

# 探测尾流自导鱼雷主动声呐的波形设计

吴楚楚, 周胜增, 江林锋

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 为了实现对不同速度尾流自导鱼雷的稳定探测, 建立尾流自导鱼雷典型弹道模型, 对运动平台主动声呐混响和鱼雷目标回波的多普勒特性进行分析。研究表明对于探测尾流自导鱼雷的主动声呐来说, 当鱼雷速度小于 2 倍平台速度时目标多普勒较小且不稳定, 仅依靠多普勒滤波难以完全避开混响干扰并实现稳定探测。提出使用宽带多普勒敏感信号与 CW 信号的组合形式来探测尾流自导鱼雷。仿真给出了组合信号的距离、速度分辨力和混响抑制能力, 证明了其性能良好。

**关键词:** 尾流自导鱼雷; 主动声呐; 波形设计; 混响抑制

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-01-0070-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.01.015

## Waveforms design for active wake homing torpedo detection

WU Chu-chu, ZHOU Sheng-zeng, JIANG Lin-feng

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In order to achieve the stable detection at different speeds of wake homing torpedo, the model of wake homing torpedo is established, and the Doppler properties of motion platform's sonar reverberation and target echo are analyzed in the paper. The results show that for the active sonar of detectong wake homing torpedo, the Doppler of target echo is small and unstable when the torpedo speed is less than 2 times the platform speed. So it is difficult to detect wake homing torpedo stably by using Doppler filtering. Wideband Doppler sensitive pulse combined with CW pulse is proposed to detect wake homing torpedo. The simulation shows that the combined pulse has super abilities in range resolution, speed resolution and reverberation suppression.

**Key words:** wake homing torpedo; active sonar; waveform design; reverberation suppression

## 0 引言

近年来, 尾流自导鱼雷的性能不断提高, 给水面舰艇带来了很大威胁。尾流自导鱼雷具有很好的抗干扰能力和较高的导引精度, 命中率高, 毁伤效果好, 成为打击大中型水面舰艇的主要武器。为了识别和跟踪舰船目标尾流, 鱼雷在尾流下方需要不断调整弹道以蛇形穿越尾流, 并逐渐减小入射角直到击中目标。作为防御手段, 对尾流自导鱼雷的探测与对抗技术也随之产生。通过对尾流自导鱼雷回波和运动平台混响的多普勒特性分析表明, 当鱼雷速度小于 2 倍平台速度时, 目标多普勒较小且不稳定, 仅仅依靠多普勒滤波难以完全避开混响干扰并实现稳定探测。好的抗混响信号在低多普勒和高多普勒下均具有相对较好的混响抑制性能<sup>[1]</sup>。具有钉

板型模糊度函数的梳状谱信号是目前广泛研究的主动声呐信号, 具有较好的抗混响性能。而对于高速运动目标, CW 信号具有最佳的抗混响能力, 且后置处理技术成熟。因此为了实现对不同速度下尾流自导鱼雷的稳定探测, 宽带多普勒敏感信号与 CW 信号组合是一种较为理想的选择形式。

## 1 尾流自导鱼雷回波特性分析

### 1.1 典型尾流自导鱼雷弹道模型

舰船在航行过程中, 由于其螺旋桨旋转使海水空化, 并使气泡形成旋转向后的运动, 从而在舰船尾部留下一片长条状、含有大量气泡的区域。该区域通常称为舰船尾流, 形状如图 1 所示。

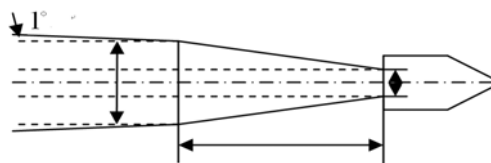


图 1 舰船尾流平面形状示意图

Fig.1 Sketch map of the plane shape of ship's wake

收稿日期: 2012-10-04; 修回日期: 2013-01-22

作者简介: 吴楚楚(1987-), 女, 浙江金华人, 助理工程师, 研究方向为声呐信号处理。

通讯作者: 吴楚楚, E-mail: evvonne-gif@163.com

尾流的有效长度可由  $L=KV$  求得， $V$  为目标航速(m/s)； $K$  为系数，三级海况时， $K=180s$ ，五级海况时  $K=120s$ 。尾流宽度在数倍于船长之后(约舰船前进 0.5min 之后)，以  $1^\circ/s$  左右的速度向两边扩散。通常可以认为尾流宽度为船体宽度的 2.5 倍<sup>[2-4]</sup>。

