

## 差动激光多普勒尾流探测方法

鲁振中, 王培南, 刘继芳, 孙艳玲, 马琳

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 利用差动激光多普勒探测法, 研究了能够探测尾流中气泡和湍流分布的光学诊断方法。实验研究了模拟尾流场中运动气泡及湍流的后向散射光的多普勒频移谱特性。采用差动相干探测法获得了模拟尾流场的流速, 测量值与实际流速误差小于 1.5%。实验结果表明: 相干光束夹角对散射光频移量具有明显影响, 散射光多普勒频移量随两相干光夹角的增大而增大; 气泡运动引起的频移主要集中在低频端, 为一宽带谱; 并且频移谱的宽度随气泡数密度的增大而增大。频谱的这一特征可作为舰船尾流识别的判据之一。

**关键词:** 尾流检测; 激光多普勒技术; 后向散射

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3525-05

## Method of differential laser Doppler ship wake detection

Lu Zhenzhong, Wang Peinan, Liu Jifang, Sun Yanling, Ma Lin

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The optical method of differential laser Doppler for the ship wake detection was studied. The characteristics of the backscattering light for the bubble and turbulence were experimentally studied. The velocity of the ship wake field was obtained by the laser differential Doppler method, which is in coincidence with the actual value, and the relative error is less than 1.5%. The experimental results show that the angle between two coherent beams has obvious effects on the frequency shift. And the frequency shift increases as the angle increases. The frequency shift spectra for the bubble are characterized by a universal profile and at the low frequency end. The full width at half peak of the profile becomes larger as the field intensity increases, which can be seen as a criterion of the wake recognition.

**Key words:** detection of simulation wake; laser Doppler technique; backscattering

收稿日期: 2015-04-22; 修订日期: 2015-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(61378079, 11304240); 中央高校基本科研业务费专项资金(JB140511)

作者简介: 鲁振中(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光水下探测方面的研究。Email: zlzlxidian@126.com

## 0 引言

水中运动目标的尾流探测就是以水中运动目标的尾流或尾迹作为探测客体,相应的探测方法有:声尾流探测、红外热尾迹探测、气体分析仪尾迹探测、电磁尾迹探测和光尾流探测。其中,声尾流探测发展最为成熟,红外探测、气体分析仪尾迹探测、电磁尾迹探测等方法由于复杂的海况所引起的较大干扰而研究较少。国内声尾流的研究已经解决了工程化问题,进入实用化阶段。但是光尾流的研究尚处于理论和实验室研究阶段<sup>[1-5]</sup>。

光尾流探测方法可通过检测激光在运动目标尾流中传输前后的强度变化、尾流对激光的前向散射、后向散射的强度来达到对运动目标的探测与跟踪,也可以利用激光在运动目标尾流中传输前后的偏振度变化、尾流对激光的前向散射、后向散射的退偏振度实现对运动目标的探测与跟踪,还可以利用激光束在运动目标尾流中传输前后波前畸变实现对运动目标的探测与跟踪。相对其他尾流探测方法,光尾流探测供选择的可测物理参数多、组成探测系统的灵活性高、探测精度高,得到了国内外相关研究人员和应用机构的重视,近几年来,光尾流探测方法已经成为水中运动目标探测研究的一个热点。

目前在光尾流检测的研究中,无论是通过检测激光在目标尾流传输前后的强度变化、尾流对激光的前向散射或后向散射的强度来达到对目标的探测与跟踪,还是利用激光在目标尾流传输后的偏振度变化、尾流对激光的前向散射或后向散射的退偏振度实现对目标的探测与跟踪,都是针对尾流气泡的检测<sup>[6-7]</sup>。光学探测的作用距离因气泡的存留时间较短而十分有限,因此研究和探索不仅能够检测尾流气泡,而且能够检测尾流湍流的新的光学探测方法十分必要。文中结合尾流中气泡和湍流的特点,利用差动型激光多普勒探测方法,重点研究了能够探测尾流中气泡和湍流分布的光学手段。

## 1 差动多普勒探测原理

激光多普勒测速系统普遍使用光外差技术进行光频移的检测<sup>[8-9]</sup>,可以很好地抑制水体自身的散射信号,而它所具有的高光增益特性又能进一步提高

检测的信噪比。在已有的多普勒外差检测模式中,差动模式<sup>[10]</sup>因其多普勒频移大小与散射光的方向无关的优点而被广泛使用。差动多普勒探测方式的基本原理如图 1 所示。

