

# 主动声纳方程和传播损失及混响级的定义<sup>\*</sup>

吴金荣<sup>†</sup> 张建兰 马力

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

**摘要** A. Ainslie 发表文章<sup>[1]</sup>指出传统定义的被动声纳方程严格应用起来与实际情况存在一定的偏差,某些情况下会带来严重的错误。该偏差需通过接收水听器与声源处介质的特征阻抗比来校正。主动声纳方程中存在同样的问题,其与实际情况的偏差需要用接收水听器与声源处的介质特征阻抗比的平方来校正。本文给出主动声纳方程中传播损失和混响级的重新定义,并且给出相应的两种主动声纳方程,两种方程都消除了这种不期望的特征阻抗比偏差。

**关键词** 传播损失,混响级,主动声纳方程

## The active sonar equation and the definitions of propagation loss and reverberation level

WU Jin-Rong ZHANG Jian-Lan MA Li

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

**Abstract** A. Ainslie<sup>[1]</sup> pointed out that a rigorous application of the traditional definition of passive sonar equation leads to the appearance of an extra factor which equals to the ratio of the characteristic impedance at the receiver to that at the source. This extra factor can lead to a non-negligible error in certain applications. The active sonar equation has the same behavior where this unwanted factor is square of the ratio of the sound impedance at the receiver to that at the source. New definitions of the propagation loss and the reverberation level are proposed here. Two alternatives to the traditional active sonar equations are suggested, both of which eliminate the unwanted impedance ratio.

**Key words** Propagation loss, Reverberation level, Active sonar equation

2004-03-19 收稿; 2005-01-31 定稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10474111)

作者简介: 吴金荣(1977-),男,江苏东台市人,中国科学院声学研究所 2002 级博士研究生,主要从事浅海混响建模研究。

张建兰(1971-),女,副研究员。马力(1968-),男,研究员,博士,博士生导师。

<sup>†</sup> 通讯联系人 Email: wujr521@tom.com

## 1 引言

声纳方程是将介质、目标和声纳设备的作用联结在一起的关系式,其主要目的是量化信号/噪声比,对于水声应用工程师来说,它是声纳设计和性能预报的有用工具。根据声纳主动应用形式和数据处理技术的不同,声纳方程可以采用不同的形式<sup>[2]</sup>。对于被动声纳,信噪比定义为到达声纳接收器的信号与背景噪声的强度比;对于主动声纳,信噪比就成了信号/混响比,即到达声纳接收器的信号与背景混响的强度比。应该指出,该强度并不是声信号的真实强度,而是等效平面波的强度。

传统的声纳方程采用了文献<sup>[2]</sup>中的定义,文献<sup>[3]</sup>对<sup>[2]</sup>中的定义进行了补充。文献<sup>[4]</sup>则用声压平方代替等效平面波强度定义声纳方程。为了澄清传统声纳方程的定义或重新定义声纳方程,前后发表了许多文章<sup>[5~7]</sup>,Morfe<sup>[8]</sup>的声学词典给出了一些声纳方程相关量的严格定义。文献<sup>[1]</sup>针对传统定义的被动声纳方程严格应用起来与实际情况存在一定偏差这一问题作了阐述,本文将探讨主动声纳方程中的这一问题并且通过相应的定义调整试图解决这个问题。

为了说明问题,我们采用了稳态(即单位时间进入接收设备的能量恒定)的连续点源信号,且不考虑多普勒频移,这种方法可以推广到指向性声源、水听器阵等复杂情况。下面我们依次介绍传统主动声纳方程、两种我们重新定义的传播损失、混响级和新定义的主动声纳方程,最后给出结论。为了直观起见,文中采用线性尺度,而不用对数尺度。

## 2 传统主动声纳方程

在主动声纳探测系统中,信号混响比可以写成信号强度 $I_{SS}^{eq}$ 与混响强度 $I_R^{eq}$ 的比: $srr \equiv I_{SS}^{eq}/I_R^{eq}$ ,其中下标 $SS$ 和 $R$ 分别代表主动探测系统接收的信号与混响,上标 $eq$ 表明这不是真

正的声强度,而是一个等效平面波强度,定义为在同一介质中传播的与真实声场有相同均方根声压的平面波。这种等效平面波强度英文简写为EPWI(Equivalent Plane Wave Intensity)。