尾流自导鱼雷就是利用舰船尾流的物理场特性实现鱼雷的制导控制<sup>[5]</sup>。由于其卓越的抗干扰性能，尾流自导被广泛应用于现代鱼雷的末弹道制导中。尾流自导鱼雷的水平面弹道随自导装置探测能力的不同，分为单波束导引和三波束导引两种<sup>[6]</sup>。

### 1.1.1 单波束导引

单波束导引是在鱼雷自导头上方垂直向上分别设置声脉冲发射和接收基阵，形成单个垂直指向的声波发射和检测通道<sup>[5]</sup>，如图 2 所示。

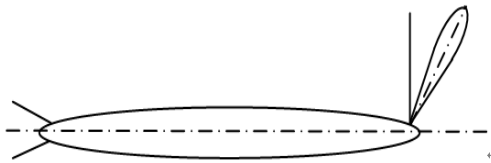


图 2 鱼雷的单波束探测  
Fig.2 Single beam detection of torpedo

鱼雷自导装置开机后，由单波束探测有无尾流信号，确定鱼雷本身是在尾流下方还是在尾流之外，给出左、右间隔的操舵指令，依靠控制操舵时间和鱼雷旋回速率，保持鱼雷本身左、右穿越尾流，经多次调整，使其按要求的导入角保持在尾流下方，接近目标舰船，直到命中目标<sup>[6]</sup>。

单波束导引机制的特点是：弹道控制简单；鱼雷航程消耗较大、且降低了鱼雷追踪目标的相对速度；特别是如果鱼雷进入目标尾流的位置不当，将会造成目标在鱼雷两次穿越尾流的间隙中被“漏掉”的可能。单波束导引的弹道如图 3 所示。

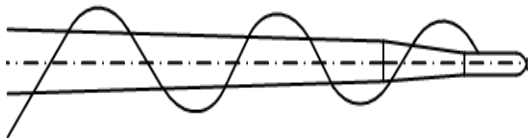


图 3 单波束水平面导引弹道  
Fig.3 The single beam guidance trajectory

鱼雷穿越尾流的导入角、旋回速率及旋回时间的选择，应使其能在左右尾流之间的距离保持在一定的范围之内，确保鱼雷最后穿越尾流时能通过目标舰船的水平面投影<sup>[6]</sup>。

当鱼雷在目标前穿越，而不能通过目标时，鱼雷进行环形再搜索，绕到目标后面再次搜索，发现尾流，再次导引攻击目标舰船。

### 1.1.2 三波束导引

三波束导引是在鱼雷自导头的左、右和垂直方向各设置声脉冲发射和接收基阵，左右两基阵的声学轴线相对于垂直方向的轴线保持一定的角度，形成指向三个方向的三个声波发射和检测通道<sup>[5]</sup>，如图 4 所示。

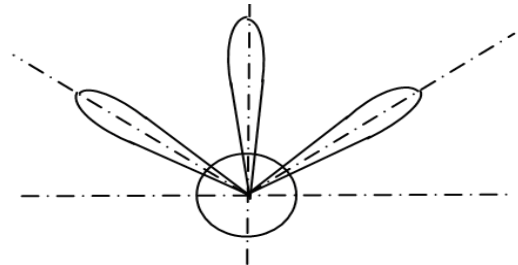


图 4 鱼雷三波束探测  
Fig.4 Triple beams' detection of torpedo

鱼雷自导开机后，搜索尾流的弹道形式为直航，三个发射基阵分别周期地在垂直向上、然后向左上、再向右上三个方向发射声脉冲信号，并由相应的接收基阵在这三个方向上接收和检测反射声波。根据各检测通道、预设定或遥控设定给出的水面舰船舷位诸多信息去执行首次出尾流弹道的机动。鱼雷穿越尾流后，首先在尾流外旋回并判断尾流的真伪，即根据在首次出尾流弹道机动中获得的信息，对尾流真实性和尾流内空穴进行判别。待再次检测到尾流的存在后，转入再入尾流弹道。

