

空射激光制导武器对舰船隐蔽指示特性研究

宗思光,夏学成,梁善永,章正良
(海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘要:舰载光电对抗系统是舰载装备电子防护对抗光电制导武器的重要手段。为提高激光精确制导武器对舰船攻击过程中的突防成功概率,研究了激光制导对舰船攻击的尾流偏差指示方法。结合舰船尾流气泡特性、激光半主动激光制导模式、尾流气泡激光散射特性模型,建立了空射激光制导武器对近水面层舰船尾流气泡探测模型。对激光照射舰船尾流不同区域、不同天气情况、不同照射角度下散射特性进行了仿真。研究结果可为新型激光精确制导武器对舰船隐蔽突防打击提供参考。

关键词:舰船尾流;激光制导;尾流散射;光电对抗

中图分类号:E929.2;TJ765 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.10.018

Air-launched laser-guided weapons research based on ship wake detection

ZONG Si-guang, XIA Xue-Cheng, LIANG Shan-Yong, ZHANG Zheng-Liang
(College of Electronic Engineering Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The shipboard optoelectronic countermeasure system is an important means against the photoelectric guided weapons. In order to improve the probability of success of laser-guided weapons against ships, the wake deviation indication method of laser guided attack on ships is studied. Combined with the characteristics of ship wake bubbles, laser semi-active guided mode, wake bubbles laser scattering model, a model of air-launched laser guided weapons for ship wake bubbles detection is established. The scattering characteristics of laser irradiated ship wake in different areas, different weather conditions and different irradiated angles are simulated. The research results can be used as a reference for new precision laser-guided weapon to attack ships with concealment.

Key words: ship wake; laser guidance weapon; wake bubbles laser scattering; optoelectronic countermeasure

1 概述

舰载光电对抗系统是舰载综合电子战系统的重要分支,随着国内外光电对抗技术飞速发展以及对抗手段与对抗能力不断增强,各军事大国尤其是美国已具有比较完备的舰载光电对抗系统,且在电子防护领域中发挥了重要的作用,已成为舰载装备电子防护不可或缺的重要手段^[1]。

为提高激光精确制导武器对舰船目标攻击的攻防成功概率,针对特定的舰船目标,研究激光精确制导武器的战术、技术具有重要的军事意义。舰船航行过程中,由于螺旋桨搅动产生的空化现象,海面波浪的翻卷、破碎,以及从吃水线部分卷入的大量空气,会在尾部形成一条含有大量气泡的气幕带,这条气幕带就是常说的尾流。舰艇尾

流具有范围大、持续时间长、且无法消除和模拟的特点。

目前,激光精确制导武器对舰船目标进行攻击时,多采用直接照射攻击方法,在与舰载光电对抗系统对抗中,处于不利地位。在空射激光精确制导武器对舰船目标进行攻击时,可采用激光偏差指示照射,即制导激光束不直接照射指示舰船本体目标,而是照射指示舰船特定区域的尾流,激光导引头跟踪检测舰船尾流激光散射回波,进而实现对舰船的目标跟踪检测,如图1所示。该方法可使敌方舰船的对抗系统难以及时告警,增大激光制导武器的突防成功机率,从而实现激光制导武器对舰船隐蔽指示。

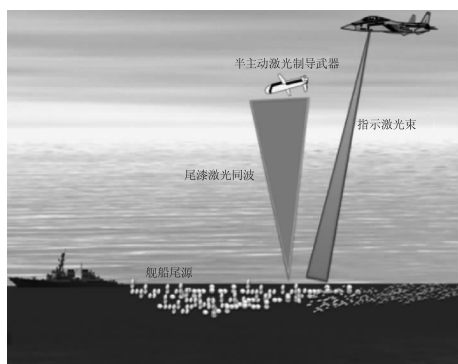


图1 激光制导武器对舰船隐蔽指示

Fig. 1 Laser guided weapons hidden instructions for ship

论文针对舰船尾流激光制导隐蔽指示,研究了舰船尾流气泡特性模型,结合激光半主动激光制导模式、尾流气泡激光散射特性模型,建立了空射激光制导武器对近水面层舰船尾流气泡探测模型。对激光照射不同舰船尾流区域、不同天气情况、不同照射角度下散射特性进行了仿真,并给出隐蔽指示方法的基本运用模式。