在传统主动声纳定义中,信号等效强度与声源级 $sl$ 、传播损失 $pl$ 、混响级 $rl$ 和目标强度 $ts$ 有关。这里 $sl$ 是离声源一定距离(一般为1m)处的声强 $I_0$ 和参考强度 $I_{ref}$ (平面波的均方根声压 $p_{ref}$ 为 $1\mu Pa$ )的比

$$sl \equiv \frac{I_0}{I_{ref}} \quad (1)$$

传播损失 $pl$ 是声源强度与目标处信号的等效强度 $I_S^{eq}$ 之比

$$pl \equiv \frac{I_0}{I_S^{eq}} \quad (2)$$

目标强度 $ts$ 定义为离目标声学中心某一距离(1m)处,回声等效强度 $I_B^{eq}$ 与入射声等效强度 $I_S^{eq}$ 的比

$$ts \equiv \frac{I_B^{eq}}{I_S^{eq}} \quad (3)$$

混响级 $rl$ 则定义为混响等效强度 $I_R^{eq}$ 和参考声强度之比

$$rl \equiv \frac{I_R^{eq}}{I_{ref}} \quad (4)$$

因此信混比可表示为

$$srr = \frac{sl \cdot ts}{pl \cdot pl \cdot rl} \quad (5)$$

(5)式是主动声纳方程的线性形式。(1)~(4)式的定义已经被声纳设计人员和分析研究者使用了几十年。它们简单的形式使得工程计算非常方便,但是我们认为应予改进。

## 3 传播损失和混响级的重新定义

前节中的参考强度 $I_{ref}(r) = p_{ref}^2/Z(r)$ ,其中 $Z(r)$ 是在测量位置 $r$ 处的特征声阻抗,因此 $I_{ref}$ 是位置 $r$ 的函数。同样理由,其它等效强度也应是位置的函数,所以(5)式是一种近

似表达式，应改写为

$$srr = \frac{sl \cdot ts}{pl \cdot pl \cdot rl} \left[ \frac{Z(r)}{Z(r_0)} \right]^2 \quad (6)$$

其中  $r_0$  是声源的位置。这似乎是一个微小的差异，因为我们认为海水在不同位置的特征阻抗差别很小。然而，密度和声速都与温度、盐度和深度有关，海水中的温、盐、深变化万千，声纳位置和目标位置不同时，介质的特征阻抗常常会发生较大变化。例如：声源处的声速 1500m/s，密度为  $1\text{g/cm}^3$ ；而目标处的声速 1540m/s，密度仍为  $1\text{g/cm}^3$ 。这样方程的综合误差就会达到 0.23dB，当水中有气泡或其它介质特征阻抗异常变化的特殊情况时，(5) 式的误差将会更大。

由此可见，(2) 式的定义不是普遍适用的。当今文献中应用的  $pl$  定义为均方声压比

(MSP)，即

$$pl_{\text{MSP}} \equiv p_0^2 / \overline{p_S^2} \quad (7)$$

其中  $\overline{p_S^2}$  是离目标声学中心某一距离 (1m) 处测量的声压均方值， $p_0$  是离声源某一距离 (1m) 处测量的均方根声压值，它和  $I_0$  的关系为  $p_0 \equiv \sqrt{I_0 Z(r_0)}$ ，这就意味着 MSP 定义的  $pl$  和传统声纳方程定义的  $pl$  相差一个因子  $Z(r_0)/Z(r)$ ，这里用  $pl_{\text{EPWI}}$  和  $pl_{\text{MSP}}$  来区别它们

$$pl_{\text{EPWI}} \equiv \frac{I_0}{I_S^{eq}} = \frac{p_0^2/Z(r_0)}{p_S^2/Z(r)} = pl_{\text{MSP}} \frac{Z(r)}{Z(r_0)} \quad (8)$$

于是，相应的 MSP 混响级为离声源某一距离 (1m) 处测量的均方混响声压值

$$rl_{\text{MSP}} = \overline{p_R(r_0)^2} \quad (9)$$

其它各项的定义及其单位见表 1。

表 1 主动声纳方程中各项的定义与单位

声纳方程项	传统声纳方程 [2]		EPWI 声纳方程		MSP 声纳方程	
	定义	单位	定义	单位	定义	单位
声源级 $sl$	$\frac{I_0}{I_{ref}(r_0)}$	无	$\frac{W}{4\pi}$	$\text{Wsr}^{-1}$	$p_0^2 r_{ref}^2$	$\mu\text{Pa}^2\text{m}^2$
传播损失 $pl$	$\frac{I_0}{I_S^{eq}(r)}$	无	$\frac{W}{4\pi I_S^{eq}(r)}$	$\text{m}^2\text{sr}^{-1}$	$\frac{p_0^2 r_{ref}^2}{p_S(r)^2}$	$\text{m}^2$
混响级 $rl$	$\frac{I_R^{eq}(r_0)}{I_{ref}(r_0)}$	无	$I_R^{eq}(r_0)$	$\text{Wm}^{-2}$	$\overline{p_R(r_0)^2}$	$\mu\text{Pa}^2$
目标强度 $ts$	$\frac{I_B^{eq}(r)}{I_S^{eq}(r)}$	无	$\frac{I_B^{eq}(r)}{I_S^{eq}(r)}$	无	$\frac{\overline{p_B(r)^2}}{p_S(r)^2}$	无
信混比 $srr$	$\frac{I_{SS}^{eq}(r_0)}{I_R^{eq}(r_0)}$	无	$\frac{I_{SS}^{eq}(r_0)}{I_R^{eq}(r_0)}$	无	$\frac{\overline{p_{SS}(r_0)^2}}{p_R(r_0)^2}$	无

