

像差对激光监听能量利用率的影响

郑联慧^{1,2*}, 纪晓东²¹装备智能控制福建省高校重点实验室, 福建 三明 365004;²三明学院机电工程学院, 福建 三明 365004

摘要 激光在传输过程中会受到大气抖动的影响, 大气抖动产生的像差会导致成像面上的光斑弥散和能量利用率下降, 从而降低远程声音采集的质量, 不利于激光监听技术在实际环境中的应用。以像差为研究对象, 研究像差对激光远程声音监听能量利用率的影响, 并对此进行了理论推导。分别分析了不同类型、不同大小的单阶 Zernike 像差和大气湍流对远程声音采集质量的影响, 并进行了数值计算。结果表明: 不同类型、不同大小的像差对能量利用率的影响不同, 能量利用率随着像差的增大而降低; 不同大气湍流对能量利用率的影响不同, 能量利用率基本上随着 D/r_0 的增大而降低。本研究为提高远程声音监听质量提供了理论依据和参考。

关键词 激光光学; 远程声音监听; 像差; 能量利用率

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121407

Effect of Aberration on Energy Utilization in Laser Eavesdropping

Zheng Lianhui^{1,2*}, Ji Xiaodong²¹Key Laboratory of Equipment Intelligence Control of Fujian Province, Sanming, Fujian 365004, China;²School of Mechanical and Electrical Engineering, Sanming University, Sanming, Fujian 365004, China

Abstract The laser can be influenced by the atmospheric turbulence during its transmission and this turbulence introduces aberrations which leading to the spot diffusion on the imaging surface and the decrease of energy utilization. Thus, the remote sound collection quality is reduced, which is not conducive to the application of laser eavesdropping in the actual environments. With aberration as the research object, the influence of aberration on the energy utilization in laser remote sound eavesdropping is investigated and the corresponding theoretical deviation is performed. In addition, the influences of single-order Zernike aberrations and the atmospheric turbulences with different types and different magnitudes on the remote sound collection quality are analyzed. Meanwhile, the numerical simulation is conducted. The results show that the influences of aberrations with different types and different magnitudes on energy utilization are different, and the utilization decreases with the increase of aberration. Moreover, the different types of atmospheric turbulences have different effects on energy utilization, and the utilization basically decreases with the increase of D/r_0 . This study provides a theoretical basis and reference for the improvement of laser remote sound eavesdropping quality.

Key words laser optics; remote sound eavesdropping; aberration; energy utilization

OCIS codes 140.3460; 140.7010; 010.1330

1 引言

激光远程声音采集技术在监听方面得到了广泛应用^[1]。采用激光技术进行远程声音监听具有隐蔽性强、不容易被发现的优点, 有利于对戒备森严、信息人员无法靠近的环境进行声音信息的获取, 从而

掌握战争、刑侦等方面的主动权^[2]。激光监听的基本原理为: 激光发出一束光, 入射至监听目标所处环境中容易受声压作用而产生振动的物体上, 然后在光束反射方向上, 采用光敏晶体管和音频功率放大器对声音信号进行解调, 以实现声音的还原^[3]。

随着激光技术的发展, 激光监听技术也取得了

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-07-30; 录用日期: 2018-08-10

基金项目: 福建省自然科学基金(2018J05009)、三明学院博士科研启动金(16YG09)、福建省卫生厅项目(2017-1-92)

* E-mail: zhenglianhui2010@sina.com

重大进展。罗海俊等^[4]介绍了激光窃听的基本原理,归纳了该技术的特点,并提出了激光窃听的实现方案。潘丽娜等^[5]采用半导体激光器进行监听研究,实现了激光监听、定位的功能。张超凡^[6]基于“猫眼”效应原理对激光监听技术进行改进,解决了发射端和接收端分离的问题。然而,激光监听技术在运用过程中常会受到诸多因素的影响,如激光入射角、传输距离和大气环境等^[7]。赵铭彤等^[8-9]研制了红外激光窃听器,并对样机的性能进行了检测。此外,激光在传输过程中会因环境大气的抖动而产生像差,导致成像面上的光斑发生弥散、破碎等,影响激光监听的质量^[10]。为了增强激光监听对大气环境的适应性,母一宁等^[11]提出了四象限激光监听方法,该方法能较好地克服大气的影响。

然而,研究人员并不十分清楚大气抖动对光斑的影响程度,且没有对此进行评价的相关标准。鉴于此,本文以像差为研究对象,研究其对激光监听质量的影响,并以能量利用率作为评价指标,定量分析不同类型、不同大小的 Zernike 单阶像差和大气湍流对光斑能量利用率的影响。为验证结果的可靠性,本文进行了理论推导和数值计算。

