

双基地混响平均强度理论及仿真预报^{*}

惠娟[†] 王自娟 惠俊英 何文翔

(哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

(2008 年 10 月 11 日收到, 2008 年 12 月 5 日收到修改稿)

考察远程双基地界面混响, 可以仅考察二维问题, 其散射区域为一椭圆环带; 对于近程双基地界面混响, 必须讨论三维模型, 其散射元分布在一椭球面上. 对二维和三维双基地混响进行理论建模分析, 该模型优点是无需使用无线电通信, 借助 GPS 时钟即可同步工作, 实现双基地声呐系统的测距及测向, 便于双基地声呐系统的集成. 推导出二维和三维模型的双基地声压混响理论预报公式. 对三维矢量混响作仿真研究, 并讨论矢量传感器组合指向性抗混响.

关键词: 双基地混响, 声压混响, 矢量混响

PACC: 4330, 9210

1. 引 言

混响^[1,2]是主动声呐的主要干扰背景, 尤其是对于小目标主动式探测声呐(例如探雷声呐、蛙人探测声呐和主动声自导系统等). 由于目标反射强度较低, 因而信混比较低, 混响是限制作用距离的主要干扰, 混响也可用于船速测量, 如多普勒计程仪, 国内外均已装备产品, 用于提高惯性导航系统相对于大地的测速精度. 混响亦是研究海洋的有用信号, 例如多普勒流速剖面仪用于测量海洋分层流速. 上述所关注的混响均称为“声压混响”, 并且是收、发合置的混响, 或称反向散射混响. 国内外学者对此作了深入研究, 公开发表的文献繁多, 俄国学者 Olishevskii^[3]和美国学者 Middleton^[4]发表了关于混响的专著. Urick 在文献[5]中综述了收、发合置声压混响的平均衰减规律及其统计特性.

随着水声对抗技术的发展, 对于声呐的隐蔽性、抗干扰性都提出了更高的要求. 双基地声呐由于收、发装置分开一定距离, 在声源、目标和接收机之间存在复杂的三角关系, 因而具有不破坏声呐平台隐蔽性、抗干扰能力强、探测距离远等优点. 因此, 双基地声呐系统已成为声呐技术研究的重要课题之一.

传统的水声传感器是水听器, 它仅是响应声场

的标量——声压 $p(t)$. 同时, 同点输出声压 $p(t)$ 和质点振速的三个正交分量 $v_x(t), v_y(t), v_z(t)$ 的传感器称为“声矢量传感器”^[6]. 矢量传感器联合拾取了声场的标量和矢量信息, 因而有更多的技术途径能更有效地取得声场(包括混响场)的信息, 从而可设计出性能更好的水声系统.

国外对于收、发分置混响的声学研究大多限于用射线理论数值预报收、发分置的平均混响强度^[7,8]. 用一个简洁的公式来预报混响强度较数值分析有更直观、更方便的优点, 便于研究其特征和规律. 本文给出了二维和三维收、发分置混响平均强度预报的解析表达式及其特性, 并讨论了矢量水听器组合指向性抗双基地混响性能.

2. 二维双基地混响

关于二维双基地混响的理论模型和混响强度预报公式, 文献[9]已有详细的阐述. 为了便于叙述, 下面对此加以简要介绍.

2.1. 二维双基地声呐几何模型

平面上一个点到两个焦点(S 和 Q) 的距离为常数, 该点的轨迹是椭圆. 图 1 中, S 为声源, Q 为接收点, 它们是椭圆的焦点. QS 在 x 轴上, y 轴为通过其

^{*} 哈尔滨工程大学基础研究基金(批准号: HEUFT07018)、水声技术国防科技重点实验室基金(批准号: 9140C2001010801)资助的课题.

[†] E-mail: huijuan@hrbeu.edu.cn

中点的法线方向. 焦点之间的距离 $\overline{QS} = L$, L 称为基线长度. 各点的坐标为 $Q(-L/2, 0), S(L/2, 0)$, 目标 (x, y) , θ, φ 的定义见图 1. 椭圆方程为

$$r + r_s = ct, \quad (1)$$

其中 c 为声速, t 为信号从源 S 到目标(或散射点 (x, y))再回到 Q 的双程传播时延. r 为目标到接收点的距离, r_s 为声源到目标(或散射点)的距离.

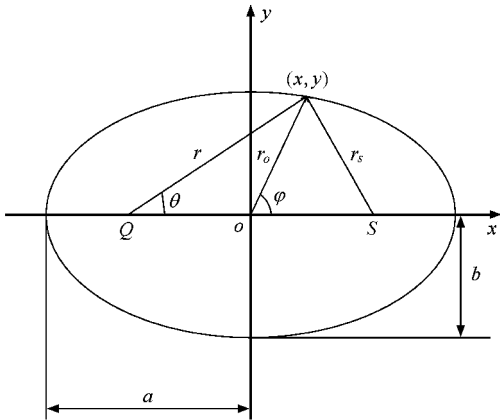


图 1 椭圆及其坐标系

本文讨论使用以 Q 为坐标原点的极坐标系 (r, θ) , 方位角 θ 是以基线方向为 0° , 逆时针旋转为正. 椭圆方程为

$$r = \frac{c^2 t^2 - L^2}{2ct - L \cos \theta}. \quad (2)$$

采用该坐标系的优点是所有的参数均可由位于 Q 处的声呐系统直接测得, 使用方便. Q 处的声呐利用 S 的发射声脉冲测量 S 的方位 θ_s (声呐坐标系中) 及到达时延 t_s , 也测得声脉冲的传播时延 t 和目标方位 θ_r (声呐坐标系中). 因此

$$\begin{aligned} L &= ct_s, \\ \theta &= \theta_r - \theta_s. \end{aligned} \quad (3)$$

