

# 利用后向散射光空间谱强度分布探测 尾流气泡的实验研究\*

邓仲芳 刘继芳 李增荣

(西安电子科技大学技术物理学院 501 教研室, 西安 710071)

**摘 要** 利用自行设计制作的尾流模拟系统产生气泡,应用散射光空间频谱测量分析系统,对水中气泡群的后向散射光空间谱强度分布进行测量和分析,研究了不同探测距离的散射光衰减对其强度分布的影响. 结果表明,在气泡密度、大小分布不变的情况下,扩束光照明时,由于参与光散射的气泡数目增加对散射光在水中传播衰减的补偿,散射空间谱强度分布的峰值和半宽值均不随探测距离变化;而细光束照明时,散射谱强度分布峰值随探测距离的增加而减小,半宽值则逐渐增大. 所以在远距离探测时,细光束的探测效果好.

**关键词** 后向散射光;空间谱强度;半值宽度(FWHM);探测距离;尾流

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

## 0 引言

尾流是舰船行驶时在其尾部形成的一条含有大量气泡的气泡幕. 尾流会沿着航行方向延伸到舰船长度的很多倍,即使在船桥和桅杆顶端,对尾流的轮廓也难有一个整体的视野. 实际中,利用水中气泡对光的透射、吸收和散射等特性来判别尾流<sup>[1,2]</sup>的特性是探测舰船运动的重要手段. 对尾流的光散射特性的规律,很多人做了大量研究工作,目前主要通过前向和后向光散射特性来研究尾流气泡的分布规律. 实验利用后向光散射特性进行尾流的研究. 因为散射光会随着传播而有所衰减,所以在用散射光空间谱强度分布探测舰船尾流时,还要考虑散射光空间谱强度分布接收系统与气泡之间的距离对后向散射谱强度的影响. 分别在扩束光和细光束两种照明条件下对气泡的后向光散射特性进行测量和分析,对尾流的后向散射光空间谱强度分布随探测距离变化的特性进行了研究,并对两种照明条件下的衰减情况进行了比较.

## 1 理论分析

### 1.1 尾流场中气泡的散射空间谱强度分布

舰船尾流场中气泡的大小、密度分布很复杂. 由于气泡的运动,其空间分布时刻在发生变化. 基于舰船尾流场中气泡分布模型<sup>[3]</sup>,可以得到尾流场的光散射模型. 考虑到实验使用 CCD 器件(TCD141C)作为光传感器,该器件的电荷积分时间

很短. 在积分期间内,尾流场中的气泡分布可以看作不变,CCD 器件所接收的散射光场可以认为是某一时刻的气泡散射光. 对于给定时刻的气泡场,认为是由大量的气幕层构成,每一气幕层为一光学散射面,再把每一个气泡看作一个散射体,则对每一气幕层有<sup>[4]</sup>:1)所研究的气泡幕是由大量无规则分布的散射体—气泡构成;2)第  $k$  个气泡在观察点的散射光波的振幅和相位统计独立;3)在气泡幕中所包含的气泡数目较大的情况下,相位在区间  $[-\pi, \pi]$  内均匀分布.

为了得到气泡散射光场的空间频谱,采用如图 1 的变换光路,气幕层  $x_0-y_0$  面位于全反射镜前的距离  $d$  处,观察面  $x-y$  面位于焦距为  $f$  的透镜的后焦面上. 气泡群的散射光经全反射镜反射后,被透镜会聚在其后焦面上. 在垂直入射的平行光照明条件下,无论  $d$  取什么值,透镜后焦面上的光强分布都是气幕面的散射光场的空间频谱强度分布<sup>[4]</sup>. 因此频谱面上的光强分布是照明区域内的所有气泡散射的结果,它们对频谱面上的散射光强都有贡献.