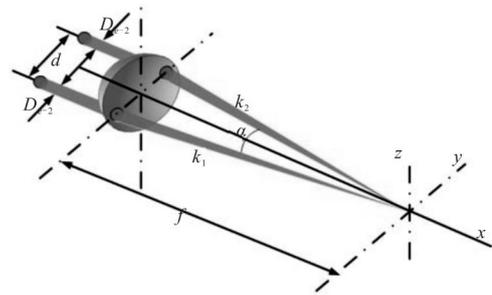


图 1 差动激光多普勒探测原理图

Fig.1 Optical pathway diagram of the differential laser Doppler detection

激光器出射的光束经分光系统分成同频率、等强度的两束平行光,其光斑直径均为  $D_c$ ,两光束间距为  $d$ 。两光束经透镜聚焦后以不同方向入射到散射粒子上,由于散射粒子的运动速度  $v$  与两束光的波矢  $k_1, k_2$  相对方向不同,两束光在交汇点发出的散射光频率  $f_1, f_2$  也因此不同,它们分别为<sup>[10]</sup>:

$$f_1 = f_0 \left( 1 - \frac{v \cdot (k_1 - k_2)}{c} \right) \quad (1)$$

$$f_2 = f_0 \left( 1 - \frac{v \cdot (k_2 - k_1)}{c} \right) \quad (2)$$

式中:  $f_0$  为入射激光频率;  $c$  为光速;  $k_s$  为散射粒子运动方向的单位矢量。

频率分别为  $f_1, f_2$  的散射光在光电探测器上干涉得到中频信号的频率为:

$$f_d = |f_1 - f_2| = \frac{f_0}{c} |v \cdot (k_1 - k_2)| = \frac{2|v_y|}{\lambda_0} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

式中:  $v_y$  为散射粒子在两光束波矢量差  $(k_1 - k_2)$  方向(即图中  $y$  轴方向)的分量;  $\lambda_0$  为入射光在真空中的波长;  $\alpha$  为两光束间的夹角。只要相干光夹角和入射激光波长给定,则多普勒频移与速度就成线性关系。

## 2 差动激光多普勒尾流探测实验

差动相干探测实验系统由光源、分束合束系统、探测接收系统、数据分析系统和水体环境五个部分组成,如图 2 所示。实验中,采用 Lighthouse Photonics 公司 Sprout-G 型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,输出 532 nm 的

连续激光,由分光棱镜 SP 将入射光分成光强相等的两束平行光,经焦距  $f=380\text{ mm}$  的透镜 L1 聚焦后入射到模拟尾流区域形成干涉场(即控制体)。控制体内气泡的后向散射光通过焦距  $f=80\text{ mm}$  的透镜 L2 收集后由 SensL 公司型号为 SPMMini 的光电倍增管 PMT(增益系数 $\sim 106$ )接收,将光信号转换为电信号输入到泰克公司 RSA3300A 频谱分析仪中进行频谱分析。实验中模拟尾流气泡是由与气泵相连的微孔陶瓷阵列产生的,通过调节气泵气压控制气泡的数密度以及气泡的速率分布,进而研究各参数对模拟尾流后向散射多普勒频谱的影响。此外,还利用吸光材料对水槽非光束入射面进行遮挡,从而消除水槽壁反射光的影响。

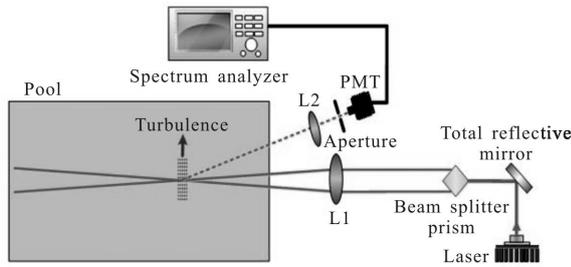


图 2 差动激光多普勒探测实验装置图

Fig.2 Experimental setup of differential coherent detection

图 3 为激光功率 $\sim 0.01\text{ W}$ 、探测区内无气泡、模拟尾流场流速为  $9.25\text{ mm/s}$  和  $22.45\text{ mm/s}$  时,相干光束夹角对散射光多普勒频移的影响:在水流速度为  $9.25\text{ mm/s}$  时,两相干光夹角从  $2.8^\circ$  增大到  $6.0^\circ$  时,散射光频移量从  $0.67\text{ kHz}$  增大到  $2.74\text{ kHz}$ ;水流速度为  $22.45\text{ mm/s}$  时,两相干光夹角从  $2.8^\circ$  增大到  $6.0^\circ$  时,散射光频移量从  $2.75\text{ kHz}$  增大到  $5.77\text{ kHz}$ 。这与公式(3)给出的频移关系相一致。因此,在实验中为获得较明显的频移量应选择较大的光束夹角。

