

本舰机动左右舷分辨方法研究

何心怡^{1†} 张春华² 张 驰³ 李启虎²

(1 海军装备研究院 北京 100073)

(2 中国科学院声学研究所 北京 100080)

(3 海军鱼雷工程办公室 西安 710075)

摘要 针对传统单根线列阵的左右舷分辨问题, 经过深入分析, 给出了本舰机动左右舷分辨方法中的一些影响因素, 并对机动角度和滞后时间得出了定量结论。文中研究的内容对传统拖曳线列阵声纳的左右舷分辨和战术使用具有参考价值。

关键词 本舰机动, 单根线列阵, 左右舷分辨

Study on the port/starboard discrimination by mother ship maneuverability

HE Xin-Yi¹ ZHANG Chun-Hua² ZHANG Chi³ LI Qi-Hu²

(1 Naval Academy of Armament, Beijing 100073)

(2 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(3 Naval Torpedo Engineering Office, Xi'an 710075)

Abstract Aimed at the port/starboard discrimination problem of the traditional single-line array, this paper mentioned some relative factors of the port/starboard discrimination method of mother ship maneuverability, and draws quantitative conclusions about the maneuvering angle and the time lag. This paper may be importance to the port/starboard discrimination and its tactics for the traditional towed linear array sonar.

Key words Mother ship maneuverability, Single-line array, Port/starboard discrimination

2005-06-15 收稿; 2006-05-19 定稿

作者简介: 何心怡 (1976-), 福建建瓯人, 博士, 工程师, 研究方向: 水中兵器论证与研究、水声信号处理、声纳与反潜战仿真。

张春华 (1962-), 男, 研究员, 博士, 博士生导师。张驰 (1977-), 男, 工程师, 学士。李启虎 (1939-), 男, 中国科学院院士, 博士生导师。

† 通讯联系人 Email: hxyisdragon@sina.com

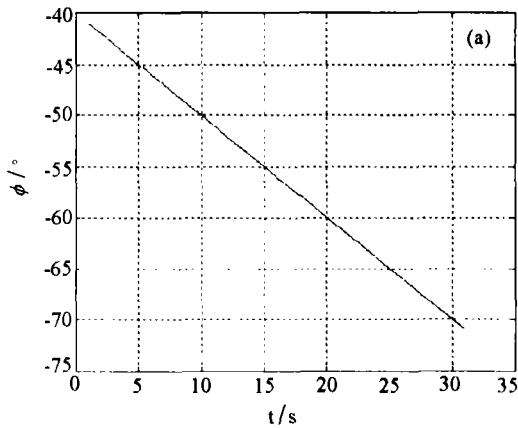
1 引言

拖曳线列阵声纳是现代声纳的重要发展方向之一, 其中, 相当多的拖曳线列阵声纳是采用传统的单根线列阵作为基阵, 以被动方式警戒远距离的水下目标, 如广泛装备于外军多型巡洋舰、驱逐舰的 H/SQR-19A 拖曳线列阵声纳。而左右舷模糊问题是传统单根线列阵的主要缺点之一, 传统单根线列阵通常以本舰机动的方法解决左右舷模糊问题, 但有关本舰机动左右舷分辨方法的定性和定量的分析却鲜见报道。有鉴于此, 本文深入分析了本舰机动左右舷分辨方法, 给出了它的具体实施方案以及机动角度和滞后时间的定量结论, 并且指出该方法是无法有效完成拖曳线列阵声纳的鱼雷报警功能。文中的研究内容对传统拖曳线列阵的左右舷分辨和战术使用具有参考价值。