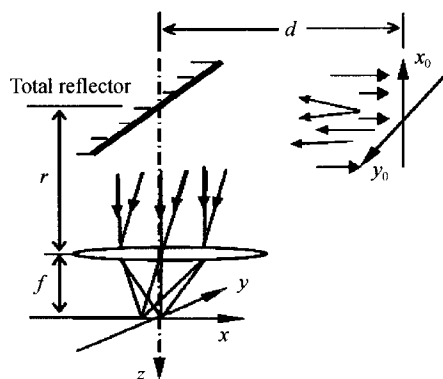


图 1 研究气泡射谱的光学系统  
Fig. 1 Optical system for study on bubbles' scattered spectrum

\* 水下信息处理与控制国防科技重点实验室资助

Tel: 029-88202561 Email: zfdeng1225@sohu.com

收稿日期: 2005-05-11

对于光照区域内的气泡场,令  $\lambda$  为照明光波长,  $N$  是该气幕层所包含的气泡数目,则每一气幕层对散射谱强度的贡献为<sup>[4]</sup>

$$I_0(\nu) = \sum_{k=1}^N \frac{a_k^2}{\nu^2} J_1^2(2\pi a_k \nu) \quad (1)$$

式中  $a_k$  为第  $k$  个气泡的半径,  $J_1$  是第一类一阶贝塞尔函数;  $\nu^2 = \xi^2 + \eta^2$ ,  $\xi = x/\lambda f$ ,  $\eta = y/\lambda f$  分别为空间频率的两个直角分量.

若  $M$  表示照明区域的气幕面个数,则整个气泡场总的散射谱强度为

$$I(\nu) = \sum_{j=1}^M I_0(\nu) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{a_k^2}{\nu^2} J_1^2(2\pi a_k \nu) \quad (2)$$

进一步考虑气泡散射光的独立性,根据中心极限定理,散射谱强度趋于圆形高斯分布. 这样对空间频谱的二维测量可简化为一维测量,大大减小了数据处理量.

### 1.2 光束在水中传播衰减对谱强度分布测量的影响

水体中激光的衰减,主要是由于水中的杂质、无机悬浮颗粒、浮游生物对光的散射和吸收,以及水自身对光吸收的作用.

一般用衰减系数描述激光在水中传播的衰减程度. 当平行光在均匀的水体中经过一薄层  $dx$  后,光强从  $I$  减小到  $I - dI$ ,此时  $dI/I$  应与  $dx$  成正比,即

$$dI/I = -cdx \quad (3)$$

解上面的微分方程可得

$$I = I_0 e^{-cx} \quad (4)$$

式中  $I$  为激光通过厚度为  $x$  的水体时的光强,  $I_0$  为起始光强,  $c$  称之为衰减系数( $c$  越大,通过的光强越小;当  $x$  的量纲为米,  $c$  的量纲为  $m^{-1}$ ). 可见,激光在水中的传播是以指数级衰减的.

有关资料介绍,大洋清洁海水的衰减系数为 0.05,而近海浊水的衰减系数约为 0.35. 假设激光传播 1m,计算可知,若在清洁海水中传播其光强衰减 5%,在近海浊水中传播则衰减 70%,其衰减程度较大,且其随距离增加光强损失会更大. 所以在利用激光探测尾流时,不能忽略激光的衰减程度.

## 2 气泡后向散射光空间谱强度的衰减特性研究

### 2.1 实验系统组成

采用扩束光照明模拟气泡群的实验系统如图 2,由三部分组成:1)光发射系统. 20 mW He-Ne 激光器输出波长为 632.8 nm 的光束,经  $\times 40$  的显微目镜扩束后照明气泡群. 2)气泡群模拟装置. 用一玻

璃水槽模拟海洋,空气压缩机通过气压调节装置与置于水槽底部的微孔陶瓷管阵列连接,通过调节进入微孔陶瓷管阵列的气压改变产生的气泡的密度和大小,模拟不同的尾流. 3)光接收系统. 由一中心带有一个半径为 6 mm 的小孔的全反射镜和置于傅里叶变换透镜后光源的共轭面上的线阵 CCD(型号 TCD141C,具有 5000 个  $7 \mu m \times 7 \mu m$  像敏单元)组成. 傅里叶变换透镜焦距为 320 mm,口径为  $\Phi 60$  mm,其截止频率远大于气泡散射光的空间频率<sup>[2]</sup>  $\Phi 5 \mu m$ . 当采用细光束照明时,将扩束镜去掉,光束经过反射镜小孔直接照明气泡幕,其余装置不变.

