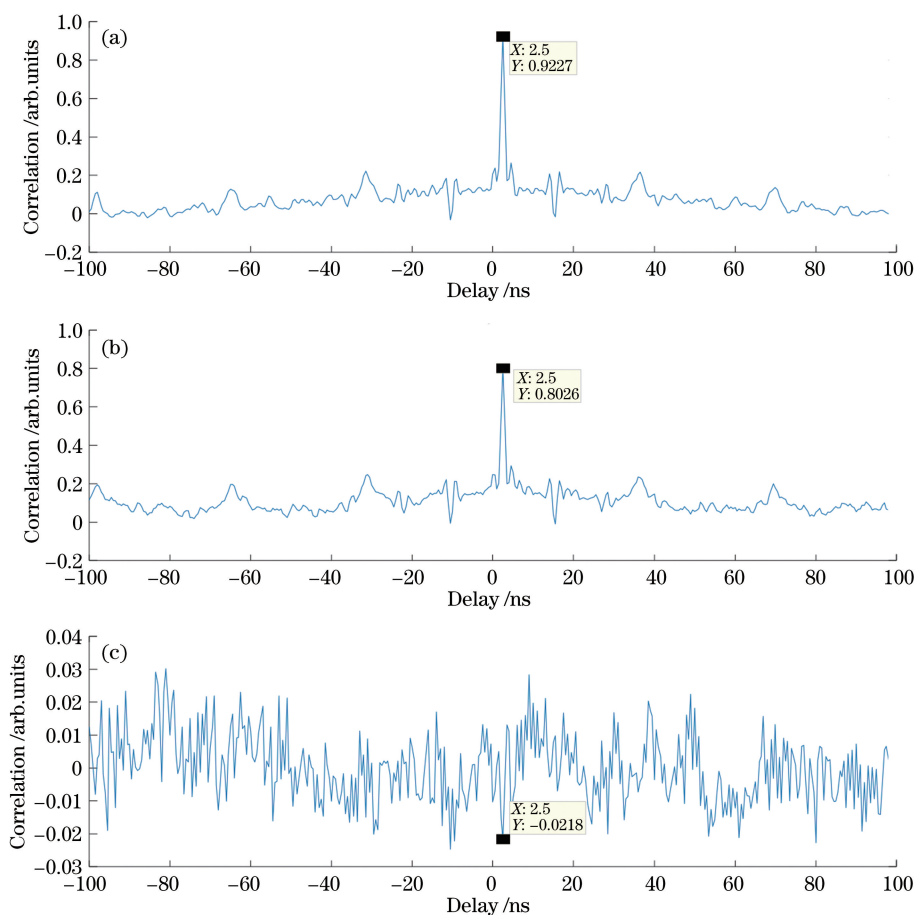


图 8 不同位置的互相关函数图。(a)无热熔胶区域;(b)热熔胶中间区域;(c)热熔胶其他区域

Fig. 8 Correlation function curves of different areas. (a) Without hot melt glue area; (b) middle area of hot melt glue; (c) other areas of hot melt glue

进行互相关。互相关函数的峰值反映了探测混沌激光照射脂肪乳液后出射的混沌信号与参考混沌信号相关后的相关系数,它与脂肪乳液对参考混沌信号的散射、吸收等光学参量有关,因此可以用互相关函数的峰值表征脂肪乳液的光学参量。互相关函数的基底反映了外部干扰与参考信号相关后的相关系数,从图 7 所示的探测图可以看出,混沌相关法除了能探测出异质物的位置和外形外,还可以探测出异质物的内部细节,异质物中间部分的损耗相对较小,故相关峰值较高。这主要是因为厚度不同的热熔胶在传输过程中,由于光的折射作用,在光传播过程中起到了类透镜的作用。由混沌信号相关具有很强的抗干扰能力以及如图 7(b)所示光束传输的类透镜作用,故而利用混沌激光可以实现高分辨、抗干扰的异质物检测。

示波器的电压幅值和光强成比例,因此可以用示波器的电压幅值表征脂肪乳液和内部异质物对混沌激光的衰减。若直接使用探测器对接收的信号进行表征,外界环境光会对测量结果产生影响。当使

用混沌激光相关法时,探测光信号和参考光信号在计算机内相关得到的互相关函数为

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y_1(\tau) y_2(t - \tau) dt = R_{yx}(\tau) + R_{nx}(\tau), \quad (1)$$

式中: $y_1(t) = y(t) + n(t)$ ,其中  $y(t)$  为通过脂肪乳液后的出射光信号, $n(t)$  为在此过程中引入的噪声; $y_2(t) = x(t)$ ,其中  $x(t)$  为初始混沌信号,即参考信号; $R_{yx}(\tau)$  为出射光信号和参考信号的互相关函数; $R_{nx}(\tau)$  为噪声和参考信号的互相关函数。因为噪声和混沌信号没有相关性,因此, $R_{nx}(\tau) = 0$ ,所以, $R_{12}(\tau) = R_{yx}(\tau)$ 。在脂肪乳液内,光传播发生散射时,出射光斑远大于探测器的接收面积,此时探测器接收的光能量较低,在此过程中,外界环境对测量结果的影响较大,而将两路信号进行互相关,由于噪声和混沌信号没有相关性,因此测量结果不受噪声的影响,即使用相关函数峰值来表征异质物对混沌激光的衰减也不会受到外界环境的影响,从而提高了信噪比。