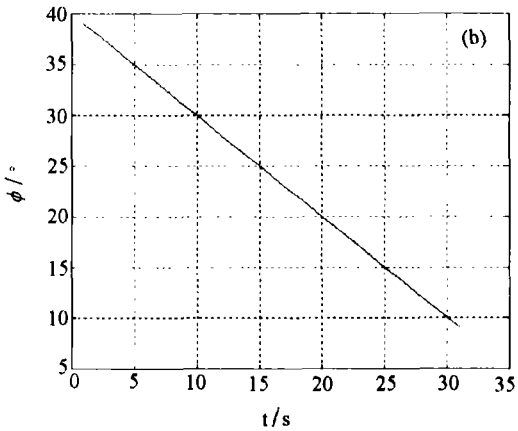
2 本舰机动左右舷分辨方法的实施方案

如果目标出现在左(右)舷 ϕ , 由于传统的单根线列阵的轴向对称性, 那么在右(左)舷 ϕ 处也将出现一个等强度的镜像源, 这就是传统拖曳线列阵声纳的左右舷模糊。经过分析, 本舰机动左右舷分辨方法可以这样实现: 首先, 确保拖曳线列阵声纳发现并跟踪上目标; 其次, 本舰机动, 朝左(右)舷方向转弯 $\Delta\phi$ 角度; 最后, 根据机动后目标舷角的变化趋势进行判断: 如果目标舷角变小, 变为 $\phi - \Delta\phi$, 则目标在左(右)舷; 如果目标舷角变大, 变为 $\phi + \Delta\phi$, 则目标在右(左)舷。

仿真场景: 拖曳线列阵航向 30° , 以 15kn 的速度拖曳航行; 远场目标航速 8kn , 航向 210° , 舷角为 40° 。发现目标后, 拖船以 $1^\circ/\text{s}$ 的转弯速率向右舷改变航向, 假定拖曳线列阵声纳的每次测量都可获得目标的精确方位, 那么目标分别位于左舷和右舷时的目标舷角变化趋势分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。



(a) 目标位于左舷时



(b) 目标位于右舷时

图 1 目标位于左舷或右舷时目标舷角的变化趋势

3 本舰机动左右舷分辨方法的定量分析

3.1 影响本舰机动左右舷分辨方法的因素

对上述本舰机动左右舷分辨方法, 我们认为, 有两个方面应深入分析: 一是本舰机动应该机动多大的角度; 二是本舰机动左右舷分辨方法的实时性。

在本舰机动过程中, 拖曳线列阵声纳并不是在每次测量中都可获得目标的精确舷角, 目标舷角的测量值 $\hat{\phi}$ 与目标的真实舷角、目标的信噪比和拖曳线列阵的阵形等因素有关, 可将测量出的目标舷角 $\hat{\phi}$ 的标准偏差 $\sigma_{\hat{\phi}}$ 表示为:

$$\sigma_{\hat{\phi}} = \text{Function}\{\phi, SNR, a_i\} \quad (1)$$

式中： ϕ 是目标的真实舷角， SNR 是目标的信噪比， a_i 表示拖曳线列阵的实际阵形。

(1) 考虑目标真实舷角对目标舷角估计的标准偏差 $\sigma_{\hat{\phi}}$ 的影响。当 $L \gg \lambda$ 时 (L 是线列阵的声学孔径长度， λ 是接收信号的波长)，线列阵的主瓣宽度 BW 可近似表示为：

$$BW \approx \left| \frac{0.88\lambda}{L} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \right| = \left| \frac{0.88\lambda}{L} \cdot \frac{1}{\sin \phi} \right| \quad (2)$$

上式中 α 表示目标与线列阵法线的夹角，可知：在相同信噪比下，目标越靠近线列阵的正横方向，线列阵的主瓣宽度 BW 越小，即线列阵对目标的方位估计精度越高，也就是 $\sigma_{\hat{\phi}}$ 越小。