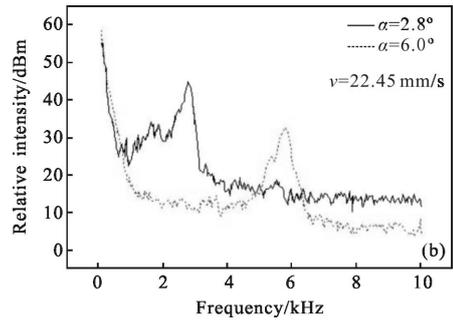
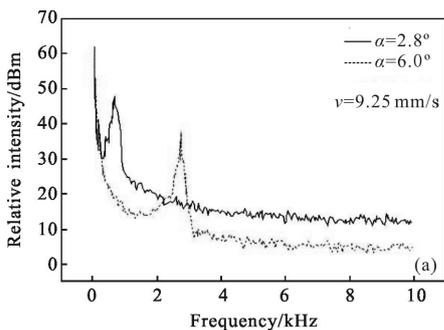


图 3 相干光束夹角对后向散射光频移的影响

Fig.3 Effect of coherent light intersecting angle on the frequency shift of the backscattering light

当入射光功率约为  $0.01\text{ W}$ , 模拟尾流场流速大小分别为  $7.56$ 、 $9.04$ 、 $22.02$ 、 $30.92\text{ mm/s}$  时,后向散射光多普勒频移谱如图 4 所示。

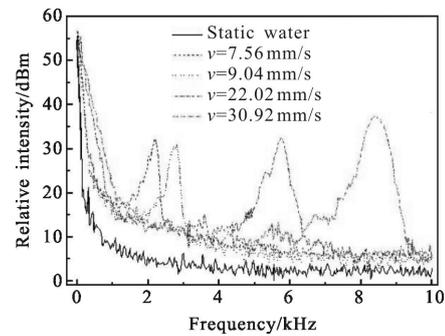


图 4 不同模拟尾流场流速下的后向散射光频移谱

Fig.4 Frequency shift spectra of the backscattering light at different simulated wake velocities

从图 4 中可以看出,随着模拟尾流场流速不断增大,后向散射光的多普勒频移量也逐渐增大,频谱逐渐展宽。频谱展宽是由于随着模拟尾流场流速的增大,控制区内速度分量增多所导致的。利用后向散射光多普勒频移量,通过公式(3)计算得到的模拟尾流场流速分别为  $7.68$ 、 $9.11$ 、 $22.19$ 、 $31.14\text{ mm/s}$ ,测量值与实际流速相一致。这也表明,采用差动相干探测系统能够实现对舰船尾流场流速的测量和舰船尾流的识别。

实验中利用微孔陶瓷阵列来模拟舰船尾流中的气泡,通过调节气泵气压控制气泡数密度以及气泡的速率分布,进而研究各参数对模拟尾流后向散射多普勒频谱的影响。

气泡发生器气压为  $0.015\text{ MPa}$  时,气泡发生器产生的气泡为大气泡,模拟尾流区内的气泡数密度

相对较少;改变气压为 0.01 MPa 时,气泡发生器产生的气泡为小气泡,此时模拟尾流区内的气泡数密度相对较大。两种情况下后向散射光多普勒频移谱如图 5 所示。

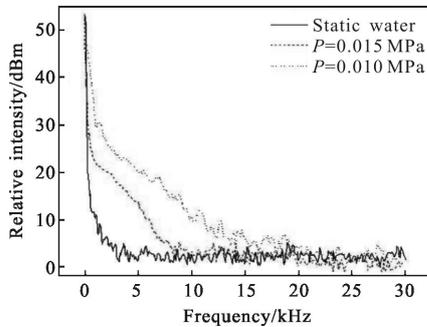


图 5 不同气泡数密度下的后向散射光频移谱

Fig.5 Frequency shift spectra of the backscattering light at different bubble densities

由图 5 可知,相对于静水情况,尾流场中存在气泡时,后向散射光发生明显的多普勒频移,且频移信号主要集中在低频端,不存在明显的谱峰,为一宽带谱。此外,模拟尾流气泡群后向散射光多普勒频移谱与气泡数密度密切相关;随着气泡数密度的增大,频移谱的半高宽增大,后向散射光截止频率亦增大。频谱的这一特征可作为舰船尾流识别的判据之一。实际的舰船尾流区离舰船越近,气泡数密度越大,其相应的频谱幅度与截止频率也相对较大;此外,不同吨位、航行速度的舰船其产生的气泡数密度也具有明显区别。因此,从尾流后向散射多普勒频移谱的频谱宽度和截止频率等特征可获得产生尾流场的运动目标的距离、方位等信息,有可能鉴别目标舰船的吨位和航行速度等参数。