2 舰船尾流激光隐蔽指示特性建模

2.1 激光隐蔽指示方法

在使用激光制导武器时,利用激光指示器对目标直接进行激光指示会引起敌告警设备的侦察告警,面对敌方采取激光对抗措施影响到我方激光行动时,可以使用激光隐蔽指示方法,即用激光指示器瞄准目标附近的物体以提供一个近似的目标或最初瞄准点。

使用激光隐蔽指示在制导武器弹道的末端,需对制导武器进行修正,一是利用偏差程序,采用偏差瞄准点的方法,但须告知偏差点与目标之间的准确方位和距离;二是利用转移程序,激光

指示器操作人员可以要求将激光移向实际的目标,这时激光指示器必须平稳地从偏差点移向目标^[2]。

舰船在海水中行驶会在船后形成尾流,舰船尾流的长度可以绵延几海里甚至几十海里,具有不可避免、存活时间长、无法消除的特点^[3-4],是飞机发现舰艇并且发起攻击的最好线索。使用激光隐蔽指示的方法对舰船尾流进行照射,而不是直接指示舰船本身,可使舰船的光电对抗系统难以及时告警,从而增大激光制导武器命中的成功率。

2.2 舰船尾流特征及模型建立

水面舰船、潜艇以及其他水下航行器运动时不可避免地在空中留下航迹。这些航迹是舰船、航行器运动时对水的扰动以及其推进器的螺旋桨对水的扰动产生的尾流。尾流之所以能够被清楚的观察到是由于尾流中存在大量的、各种尺寸的气泡,这些气泡的存在使尾流的光透射、吸收和散射特性发生了变化。由于水中气泡不断地上浮、破灭,而且气泡体积越大,上浮的速度越快,所以到产生尾流舰船的距离不同,尾流中所含气泡的尺寸不同,因而其对光的透射、吸收和散射性能也不同。

对于舰船尾流中的气泡场,在给定时刻的气泡分布,可视作为气泡空间随机分布,由大量的气幕层构成,每一气幕层都散射光。在每一气幕层面上随机分布着大小随机取值的气泡,其尺寸在 $10 \sim 2000 \mu\text{m}$ ^[3-4]。

舰船尾流主要由不同大小的气泡组成,并且随着海水密度和深度发生变化。尾流内气泡密度分布函数 $n(r, z)$ 随气泡半径 r 和尾流深度 z 的变化关系可表示为^[5]:

$$\begin{cases} n(r, z) = n_0 \left(\frac{r}{r_{\text{peak}}} \right)^{-4.5} e^{-\frac{z}{L}}, & r > r_{\text{peak}} \\ n(r, z) = n_0 e^{-\frac{z}{L}}, & r < r_{\text{peak}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $n(r, z)$ 为尾流表面的气泡数密度; r_{peak} 为气泡的峰值半径; L 为气泡的测深标尺。

由于不同地域海水密度和舰船自身结构的不同,结合参考文献[5],建立尾流气泡分布模型如表1所示:舰船尾流沿尾流深度方向分为5层,沿尾流纵向分为6个区域。尾流中心区域为尾流5区,尾流远区纯海水区域为尾流0区,每个区域由不同尾

流深度层构成^[6]。

表1 尾流气泡尺寸分布模型^[6]

Tab. 1 Wake bubble distribution

尾流深度 z/m	尾流气泡尺寸分布 $r/\mu\text{m}$					
	区域5	区域4	区域3	区域2	区域1	区域0
0 ~ 1	8 ~ 200	10.3 ~ 180	10.3 ~ 150	10.3 ~ 100	10.3 ~ 37.4	
1 ~ 3	8 ~ 160	10 ~ 140	10 ~ 95	10 ~ 37		
3 ~ 5	8 ~ 120	9.5 ~ 90	9.5 ~ 36			
5 ~ 7	8 ~ 80	9 ~ 34				
7 ~ 9	8 ~ 30					
9 ~ 30						

以美国国防研究委员会第6局用声纳对15节航行的驱逐舰的尾流测量数据为依据^[7],可设 $r_{\text{peak}} = 20 \mu\text{m}$, $r_{\text{min}} = 8 \mu\text{m}$, $r_{\text{max}} = 200 \mu\text{m}$, 尾流时间 $t = 3 \text{ min}$, $L = 9 \text{ m}$; 令 $n_0 = 6.0 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 。

