

文章编号: 0258-7025(2007)04-0507-04

探测受声波调制的激光漫反射回波信号

叶嘉雄, 徐启阳*, 符鑫尧

(华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 基于光电接收目标的漫反射光原理, 采用红外激光探测室内声波, 在对目标特性研究和漫反射回波信号光功率估算的基础上, 设计和研制了实验系统。用红外激光探测从玻璃目标返回带有受声波调制的激光漫反射回波信号, 在6~63 m距离及直接反射光线与探测器光轴之间的夹角 $\beta \leq \pm 4^\circ$ 时, 可以听见所探测到回波信号中的声音; 当 $\beta = 4^\circ \sim 15^\circ$ 时, 可以探测到激光漫反射回波信号, 但听不到声音。实验证明, 利用漫反射激光探测室内声音的方法是可行的。

关键词 激光技术; 红外激光探测; 声波调制; 漫反射回波信号

中图分类号 TN 249; TN 247 **文献标识码** A

Detection of a Sound of Modulation Signal in Scattering Laser

YE Jia-xiong, XU Qi-yang, FU Xin-yao

(Institute of Photoelectric Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Based on a scattering laser principle of photoelectricity sounding from the target, a infrared laser is used in detecting sound wave. On the foundation of researching target specific feature and estimated scattering laser power of echo signal, the experimental equipment is designed. In experiment, a sound of modulation signal is detected from glass target in scattering infrared laser. If the distance between target and light source was 6~63 m and the reflection of laser ray is $\beta \leq \pm 4^\circ$ (an angle with the detector spool) the sound of echoic modulation signal should be heard. If $\beta = 4^\circ \sim 15^\circ$, the echo signal of scattering laser can be detected, but the sound cannot be heard. Experiment proves that the method of sounding sound wave using scattering laser from the target is feasible.

Key words laser technique; infrared laser detect; modulation of sound wave; scattering echo signal

1 引言

声波探测在军事、刑事侦察、自然灾害预测、工业检测和科学研究中有许多应用, 其常用方法有无线电探测和压电传感式探测。用激光探测是一种新的方法。曾道红^[1]已经报道过一种新的窃听装置——激光窃听器, 但是, 国外研究人员只是做某些理论性的研究^[2,3]。罗海俊等^[4]提出了一种用激光探测室内含声音的反射光为基本原理的实现方案, 但没有具体的实验。还有研究者进行了激光探测水下声波信号的研究^[5~9]。采用不可见的红外激光探测室内声波, 具有更机动灵活、保密性强的特点。本文利用漫反射激光探测室内声音, 估计目标特性和

回波光功率, 设计了实验系统。

2 原理

声波在空气中传输, 会在玻璃表面产生声压, 声压的大小与质点所处的位置有关。而玻璃表面的反应只和直接作用在上面的局部声压成正比, 因此玻璃会产生变形。也就是说, 声波引起了玻璃的振动。不同频率、不同强度的声音引起的振动程度也不同。当一束激光照射到玻璃表面, 并反射或散射而离开玻璃时, 此反射或散射的激光受玻璃振动声波的调制。

以玻璃为声波载体, 当室内有声音传播到窗户

收稿日期: 2006-06-26; 收到修改稿日期: 2006-10-30

作者简介: 叶嘉雄(1937—2006), 男, 广西南宁人, 教授, 研究方向为光电技术与自动控制。

* 通信联系人。E-mail: wusong@hust.edu.cn

玻璃上时,玻璃产生微弱的振动。通过激光(如图 1 中的入射光 I) 照射到玻璃上,然后用光电探测器和信号处理系统,探测和处理从玻璃上返回带有受声波调制的反射光 I_m ,或者漫反射光 I_s ,从而探测出所需要听到的声音。

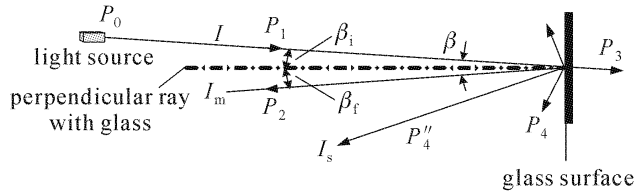


图 1 光电接收目标漫反射光原理图

Fig. 1 Scattering laser principle of photoelectric receiving target

从同一介质表面同一点出发的反射光和漫反射光,当在光源处接收这两种光的能量时,反射光的大小只与介质表面的反射率有关。它对应于入射光是直来直去的一束光,然而漫反射光是向四面散射的。设 P_4 为整个立体角 4π 弧度内的总散射光功率,接收望远镜所能接收到的光仅仅为总散射光功率的一部分。如按光的均匀分布,并设接收光的发散角为 1 mrad ,那么在此立体角内所能接收到的散射光功率 P'_4 为

$$P'_4 = P_4 \times 10^{-3} / 4\pi = P_4 \times 0.16 \times 10^{-3}, \quad (1)$$

式中 $4\pi = 360^\circ / 57.2984^\circ = 6.283 \text{ rad}$; $1/4\pi = 1/6.283 = 0.16$ 。

