

文章编号: 1001-3806(2006)03-0298-03

基于激光多普勒效应的舰船尾流探测研究

朱东华, 张晓晖*

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了改进鱼雷激光尾流制导方法, 在激光多普勒效应的基础上, 建立激光探测舰船尾流的理论模型, 并设计出差动型光学系统, 使探测器接收到的散射光信号产生多普勒频移, 有效提高信噪比。仿真结果表明, 通过锁相放大技术处理, 能检出待测目标多普勒差频信号, 并抑制噪声, 在水中兵器领域有应用前景。

关键词: 散射; 激光多普勒效应; 舰船尾流探测; 频移

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Ship wake detection based on laser Doppler effect

ZHU Dong-hua, ZHANG Xiao-hui

(Department of Weaponry Engineering Naval University of Engineering Wuhan 430033, China)

Abstract In order to improve the guidance method for torpedoes based on laser Doppler effect a theoretical model is established for detecting the ship wake with laser. A differential optical system is designed to produce Doppler shift frequency in scattering signal on sensor which can improve the signal-to-noise ratio efficiently. The simulation results indicate that the Doppler shift signal can be detected by lock-in amplifier technique, and the noise will be limited. The technique has a broad application perspective in underwater weaponry.

Key words scattering laser Doppler effect ship wake detection shift frequency

引 言

自 1842 年 DOPPLER 首次发现多普勒频移现象以来, 其原理已经得到广泛应用^[1]。而激光多普勒频移测量技术更是具有空间分辨率高、动态响应快、线性度高、测量范围大、非接触性等诸多优点, 被用于流体力学、空气动力学、燃烧学、生物学和医学, 以及速度测量等方面^[2,3]。利用激光多普勒效应舰船尾流探测能突出目标特征, 体现很强的频率特性, 可用作鱼雷制导方式。

舰船在航行过程中, 不可避免地会在其尾部产生 1 个包含大量不同线度气泡的区域——舰船尾流。尾流的存活时间很长, 它的长度是舰船长度的 10 倍以上, 宽度是舰船身宽的 2 倍~3 倍, 厚度为舰船吃水深度的 1.5 倍~2 倍^[4]。尾流是难以消除和复制的, 因此, 可以把制导目标从舰船本身转移到其尾流上来。跟其它用于鱼雷的制导方式相比, 激光制导技术有精度高、响应快的特点, 尤其可以用在精确末制导。对该领域的研究, 已经有学者取得了一定的研究成果^[5]。

作者简介: 朱东华 (1979-), 男, 硕士研究生, 现从事光电探测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhangxiaohu505@vip.sina.com

收稿日期: 2005-04-13 收到修改稿日期: 2005-11-16

然而仅用连续光、脉冲光的前向或后向散射的光强对尾流进行判别, 很难消除海水自身存在的噪声和干扰。因为海水自身存在分子、悬浮微粒、黄色物质和有机溶解物, 对光的传输产生散射和吸收效应^[6,7], 给尾流的识别带来一定难度。考虑到鱼雷是在航行过程中探测目标, 具有一定的速度, 国外现役鱼雷航速通常为 20kn~50kn (1kn 相当于 1nmile/h), 而舰船尾流比起鱼雷的运动速度可以认为是速度很小或静止的, 因此鱼雷和目标之间存在 1 个较大的相对速度, 使安装在鱼雷上的光探测器接收到的目标信号后向散射光产生多普勒频移。选择合适的激光器、光电发射接收装置以及信号处理系统, 可以有效抑制噪声, 提高信噪比, 能够探测并识别尾流。

1 理论模型

如图 1 所示, 航行中的鱼雷速度 v , 雷身保持水

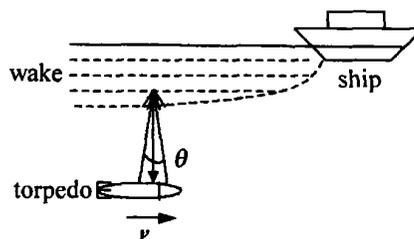


Fig 1 The scheme of wave-seeking torpedo by laser

平。选择雷体上的光电接收装置作为参照系时,尾流以同样的速度向反方向运动。激光发射系统将激光分成两路,在鱼雷纵轴线上成夹角 θ 出射,会聚在鱼雷垂直上方,并使角平分线与速度矢量垂直;接收装置的视场和雷体垂直。鱼雷没有进入目标区域之前,激光束传播时经历的是自然海水水体,前面提到过的存在于海水中的各类物质也会对激光产生弹性散射和非弹性散射,弹性散射主要是分子的瑞利散射和海水固有微粒的米散射;非弹性散射主要是喇曼散射引起,来源于海水中的各类分子振动,也会造成光频的改变,这种变化量是多普勒频移的 10^{-2} 数量级^[8]。研究表明^[9],海水对激光的后向散射也产生一定频谱范围的包络,但这种情况下散射信号非常弱,加上视场的限制,所接收到信号和目标散射有数量级上的差别,可以通过设置门限和滤波加以消除。当鱼雷进入尾流区域下方,两束激光和散射目标存在不同的速度矢量差,接收到的主要是包含多普勒频移的散射光信号,这是判别尾流的依据。