## 5 结 论

本课题组提出了一种基于混沌激光相关法的新测量方法,该方法通过提取探测信号和参考信号的互相关函数峰值来表征脂肪乳液及其内部异质物对混沌光的衰减,得到脂肪乳液内异质物对混沌光的衰减信息,实现了对脂肪乳液内异质物的测量。结果表明,该方法具有抗噪声干扰、信噪比高的优点,在医学成像以及物体检测等领域具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Cooper D W. Monitoring contaminant particles in gases: a review[J]. Particulate Science and Technology, 1988, 6(2): 219-242.
- [2] Zhang L. Study on particle monitoring technique in water[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009: 7-9.  
张磊. 水中颗粒物的检测技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009: 7-9.
- [3] Phillis G D J. Suppression of multiple scattering effects in quasielastic light scattering by homodyne cross-correlation techniques [J]. The Journal of Chemical Physics, 1981, 74(1): 260-262.
- [4] Pine D J, Weitz D A, Chaikin P M, *et al.* Diffusing wave spectroscopy [J]. Physical Review Letters, 1988, 60(12): 1134-1137.
- [5] Cucheval A, Vincent R R, Hemar Y, *et al.* Diffusing wave spectroscopy investigations of acid milk gels containing pectin[J]. Colloid and Polymer Science, 2009, 287(6): 695-704.
- [6] Tan C X. Study on particle sizing by the photon cross correlation spectroscopy[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2014: 21-24.  
谭成勋. 基于光子互相关光谱的颗粒测量技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2014: 21-24.
- [7] Drewel M, Ahrens J, Podschus U. Decorelation of multiple scattering for an arbitrary scattering angle [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1990, 7(2): 206-210.
- [8] Ntziachristos V. Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology [J]. Nature Methods, 2010, 7(8): 603-614.
- [9] Chance B. Near-infrared (NIR) optical spectroscopy characterizes breast tissue hormonal and age status [J]. Academic Radiology, 2001, 8(3): 209-210.
- [10] Tromberg B J, Shah N, Lanning R, *et al.* Non-invasive *in vivo* characterization of breast tumors using photon migration spectroscopy[J]. Neoplasia, 2000, 2(1/2): 26-40.
- [11] Colak S B, van der Mark M B, Hooft G W, *et al.* Clinical optical tomography and NIR spectroscopy for breast cancer detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 1143-1158.
- [12] Gratton G, Fabiani M, Elbert T, *et al.* Seeing right through you: applications of optical imaging to the study of the human brain [J]. Psychophysiology, 2003, 40(4): 487-491.
- [13] Villringer A, Chance B. Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function [J]. Trends in Neurosciences, 1997, 20(10): 435-442.
- [14] Jobsis F. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters [J]. Science, 1977, 198(4323): 1264-1267.
- [15] Zevallos M E, Gayen S K, Das B B, *et al.* Picosecond electronic time-gated imaging of bones in tissues [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1999, 5(4): 916-922.
- [16] Wang C Y, Sun C W, Yang C C, *et al.* Optical imaging of objects in turbid medium with ultrashort pulses[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4082: 14-21.
- [17] Yang F, He Y, Zhou T H, *et al.* Simulation of space-borne altimeter based on pseudorandom modulation and single-photon counting [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 21-26.  
杨馥, 贺岩, 周田华, 等. 基于伪随机码调制和单光子计数的星载测高计仿真[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 21-26.
- [18] Qiu Z S, Yang F, Ye X C, *et al.* Research on laser ranging technology based on pseudo-random code phase modulation and coherent detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 052801.  
邱子胜, 杨馥, 叶星辰, 等. 基于伪随机码相位调制和相干探测的激光测距技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 052801.
- [19] Chen N G, Zhu Q. Time-resolved diffusive optical imaging using pseudo-random bit sequences [J]. Optics Express, 2003, 11(25): 3445-3454.
- [20] Wang Y C, Wang A B. Range finding with chaotic laser with high resolution non-affected by ranging distance[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(5): 80-84.  
王云才, 王安帮. 距离无关的高精度混沌激光测距[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(5): 80-84.
- [21] Qiao Y, Ma J, Zhang J G. Design of chaotic light source for chaos optical time domain reflectometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54

(2): 021201.

乔翊, 马珺, 张建国. 面向混沌光时域反射仪的混沌光源设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021201.

[22] Wang Y, Jin B Q, Zhang J G, *et al.* Distributed optical fiber acoustic sensing based on chaotic laser

interference[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328016.

王宇, 靳宝全, 张建国, 等. 基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328016.