(2) 其它条件相同时，信噪比 SNR 越大，则 $\sigma_{\hat{\phi}}$ 越小。

(3) 拖曳线列阵的阵形畸变增大了 $\sigma_{\hat{\phi}}$ 。

(1) 和 (2) 两点，也就是目标的真实舷角和信噪比对方位估计精度的影响，可由拖曳线列阵声纳的测向误差 $\Delta\phi_1$ 表示，可以认为：无论目标的信噪比是多少，只要目标的信噪比大于检测所需的信噪比门限，那么目标的测向误差将不超过 $\Delta\phi_1$ ，这是由声纳系统本身所决定的。

经过以上分析可知，阵形畸变是影响本舰机动左右舷分辨方法的关键因素。可将本舰机动过程分为两个阶段：一是基阵未稳定阶段，即本舰仍处于机动中或机动后但拖线阵的基阵还未稳定时，此时基阵（线列阵）存在阵形畸变；二是基阵稳定阶段，即本舰机动完成，并且基阵也恢复到机动前的未畸变状态。在基阵稳定阶段，不存在因阵形畸变带来的额外的方位估计误差。因此，下一小节将重点分析在基阵未稳定阶段，即存在阵形畸变时，对目标方位估计的影响。

3.2 阵形畸变对本舰机动左右舷分辨方法的影响分析

传统的单根线列阵信号处理通常有以下三

个假设：(1) 线列阵是由无指向性的水听器构成的直线阵，并且所有水听器位于同一水平面；(2) 目标相对于线列阵来说是呈远场关系，并且以平面波传播；(3) 在积分时间内，远场目标相对于线列阵来说是固定的。

为简化分析，假设以 $h(t)$ 表示拖船的航向， $h(t)$ 的反向延长线为 x 轴，线列阵的轴线在 x 轴上，以阵形未畸变时离拖船最近的水听器位置为坐标原点 O ， xoy 平面是包含线列阵的水平面。线列阵中水听器数目为 M ，依次编号为 $(1, 2, \dots, M-1, M)$ ，无畸变情况下相邻两个水听器的间距为 d 。那么用 a_i 表示各水听器的真实位置，用 $\hat{a}_i = ((i-1) \cdot d, 0)$ 表示无畸变时的水听器位置。

在线列阵的拖曳过程中，由于拖船的横向运动、海流、流体动力等方面影响，阵形畸变是无时不在的，只是程度的差别。经过分析，将本舰机动时线列阵的阵形畸变归纳为以下模型：在拖船的转弯过程中，产生了相对于阵列尺寸的大直径转弯机动，此时阵形畸变成圆弧阵^[1]。

在直角坐标系中画出这种阵列形状，如图 2 所示，舷角 ϕ 如图中所示，定义为 x 轴的负向与入射信号方向的夹角，也可称之为水平方

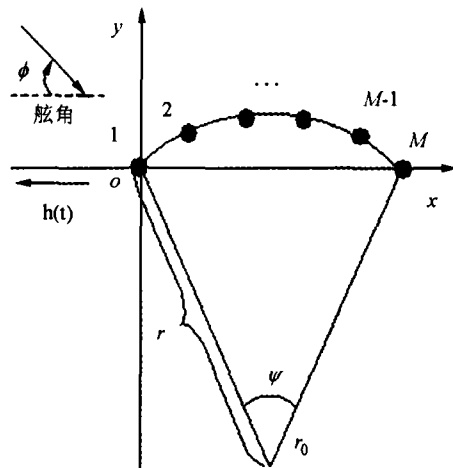


图 2 本舰机动过程中，线列阵畸变成圆弧阵示意图

位角，其中，顺时针为正，代表右舷舷角；逆时针为负，代表左舷舷角。

图 2 中线列阵的各水听器均匀分布在张角为 ψ (单位为弧度), 长为 $L = (M - 1) \cdot d$ 的圆弧上, 则圆弧半径为 $r = L/\psi$ 。图中各水听器位置可表示为:

$a_i =$

$$\begin{pmatrix} 2r \sin \left[\frac{i-1}{2(M-1)} \psi \right] \cos \left[\frac{\psi}{2} - \frac{i-1}{2(M-1)} \psi \right] \\ 2r \sin \left[\frac{i-1}{2(M-1)} \psi \right] \sin \left[\frac{\psi}{2} - \frac{i-1}{2(M-1)} \psi \right] \end{pmatrix} \quad (3)$$

Brian G.Ferguson 经过理论分析和海试实验得出结论 [2]: 如果拖曳线列阵声纳采用传统波束形成技术, 当拖船在直线航行且阵形扰动较小时, 则拖曳线列阵是直线阵的假设成立; 但当拖船机动时 (指转弯), 阵形畸变是比较大的, 则必须要估计阵形, 根据阵列形状修正波束形成。因此, 一般情况下, 拖船在直线航行时, 可以假设阵形畸变足够小, 即认为拖线阵没有畸变, 正如本节开始时提出的假设 1, 此时拖曳线列阵声纳是根据无畸变的阵形进行波束形成。

假设只存在一个目标, 无阵形畸变时第 i 路水听器信号为 $s(t + \tau_i(\phi))$, 其中, $\tau_i(\phi)$ 是第 i 个水听器相对于参考点的时延差。若存在阵形畸变, 那么第 i 路水听器的实际接收信号为 $s(t + \tau_i(\phi) + \Delta\tau_i)$, 则拖曳线列阵在 ϕ 方向的波束主瓣输出功率为 [3]:

$$P = E \left\{ \left[\sum_{i=1}^M s(t + \Delta\tau_i) \right]^2 \right\} \quad (4)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 表示求期望操作。那么无阵形畸变时, 即 $\Delta\tau_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 时, 则:

$$P = M^2 \sigma_s^2 \quad (5)$$

式中 σ_s^2 为入射信号的功率。

而存在阵形畸变时, $\Delta\tau_i$ 不全为零, 此时波束主瓣输出功率变为:

$$P = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M R_s(\Delta\tau_i - \Delta\tau_j) \quad (6)$$

拖曳线列阵通常工作在较低的频率, 所以 $\Delta\tau_i$ 与信号的相关半径相比通常是较小的, 可以把 $R_s(\tau)$ 在零点附近展开, 即:

$$R_s(\tau) \approx \left[1 - \frac{1}{2}(\alpha\tau)^2 \right] \sigma_s^2 \quad (7)$$

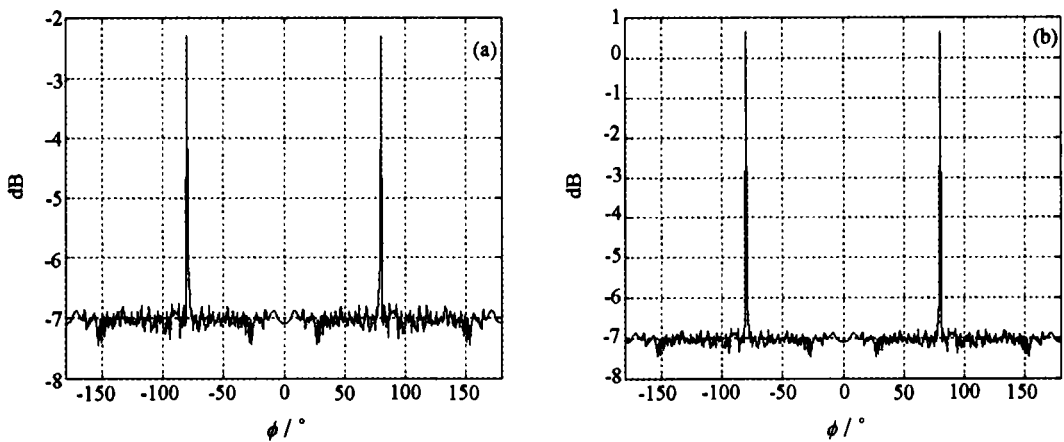
这里 α 是一个刻画 $R_s(\tau)$ 形状的参数, 于是 (6) 式可写成:

$$P \approx M^2 \sigma_s^2 - \frac{1}{2} \sigma_s^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [\alpha(\Delta\tau_i - \Delta\tau_j)]^2 \quad (8)$$

