

# 接收基阵垂直指向性引起的附加声传播损失

宋志杰 韩梅 吴小勇 赵海彬

(海军潜艇学院 青岛 266071)

李奎满

(37033 部队 大连 166041)

2000 年 11 月 6 日收到

**摘要** 具有垂直方向指向性的接收基阵对入射声波有方向加权效应。本文在该类基阵声纳方程的基础上, 导出了附加声传播损失的具体表式, 讨论了深度-声速梯度对附加传播损失的影响。最后给出负声速梯度条件下的算例, 计算结果与海上试验吻合较好。

**关键词** 声传播, 指向性, 声纳方程, 传播损失

## Additional sound transmission loss resulting from directivity in the vertical plane of a receptive array

SONG Zhijie HAN Mei WU Xiaoyong ZHAO Haibin

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266071)

LI Kuiman

(Troop 37033, Dalian 166041)

**Abstract** The receptive array with directivity in the vertical plane has weight effect on the incident wave. In this paper the formula of additional sound transmission loss is derived, and the sonar equation for the array is accordingly modeled. The effect of depth-sound speed profile on the additional sound transmission loss is discussed. An example with a negative gradient depth profile of sound speed is presented, where the calculated values are shown to be in agreement with the experimental data.

**Key words** Sound propagation, Directivity, Sonar equation, Transmission loss

## 1 引言

一类舰壳声纳基阵(以下称基阵)在垂直方向上有一定的指向性。声传播的多途效应,使声纳波束不可能同时指向每一束入射波的方

向,因而波束对不同入射方向声波的加权系数不同,产生了“附加声传播损失”。本文在给出这类基阵声纳方程的基础上,进而探讨深度-声速梯度对基阵输出端“附加声传播损失”的影响。

## 2 附加声传播损失

### 2.1 声纳方程

工程上用于估计理想水文条件下声纳探测距离的被动声纳方程为

$$SL - TL - (NL - DI) = DT \quad (1)$$

其中,  $NL$  为背景噪声级,  $DI$  为换能器指向性指数,  $DT$  为检测阈,  $SL$  为声纳工作带宽内的目标辐射噪声源级,  $TL$  为声纳探测距离相应的声传播损失。通常,  $DI$ 、 $DT$  为声纳设计参数,  $NL$  为可测量, 在给定目标声源级  $SL$  的情况下, 根据声传播损失由 (1) 式估计声纳探测距离。

方程 (1) 应用于实际水文条件时, 指向性指数  $DI$  的适用条件<sup>[1]</sup> (平面波入射、声纳波束指向对准声波入射方向和干扰噪声各向同性) 受到限制。按现代声纳探测距离的尺度估计, 平面波入射的条件是可以近似满足的; 干扰噪声也可以近似认为是各向同性的; 而在声纳有垂直方向指向性的条件下, 声波入射方向和声纳波束指向一致的条件并不能总是成立。

当深度 - 声速梯度较大时, 声源发出的声线将发生较大的弯曲。声纳垂直方向上的波束难以对准入射声波, 也不可能对多途到达的声波全部对准。显然,  $DI$  要求的条件不能完全满足, 声纳方程的形式需要做适应性改进。

令基阵输入端的信号功率与噪声功率分别为  $s(\vartheta, \varphi)$  和  $n(\vartheta, \varphi)$ , 信号  $s(\vartheta, \varphi)$  是完全相干的,  $\theta$  为入射声波与水平面的夹角,  $\varphi$  为入射声波与水平波束指向的夹角, 则在基阵波束形成器输出端的信噪比为

$$10 \log(s/n)_{out} = \left[ \int_{4\pi} s(\vartheta, \varphi) d\Omega \right. \\ \left. / \int_{4\pi} n(\vartheta, \varphi) d\Omega \right] + AG \quad (2)$$

其中  $AG$  为阵增益。令基阵的指向性函数为  $b(\vartheta, \varphi)$ ,  $AG$  可以表示为

$$AG =$$

$$10 \log \frac{\int_{4\pi} s(\vartheta, \varphi) b(\vartheta, \varphi) d\Omega / \int_{4\pi} n(\vartheta, \varphi) b(\vartheta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} s(\vartheta, \varphi) d\Omega / \int_{4\pi} n(\vartheta, \varphi) d\Omega} \quad (3)$$

将 (3) 代入 (2) 得

$$10 \log(s/n)_{out} = 10 \log \int_{4\pi} s(\vartheta, \varphi) b(\vartheta, \varphi) d\Omega \\ - 10 \log \int_{4\pi} n(\vartheta, \varphi) b(\vartheta, \varphi) d\Omega \quad (4)$$

为方便讨论深度方向声速梯度对基阵探测的影响, 假定信号在水平方向是单向的, 且与水平指向性函数方向一致, 即对信号水平入射方向  $\varphi_0$  有:  $b(\vartheta, \varphi) = b_{\parallel}(\varphi) b_{\perp}(\vartheta)$ , 且  $b_{\parallel}(\varphi_0) = 1$ ; 噪声是各向同性的, 即  $n(\vartheta, \varphi) = \mathbf{n}$ 。由 (2) 式可得

$$10 \log(s/n)_{out} = 10 \log \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\vartheta) b_{\perp}(\vartheta) \\ \cdot \cos \vartheta d\vartheta - \left[ NL - 10 \log \right. \\ \left. \cdot (4\pi n / \int_{4\pi} b(\vartheta, \varphi) d\Omega) \right] \quad (5)$$