2.3 空照激光后向散射特性

如图2所示,若激光指示器发射总能量为 E_i 的激光,传播距离 R_i 后, θ_i 表示入射激光与法线的角度,表示激光对舰船尾流的照射角度。假设目标表面为漫反射面,则在入射方向夹 θ_c 的方向上,距离海水表层 R_z 的空间某处的激光能量密度中,海水表层被激光照射的面积为 ds 的面元的单元能量为:

$$E'_z = \frac{CE_i r_i e^{-\mu(R_i+R_z)} \cos\theta_c}{2\pi R_z^2} ds \quad (2)$$

$$C = \frac{2}{1 + \cos\theta_z} \quad (3)$$

式中, E_i 为 ds 上目标指示激光入射的能量密度; r_i 为照射目标表面的散射系数; μ 为大气衰减系数,那么该点总的激光能量密度为:

$$E_z = \int_{S_i} E'_z ds = \int_{S_i} \frac{CE_i r_i e^{-\mu(R_i+R_z)} \cos\theta_c}{2\pi R_z^2} ds \quad (4)$$

式中, S_i 为落在目标表面的光斑区域。由于舰船尾流激光后向散射发生的是 Mie 散射,此时的反射系数可由下式给出:

$$r_i = NK\pi R^2 \quad (5)$$

式中, K 为实际的散射截面与几何截面之比,通常取值 $K = 2$ 。由于目标指示激光的光束发射角很小(一般小于 0.5 mrad),因此传播距离 R_i 后,目标指示激光的光斑面积仍然很小,可以认为全部光斑落在目标表面,则有:

$$E_i = \int_{S_i} E_i ds \quad (6)$$

由于光斑很小且观测距离 R_z 很远,光斑区域内不同位置对观测点所张的角度 θ_c 可视为近似相等,因此散射回波激光能量密度为:

$$E_z(\theta_c, R_z) = \int_{S_i} \frac{CE_i r_i e^{-\mu(R_i+R_z)} \cos\theta_c}{2\pi R_z^2} ds \approx \frac{E_i r_i e^{-\mu(R_i+R_z)} \cos\theta_c}{\pi R_z^2 (1 + \cos\theta_z)} \quad (7)$$

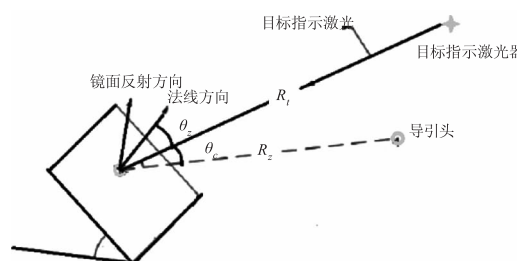


图2 空照激光照射舰船尾流示意图

Fig. 2 According to principle of laser detection

3 隐蔽指示方法的仿真及结果分析

采用激光精确制导武器典型机载照射、投弹为例,取目标指示激光的输出能量 $E_i = 200 \text{ mJ}$, 激光照射距离 $R_i = 10 \text{ km}$, $R_z = 10 \text{ km}$ 。以目标表面的光斑中心为坐标原点,模拟计算了不同条件下散射能量密度的分布情况。其中, E_z 会受到海水表面不同区域的散射系数 r_i 与不同大气环境下大气衰减系数 μ 的影响。

(1) 激光指示照射尾流不同区域特性

通过建立的模型,经过计算得到尾流中不同区域的散射系数如表2所示。

表2 尾流不同区域气泡散射系数

Tab. 2 Wake bubbles scattering coefficient of different wake areas

尾流深度 z/m	尾流气泡尺寸分布 r/m^{-1}					
	区域5	区域4	区域3	区域2	区域1	区域0
0 ~ 1	0.2584	0.2509	0.2488	0.2415	0.1872	0
1 ~ 3	0.2562	0.2489	0.2413	0.1871	0	
3 ~ 5	0.2519	0.2414	0.1857	0		
5 ~ 7	0.2416	0.1805	0			
7 ~ 9	0.1662	0				
9 ~ 30	0					

通过表2中的0~1 m的尾流气泡散射系数,代入式(7)中可计算尾流深度在0~1 m时舰船尾流0~5区域的激光后向散射特性。由于目标指示为机载激光照射,设 $\theta_i = 80^\circ$,天气情况晴,取大气衰减系数 $\mu = 0.11$ 。