为了测量 t 和 t_s , 声源 S 和接收阵 Q 均由 GPS 卫星时钟同步. 该方法无需通过无线电通信在平台 S 和平台 Q 之间传送有关信息, 借助 GPS 时钟即可同步工作, 按本方法集成双基地声呐系统十分方便.

2.2. 二维双基地混响模型

混响是一个复杂的随机过程, 受到很多因素的影响, 在讨论过程中, 为简化问题作如下假设: 相互独立的散射元随机均匀分布在平面界面上, 海水介质是均匀的; 忽略二次散射, 即散射声的再次散射忽略不计; 界面具有漫散射特性, 因此散射系数是

常数.

考察远程界面混响, 因而可近似地看成是一个二维问题. 无指向性声源置于 S 处, 无指向性水听器放在 Q 处. 在 t 时刻, Q 处收到的混响, 其散射区域由下式决定:

$$\begin{aligned} r(t) + r_s(t) &= ct, \\ r(t + T/2) + r_s(t + T/2) &= c(t + T/2), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 c 为声速, $r(t)$ 和 $r_s(t)$ 分别为 t 时刻散射元到 Q 的距离和源 S 到散射元的距离, T 为发射脉冲宽度. 只有延时差小于 $T/2$ 的散射信号才能“同时”到达接收点叠加形成 t 时刻的混响^[5].

(4) 式是椭圆方程组, 两条椭圆线围成一椭圆环带, 它是形成 t 时刻混响的散射区. 收、发合置 ($L = 0$) 时它退化为圆环带; t 很大时, 它也近似地为圆环带, 见图 2.

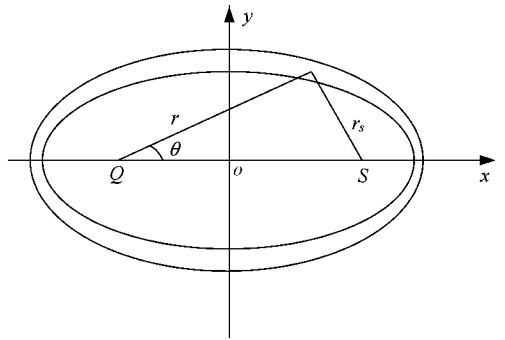


图 2 收、发分置混响散射带示意图

2.3. 二维无指向性收、发分置混响平均强度

基本假设如上所述, 发射和接收都是无指向性的, 形成混响的散射区 A 为椭圆环带, 见图 2. 混响平均强度 $I_R(t)$ 为

$$I_R(t) = I_0 \iint_A \frac{\mu}{(r_s r)^\beta} e^{-\alpha(r+r_s)} ds. \quad (5)$$

(5) 式为面积分, A 为积分区域, 它由 (4) 式决定. $\beta = 1$ 为柱面波声场情况, $\beta = 2$ 为球面波声场情况. α 为海水声吸收系数, μ 为常数, 它是海底界面(或海面界面)的漫散射系数. I_0 为离声源 1 m 处的声强. 在以 Q 为原点的极坐标系中 (5) 式改写为

$$I_R(t) = 2\mu I_0 e^{-\alpha ct} \int_0^{r_2} \int_{r_1}^{\pi/2} \frac{1}{[r(ct-r)]^\beta} r dr d\theta, \quad (6)$$

其中 r 由 (1) 式决定,

$$r_1 = \frac{c^2 t^2 - L^2}{2ct - L \cos \theta},$$

$$r_2 = \frac{c^2(t + T/2)^2 - L^2}{2[c(t + T/2) - L\cos\theta]} \quad (7)$$

(6)和(7)式即为 t 时刻无指向性收、发分置混响平均强度估算公式, t 为给定的常数, $\beta = 1$ 为柱面波声场情况, $\beta = 2$ 为球面波声场情况。

2.3.1. 柱面波声场混响

若声传播符合柱面波规律, 则 $\beta = 1$ 。此时(6)式改写为

$$I_R(t) = 2\mu I_0 e^{-\alpha ct} \int_0^{\pi/2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{ct - r} dr d\theta. \quad (8)$$

