

文章编号: 1001-3806(2005)05-0494-03

舰船尾流激光制导方法的研究

张晓晖,雷选华,饶炯辉,刘启忠,葛卫龙,朱东华
(海军工程大学 兵器工程系,武汉 430033)

摘要: 为了研究鱼雷的激光尾流制导方法,分析了舰船航行时所产生尾流的几何特征和光学性质,讨论了舰船尾流中不易在短时间内消失的微气泡对激光的散射特性,提出了利用激光在尾流区域内、外传输时,其前向或后向散射激光在时域、频域和空域中光学参数的变化来快速、准确地判别鱼雷是否进入、穿出尾流,从而导引鱼雷沿目标舰船的航迹靠近目标的新型鱼雷制导方法。讨论了实现鱼雷激光尾流制导的几种不同途径,得出了上视激光尾流制导是一种既不会破坏鱼雷雷体的流线性结构,又可以通过激光扫描来确定尾流边界的先进的鱼雷制导方法的结论。

关键词: 激光水下探测;鱼雷制导;舰船气泡尾流;激光散射

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Study of homing means for laser-wake-homing torpedoes

ZHANG Xiao-hui, LEI Xuan-hua, RAO Jiong-hui, LU Qi-zhong, GE Wei-long, ZHU Dong-hua

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

Abstract: The geometric characteristics and optical properties of ship wake are studied. It is analyzed that the scattering idiosyncrasy of laser by small bubbles in wake which are difficult to diffuse and dissolve in short time. Based on the changes of the forward or backward laser scattering characteristics in time domain, frequency domain and space domain when torpedo comes in and goes out of the ship wake, a new torpedo-wake-homing scheme to shadow the target is proposed. Some laser-wake-homing ways are discussed and compared. It is confirmed that ascending laser-wake-homing means is the advanced non-acoustic wake homing method which not only does not injure the exterior structure of torpedo, but also can fix on the borderline of ship wake by laser scan.

Key words: underwater laser detection; torpedo homing system; ship bubbles wake; laser scattering

引 言

早在一次世界大战期间,鱼雷就以一种重要的水中兵器登上了历史舞台^[1],一个多世纪以来,它一直是海军夺取制海权的重要手段。为了提高鱼雷的命中概率,人们对其制导技术进行了孜孜不倦地研究。鱼雷既可以利用舰船的目标特征进行制导,也可以利用舰船的尾流特性进行制导,但利用舰船的目标特征进行制导的鱼雷容易受到与舰船目标相似的假目标欺骗^[2],而舰船尾流却是舰船在水中运动的固有标志,既无法彻底消除又难以人工模拟,所以,尾流制导鱼雷是现代海战中最有效的反水面舰船武器。

尾流是舰船在航行过程中所形成的一个含有大量气泡而与其它水域所不同的区域,其声学、光学、热学及电磁学特性都与正常海水截然不同,通过对这些声学或光学、热学及电磁学等特征信号的追踪,可以引导

鱼雷沿着舰船的尾流运动并击中舰船。

目前,部队所使用的尾流制导鱼雷主要是利用尾流声学效应进行制导的^[1],被称为声尾流制导鱼雷,激光尾流制导鱼雷则是基于尾流的光学效应的。与声波比起来,光波的波长短、速度高,在海水中传播时损耗大、方向性好,对尾流中的气泡非常敏感却不易受外界干扰的影响,所以,激光尾流制导鱼雷应该比声尾流制导鱼雷更能适应现代海战中目标隐身性能越来越好、诱骗手段越来越高、反探测技术越来越进步的作战条件和浅海高混响、高浊度、强负声速梯度水域的作战环境,特别是在发达国家已经大量装备声尾流制导鱼雷并已找到了其对抗方法的情况下,对激光尾流制导鱼雷进行研究就显得格外重要,必然会在未来战争中发挥出其不意的作用^[2]。

1 舰船气泡尾流的空间分布特性

舰船在航行过程中,由于螺旋桨搅动产生空化现象,舰船壳体侧壁与水体摩擦使海面波浪翻卷、破碎而从吃水线部位卷入大量空气等因素的影响,不可避免地会在其尾部产生一个包含大量不同尺寸气泡的区