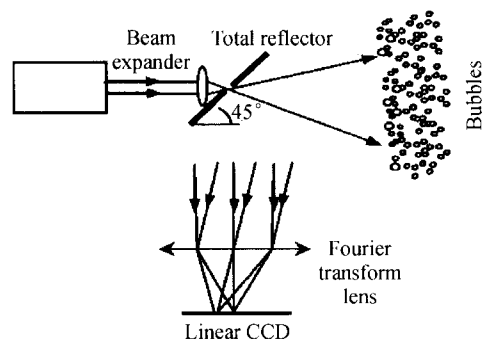


图 2 实验系统  
Fig. 2 Setup of experiment

一般水中气泡的尺寸分布在几  $\mu m \sim 2000 \mu m$  之间,气泡群模拟装置使用的微孔陶瓷管孔径为  $1 \sim 10 \mu m$ ,平均孔径为  $2 \mu m$ . 由于后向光散射受水衰减的影响较大,而且水槽内侧玻璃面散射对实验结果也有很大的噪音干扰,故实验在暗室条件下进行,并在水槽内侧以黑纸覆盖,这样大大减少了外部干扰噪音对实验结果的影响. 实验中所用的气泡发生装置是一个开放系统,气压表读数越高时,气泡密度和大小越小.

### 2.2 实验结果

在实际应用中,尾流探测的主要对象是小密度的小气泡,故实验中将气压表读数固定在 0.33 MPa,产生含小密度小气泡的气泡幕,同时为了确保实验结果之间的可比性,气泡幕的宽度保持 110 mm 不变.

#### 2.2.1 扩束光照明条件下的实验结果

采用扩束光照明气泡幕,改变气泡幕前端与全反射镜之间的水平距离  $d$ ,记录各自的实验结果,然后利用编写的 Matlab 程序处理数据,得到如图 3 的后向散射光空间频谱强度的离散数据图及其高斯拟合曲线. 图中横坐标表示 CCD 像素单元的相对位置,纵坐标表示接收到的气泡后向散射光空间谱强度的相对值, (a), (b), (c), (d) 依次为  $d = 8.0$  cm, 12.0 cm, 16.0 cm 和 20.0 cm 时的实验结果.

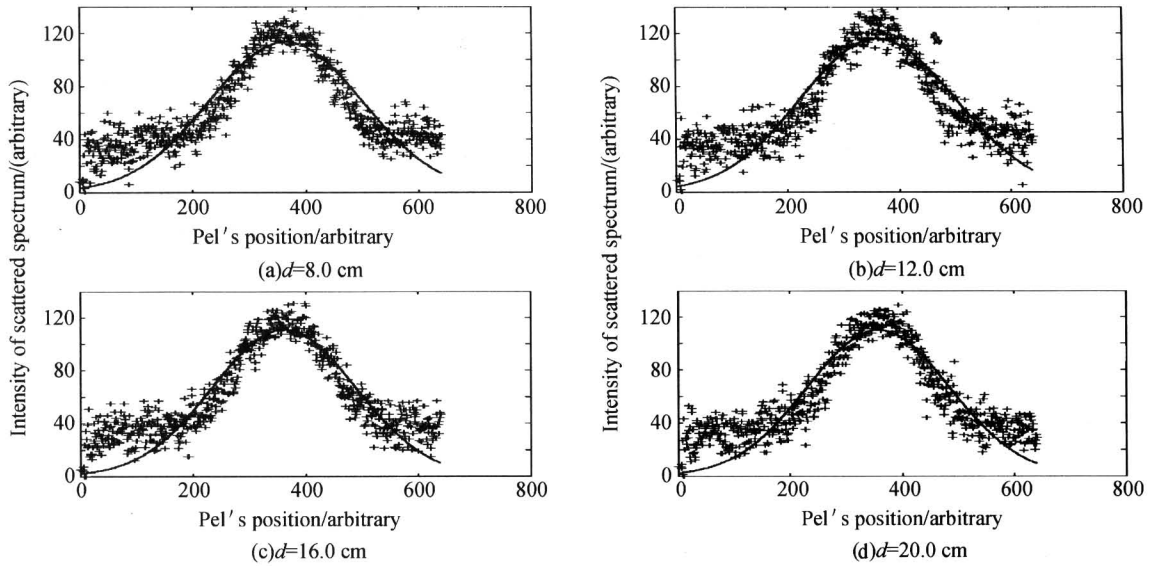


图3 扩束光照明下的散射谱强度分布

Fig. 3 Scattered spectrum intensity distribution under expanded beam illumination