由上式可见, 阵形畸变引起了波束主瓣输出功率的下降。

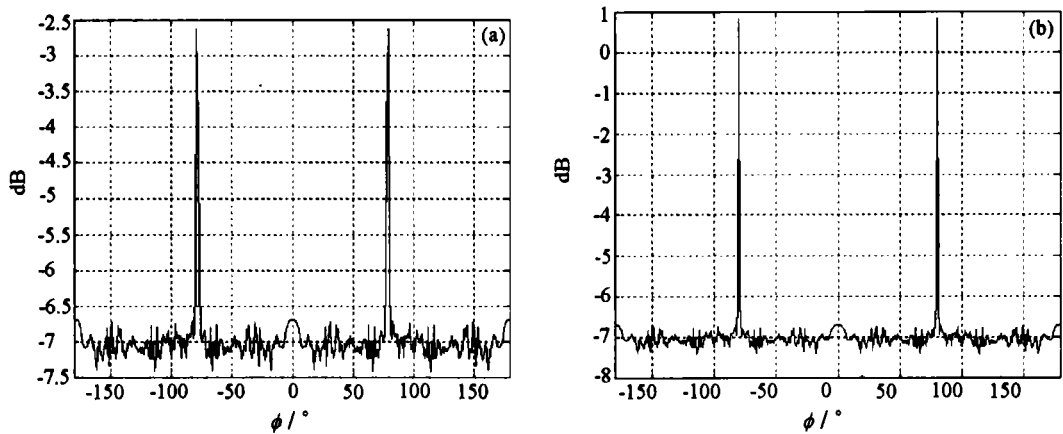
在本舰机动过程中, 如果拖曳线列阵声纳还是按照未畸变时的原始阵形进行波束形成, 即根据均匀直线阵列计算线列阵的输出功率, 那么对方位估计精度是有影响的。为考查阵形畸变对方位估计精度的影响, 做如下的仿真实验: 假定某型拖曳线列阵声纳的拖缆和隔振段、声阵段、仪表段、零浮力缆等组成的拖线阵湿端部分总长为 1300m, 其中声阵段由 160 个水听器组成, 相邻两个水听器间距为 1m, 对应的接收信号中心频率为 750Hz, 那么声阵段总长为 159m。仅以主动工作方式为例进行说明, 其结果可扩展到被动工作方式。假定拖曳线列阵声纳发射 750Hz 单频信号, 为判断目标所处的左右舷, 进行本舰机动, 转弯角度分别为 10° 、 20° 和 30° ; 机动后在右舷 80° 有一目标回波, 回波的信噪比为 -15dB ; 假设本舰机动足够快, 当本舰机动完成时, 而基阵还没有稳定下来, 此时阵形呈圆弧状, 拖线阵湿端部分所呈的张角等于本舰转弯的角度 (是整个湿端部分对应的张角), 由此可计算出当转弯角度分别为 10° 、 20° 和 30° 时, 畸变阵列 (畸变成圆弧阵) 的波束输出和无畸变阵列的波束输出分别如图 3~ 图 5 系列所示。