作者简介:张晓晖(1965-),女,副教授,现从事军用光电工程等方面的研究。

E-mail: xiaoyan6481@sina.com

收稿日期:2004-08-31;收到修改稿日期:2004-11-29

域,这就是舰船气泡尾流^[3]。

如图 1 所示,舰船气泡尾流的横向剖面形状呈高

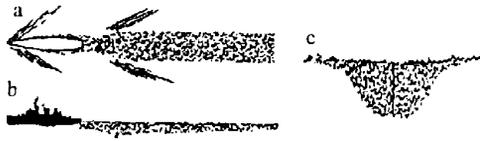


Fig 1 Geometrical shape of ship wakes

a—top view of ship wakes b—side view of ship wakes c—back view of ship wakes

斯分布形状;气泡尾流的起始端宽度仅为船体宽度的一半,但在螺旋桨和船尾涡所产生湍流的强烈作用下,尾流中的气泡会在近程初始扩散区沿宽度以 $40^\circ \sim 60^\circ$ 的角度向左右迅速扩展,到达船后几十米距离处的远尾流衰减区后,扩展角转变为 1° 左右^[3],总体看来,舰船气泡尾流的宽度是随时间线性加宽的;舰船气泡尾流的起始端深度决定于舰船的吃水深度,由于螺旋桨的搅动会使气泡具有向下运动的速度,故气泡尾流的深度在近程初始扩散区会迅速变大,达到最大深度后,气泡不再受螺旋桨的搅动、舰船驶过所形成的空穴吸引力等因素的影响而主要受其本身浮力的影响,气泡尾流的深度会随着时间的增长逐渐减小;尾流的长度在不同的海情下有不同的值,根据文献[4]、文献[5]中的实测结果,驱逐舰、护卫舰及航空母舰等大型舰船的气泡尾流往往延绵于船尾几公里乃至几十公里的长度。

舰船气泡尾流中包含着大量不同尺寸的气泡,由于这些气泡中尺寸较大的气泡会在浮力的作用下迅速上升到海面而破碎,一些尺寸较小的气泡又会溶解于海水而消失,所以,舰船气泡尾流中的气泡数密度是随着时间的增长而逐渐减小的,但直径在 $10\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ 范围内的中等尺寸的气泡则因为尾流涡旋的作用而能存活较长的时间,对鱼雷制导有意义的气泡尾流主要就是这些聚集在远程尾流区中的气泡,它们的数密度达到 $5.98 \times 10^6 / \text{m}^3$,比周围海水的气泡数密度高 $1 \sim 2$ 个数量级^[5],它们的存在可以作为判断舰船尾流存在的依据。

2 激光探测舰船气泡尾流机理

激光探测舰船气泡尾流的科学依据就是光的散射效应。当光波在纯净的均匀介质传输时,光线只能在折射方向上传播;但当均匀介质中渗入了进行着布朗运动的微粒后,就会在其它方向上出现散射光,这就是光的散射效应^[6]。

普通海水中存在着杂质分子、悬浮粒子、有机及无机溶解质、微生物和气泡等,当激光在普通海水中传输时,也会产生光散射效应,但这些微粒的直径和数密度很小,所产生的光散射效应很弱,故一般海水具有尖锐

的前向散射区^[7](见图 2),大部分激光能量还是沿着传输方向传播的。

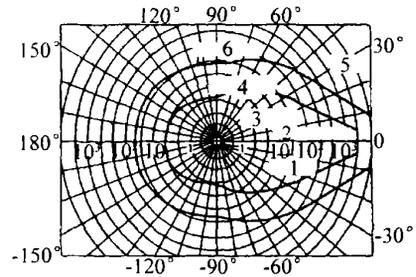


Fig 2 Polar coordinates of volume scattering function of seawater

1—relative unit 2—direction of incident light 3—water molecule scattering 4—clear sea water 5—scattering angle 6—feculent sea water