比较图3中的四条高斯拟合曲线可以看出,在探测距离由8 cm逐渐增大到20 cm的过程中,后向散射光空间谱强度分布曲线的峰值均在117附近,前后相差很小.利用Matlab程序计算它们的半宽值分别为318.0、327.2、298.7、298.7,最大和最小值差别约10%,前后变化不大.这表明在扩束光照明下,后向散射空间谱强度分布曲线的峰值和半宽值随探测距离变化波动不大,其原因在于:在扩束光照明、气泡幕宽度保持不变的条件下,当探测距离逐渐增大时,扩束光照明的气泡范围也在增大,即参与光散射的气泡数目在逐渐增加,这样可以补偿由于距离的增大而引起的接收到的后向散射光衰减的光强,所以曲线峰值随距离变化波动较小.但同时应

考虑到,当该距离增大到一定值(经理论计算,该值为20.4 cm)时,扩束光的照明范围达到整个气泡幕,这时再增大探测距离,扩束光照明范围内的气泡数目不再变化,接收到的后向散射光强会逐渐减弱.至于曲线半宽,因为背景噪音不变,空间谱强度曲线的峰值基本不变,半宽自然变化不明显.

### 2.2.2 细光束照明条件下的实验结果

改变照明条件,去掉扩束镜,采用细光束直接照明气泡幕,同样改变探测距离 $d$ ,记录实验结果,并用相同的方法处理数据. $d=8.0$  cm、12 cm、16 cm和20.0 cm时,气泡群后向散射空间谱强度的实验结果如图4.

从图4可以看出,当探测距离由4 cm逐渐增大

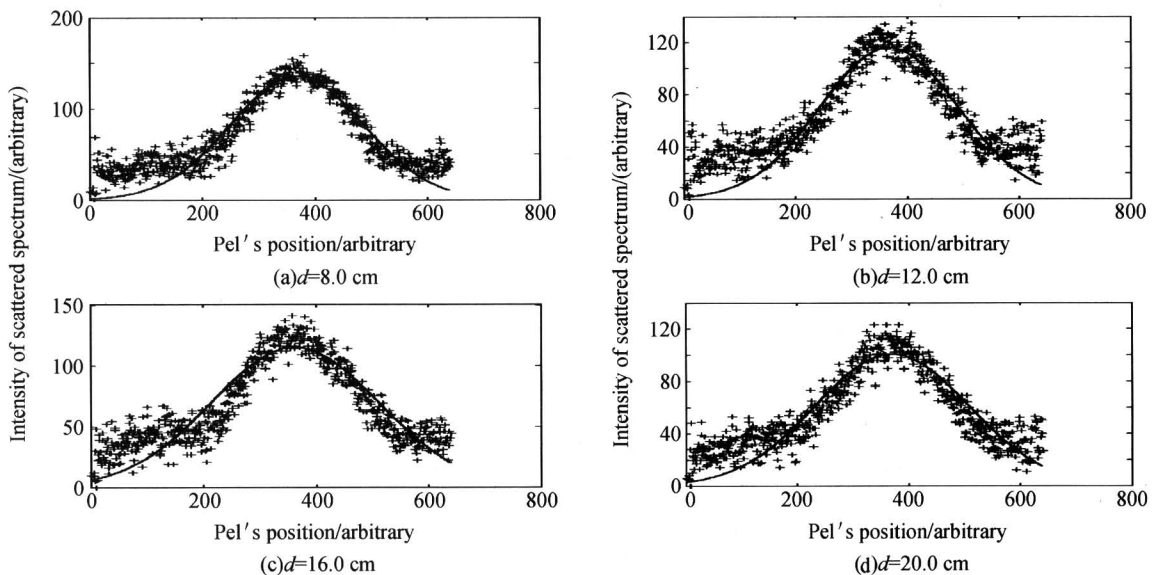


图4 细光束照明下的散射谱强度分布

Fig. 4 Scattered spectrum intensity distribution under slim beam illumination

到 20 cm, 空间谱强度分布曲线的峰值变化明显, 下降了约 40 个单位, 是原峰值的 30%. 这说明在细光束照明下, 空间谱强度分布曲线的峰值随距离增大下降幅度很大. 计算其半宽, 分别为 280.2、291.1、316.8、324.6, 最大和最小值差别约 15%, 比扩束光照明下的半宽大小差别(10%)稍大, 但可同样认为其半宽前后变化不大. 造成这种变化的原因在于: 采用细光束照明气泡幕时, 照明的气泡数目有限, 且随着探测距离的变化, 受照明的气泡数目基本不变, 所以探测距离越大, 接收到的后向散射光强只是因受水体吸收和散射的影响而随着传播一直减弱. 另外, 背景噪音不变, 空间谱强度曲线的峰值随探测距离增大逐渐下降, 半宽自然逐渐增大.