分析对比图 3~ 图 5, 为便于分析对比总结, 将它们的条件和结果制成表格, 如表 1 所示。



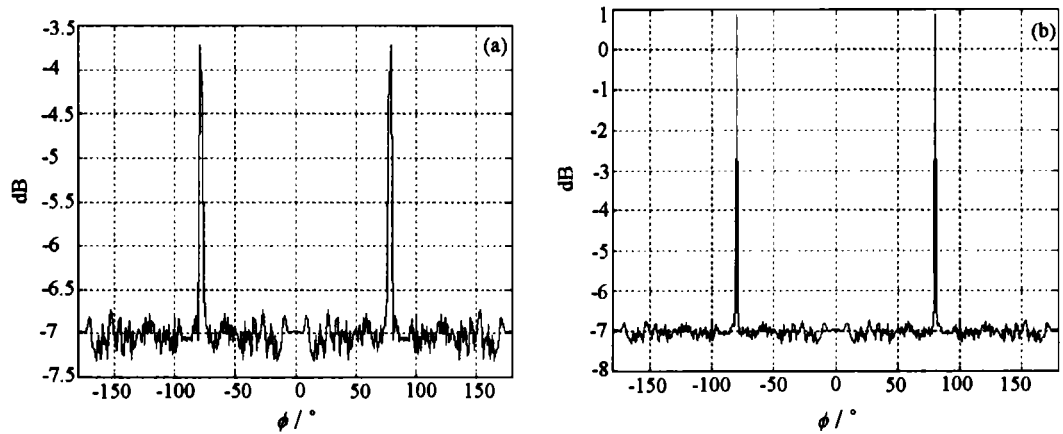
(a) 转弯角度为 10° 时, 畸变阵列的波束输出 (b) 无畸变阵列的波束输出

图 3



(a) 转弯角度为 20° 时, 畸变阵列的波束输出 (b) 无畸变阵列的波束输出

图 4



(a) 转弯角度为 30° 时, 畸变阵列的波束输出 (b) 无畸变阵列的波束输出

图 5

表 1 仿真条件与结果

本舰转弯的 角度 (°)	转弯 半径 (m)	声阵段对应的 张角 (°)	额外的方位 估计误差 (°)	阵形畸变时与无畸变时 的增益损失 (dB)
10	7448.5	1.2231	0.6	2.9
20	3724.2	2.4462	1.2	3.4
30	2482.8	3.6692	2.5	4.6

能够总结出: 在基阵未稳定阶段, 由于阵形畸变, 将造成波束失真, 表现在以下几方面:

- (1) 增大了目标方位估计的误差 (如表 1 所列的额外方位估计误差);
- (2) 基阵增益有所损失;
- (3) 波束主瓣变宽;
- (4) 有可能会 出现高副瓣;

3.3 阵形畸变对本舰机动左右舷分辨方法的定量影响

基阵未稳定阶段的波束失真会带来以下几种后果: 一是在本舰机动前 (此时基阵无畸变) 恰好能检测到目标, 而机动后, 在基阵未稳定阶段, 阵形畸变导致基阵增益损失, 造成目标丢失, 更谈不上通过目标的舷角变化趋势判断出目标所处的左右舷; 二是假设在基阵未稳定阶段还能够检测到目标, 但由于目标方位估计误差增大, 造成判断出的目标方位变化趋势不可靠, 从而使得左右舷分辨的结果也不可靠。综上所述, 如果以本舰机动方法进行左右舷分辨, 那么在基阵未稳定阶段是难以可靠地分辨出目标所处的左右舷; 必须要等到本舰机动完成后, 且进入基阵稳定阶段才能有效地判断出目标所处的左右舷, 这样就存在着一个滞后时间。因此, 采用传统的单根线列阵, 以本舰机动的方法进行左右舷分辨, 决定了拖曳线列阵声纳无法在检测到目标的同时判断出目标所处的左右舷; 在发现目标后, 必须要经过一定滞后时间才能判断出目标所处的左右舷, 滞后时间 Δt 的长短取决于本舰机动的时间 t_1 和本舰机动后基阵的稳定时间 t_2 , 可能还取决于所需要的声纳的时间-方位历程图的刷新次数所带来的额外时间 t_3 。之所以这样说是因为: 声