实际的舰船尾流和未扰动水体的差异实际上同时包含两种形态,即气泡和湍流。在实验中,还利用湍流和气泡模拟装置对现实中的尾流场(即同时包含气泡和湍流)进行了模拟测量,所获得的后向散射光多普勒频移谱如图 6 所示。与静水时相比,控制气泡与湍流模拟装置持续产生气泡和湍流时,尾流区后向散射光多普勒频移谱低频一侧存在一个明显的宽带谱峰,是由于气泡运动产生的宽带频移谱与湍流中不同速度产生的频移谱峰的叠加。当停止气泡和湍流的产生后,尾流中气泡和湍流的时间特性是气泡的存留时间短,湍流的存留时间长,因此为了获

得大的作用距离,应探测尾流中的湍流。

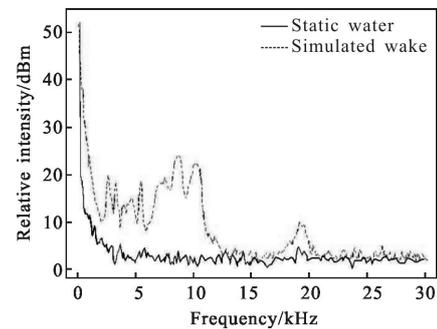


图 6 静水和模拟尾流的后向散射光频移谱

Fig.6 Frequency shift spectra of the backscattering light for the static water and simulated wake

### 3 结论

实验研究了模拟尾流场中运动气泡及湍流的后向散射光的多普勒频移谱特性。实验结果表明,相比于静水时的多普勒频移,模拟尾流场中存在气泡和湍流时,后向散射信号存在明显的多普勒频移。采用差动相干探测系统获得的舰船尾流场流速与实际流速相一致。湍流场中不同流速的水流产生的频移为独立的谱峰,而模拟尾流中气泡运动引起的频移主要集中在低频端,且不存在明显的谱峰,为一宽带谱。此外,模拟尾流气泡群后向散射光多普勒频移谱与气泡数密度密切相关;随着气泡数密度的增大,频移谱的半高宽增大,后向散射光截止频率亦增大。频谱的这一特征可作为舰船尾流识别的判据之一。上述结果表明,激光多普勒差动相干探测法可作为一种有效的尾流检测方法。

### 参考文献:

- [1] Arnott W P, Marston P L. Optical glory of small freely rising gas bubbles in water: observed and computed cross-polarized backscattering patterns [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, 5(4): 496-506.
- [2] Wang Huili, Qi Yi, Liu Huanying. Border detecting method for IR image of ship wake [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 524-527. (in Chinese)  
王慧丽, 齐异, 刘焕英. 舰船尾流红外图像边界检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 524-527.
- [3] Tian Jing, Chen Hang, Qi Qian. Experimental analysis of polarization effect for wake detection [J]. *Infrared and Laser*

- Engineering*, 2013, 42(S1): 34–37. (in Chinese)  
田晶, 陈航, 戚茜. 光尾流偏振探测实验分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 34–37.
- [4] Zhao Wei, Hui Bin, Zhang Yuxiao. Detection algorithms of aim points of IR warship images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 48–52. (in Chinese)  
赵微, 惠斌, 张玉晓. 红外舰船目标的要害点检测算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 48–52.
- [5] Zhang Shicheng, Yang Li, Shi Heng. Infrared characterization and detection of ship wake based on ray tracing method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1450–1455. (in Chinese)  
张士成, 杨立, 石恒. 基于射线跟踪算法的舰船尾迹波红外特征与探测[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1450–1455.
- [6] Liang Shanyong, Wang Jiangan. Key technology of lidar by ship bubble wake[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1755–1760. (in Chinese)  
梁善勇, 王江安. 舰船气泡尾流激光雷达的关键技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1755–1760.
- [7] Qin Gang, Yang Yu, Zhang Jiansheng. Monte Carlo simulation of polarization properties of scattered light from far ship wakes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1730–1736. (in Chinese)  
秦刚, 杨郁, 张建生. 舰船远程尾流散射光偏振特性的蒙特卡洛模拟[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1730–1736.
- [8] Wang Yun, Liu Jifang, Lu Zhenzhong, et al. Laser Doppler method for the detection of wake bubbles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0813002–1–6. (in Chinese)  
王贇, 刘继芳, 鲁振中, 等. 尾流气泡群的激光多普勒检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0813002–1–6.
- [9] Feng Qingqi, Liu Gang, Zhou Mingxi, et al. Land-based facilities vibration monitoring system based on laser Doppler effect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2008–2012. (in Chinese)  
冯庆奇, 刘刚, 周明熙, 等. 基于激光多普勒效应的地面设备振动监测系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2008–2012.
- [10] Wang Yun, Liu Jifang, Lu Zhenzhong, et al. Domestic research progress in optical detection of wake [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 120004–1–7. (in Chinese)  
王贇, 刘继芳, 鲁振中, 等. 国内尾流光学检测研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 120004–1–7.