### 2.2.3 远距离探测的情形

实际的尾流探测中, 有时探测器离水中目标很远, 所以实验中还研究了远距离探测(探测距离  $\geq 85$  cm)时的情形.

扩束光在水中传播的距离远, 照明的气泡范围大, 损失的后向散射光强要比细光束大. 如, 2.2.1 和 2.2.2 的实验结果中, 探测距离为 4 cm 时, 细光束照明下的后向散射光空间谱强度的峰值比扩束光要大 20 多各单位, 相差约 25%, 所以远距离探测采用细光束照明效果好. 另外, 在远距离探测时, 由于接受到的气泡群后向散射光很弱, 所以只能探测大小和密度变化剧烈的气泡群. 进一步的实验表明细光束探测的最远距离不到 2 m, 超过 2 m 后向散射光空间谱强度曲线半宽变化不明显, 不利于探测.

## 3 结论

在近距离探测尾流气泡时, 扩束光会受限制, 其

气泡后向散射光空间谱强度分布随探测距离增大变化不明显. 在一定的探测距离之外(该距离可以估算), 它才发生明显变化. 这点不利于气泡特性的判别, 但可以用来判断尾流距探测器的距离. 细光束探测时, 光空间谱强度分布曲线的峰值随距离增大逐渐减小, 半宽则逐渐增大. 另外, 远距离探测时, 采用细光束照明效果好, 但只能探测到大小和密度变化剧烈的气泡群.

### 参考文献

- 1 纪延俊, 何俊华. 尾流气泡幕散射光的性质. 光子学报, 2004, **33**(8):1018~1020  
Ji Y J, He J H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):1018~1020
- 2 纪延俊, 马祥, 何俊华, 等. 尾流中气泡对光传播的影响. 光子学报, 2004, **33**(5):626~628  
Ji Y J, Ma X, He J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):626~628
- 3 张建生, 刘健康, 冀邦杰, 等. 尾流气泡幕光学特性的数理模型. 光子学报, 2002, **31**(8):1032~1036  
Zhang J S, Liu J K, Ji B J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(8):1032~1036
- 4 刘继芳, 刘海洋, 冀邦杰. 气泡光散射谱强度分布研究. 鱼雷技术, 2003, **11**(2):17~19  
Liu J F, Liu H Y, Ji B J. *Fish Torpedo Technology*, 2003, **11**(2):17~19
- 5 陈养渭. 天然水体中激光衰减的现场测量. 舰船科学技术, 2000, (1):3~7  
Chen Y W. *Ship Science and Technology*, 2000, (1):3~7

## Study of Air Bubbles in Water Based on Spatial Spectrum Intensity of Backward Scattered Light

Deng Zhongfang, Liu Jifang, Li Zengrong

Lab 501, School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2005-05-11

**Abstract** The peak value and Full Width at Half Maximum (FWHM) of scattered light's spatial spectrum intensity distribution of air bubbles in water can be used to determine bubbles' size and density. By the developed air bubbles producing setup and scattered light's spatial spectrum intensity measuring and analyzing system, how detecting distance affects backward scattered light's spatial spectrum intensity was investigated experimentally. The experiment results show that as air bubbles' size and density are invariable, the change of detecting distance has different effect on the peak value and the FWHM of scattered light's spatial spectrum intensity distribution under different illuminations. The peak value and the FWHM of scattered light's spatial spectrum intensity distribution are unchanging as the detecting distance increases under expanded beam illumination, for the number of bubbles scattering light increases constantly, which can offset scattered light intensity's losing caused by a longer distance propagation. But the peak value reduces gradually and FWHM increases as the detecting distance increases under the slim beam illumination. The experiment results also show at slim beam illumination has advantage for long distance detecting.

**Keywords** Backward scattered light; Spatial spectrum intensity; FWHM(Full Width at Half Maximum); Detecting distance; Ship wake



**Deng Zhongfang** was born in Shanxi Province and in 1980. She received her Bachelor's Degree from Xidian University in 2003. Now she is a Master candidate at the School of Technical Physics of Xidian University. Her current research primarily concentrates on optical information processing.