如果设该介质表面的反射率为 1,那么从光源处接收到的反射光功率 P_2 等于入射光功率 P_1 ,且 P_2 等于整个立体角 4π 弧度内的总散射光功率 P_4 。所以

$$P'_4 = P_2 \times 0.16 \times 10^{-3}, \quad (2)$$

显然,对应于 P_2 的反射光 I_m 远大于 P'_4 的漫反射光 I_s 。

如果采用探测反射光 I_m 的方法,可以接收到比漫反射光 I_s 强得多的回波信号。但是,这必须要准确地寻找与入射角 β_i 所对应的反射角 β_r 。并且, I_m 的方位是随激光入射角和目标的变化而变化的。所以,在用不可见的红外激光探测中,很难准确地找到三维空间上接收反射光 I_m 的位置。

如果改用直接探测从目标上漫反射光 I_s 的方法,就可以不需要寻找很难找到的 I_m ,因而大大提高了探测使用范围。

由于漫反射光 I_s 远小于反射光 I_m ,所以激光从玻璃目标上漫反射的回波信号是极其微弱的。对这

种带有受声波调制而极其微弱的激光漫反射回波信号的探测进行了探索实验。

3 目标特性与回波光功率的估计

3.1 实测数据

实验采用半导体激光器作为光源,波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$ (红光),输出功率 $P_0 = 9.5 \text{ mW}$ 。玻璃距光源 7 m 。在图 1 中,参数 P_1 为入射光功率, P_3 为透射光功率。当忽略玻璃对光的吸收时,则有

$$P_4 = P_1 - (P_2 + P_3),$$

目标的反射率 $\rho_r = P_2 / P_1$,

目标的透过率 $t_{\text{opt}} = P_3 / P_1$,

目标的漫反射率 $\rho_m = P_4 / P_1$,

且 $\rho_r + t_{\text{opt}} + \rho_m = 1$ 。

测试条件是玻璃背面贴有报纸,透射光 P_3 也转变为漫反射光,实测数据如表 1 所示。

表 1 从玻璃目标上返回的回波光功率实测数据

Table 1 Measured laser power of echo from glass

| P_0 | P_1 | P_2 | ρ_r | P_3 | t_{opt} | P_4 | ρ_m |
|-------|-------|-------|----------|-------|------------------|-------|----------|
| /mW | /mW | /mW | /% | /mW | /% | /mW | /% |
| 9.5 | 9.5 | 0.40 | 4.2 | | | 9.1 | 95.8 |

3.2 漫反射回波信号光功率估算

实际上,激光器光源的漫反射激光功率是沿不同的角度按高斯函数分布。所以,在较小的偏转角 β 下,接收望远镜视场角内所能接收到的漫反射光功率要大;在较大的偏转角 β 下,漫反射光功率将大大地减少,甚至比均匀分布的漫反射光功率还要小得多。

令光源功率 $P_0 = 1 \text{ W}$,距离目标为 100 m ;激光照射在目标处的光斑直径为 0.1 m ,往返光程 200 m ,从目标返回的漫反射激光通过探测器口径处的光斑直径 $d = 0.13 \text{ m}$,望远镜物镜的孔径 $D = 0.05 \text{ m}$,其光斑占空系数 $(D/d)^2 = 0.14$;在接收望远镜光轴偏转角 β 时,其对应的发散角近似为 1 mrad 。则接收器接收的回波功率为

$$P''_4 = P_0 \rho_m (D/d)^2 (10^{-3} / 4\pi), \quad (3)$$

所以,对于背贴纸玻璃的目标,其接收器接收的回波功率为

$$P''_4 = 1 \text{ W} \times 0.958 \times 0.14 \times 10^{-3} \times 0.16 = 21.5 \mu\text{W}, \quad (4)$$