当激光在舰船尾流中传输时,激光的传输路径上就会存在大量作布朗运动的微尺度气泡,这些气泡的直径一般为激光波长的几倍到几十倍,将对激光产生 Mie 散射^[7],致使散射光的光学特性参数因此而改变,特别是散射角为 0° 附近的后向散射光的变化更为明显:根据气泡的光散射实验结果^[6],那些半径在 $10^{-5} \text{m} \sim 1.5 \times 10^{-4} \text{m}$ 范围的干净气泡对光在海水中后向散射系数的贡献近似可达到 10%,而这些气泡一旦被覆了有机膜(海洋中的气泡在形成后会迅速吸附上有机膜)成为泡沫后又显著地增强其后向散射效应,如果气泡数量较多形成气泡幕时,大量气泡对光的后向散射作用的叠加甚至会产生与光的反射效应相类似的结果(实验室条件下测量的清洁水的密集泡沫在可见光区的光谱反射率约为 50%^[7]),所以,舰船尾流中的大量气泡会使穿越其中的激光产生比普通海水强烈得多的散射效应。对于连续激光,传输路径上无气泡会使散射光(包括前向散射光和后向散射光)的光强及其空间分布发生很大的改变^[8,9],根据 Mie 散射理论,散射光的偏振特性也会发生改变^[7];对于调制激光和脉冲激光,由于舰船尾流的光散射效应是大量气泡多次散射的叠加结果,故散射光的相位、频谱和脉宽等其它光学特性参数也会发生变化,综合比较散射光光学特性参数的变化,就能准确地感知激光传输路径上是否存在气泡,从而判别出鱼雷是否进入或穿出舰船尾流。

3 舰船尾流激光制导原理

舰船尾流激光制导鱼雷的基本工作原理是从鱼雷上主动发射激光束,通过探测该激光束的前向或后向散射光光学特性参数的变化来判别激光传输路径上是否存在气泡以及气泡量的多少,进而判别出鱼雷是否进入或穿出气泡尾流区,当鱼雷进入气泡尾流区或处于气泡尾流区的下方时,则保持鱼雷的运动方向;当察觉鱼雷已穿出气泡尾流区或其下方时,则通过控制装

置发出旋回信号,改变鱼雷的运动方向直至鱼雷再次进入气泡尾流区或处于气泡尾流区的下方,这样就可以指导鱼雷在周期性地进入、穿出目标舰船尾流的运动状态下向目标舰船靠近。

图 3所示是激光尾流制导鱼雷的导引弹道,通常

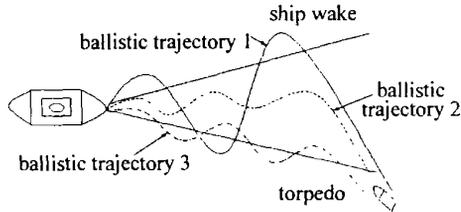


Fig 3 Ballistic trajectories of a laser-wake-homing torpedo

可以有 3种形式^[2]:第 1种弹道以尾流为轴线,鱼雷在尾流中蛇形航行,它以感知鱼雷是否穿出舰船尾流作为鱼雷控制装置发出旋回信号的依据;第 2种弹道也是以尾流中线为轴线蛇形航行,但它却是以感知鱼雷是否接近舰船尾流的边界作为鱼雷控制装置发出旋回信号的依据;第 3种弹道以尾流的一个边线为轴线蛇形航行,它以感知鱼雷是否进入或穿出舰船尾流作为鱼雷控制装置发出旋回信号的依据。显然,采用第 1种弹道的鱼雷由于其旋回半径较大,到达目标舰船所需航行的时间最长,而采用第 3种弹道的鱼雷则可以用最小的航程实现对目标舰船的追踪。

4 实现鱼雷激光尾流制导的技术途径

从前述激光尾流制导鱼雷的工作原理可知,这种制导技术的关键是正确感知舰船的气泡尾流,通常采用两种方法来检测尾流气泡的激光散射特性:一是检测其前向散射光,二是检测其后向散射光。

图 4所示是通过检测前向散射光的变化来感知舰

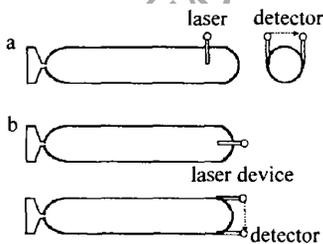


Fig 4 Laser device and detector on a laser-wake-homing torpedo by forward scattering

a—laser device and detector on the top of torpedo b—laser device and detector on the front of torpedo