注： $r_0$  表示离声源某一参考距离的位置， $r$  则表示离目标某一参考距离的位置

## 4 两种新形式的主动声纳方程

传统主动声纳方程中出现的偏差和两种  $pl$  比的平方是一样的，等于  $[Z(r)/Z(r_0)]^2$ 。因此，如果用  $pl_{\text{MSP}}$  来代替 (5) 式中的  $pl_{\text{EPWI}}$ ，就不再需要纠正项了。另外，传统主动声纳方程改变形式后，也可以消除其固有的偏差。下面介绍这两种声纳方程，分别用 EPWI 项和 MSP 项给出。

### 4.1 EPWI 主动声纳方程

为了清楚地给出主动声纳方程的三维物理图像，并且和物理学其它分支的有关定义相一致，这里首先采用 Hall<sup>[7]</sup> 给出的声纳方程各项定义。Hall 指出 (1) 式中的 EPWI 声源级和单位立体角内的声功率是相等的，即对于功率为  $W$  的无指向性声源，声源级为  $sl_{\text{EPWI}} \equiv W/(4\pi)$ 。因此可以定义传播损失  $pl_{\text{EPWI}}$  为  $W/(4\pi I_S^{eq})$ ，其中  $I_S^{eq} = \overline{p_S^2}/Z(r)$  是离目标某一

距离单位面积上接收的信号强度; 定义混响级  $rl_{EPWI}$  为  $I_R^{cq}$ , 其中  $I_R^{cq} = \overline{p_R^2}/Z(r_0)$  是离声源某一距离单位面积上接收的混响信号强度; 其它项的定义见表 1。因此 EPWI 主动声纳方程可以写成

$$srr_{EPWI} \equiv \frac{I_{SS}^{cq}(r_0)}{I_R^{cq}(r_0)} = \frac{sl_{EPWI} \cdot ts_{EPWI}}{pl_{EPWI} \cdot pl_{EPWI} \cdot rl_{EPWI}} \quad (10)$$

#### 4.2 MSP 主动声纳方程

利用 MSP 方法定义传播损失  $pl$  和其它各项, 可以得到主动声纳方程

$$srr_{MSP} \equiv \frac{\overline{p_{SS}(r_0)^2}}{p_R(r_0)^2} = \frac{sl_{MSP} \cdot ts_{MSP}}{pl_{MSP} \cdot pl_{MSP} \cdot rl_{MSP}} \quad (11)$$

其中  $sl_{MSP}$ 、 $pl_{MSP}$  和  $rl_{MSP}$  等项的定义见表 1, 它们都以距离声源  $r_{ref}$  处的均方声压  $p_0^2$  为参考。  $p_0^2$  可以写成

$$p_0^2 \equiv Z(r_0) \frac{W}{4\pi r_{ref}^2} \quad (12)$$

与 EPWI 声纳方程相比, MSP 声纳方程的优点是转换到传统声纳方程或从传统声纳方程转换 MSP 声纳方程时仅需要很少的数值调整。

## 5 结论

应用传统的主动声纳方程时会产生与实际

情况的偏差, 偏差值定义为  $[Z(r)/Z(r_0)]^2$ , 当该值等于 1 时表示没有产生偏差。应用传统主动声纳方程时, 这个偏差值在介质的特征阻抗变化不大的海洋环境中接近 1, 但是在介质的特征阻抗变化很大的海洋环境中会远远偏离 1 而导致严重的后果。本文讨论了主动声纳方程中传播损失和混响级的重新定义, 并且给出了相应的两个主动声纳方程来代替传统的主动声纳方程, 消除了应用传统主动声纳方程时可能产生的偏差。

## 参 考 文 献

- 1 Michael A A. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2004, **115**(1):131~134.
- 2 Horton J W. *Fundamentals of SONAR*, 2nd ed. Annapolis: United States Naval Institute, 1959.
- 3 Urick R J. *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. Los Altos: Peninsula, 1983. 1~30.
- 4 Ross D. *Mechanics of Underwater Noise*. New York: Pergamon, 1976.
- 5 Carey W M. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 1995, **20**, 109~113.
- 6 Marshall W J. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 1996, **21**: 108~110.
- 7 Hall M V. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1995, **97**(6):3887~3889.
- 8 Morfey C L. *Dictionary of Acoustics* San Diego: Academic, 2001.