(4)式没有考虑大气和光学系统对光功率的损耗、目标对光功率的吸收和激光波长的差别,以及漫反射

随角度不均匀分布等因素所带来的误差,其误差有一个数量级的差别,衰减因素应为0.1~1。估计室内声音对玻璃的调制系数为 10^{-4} ,因此在目标上回波功率中声音信号的光功率 P_{SY} 应减少 $(0.1\sim 1)\times 10^{-4}$,所以,对于背贴纸玻璃

$$P_{SY} = 0.215 \sim 2.15 \text{ nW}.$$

3.3 光电偏置电路、光电流和电压变化量

使用光敏雪崩二极管(APD)探测器 C30902S,根据其产品说明书的技术参数和光电偏置电路,对达到探测器上的光电流及电压变化值进行计算。在波长980 nm时,雪崩二极管的灵敏度 ζ 为80 A/W。在对应的光电偏置电路中,令 Δi_{oi} 为回波对应的直流电流, Δi_i 为回波信号的光电流; $\Delta V_{01}, \Delta V_{02}, \Delta V_{03}$ 分别为回波对应的直流电压, $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3$ 为回波中所含声音信号的电压变化量,且 $\Delta V_{oi} = \Delta V_i \times 10^4$ 倍。当光功率为0.1 nW时,其光电流应为

$$\Delta i_{0.1} = 8.0 \text{ nA},$$

在对应光电偏置电路中的负载电阻 $R = 100 \Omega$,其声音信号引起的电压变化量为

$$\Delta V_1 = \Delta V_{01} \cdot R = 8 \times 10^{-9} \times 100 \times 1000 \text{ V} = 0.8 \text{ mV}, (5)$$

对于声音信号的光功率为0.215~2.15 nW时, $\Delta V_3 = 1.72\sim 17.2 \text{ mV}$, $\Delta V_{03} = 17.2\sim 172 \text{ V}$ 。

另外,考虑到对准角的变化误差,实际上接收到

的信号估计只有计算值的1/10。计算值是设计实验系统和选择元器件的初步依据。

4 实验

4.1 实验系统

在对目标特性研究和漫反射回波信号光功率估算的基础上,设计和研制了实验系统。实验系统由激光发射器、光学机械系统、光电探测与信号处理系统以及音室四部分组成,如图2所示。激光发射器包括激光器、激光准直和整形部件。光学机械系统由发射望远镜、接收望远镜和发射端目测望远镜组成,它能使发射激光器光轴、发射端目测望远镜光轴、接收探测器光轴和接收端望远系统光轴,在任意观测距离,四轴合一,并设置了角度微调装置。光电探测器与信号处理系统有锁相放大器、带通滤波器、光电探测器、光电放大器、音频放大器和超低噪声前置放大器以及存储示波器等。音室为一长、宽、高400 mm×500 mm×550 mm的封闭小木屋,顶上为分边斜坡遮雨的屋顶,仅一面为普通的窗户玻璃,其内侧仿有窗帘而贴了一层报纸。声音来自一小型半导体盒式磁带放音机放的音乐或者说话声,在1 m处可以听得很清楚。当将放音机放入小木屋内,关上门封闭后,站在原来的地方就听不到声音了。

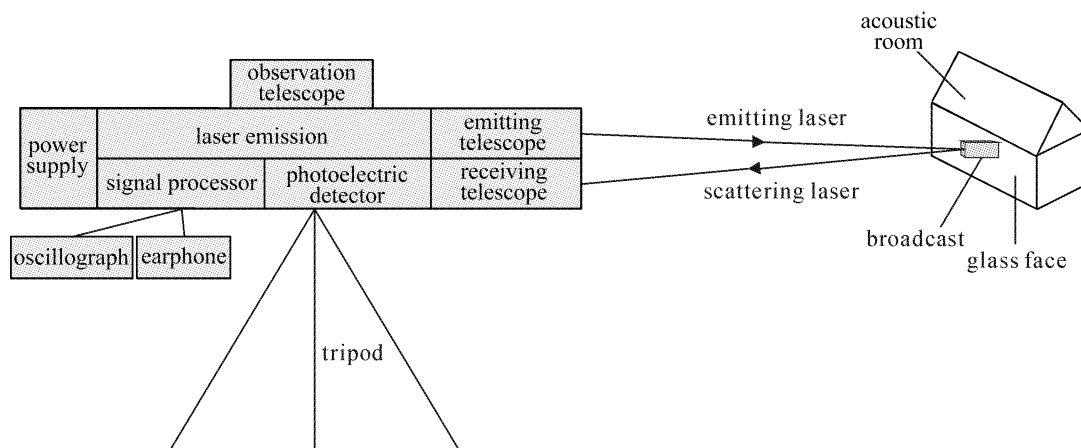


图2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic experimental setup

4.2 实验结果

用可见光激光器发射630 nm的红光,输出功率3 mW,调制频率50 kHz;用雪崩光电二极管(APD)和PIN光电接收器、低通和高通滤波,探测到距离10 m处目标上反射光 I_m 的回波信号。因为使用了可见光,容易寻找反射角 β_i ,所以,听到了从玻