船尾流的鱼雷(本文中称之为前向激光尾流制导鱼雷)的发射及接收系统示意图,其基本工作原理是主动发射经过调制后的激光信号,再探测其前向散射光信号,当激光传输路径上只有海水时,由于传输路径较短,其前向散射光信号与所发射的激光信号之间差异较小;而激光传输路径上存在大量气泡时,将大大改变所发射的激光的前向散射光信号的特征,据此即可感

知舰船气泡尾流。由于前向激光尾流制导鱼雷只能判别鱼雷是否航行于尾流之中,所以前向激光尾流制导鱼雷只能采用图 3所示的第 1或第 3种弹道,且在进入尾流的第 1个周期必须采用第 1种弹道,故其追踪目标的旋回半径较大。

作者提出了通过检测所发射激光的后向散射光的变化来感知舰船尾流的上视激光尾流制导鱼雷的激光发射及接收,系统示意图见图 5。其工作原理是:鱼

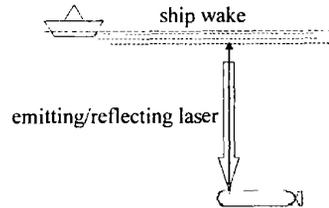


Fig 5 Work theory of an ascending laser-wake-homing torpedo

雷主动向上方发射激光脉冲并在一定的空间范围内作横向扫描,高灵敏度光电探测器高速响应激光后向散射光及海面反射光波,信号处理系统分析连续几个扫描光脉冲回波信号的特征,判断出激光传输路径上(即鱼雷上方)是否存在气泡幕并确定出气泡最密集处的大致方位,导引鱼雷进入舰船尾流下方并始终沿气泡最密集的方位航行,这样就可以指导鱼雷以最小的航程向目标舰船靠近,在最短时间内完成对目标舰船的攻击。

前向激光尾流制导鱼雷的优点是激光发射功率小,结构简单,造价低。但这种鱼雷只能判别自身是否航行于气泡尾流之中而不能感知尾流边界,所以,它必须要采用其它制导手段先将鱼雷送入尾流气泡之中才能开始制导,加上舰船船尾 2000m 后的尾流气泡基本上都分布在距海面 4m 以内,这限制了前向激光尾流制导鱼雷的航行深度和作用距离;而且从图 4可以看出,这种制导方法所使用的激光发射与接收系统破坏了鱼雷的流线型外部结构,将会给鱼雷的装填、发射及运行带来诸多不便。

上视激光尾流制导鱼雷采取了与激光雷达相似的技术途径,其航行深度不受舰船尾流气泡分布的限制,可以航行在较深的海域,这不仅可以提高鱼雷攻击的隐蔽性,还可以有效地降低海面气泡、白浪以及背景光的干扰,提高激光尾流制导的可靠性,特别是上视激光尾流制导鱼雷可以通过发射扫描激光脉冲而确定出气泡的边界,因而可以采用图 2所示第 2种弹道,减小鱼雷追踪目标的航程。

5 结论

利用舰船尾流的激光散射效应来制导鱼雷,是一
(下转第 500页)

高。因此,在实际应用中,适当地提高抽运功率有助于改善 DCFL 多波长输出的性能。

输出的多波长数目可以通过 F-P 滤波器的长度 d 来调节,以适应不同的应用。图 9 表示的是 DCFL 多

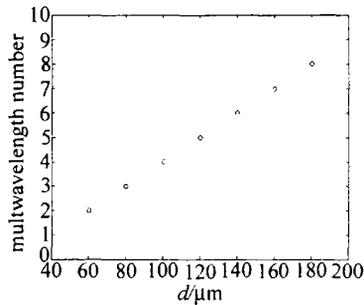


Fig 9 Number of multiwavelength as a function of d

波长输出的数目与 d 的关系。从图中可看到,在 F-P 腔的长度小于 $40\mu\text{m}$ 时,滤波器的选频特性较差,无法形成明显的输出峰。随着腔长度的增加,开始出现输出峰,并且输出峰的数目和长度 d 成近似的线性关系。输出峰的数目也不能无限制地增加,因为输出峰数目的增加会使得自由谱域值减小,对接收端的要求会变得很高。