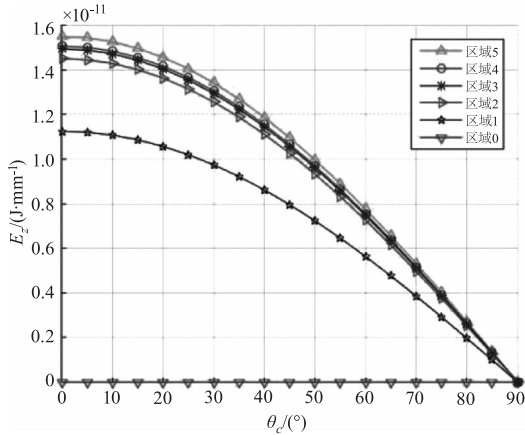


图3 不同尾流区域对激光散射能量的影响

Fig. 3 Laser scattering characteristics under different wake area

图3中横坐标表示入射方向夹角 θ_i 的值,纵坐标表示反射光的能量密度 E_z 。从图中可以看出,海水中不同区域由于海水表面散射系数的不同,导致激光后向散射/反射的能量密度不同。在尾流中心的区域5具有相对较大的激光反射光能量密度,在距舰船尾部的2~5区域,激光发射的能量密度相差较小。当远离到区域1,即接近无尾流气泡的海面状态时,激光反射光能量密度衰减较大。在舰船尾流隐蔽指示的使用中,应照射舰船尾流的区域2~5,避免照射区域0和区域1,并且控制入射方向尽量使制导武器的导引头与入射方向夹角为 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的范围内,从而提高隐蔽指示的成功率。

考虑到该计算数据为舰船航行后 $t = 3$ min尾流气泡散射特性,以航行速度为15 kn,我们可以判断此舰船尾流长度大约为1390 m。此时激光目标指示器照射距舰船尾流0~1000 m处都可形成对尾流的检测能力,考虑到激光偏差照射的攻击后期的转移程序,以及敌舰载激光告警器的激光散射截获能力,在距离舰船尾流500~600 m处照射,可形成较好的隐蔽指示能力。

(2) 不同大气参数对激光指示照射性能影响

不同的天气情况对激光目标指示的制导光区有较大的影响,甚至会导致导引头无法识别跟踪目标。

这里选取无云雾、雾天、雨天三种天气情况进行分析,研究发现可以采用下面简单的公式来计算三种天气情况对激光的衰减系数^[7]。

①大气能见度较好,无云雾情况下:

$$\mu = \frac{3.912}{V_m} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q (\text{km}^{-1}) \quad (7)$$

其中, V_m 为大气能见度(km); λ 为激光波长; q 为修正因子,取之规律为若 $V_m > 20$ km时, $q = 1.6$,若 $V_m < 6$ km时, $q = 0.585$,一般情况下 $q = 1.3$ 。取 $V_m = 15$ km,计算得 $\mu = 0.110$ 。

②雾:

$$\mu = \frac{A_f}{V_m} \quad (8)$$

其中, A_f 为经验常数, $\lambda = 0.53 \mu\text{m}$, $A_f = 2.46$,计算得 $\mu = 0.255$ 。

③雨天情况下:

$$\mu = 0.56 J_s^{0.659} \quad (9)$$

式中, J_s 为降雨量,以小雨为例, $J_s = 5$ mm,计算得 $\mu = 1.617$ 。

通过计算三种天气情况对激光的衰减系数,代入式(7)中可计算尾流深度在0~1 m时舰船尾流区域5的激光散射特性,其余参数设置相同,得到图4所示结果。

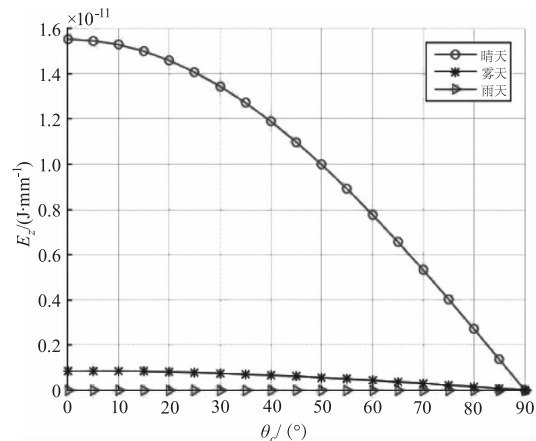


图4 不同天气条件下尾流激光散射特性

Fig. 4 Laser scattering characteristics under different weather conditions

图4中横坐标表示入射方向夹角 θ_i 的值,纵坐标表示反射光的能量密度 E_z 。从图中可以看出,不同天气情况由于对激光的衰减系数差异大,激光反射能量密度差异也较大,晴天散射回能量密度最高,雾天和雨天的散射能量密度较低甚至为零,导致接收能量低于导引头灵敏度而不能正常工作。因此,在实际使用激光制导武器时,应充分考虑天气影