鱼雷第一次再入尾流时，按照攻击目标舷别向左或向右以最大角速度向尾流旋回到某一给定的角度。此时，若三个波束通道仍然能够检测到目标尾流信号，则调整角速度再次旋回一定角度，依次不断调整和旋回，直到鱼雷接近目标尾流边沿时，出现左通道或右通道丢失尾流信号，而其它两波束仍能接收到尾流信号的现象，这表明鱼雷已到达目标尾流边沿<sup>[5]</sup>。

鱼雷到达目标尾流边沿后，又以较上次进入尾流相对较小的旋回角和旋回角速度逆向旋回，并不断调整旋回角速度直至鱼雷到达目标尾流的另一边再做逆向旋回。这样，依次通过不断减小鱼雷的进入角，而使鱼雷的弹道逐步收敛在目标的尾流之内，直至命中目标。典型的三波束导引弹道如图 5 所示。

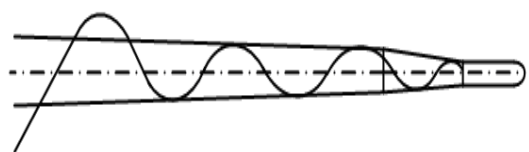


图 5 三波束导引弹道示意图  
Fig.5 Triple beams' guidance trajectory

三波束导引机制的弹道具有航程消耗较小、追踪目标的相对速度较高、不会“漏掉”目标等优点。

目前世界上一般的尾流自导鱼雷采用的都是单波束或者三波束尾流自导。从上述分析可知此两种导引弹道均为蛇形。

### 1.2 目标回波多普勒特性分析

根据 1.1 节尾流自导鱼雷弹道模型，分析鱼雷与声呐之间的相对运动产生的多普勒频移。其值大小取决于相对运动速度与声波传播速度的比值。单基地声呐和目标之间的速度以及位置关系如图 6 所示。图中， $S$  代表声呐， $T$  为目标，它们的速度分别为  $V_S$ 、 $V_T$  [7]。

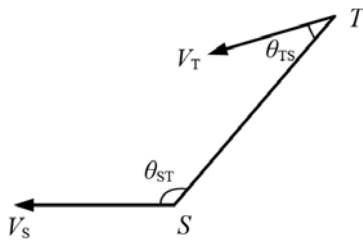


图 6 声呐与目标几何位置及角度定义

Fig.6 Definitions of angles and geometric positions between the base and targets

设发射信号的频率为  $f_0$ ，从目标反射回来的信号频率为  $f_r$ ，声速为  $c$ ，则多普勒系数为

$$\frac{f_r}{f_0} = \frac{1 + \frac{V_S}{c} \cos \theta_{ST}}{1 - \frac{V_S}{c} \cos \theta_{ST}} \cdot \frac{1 + \frac{V_T}{c} \cos \theta_{TS}}{1 - \frac{V_T}{c} \cos \theta_{TS}} \quad (1)$$

式(1)中第一部分是由声呐运动引起的频率移动因子，第二部分是由目标运动引起的频率移动因子。

图 7 从上到下分别为尾流鱼雷在 30kn 和 50kn 航速时蛇形方式接近本舰产生的多普勒系数，目标相对于声呐方位角  $\theta_{TS}$ ，声呐相对于目标方位角  $\theta_{ST}$  的变化图。图 7(a)、7(b)、7(c)中实线代表目标速度为 30 kn，虚线代表目标速度为 50 kn，声呐的速度为 20 kn。图 7(a)中速度为 30 kn 的目标回波频率在混响频率范围(两条小虚线之间)内，目标多普勒较小且不稳定，仅仅依靠多普勒滤波难以完全避开混响干扰并实现其稳定探测。而当目标速度在 50 kn 时，目标多普勒频移比较大，大部分时间位于目标和混响多普勒频移可以分开的高速区。