其中,  $NL = 10 \log(4\pi n)$ , 为无指向性水听器的干扰噪声;  $S(\vartheta) = \int_0^{2\pi} s(\vartheta, \varphi) b_{\parallel}(\varphi) d\varphi$ 。

当基阵波束形成器输出端的信噪比  $10 \log(s/n)_{out}$  等于声纳接收机的检测阈  $DT$  时, 把相关参数以分贝数表示, 就可以得到声纳方程的表式为

$$10 \log \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\vartheta) b_{\perp}(\vartheta) \cos(\vartheta) d\vartheta - \left[ NL \right. \\ \left. - 10 \log (4\pi n / \int_{4\pi} b(\vartheta, \varphi) d\Omega) \right] = DT \quad (6)$$

(6) 式为接收声纳有深度方向指向性时, 声纳方程的表示形式。该式的第一项表示同一时刻从不同方向 (多途效应) 到达基阵的

声波, 在基阵输出端输出时, 要被深度指向性函数加权, 基阵对不同方向入射的声波响应不同; 第二项的意义和(1)式中  $[NL - DI]$  项基本相同, 表示各向同性的噪声受到指向性函数的抑制而降低。显然, 改进后的声纳方程(6)式考虑了基阵对多途声波的接收, 适用于较为复杂的水文条件, 比(1)式有更宽的适用范围。

## 2.2 附加声传播损失

令

$$SL = 10 \log I_0$$

$$TL_a = 10 \log [I_0 / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\vartheta) b_{\perp}(\vartheta) \cos(\vartheta) d\vartheta]$$

则(6)式可写为与(1)式相同的形式:

$$DT = SL - TL_a - \left[ NL - 10 \log \left( 4\pi n \int_{4\pi} b(\vartheta, \varphi) d\Omega \right) \right] \quad (7)$$

其中  $TL_a$  为基阵输出端的“声传播损失”, 而(1)式中的  $TL$  为无深度方向指向性水听器测量的声传播损失, 两者之差( $TL_a - TL$ )为深度指向性函数对入射声波加权引起的传播损失, 即为“附加声传播损失”。当声波入射方向与声纳指向性一致时, (7)式退化为(1)式,  $TL_a$  与  $TL$  有相同的数值。应当指出,

$$TL = 10 \log \left\{ \frac{4}{r} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \exp[-2\beta(\alpha_l)r] d\alpha_1}{S(\alpha_1)[D(z_1) + \sin^2 \alpha_1]^{1/2} S(\alpha_1)[D(z_2) + \sin^2 \alpha_2]^{1/2}} \right\} \quad (9)$$

其中,  $\beta(\alpha_l) = -[\ln |V_s(\alpha_s)| + \ln |V_b(\alpha_b)|] / S(\alpha_l)$ ,  $d(z) = 0.875 \left| \frac{1}{\pi f} \frac{dc(z)}{dz} \right|$ ,  $S(\alpha_l)$  为  $l$  号本征声线的跨度,  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $r$  分别为声源深度、接收深度和距离,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为本征声线在声源深度和接收深度上的掠角。

在基阵波束水平方向对准目标的条件下, (7)式中  $TL_a$  为

$$TL_a = 10 \log \left\{ \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2(n\pi d \sin \alpha_2 / \lambda)}{n^2 \sin^2(\pi d \sin \alpha_2 / \lambda)} \cdot \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \sin^2(n\pi d \sin_2 / \lambda)}{S(\alpha_1)[D(z_1) + \sin^2 \alpha_1]^{1/2}} \right\}$$

“附加声传播损失”是基阵接收指向性形成而花费的代价, 它不是环境因素直接产生的, 但与环境因素有关。

## 3 深度—声速分布对“附加声传播损失”的影响

按照(7), 声速梯度绝对值大时, 声线弯曲加大,  $TL_a$  增加, 反之,  $TL_a$  减小。为简洁计, 以典型的浅海负梯度声速分布为例分析深度—声速分布对“附加声传播损失”的影响, 其它分布类型可用相同方法分析。

$TL_a$  的表式较(1)式中增加了被积函数中的深度方向指向性函数因子  $b_{\perp}(\vartheta)$ 。在平滑平均<sup>[2-4]</sup>意义下,  $b_{\perp}(\vartheta)$  是深度方向性函数  $D(\vartheta)$  的平方。假定  $D(\vartheta)$  由等间隔线性输出直线阵形成, 其表式为<sup>[5]</sup>

$$D(\vartheta) = \frac{\sin(n\pi d \sin \vartheta / \lambda)}{n \sin(\pi d \sin \vartheta / \lambda)} \quad (8)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $n$  为阵元数,  $d$  为相邻阵元间距,  $\vartheta$  为入射声波的掠角。