2 像差对激光监听系统能量利用率影响的理论分析

激光是远程声音监听的重要组成部分,但其在传输过程中会受到大气抖动的影响,如图 1 所示。大气的抖动会引起光斑发生形变,甚至破碎,严重影响成像面的监听质量。根据光学理论,大气抖动可以采用一组相互正交的 Zernike 多项式进行描述^[12]。能量利用率 η 可直接描述像差对光斑的影响:

$$\eta = \frac{I_{\varphi \neq 0}}{I_{\varphi = 0}}, \quad (1)$$

式中: $I_{\varphi \neq 0}$ 和 $I_{\varphi = 0}$ 分别为有像差和无像差时的能量。

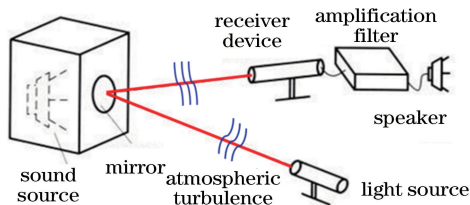


图 1 激光监听工作原理示意图

Fig. 1 Schematic of laser eavesdropping

任意一个随机波前像差均可用 Zernike 多项式表示为

$$\varphi(r, \theta) = \sum_{j=0}^N a_j Z_j(r, \theta), \quad (2)$$

式中: r 为归一化的极坐标半径; $0 \leq r \leq 1$; θ 为 r 与 x 轴的夹角; $\varphi(r, \theta)$ 为孔径内波前; a_j 为各阶模式系数; N 为 Zernike 系数的阶数; $Z_j(r, \theta)$ 为第 j 阶 Zernike 多项式。 a_j 可表示为

$$a_j = \int W(r, \theta) Z_j(r, \theta) \varphi(r, \theta), \quad (3)$$

式中: $W(r, \theta)$ 为窗函数, 可表示为

$$W(r, \theta) = \begin{cases} 1/\pi, & |r| \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

不妨假设激光光斑为均匀分布, 其他类型分布的光斑只需对高斯分布的光斑进行一次卷积运算即可获得。由于大气抖动的影响只是导致光斑的相位发生改变, 因此, 大气抖动对光斑的影响可表示为

$$I_{\text{obj}}(x, y) = I_{\text{src}}(x, y) \otimes F_{\text{PSF}}(x, y), \quad (5)$$

式中: $I_{\text{obj}}(x, y)$ 和 $I_{\text{src}}(x, y)$ 分别为成像面和光源的光斑; \otimes 为卷积运算; $F_{\text{PSF}}(x, y)$ 为系统的点扩展函数, 且

$$F_{\text{PSF}}(x, y) = |\mathcal{F}\{A_0 \exp[i\varphi(x, y)]\}|^2, \quad (6)$$

式中: $\varphi(x, y)$ 为大气抖动引起的等效波前像差; A_0 为波前振幅。

因此, 大气抖动对成像面上光斑的影响可以表示为

$$\eta = \frac{I_{\varphi \neq 0}}{I_{\varphi = 0}} = \frac{\iint I_{\text{obj}}(x, y) dx dy |_{\varphi \neq 0}}{\iint I_{\text{obj}}(x, y) dx dy |_{\varphi = 0}}. \quad (7)$$

显然, 波前像差的存在会降低成像面上光斑的能量利用率, 而且不同类型、不同大小的波前像差对能量利用率的影响不同。综上, 波前像差的存在降低了激光远程监听的效果。

3 数值计算

不妨设激光光斑为一点源, 若激光为其他类型分布时, 只需在点源的基础上进行一次卷积运算即可。当系统无像差时, 在成像面的光斑为爱里斑。激光在大气中传输时会受到大气湍流的影响, 根据(4)式和(7)式可以计算得到不同类型、不同大小的像差对能量利用率的影响。

3.1 单阶 Zernike 像差对能量利用率的影响

为了研究单阶 Zernike 像差对激光监听能量利用率的影响, 本研究模拟了 z_3 (离焦像差)、 z_4 (x 方向像散)、 z_6 (x 方向彗差)、 z_8 (4 叶瓣) 和 z_{10} (球差) 等 Zernike 单阶像差对能量利用率 η 的影响。成像面分辨率为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。像差均方根 (RMS) 为 $0.01\lambda \sim 0.2\lambda$ 。部分实验结果如图 2 所示,