2 原理分析及仿真

2.1 光路设计

由于鱼雷和尾流的相对运动速度远比光速小,相应的多普勒频移比光频小很多,相差约 7 个 ~ 8 个数量级,已经超出了现有的光谱仪最高分辨率。因此,必须用光学外差法来检测频移。通常使用的光路有参考型和差动型:参考型光路发射的激光束只有 1 路,分光后的另一路本征光只是作为比较,而不参与散射;而差动型光路将激光束分成两路,同时参与散射,接收到的散射光存在多普勒频移。相比较而言,参考型光路设计简单,但由于分出一部分光作参考,使得探测光的功率降低,导致接收到的散射信号能量很小,影响探测距离;差动型光路相对复杂,由于不受视场限制,收集散射光信号的能力远大于前者,探测距离得到很大提高。激光在海水中传播时,整个光路上发生散射和吸收,能量衰减很大。因此,选择差动型光路对于抑制噪声,提高信噪比,增大探测距离是有利的。

方案中用到的双光束差动型光路如图 2 所示。激

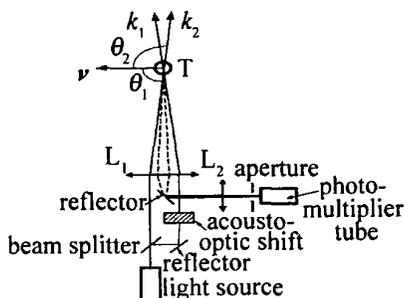


Fig 2 The outline of optical system

光从光源出射,等量分光后,其中一路光束经声光调制晶体将光束调制,两光束频率相差 f_c ,为了提高信号强度,两光束要尽量满足相干条件。光束经过透镜 L_1 会聚在目标 T 处,由于目标和探测器之间的相对运动,经目标散射后的两束光都产生了频移,返回的光束经过透镜的两次折射,最后光信号被光混频器接收。光阑的作用是限制杂散光进入光混频器。

2.2 多普勒原理

如图 2 所示,以鱼雷作为参照系,目标 T 以速度 v 运动,出射的激光束 k_1, k_2 和散射目标也存在相对运动,速度矢量分别为 $v \cos(k_1, v), v \cos(k_2, v)$,两者大小相等,方向相反。由相对论可以推出,经过达目标散射后到达探测器的两束激光的光频为:

$$\begin{cases} f_1' = f_1 - \frac{v \sin(\theta/2)}{\lambda'} \\ f_2' = f_2 - \frac{v \sin(\theta/2)}{\lambda'} \end{cases} \quad (1)$$

式中, f_1, f_2 是激光束 k_1, k_2 (经声光调制) 的频率,且 $f_2 - f_1 = f_c$; f_1', f_2' 分别是光束 k_1, k_2 经目标 T 散射后的频率; λ' 是光在海水中波长; θ 是本征光声与光调制后光束的夹角,且 $\theta = \theta_2 - \theta_1$ 。

因而光混频器接收到的散射光信号存在差频,大小为:

$$\Delta f = f_c + f_D \quad (2)$$

式中, f_c 是声光调制的差频; $f_D = \frac{2v \sin(\theta/2)}{\lambda'}$ 是多普勒效应引起的差频; Δf 是叠加后的差频总量。

设光束 k_1, k_2 散射后的电场强度为:

$$\begin{cases} E_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ E_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_1, A_2 为振幅; $\omega_1 = 2\pi f_1', \omega_2 = 2\pi f_2'$ 均为圆周频率; t 表示时间; ϕ_1, ϕ_2 为初始位相。则光混频器接收到叠加后的散射光电场强度为: $E = E_1 + E_2 = A_1 \times \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2)$ 。光混频器对光信号响应输出电流和电场强度的平方成正比,因此:

$$\begin{aligned} i &= \beta E^2 = \beta E_1^2 + \beta E_2^2 + 2\beta A_1 A_2 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \times \\ &\quad \cos(\omega_2 t + \phi_2) = \frac{1}{2} \beta A_1^2 + \frac{1}{2} \beta A_2^2 + \\ &\quad \beta A_1 A_2 [(\omega_1 + \omega_2)t + (\phi_1 + \phi_2)] + \beta A_1 A_2 \times \\ &\quad \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, i 是电流信号; β 是比例因子; $\omega_1 - \omega_2 = 2\pi \Delta f$, 由 (2) 式知道,它包含调制引起的差频和多普勒差频两部分。等式右边前两项输出的是直流分量;第 3 项是高频分量,超出了混频器的截止频率,无法响应;而第 4 项正是需要得到的拍频为 $2\pi \Delta f$ 的交流分量。没有目标信号时,混频器输出的是 $2\pi f_c$ 加上直流分量的电信号;