利用平滑平均声场的表式, (1)式中  $TL$  为

$$\left\{ \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 \exp[-2\beta(\alpha_l)r] d\alpha_1}{S(\alpha_1)[D(z_2) + \sin^2 \alpha_2]^{1/2}} \right\} \quad (10)$$

在2000年4月的一次试验中, 利用深度方向波束角为  $30^\circ$  的基阵, 测量了不同接收深度(图1(b))和不同接收距离(图1(c))上的声传播损失, 声速分布如图1(a)所示, 海深75m, 声源深度9m, 图1(b)测量距离11km, 图1(c)接收深度30m, 接收频段为2.5-4kHz。利用(10)和(11)两式计算的结果(中心频率3.15kHz)也在图1中给出, 理论计算与试验结果基本一致。

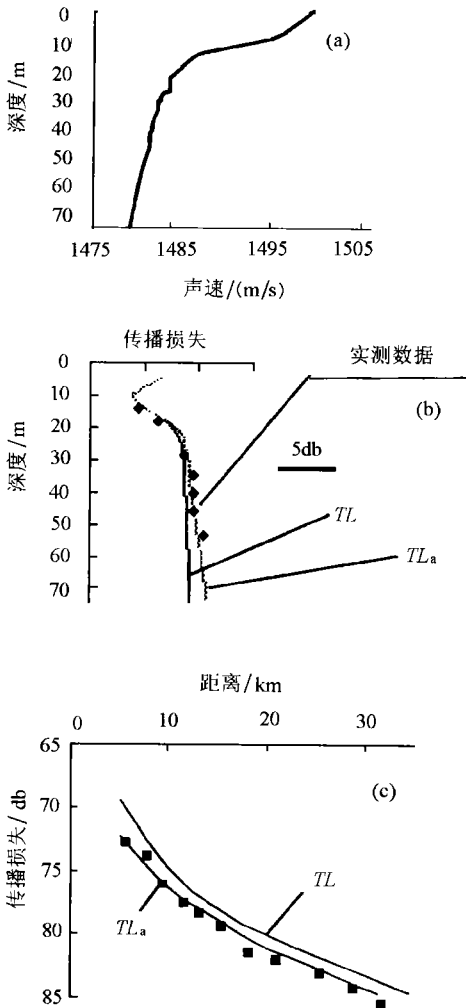


图1 传播损失理论计算与实测数据对比

从图1可以看出：(1)附加传播损失随着接收与声源深度差的增加而增加，这是由声

线掠角随深度差增加而引起的。(2)在较近距离处，附加传播损失较大；随着接收距离增加，附加传播损失逐渐减小至一确定值。这和用 Snell 定律的分析结果一致。

## 4 讨论

(1)附加声传播损失与声速梯度、声源和接收的相对深度、基阵深度方向指向性和接收距离等因素有关，在较远距离上几乎不随距离变化。

(2)本文给出的有深度指向性声纳的声纳方程，在应用上有更宽的适用范围，尤其声速梯度值较大时，(1)式会引起较大误差，需使用(7)式。

(3)当使用有深度指向性基阵测量声传播损失时，需修正附加声传播损失的影响，才能真正反映水声环境的声传播特性。

(4)实际使用基阵探测目标时，沿深度方向缓慢转动波束，对准信号最强方向是重要的。它可以使附加声传播损失降至最低而有利于探测。这已经为海上实践所证实。

## 参 考 文 献

- 1 尤立克. 水声原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1991.
- 2 张仁和. 声学学报, 1979, 4(2): 102-108.
- 3 张仁和. 声学学报, 1981, 3(4): 535-545.
- 4 周坚力, 张仁和. 海洋学报, 1982, 4(3): 283-291.
- 5 王玉泉. 水声设备. 北京: 国防工业出版社, 1981.

(上接第 29 页)

- 16 Huber P E, Juergen, Jenne, et al. *Ultrasound in Med. & Biol.*, 1999, 25(9): 1451-1457.
- 17 Miller D, Bao S P, Morris J E. *Ultrasound in Med. & Biol.*, 1999, 25(1): 143-149.
- 18 Tachibana K, Uchidab T, Tamura K. *Cancer Letters*, 2000, (149): 189-194.
- 19 Gambihler S, Delius M. *Br.J.Cancer*, 1992, (66): 69-73.
- 20 Weiss N, Delius M, Gambihler S, et al. *Int.J.Cancer*, 1994, (58): 693-699.
- 21 Prat F, Sibille A, Luccioni C, et al. *Gastroenterology*, 1994, (106): 937-944.
- 22 Marin A, Muniruzzaman M D, Rapoport N. *Journal of Controlled Release*, 2001, (71): 239-249.
- 23 袁易全. 近代超声原理与应用. 南京: 南京大学出版社, 1996. 108-168.
- 24 丁志山, 沃兴德. 生物技术, 1996, 6(4): 41-43.
- 25 Zimmermann U, et al. *Biophys*, 1991, 14: 881-899.