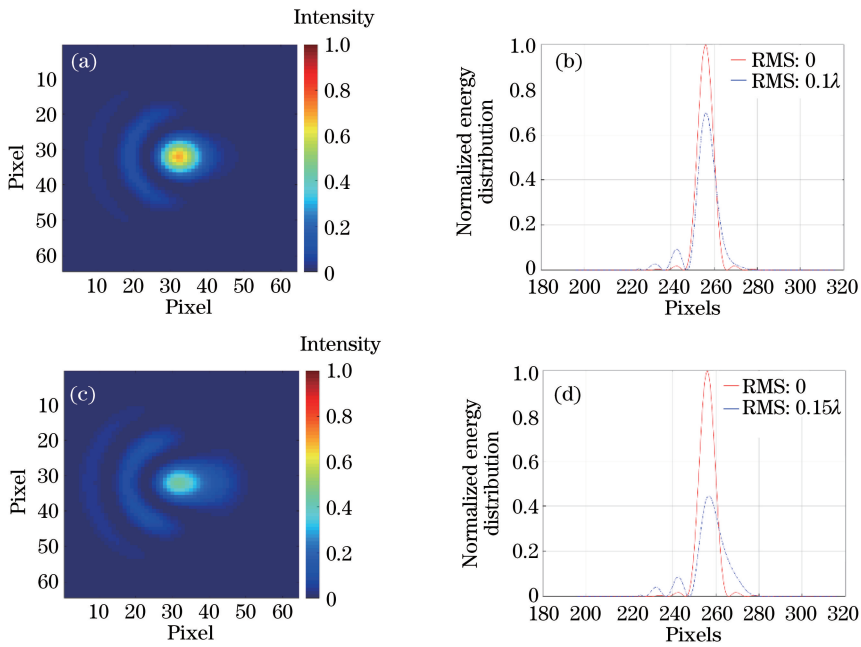


图 2 z_6 像差对能量利用率的影响。(a)光斑图,像差 RMS 为 0.1λ ;

(b)能量利用率分布;像差 RMS 为 0.1λ ;(c)光斑图,像差 RMS 为 0.15λ ;(d)能量利用率分布;像差 RMS 为 0.15λ

Fig. 2 Influence of z_6 aberration on energy utilization. (a) Spot diagram, RMS of aberration is 0.1λ ; (b) energy utilization distribution; RMS of aberration is 0.1λ ; (c) spot diagram, RMS of aberration is 0.15λ ; (d) energy utilization distribution; RMS of aberration is 0.15λ

图像显示区域为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 。结果显示:像差的存在导致了能量利用率的下降。

此外,定量分析了不同类型、不同大小的单阶 Zernike 像差对能量利用率的影响,结果如图 3 所示。可见:不同类型、不同大小的单阶 Zernike 像差对能量利用率的影响不同,能量利用率随像差的增大而降低;当像差均方根大于 0.15λ 时,能量利用率约为 0.4。

3.2 大气湍流对能量利用率的影响

按照 Kolmogorov 大气湍流理论,生成了 D/r_0 分别为 5、9、13、17、21、25 的大气湍流相位屏,所生成的大气相位屏均由 3~36 阶 Zernike 像差组成,不包括倾斜像差和 piston 像差。其中, D 为入瞳直径, r_0 为大气视宁度参数。不同大气湍流相位屏对

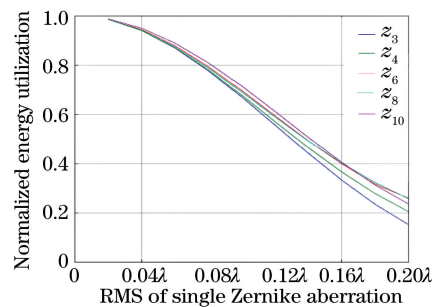


图 3 不同类型、不同大小的 Zernike 像差对能量利用率的影响

Fig. 3 Influences of Zernike aberrations with different magnitudes and different types on energy utilization
能量利用率 η 的影响如图 4 所示,可见:大气会降低激光监听系统的能量利用率。

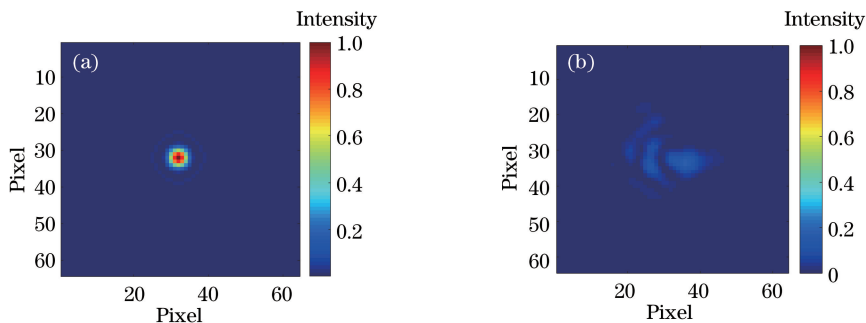


图 4 大气湍流对能量利用率的影响。(a) $D/r_0=0$;(b) $D/r_0=5$

Fig. 4 Influence of atmospheric turbulence on energy utilization. (a) $D/r_0=0$; (b) $D/r_0=5$