当进入目标区域时,还加载了多普勒差频信号 $2\pi f_D$ 。

2.3 信号处理

由于海水中目标后向散射信号非常微弱,用常规的信号检测手段很难提取目标特征信号,在本方案中用到锁相放大技术。锁相放大器主要由3部分组成:信号通道、参考通道和相敏检波器。信号通道将待测信号选频放大,参考通道将参考信号选频放大并移相,相敏检波器由1个乘法器和1个低通滤波器组成,通过上述步骤可以直接检测出目标多普勒信号。这里将声光调制信号作为参考信号,和待测信号相乘得到:

$$i' = \beta A_1 A_2 \cos(2\pi f_c + 2\pi f_D + \phi) \cos(2\pi f_c) = \frac{1}{2} \beta A_1 A_2 \cos(4\pi f_c + 2\pi f_D + \phi) + \frac{1}{2} \beta A_1 A_2 \times \cos(2\pi f_D + \phi) \quad (5)$$

式中, i' 为处理后的电流信号; ϕ 为初始位相。从上式可以看出,等式右边第1项是高频分量,第2项是低频分量,低通滤波后能除掉高频分量,并有效降低探测装置以及海水环境散射引起的噪声。

2.4 仿真计算

仿真参数如下:鱼雷和尾流的相对速度 30kn 探测距离与激光能量以及海水光学水质参数有关,可以达到 $15\text{m} \sim 20\text{m}$;光源为波长 532nm 的连续激光,光束夹角 10mrad 声光调制后的两光束频率相差 40MHz 根据文献[10],在某一海域,海水折射率取 1.33 海水衰减系数 $0.243/\text{m}$,海水散射系数 $0.180/\text{m}$,体散射函数采用改进的 G-H 函数;光电倍增管的电流放大倍数 5×10^6 ,阳极暗电流 4nA 。并且由(2)式可以计算出,鱼雷和尾流相对运动所引起的差频约为 385kHz 。

用 MATLAB 环境下的仿真工具进行模拟,结果如

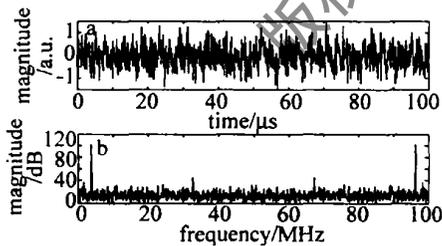


Fig 3 The simulated signal profile in temporal domain and frequency domain

a— the signal in time domain b— the signal in frequency domain

图3所示。图3a是探测器接收到的信号和参考信号输入乘法器后输出的时域波形,图3b是作相应的傅里叶变化后的频域波形,可以发现,使用锁相放大技术后明显抑制噪声,突出了目标多普勒频移信号。在频域中 400kHz 和 96MHz 左右的频谱幅度较大,通过低通滤波后可以将声光调制差频信号滤掉,在一定的虚警条件下,可以直接检测到目标信号。

3 结论

利用激光多普勒差频技术,并使用锁相放大器进行信号处理,能探测尾流目标区域的微弱后向散射信号,抑制噪声,提高信噪比。和传统的光学探测方法相比,具有较强的抗干扰能力,探测作用距离和精度得到提高,在水中兵器尾流制导上有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] DRA N L E. The laser Doppler technique [M]. New York: John Wiley & Sons 1980 36~45.
- [2] ZHANG X Y, HONG X, HE Sh Zh. Study on measurement technique of scattering surface displacement utilizing laser Doppler effect [J]. Chinese Journal of Lasers 2000 27(8): 751~755 (in Chinese).
- [3] HE Sh Zh, YAO X, JIANG Ch Zh. Study on demodulation system of laser-Doppler [J]. Laser Technology, 2004 28(2): 190~192 (in Chinese).
- [4] ZHANG X H, GE W L, ZHU D H. Study of torpedo wake-homing based on laser scattering [A]. Paper volumes of academic conference 2004 of Optics Academy of China [C]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004 273~277 (in Chinese).
- [5] JI B J, ZHOU D Sh, ZHANG J Sh. Guiding torpedoes based on laser effect of shipwakes [J]. Journal of Torpedo Technology, 2000 31(3): 40~43 (in Chinese).
- [6] ZHANG T L, LIU Zh Sh. A database of the optical properties used for radiative transfer calculations in ocean and atmosphere [J]. Periodical of Ocean University of China 2004 34(4): 641~648 (in Chinese).
- [7] PEGAU W S. A comparison of methods for the measurement of the absorption coefficient in natural waters [J]. Journal of Geophysical Research, 1995 100(7): 13201~13220.
- [8] CHENG G X. Theory and application of Raman-Brillouin scattering [M]. Beijing Science Press 2001 54~58 (in Chinese).
- [9] ZHU X, WANG H, QIL J F. Frequency analyzing of back scattering signals in airborne laser bathymetry [J]. Laser & Infrared, 2003 33(1): 25~27 (in Chinese).
- [10] OLEG V K, OLGA V P. Assessment of sea water optical characteristics in the upper 200m ocean by the ir subsurface values [J]. SPIE, 1994 2258 623~633.