## 2 尾流自导鱼雷检测背景分析

对尾流自导鱼雷的检测背景主要取决于目标回波和混响的多普勒特性。对于高速目标探测，CW 脉冲是最佳选择，其本质是依靠多普勒滤波来抑制

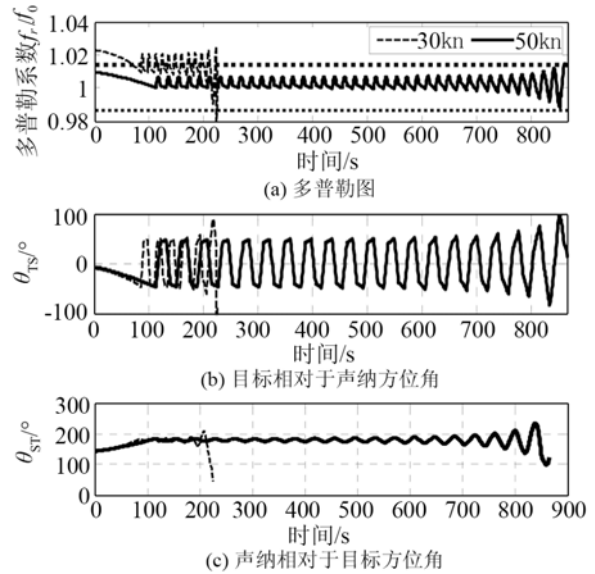


图 7 多普勒图、目标相对于声呐方位角、声呐相对于目标方位角  
Fig.7 Doppler, target azimuth and sonar azimuth

混响，只有当目标回波多普勒大于混响多普勒频率范围时才能避开混响干扰，从而实现噪声背景目标检测。因此混响抑制能力取决于目标的最小多普勒频移。

图 8 为运动平台混响的空时特性。试验过程中由拖曳声源发射 CW 信号，线列阵接收混响数据。从图中可看出混响多普勒频移主要由运动平台速度和接收方位角决定。

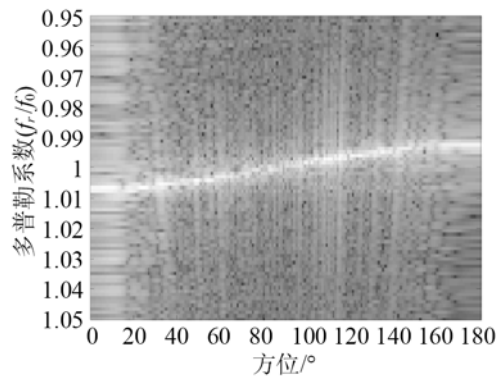


图 8 运动平台混响空时特性

Fig.8 Space-time property of reverberation for moving platform

图 9 为不同鱼雷速度和插入角度下的鱼雷回波多普勒值。黑线下面的区域表示的是目标多普勒速度小于舰船速度(此时航速为 20 kn)的混响背景区域。针对速度为 30~40kn 的尾流自导鱼雷，声呐主要是在混响背景下探测，因此对尾流自导鱼雷探测波形设计需要考虑其混响抑制能力。

## 3 组合波形设计

窄带信号具有良好的多普勒敏感性，其功率谱

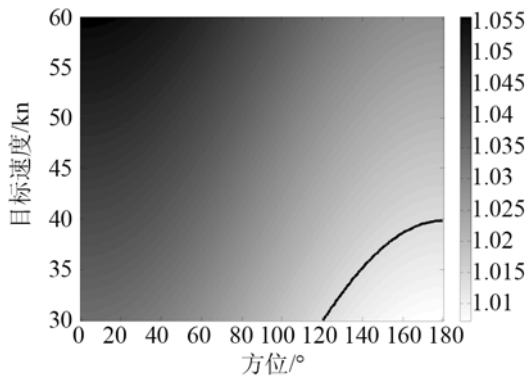


图 9 不同鱼雷速度和插入角度下的鱼雷多普勒值  
Fig.9 Doppler of a torpedo as a function of torpedo speed and inserting bearing