3 结论

在考虑反射率的波长依赖性的前提下,对基于 F-P 滤波器的多波长掺镱 DCFL 进行了理论研究,得到了

与参考文献 [4] 相吻合的结果。结果表明,可以通过调节光纤出光端面和双色镜的反射率来优化 DCFL 多波长输出的性能。光纤出光端面的反射率存在一个最佳值,再配以合适的双色镜反射率,就可获得满意的输出功率和消光比。适当增大抽运功率也能改善输出功率和消光比。另外,通过控制 F-P 滤波器的腔长,能够调节多波长输出的数目。

参 考 文 献

- [1] 迟荣华,吕可诚,陈胜平 *et al* 单一偏振的多波长环形腔掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2003, 30(12): 1061~1064.
- [2] 杨先波,刘德明,黄德修. 光纤喇曼激光器及多波长输出的分析 [J]. 激光技术, 2003, 27(5): 409~414.
- [3] ZENTENO L. High-power double-clad fiber lasers [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1993, 11(9): 1435~1446.
- [4] 项阳,许兆文,宁鼎 *et al* 掺 Yb^{3+} 双包层光纤激光器的多波长输出 [J]. 中国激光, 2004, 31(4): 403~406.
- [5] 孙军强,刘德明,黄德修 *et al*. 窄线宽多波长掺镱光纤激光器 [J]. 中国激光, 2000, 27(9): 773~776.
- [6] LOVSETH S W, STEPANOV D Y. Analysis of multiple wavelength DFB fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(6): 770~780.
- [7] 徐建华,张似在,干福熹. 法布里-珀罗干涉仪外腔半导体激光器的选模和锁模特性研究 [J]. 中国激光, 1995, 22(2): 85~90.
- [8] HARDY A, ORON R. Signal amplification in strong pumped amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(3): 307~313.
- [9] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Q E, 1998, 34(9): 1570~1576.
- [10] 聂秋华. 光纤激光器和放大器技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997. 305~313.

(上接第 496 页)

种新兴的非声制导技术。激光对舰船尾流中不易消溶和扩散的微气泡非常敏感,当激光在尾流区域内、外传输时,其前向或后向散射光光强在时域、频域和空域中的光学特性都极为不同,可通过比较散射激光光学参数的变化来快速、准确地判别鱼雷是否进入或穿出尾流并导引鱼雷沿目标舰船的航迹靠近目标。在目标消声性能和对抗技术及诱饵技术不断进步的今天,激光尾流制导鱼雷必然会成为现代鱼雷的一个发展方向。特别是上视激光尾流制导鱼雷与前向散射激光尾流制导鱼雷相比,又具有航程短、航行深度较深、隐蔽性好、可靠性高等优点,因而具有更加美好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 李溢池,王树宗. 现代鱼雷——水下导弹 [M]. 北京: 海洋出版社, 1995. 107~109.
- [2] 冀邦杰,周德善,张建生. 基于舰船尾流光效应的制导鱼雷 [J]. 鱼雷技术, 2000, 31(3): 40~43.
- [3] 周德善. 舰船气泡尾流几个特征参数的研究 [R]. 西安: 西安 705 研究所, 2001. 140~152.
- [4] CARRICA P M, BONETTO F J, DREW D A. The interaction of background ocean air bubbles with a surface ship [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 28(5): 571~600.
- [5] 蔡平,朱代柱,惠俊英. 水面船尾流的声散射实验研究 [J]. 声学学报, 2000, 25(1): 10~15.
- [6] ZHANG X D, LEW IS M, JOHNSON B. Influence of bubbles on scattering of light in the ocean [J]. Appl Opt, 1998, 37(27): 6525~6536.
- [7] 张建生. 尾流的光学特性研究与测量 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2001. 99~101.
- [8] 张建生,刘健康,冀邦杰. 激光通过实验室模拟尾流的衰减特性 [J]. 西安工业学院学报, 2001, 21(6): 283~287.
- [9] 刘继芳,刘海洋,冀邦杰. 气泡光散射谱强度分布研究 [J]. 鱼雷技术, 2003, 42(2): 17~19.