纳的方位-幅度显示图刷新速率较快, 有时仅依靠声纳的方位-幅度显示图来判断目标舷角的变化趋势, 可靠性会比依靠时间-方位历程图要低 (特别是本舰转弯的角度不太大时); 但声纳的时间-方位历程图刷新速率比较低, 刷新时间-方位历程图中的一行数据, 大约需要 6~7s; 比方说需要刷新五行数据后才能判断出目标所处的左右舷, 那么所需的额外时间 t_3 为 30~35s, 也就是说在本舰机动完成后, 且进入基阵稳定阶段后, 还需要 30~35s 的时间通过声纳的时间-方位历程图来判断目标所处的左右舷, 则总的滞后时间为:

$$\Delta t = t_1 + t_2 + t_3 \tag{9}$$

参考文献 [4] 中曾提到: 本舰机动后, 对于一艘 5000 吨级的驱逐舰, 基阵的稳定时间至少为 5min, 那么总的滞后时间 Δt 至少要大于 5min。由于滞后时间的存在, 使得采用传统的单根线列阵的拖曳线列阵声纳无法实时完成对目标的左右舷分辨功能。滞后时间对处于远程被动警戒状态的拖曳线列阵声纳也许还可以接受, 但若存在鱼雷攻击时, 这种滞后时间是无法容忍的。因为鱼雷是一种高速的水中兵器, 一般鱼雷航速普遍都在 50kn 左右 (也就是 25m/s), 5min 内鱼雷航行的距离将超过 7700m, 5min 后即使判断出鱼雷所处的左右舷, 也已经是措手不及了; 更何况在中近距离时, 鱼雷的目标舷角变化快, 采用本舰机动方法难以实时有效地分辨出鱼雷所处的左右舷, 无法有效完成鱼雷报警功能。

采用本舰机动方法分辨左右舷时, 本舰航向角的变化角度至少要大于声纳系统的测向误差 $\Delta\phi_1$ 。此外, 如果想在基阵未稳定阶段判断

出目标舷角的变化趋势(假设在基阵未稳定阶段,拖线阵声纳还能够检测到目标),由于阵形畸变带来的额外的方位估计误差为 $\Delta\phi_2$,为确保左右舷分辨的可靠性,那么本舰航向角的变化角度,也就是转弯角度 $\Delta\phi$ 必须要满足:

$$\Delta\phi \geq \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 \quad (10)$$

4 结论

经过分析,可得出本舰机动左右舷分辨方法的几个要点:

(1) 本舰机动方法是在发现并跟踪上目标后,本舰转弯,通过监视目标舷角的变化趋势判断目标所处的左右舷:如果目标舷角变小,则目标在本舰转向的这一边;如果目标舷角变大,则目标在本舰转向的另一边。

(2) 为可靠地判断出目标所处的左右舷,则机动角度要满足: $\Delta\phi \geq \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2$, 其中: $\Delta\phi_1$ 是拖曳线列阵声纳本身的测向误差, $\Delta\phi_2$

是阵形畸变引起的额外的方位估计误差。

(3) 本舰机动方法不能实时完成左右舷分辨功能,在检测到目标后,要经过滞后时间 $\Delta t = t_1 + t_2 (+t_3)$ 后才能可靠地判断出目标所处的左右舷,其中: t_1 是本舰机动所需要的时间, t_2 是本舰机动后基阵的稳定时间, t_3 是满足时间-方位历程图的刷新次数的时间。

(4) 由于本舰机动方法不能实时分辨左右舷,因此该方法是无法有效完成拖曳线列阵声纳的鱼雷报警功能。

参 考 文 献

- 1 何心怡,蒋兴舟,李启虎等. 声学学报, 2004, 29(5):409~413.
- 2 Brian G Ferguson. *IEEE Journal Oceanic Engineering*, 1993, 18(4):565~571.
- 3 李启虎. 数字式声纳设计原理. 第1版. 合肥:安徽教育出版社, 2003: 426~442.
- 4 杜选民. 水面舰鱼雷报警声纳技术研究: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999.