响因素,在天气情况较为晴朗的气候条件下使用,确保激光制导的正常工作。

(3) 不同照射角度的影响

通过改变机载激光指示器的照射角度,带入式(7)中可计算尾流深度在0~1 m时舰船尾流区域5的激光散射特性,其余参数设置相同,得到图5所示结果。

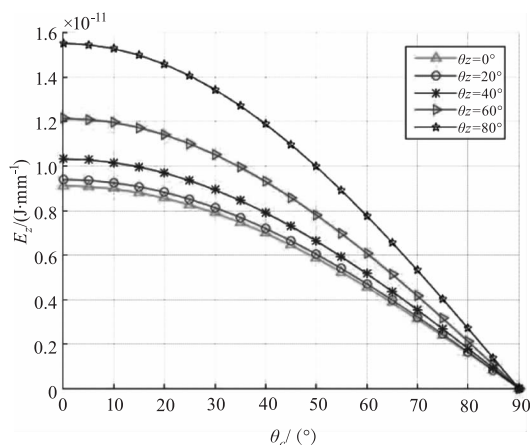


图5 不同照射角度对激光散射特性

Fig. 5 Laser scattering characteristics under different irradiation angle

从图5中可以看出,随着机载激光照射角度 θ_z 的增大,散射光的能量密度逐渐增强,并且在大角度照射时,能量密度增加较为显著。在实际使用激光指示器时,应尽可能增大照射角度,增强反射光的能量密度,使导引头的作用距离增加。

随着入射角度 θ_i 的增大,反射光的能量密度在逐渐增强,这是因为目标指示激光的漫反射光的分布范围随着入射角度 θ_i 的增大而减小,在入射总能量不变的情况下,反射光的能量密度也就随之增强。此外,随着反射角度 θ_r 的增大,反射光的能量密度也在逐渐减小,但是反射角度 θ_r 在0~30°范围内时,反射光的能量密度变化较为平缓,在投弹时将激光制导武器投入该范围内的命中概率更高。

4 总结

空射激光精确制导武器通过对舰船尾流的激光偏差照射、跟踪、检测可实现对舰船的隐蔽攻击,提

高与舰载光电对抗系统间的对抗效能。论文提出了激光制导对舰船攻击的尾流偏差指示方法,建立了空射激光制导武器对近水面层舰船尾流气泡探测模型。仿真计算了激光照射不同舰船尾流区域、不同天气情况、不同照射角度下散射特性,可为新型激光精确制导武器对舰船隐蔽突防打击提供参考。

参考文献:

- [1] SUN Yanfei, YE Jiesong, HAO Yanjun. Research on counter laser-guided bomb on artillery field[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S): 464-467. (in Chinese)
孙彦飞, 叶结松, 郝延军. 对抗激光制导武器方法研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 464-467.
- [2] LV Yueguang, SUN Xiaoquan. Fundamentals and applications of laser countermeasures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
吕跃广, 孙晓泉. 激光对抗原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [3] SHI Shengwei. Study on wake acquisition technique using backscattering laser light[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2008. (in Chinese)
石晟玮. 后向散射式激光尾流探测技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2008.
- [4] LIANG Shanyong. Studies on laser scattering characteristics and detection technology of ship wake bubbles[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2013. (in Chinese)
梁善永. 舰船尾流气泡激光散射特性及探测技术研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2013.
- [5] Mark V Trevorrow. Boundary scattering limitations to fish detection in shallow waters[J]. Fisheries Research, 1998, 35(1-2): 127-135.
- [6] Mark V Trevorrow, S Vagle, D M Farmer. Acoustical measurement of micro bubbles within ship wakes[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1994, 95(4): 1922-1930.
- [7] E W Miner, O M Griffin. Near surface bubble motions in sea water[R]. AD-A168395, 1986.