璃目标处返回的声音信号,验证了探测受声音调制的激光漫反射回波信号的方法是可行的。

以连续980 nm的红外激光作为发射光,输出功率为1 W,采用四轴合一的光学机械系统,在直接反射光线与探测器光轴之间的夹角 $\beta \leq \pm 4^\circ$ 时,经雪崩二极管光电探测器和信号处理,在6~63 m内,

可以听见从音室玻璃上所探测到回波信号中的声音,但噪声比较大。当 $\beta=4^\circ\sim 15^\circ$ 时,可以探测到激光漫反射回波信号(由示波器显示),但听不到声音。

在进行两栋楼之间房间对房间的探测实验中,距离20 m左右可以听见从房间玻璃上所探测到回波信号中的声音,但噪声未见改善。

采用脉冲调制探测方法,在激光脉冲调制频率为10 kHz,激光脉冲峰值功率为10 W,发射激光脉冲宽度为20 ns,接收脉冲宽度为200 ns,接收视频放大器输出电压为160 mV,探测距离为100 m的条件下,可以听见从音室玻璃上所探测到回波信号中的声音,且噪声电平比连续光学机械系统要小,但是声音清晰度仍然不理想。

5 结 论

1) 基于光电接收目标的漫反射光原理,用红外激光探测,实现了在10~100 m内任意距离接收到从玻璃目标上漫反射的回波信号。在63 m处听到探测到的声音,证明利用红外激光漫反射光探测室内声音的原理是正确的。

2) 进一步降低探测系统噪声电平,尽可能地消除或减少激光发射器内部噪声,提高探测灵敏度,采用数字信号处理技术和优质特性的光学滤光片,是进入实用化研究的有效途径。

参 考 文 献

1 Zeng Daohong. Laser eavesdropping [J]. *Science & Culture*, 2005, (4):19

- 曾道红. 激光窃听[J]. *科学与文化*, 2005, (4):19
- 2 Erik Olsson, Nils-Erik Molin, Mikael Sjudahl. Scattered ultrasound fields measured by scanning laser vibrometry [C]. *SPIE*, 2003, **5144**:717~727
- 3 Aleksandr P. Solov'ev, Yurii P. Sinichkin *et al.*. Spatial modulation characteristics of scattered laser radiation and acousto-optical imaging of weak scattering media [C]. *SPIE*, 2001, **4242**:164~171
- 4 Luo Haijun, Zhu Xiao. Research on laser eavesdropping technology [J]. *Laser & Optronics Progress*, 2003, **40**(12):55~58
- 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):55~58
- 5 Sang Guoming, Tian Zuoxi, He Jinlin *et al.*. Research on making use of laser eavesdropping technology in detecting underwater acoustic signals [J]. *Ship Electronic Engineering*, 1999, (6):56~59
- 桑国明,田作喜,何锦林等. 激光窃听技术在水声信号检测中的应用研究[J]. *舰船电子工程*, 1999, (6):56~59
- 6 Liu Qitao. Research on detecting underwater acoustic signals using laser [J]. *Electro-Optics & Passive Countermeasures*, 2005, **20**(5):10~11,72
- 刘其涛. 利用激光探测水下声信号的研究[J]. *光电技术应用*, 2005, **20**(5):10~11,72
- 7 Qin Huiping, Zhou Tianhua, Zhang Dekun. Research on laser detection of underwater acoustic signals [J]. *Infrared*, 2005, (8):25~28
- 秦慧平,周田华,张德琨. 水下声信号激光探测技术研究[J]. *红外*, 2005, (8):25~28
- 8 Yi Houhui, Sun Jinzuo. Theoretical study on using laser to detect the underwater acoustic signal [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2003, **16**(4):252~255
- 伊厚会,孙金祚. 利用激光探测水下声场的理论研究[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2003, **16**(4):252~255
- 9 Gong Yanjun, Jiang Rongxi, Li Xiaowei *et al.*. Detect technique of extracting underwater acoustic signal from scattered light by using laser [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2003, **16**(1):38~42
- 宫彦军,江荣熙,李晓伟等. 利用激光从散射光中提取水下声信号的探测技术[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2003, **16**(1):38~42