此外,还定量分析了不同情况下的大气湍流对能量利用率的影响,结果如图5所示。由图5可以看出:能量利用率大体上随着 D/r_0 的增大而降低,这与单阶像差对能量利用率的影响规律基本一致。然而,大气湍流是动态变化的,因此每一次大气湍流相位屏包含的像差类型及其大小也是变化的,这也是 $D/r_0=17$ 比 $D/r_0=13$ 对能量利用率影响较小的原因。结果显示,大气会影响激光的监听质量,从而限制了激光监听的应用。

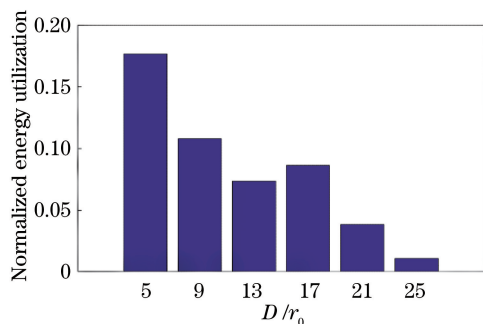


图5 不同 D/r_0 的大气湍流对能量利用率的影响

Fig. 5 Influences of atmospheric turbulences with different D/r_0 on energy utilization

4 结 论

本研究结果表明,大气抖动产生的像差会导致成像面上的光斑发生变形,从而降低了能量利用率。不同类型、不同大小的像差对能量利用率的影响是不同的,并随着像差的增大而降低。大气抖动产生的像差会降低利用激光技术获得的远程声音的采集质量。本研究结果对提高激光监听质量提供了一定参考。

参 考 文 献

- [1] Huang Z, Wu L F. Laser remote voice detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 121206.
黄贞, 吴林富. 便携式激光远程语音监听装置设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 121206.
- [2] Xu H X. Design of laser remote monitoring system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 33-35.
许海霞. 激光器远程监控系统的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 33-35.
- [3] Ning Q S, Ma X L, Yang Z. Experimental research on laser eavesdropping[J]. Physics Experimentation, 2009, 29(12): 38-41.
甯青松, 马小龙, 杨振. 激光窃听实验探究[J]. 物理

实验, 2009, 29(12): 38-41.

- [4] Luo H J, Zhu X. Research on laser eavesdropping technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(12): 53-56.
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): 53-56.
- [5] Pan L N, Zhuang Z Y, Wang G, *et al.* The research of audio monitoring and audio source location using semiconductor laser[J]. Optical Instruments, 2013, 35(1): 37-43.
潘丽娜, 庄紫云, 王戈, 等. 运用半导体激光器进行监听以及音源定位的研究[J]. 光学仪器, 2013, 35(1): 37-43.
- [6] Zhang C F. The improvement and realization of laser eavesdropping [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(2): 145-148.
张超凡. 激光窃听技术的改进与实现[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 145-148.
- [7] Wang Z. Study on the transceiver system of laser eavesdropping [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, China Academy of Sciences, 2007: 6-12.
王哲. 激光监听收发系统的研究[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2007: 6-12.
- [8] Zhao M T, Duan F L, Liu C, *et al.* Design of infrared laser tapping device [J]. Optoelectronics, 2016, 6(4): 149-155.
赵铭彤, 段帆林, 刘池, 等. 红外激光窃听器的研制[J]. 光电子, 2016, 6(4): 149-155.
- [9] Zhao M J, Hu Y Z, Zeng X D. Estimation of the operation range of the active laser surveillance [J]. Journal of Xidian University(Natural Science), 2004, 31(1): 72-75.
赵铭军, 胡永钊, 曾小东. 激光主动侦察作用距离评估[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2004, 31(1): 72-75.
- [10] Zheng L H, Gu N T, Rao C H, *et al.* Study on the aberration correction method of solar grating spectrometer based on adaptive optics [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0812002.
郑联慧, 顾乃庭, 饶长辉, 等. 基于自适应光学技术的太阳光栅光谱仪的像差校正方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0812002.
- [11] Mu Y N, Liu Y Y, Li P, *et al.* Methods and tests of four-quadrant laser eavesdropping in atmospheric environments [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(3): 523-526.
母一宁, 刘艳阳, 李平, 等. 大气环境下的四象限激

光监听方法与试验[J]. 半导体光电, 2014, 35(3): 523-526.

[12] Huang L H, Ning Y, Yang H F, *et al.* Multi-frame algorithm with deformable mirror[J]. Acta Optica

Sinica, 2009, 29(6): 1443-1448.

黄林海, 宁禹, 杨华峰, 等. 基于变形镜面形的多帧相位反演算法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1443-1448.