主瓣尖锐，有利于对高速目标进行检测。而在目标速度相对较低的时候，宽带信号的展宽工作频带可以有效分散混响的能量，使其谱级下降，此时宽带信号更有利于目标的检测。

梳状谱信号的频谱由许多独立的谱线组成，信号能量如同宽带信号一样在频域分布，而其较窄的谱线如同单频信号一样具有多普勒敏感性，可以兼具以上两者的优点<sup>[8]</sup>。

调频脉冲串信号(Pulse Train of Frequency Modulated, PTFM)是使用 LFM 信号作为子脉冲，与周期脉冲卷积得到的信号。时域上相当于 LFM 信号连续重复  $N$  次，其中  $N$  值与梳状谱密度有关。设时间宽度为  $T$  的 PTFM 信号，子脉冲数为

$$N=2\left(\frac{2V T f_0}{c}+1\right)\approx\frac{4V T}{\lambda} \quad (2)$$

其中： $V$  为声呐运动速度； $f_0$  为子脉冲中心频率。

双调频脉冲串信号(Double pulse Train of Frequency Modulated, DTFM)和三调频脉冲串信号(Triple pulse Train of Frequency Modulated, TTFM)都是在 PTFM 信号基础上产生的<sup>[1]</sup>。

### 3.1 抗混响性能 Q 函数衡量

在混响限制条件下，定义：

$$Q(\eta)=\int_{-\infty}^{\infty}|\chi(\tau,\eta)|^2 d\tau \quad (3)$$

Q 函数为发射信号模糊度函数  $|\chi(\tau,\eta)|$  的平方沿距离维的积分，其中  $\eta$  为多普勒压缩因子<sup>[8]</sup>。由于模糊度函数为在理想信道中匹配滤波器的输出，当把散射体理解为一种特殊“目标”时，Q 函数可以认为是当发射阵和实际目标具有某一相对运动速度时，在所有距离上的散射体产生的混响回波经过匹配滤波器后输出能量的卷积。因此 Q 函数可作为度量声呐波形混响输出大小的一个参考，几种信号的 Q 函数图如图 10 所示。

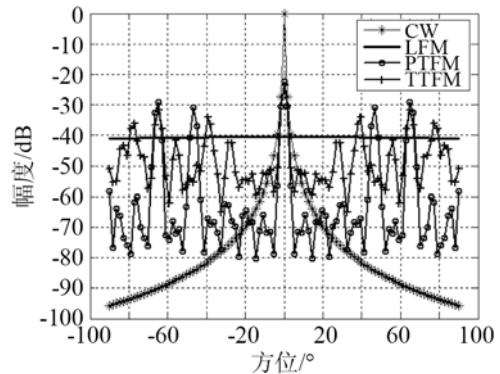


图 10 几种信号的 Q 函数图  
Fig.10 Q functions of different signals

从图 10 可以看出，在检测混响限制下的低速目标时，PTFM 检测能力比较强。而对于高速运动目标，CW 信号具有最佳抗混响能力。PTFM 信号的混响输出随着目标运动速度的增加下降很快，也能检测到尾部速度相对较慢的目标，虽然 PTFM 信号对单个目标的距离分辨力较高，但会出现较多旁瓣，出现测量模糊，而且在分辨多目标时会出现多峰值以及峰值混叠的测量模糊。在主瓣两侧每隔一定频率也会出现旁瓣，间隔为谱线间距  $d$ ，也就是当目标运动导致的多普勒频偏大于谱线间距时，将出现测频模糊。所以 PTFM 信号在应用时应考虑重复周期的次数和抑制旁瓣的检测算法。TTFM 可以消除距离模糊，弥补 PTFM 的缺陷。

### 3.2 模糊度分析

模糊度函数反映了波形在受到传播时延和运动多普勒频偏的影响下通过匹配滤波器后的输出，虽然不能直接指导设计一种优化的波形，但是可以用于比较各种波形分辨力性能的优劣。这里主要以 TTFM 信号为例。

图 11 为 TTFM 信号模糊度图(TTFM 脉宽为 0.0625s，由三个调频脉冲串组成，子脉冲个数分别为 21、35、15)，从图中可以看出此信号具有很好

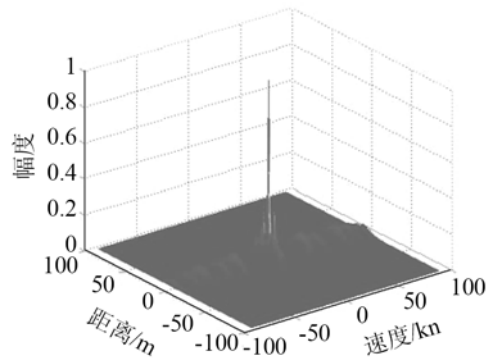


图 11 TTFM 信号模糊度图  
Fig.11 Ambiguity surface of TTFM pulse

的多普勒分辨力和距离分辨力。

## 4 结 论

本文通过对尾流自导鱼雷弹道模型进行分析,给出鱼雷蛇形穿越舰船尾流时相对于声呐的位置参数,计算出目标回波的多普勒频移,从而对尾流自导鱼雷检测背景进行分析。研究表明对于探测尾流自导鱼雷的主动声呐来说,当鱼雷速度小于2倍平台速度时,目标多普勒较小且不稳定,仅仅依靠多普勒滤波难以完全避开混响干扰并实现稳定探测。因此本文采用宽带梳状谱信号与CW信号组合来探测尾流自导鱼雷。通过对几种波形的抗混响性能和分辨力进行仿真分析对比,采用TTFM信号与CW信号组合是一种较为理想的选择形式。

### 参 考 文 献

- [1] van IJsselmuide S P, Beerens S P, Doisy Y, et al. New sonar waveforms for active torpedo warning using an LFAS system[C]// UDT'03, The Netherlands.
- [2] 王宏, 韩明连, 陆达人. 舰船声尾流自导鱼雷及其防御技术[J]. 声学技术, 2007, 26(2): 193-198.  
WANG Hong, HAN Minglian, LU Daren. Ship wake guided torpedo and the defence technique[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(2): 193-198.
- [3] 易红, 何辰, 陈春玉. 对抗尾流自导鱼雷的防御技术[J]. 鱼雷技术, 2007, 15(4): 6-10.  
YI Hong, HE Chen, CHEN Chunyu. Defense technologies against wake homing torpedo[J]. Torpedo Technology, 2007, 15(4): 6-10.
- [4] 苏颖, 康凤举. 水下航行器反舰尾流自导弹道设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1541-1547.  
SU Ying, KANG Fengju. Design and simulation for anti-warship wake guidance trajectory of underwater vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(11): 1541-1547.
- [5] 李本昌, 刘振峰, 海宽. 尾流自导鱼雷及其射击控制的关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(增刊): 90-92.  
LI Benchang, LIU Zhenfeng, HAI Kuan. The wake homing torpedo and the critical firing and control critical[J]. Fire Control & Command Control, 2002, 27(suppl.): 90-92.
- [6] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.  
YAN Weisheng. Torpedo voyage dynam[M]. Xi'an: Publishing Company of NPU, 2005: 78-181.
- [7] 杨丽, 张明敏, 刘丹丹. 基于多普勒频移的双基地声呐目标速度测量[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2622-2625.  
YANG Li, ZHANG Mingmin, LIU Dandan. Target speed vector estimation based on bistatic Doppler shift[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 2622-2625.
- [8] 姚东明, 蔡志明. 主动声呐梳状谱信号研究[J]. 信号处理, 2006, 22(2): 256-259.  
YAO Dongming, CAI Zhiming. Research on comb waveforms for active sonar[J]. Signal Processing, 2006, 22(2): 256-259.