(8)式积分^[10-12]后得

$$I_R(t) = 2\pi\mu I_0 E e^{-\alpha ct} + 2\pi\mu I_0 e^{-\alpha ct} \times \ln \left(\frac{(1 + \sqrt{1 - a_2^2})(1 + \sqrt{1 + b_1^2})}{(1 + \sqrt{1 - a_1^2})(1 + \sqrt{1 + b_2^2})} \right), \quad (9)$$

$$E = \ln \left(\frac{(c^2 t^2 + L^2)(t + T/2)}{[c^2(t^2 - T^2/4 + L^2)]t} \right), \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{2ctL}{c^2 t^2 + L^2}, \quad (11)$$

$$b_1 = \frac{L}{ct},$$

$$a_2 = \frac{2ctL}{c^2(t^2 - T^2/4) + L^2}, \quad (12)$$

$$b_2 = \frac{L}{c(t + T/2)}.$$

(9)–(12)式即为柱面波声场情况下, 无指向性收、发分置混响平均强度的预报公式。这里, c 为声速, L 为双基地基线长度, t 为传播时间, T 为发射脉冲宽度。

2.3.2. 球面波声场混响

入射波与散射波均为球面波条件时, $\beta = 2$ 。(6)式应为

$$I_R(t) = 2\mu I_0 e^{-\alpha ct} \int_0^{\pi/2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{[r(ct - r)]^2} r dr d\theta. \quad (13)$$

(13)式积分后得

$$I_R(t) = 2\mu I_0 e^{-\alpha ct} \left\{ \frac{d_2}{ct} \left[\frac{b_2\pi}{a_2} + \frac{a_2 - b_2}{a_2} \frac{\pi}{\sqrt{1 - a_2^2}} \right] - \frac{d_1}{ct} \left[\frac{b_1\pi}{a_1} + \frac{a_1 - b_1}{a_1} \frac{\pi}{\sqrt{1 - a_1^2}} \right] - \frac{\pi}{c^2 t^2} \left[\ln \frac{b_2(1 + \sqrt{1 - a_2^2})}{Ld_2(1 - b_2^2)} \right] + \frac{\pi}{c^2 t^2} \left[\ln \frac{b_1(1 + \sqrt{1 - a_1^2})}{Ld_1(1 - b_1^2)} \right] \right\}, \quad (14)$$

$$a_1 = \frac{2ctL}{c^2 t^2 + L^2},$$

$$b_1 = \frac{L}{ct}, \quad (15)$$

$$d_1 = \frac{2ct}{c^2 t^2 + L^2},$$

$$a_2 = \frac{2ctL}{c^2(t^2 - T^2/4) + L^2},$$

$$b_2 = \frac{L}{c(t + T/2)}, \quad (16)$$

$$d_2 = \frac{2c(t + T/2)}{c^2(t^2 - T^2/4) + L^2}.$$

(14)–(16)式即为球面波声场条件下, 收、发分置混响平均强度的预报公式, 其中各项参数定义同柱面波声场情况。

2.3.3. 仿真分析

图3和图4分别为柱面波和球面波声场情况下混响强度随时延 t 、基线长度 L 的变化规律。参数取值如下: 声速 $c = 1500$ m/s, 声源强度 $I_0 = 10^5$ W/m², 中心频率 $f_0 = 2$ kHz, 声吸收系数 $\alpha = 0.1$ dB/km, 散

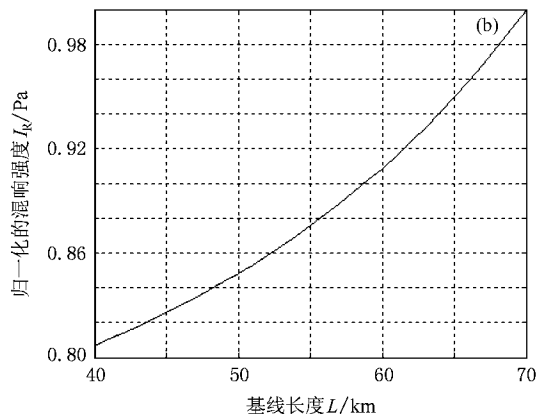
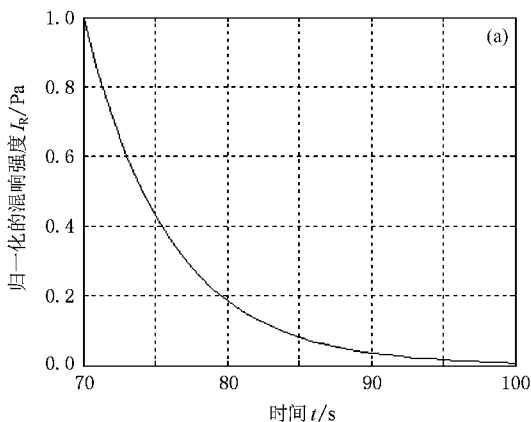


图3 柱面波声场的混响强度变化规律 (a) 随时延的变化规律 (b) 随基线长度的变化规律

射系数 $10\log\mu = -40$ dB, 发射脉冲宽度 $T = 4$ s. 从图中可以看出: 混响强度与传播时间 t 和基线长度 L 有关. 传播时间 t 一定时, 基线越长, 混响强度越强. 这是因为基线长度越长, 双基地混响的散射区域

也越大; 基线长度一定时, 传播时间越长, 即传播距离越远, 混响强度越弱. 混响强度在球面波声场中比在柱面波声场中衰减得快.

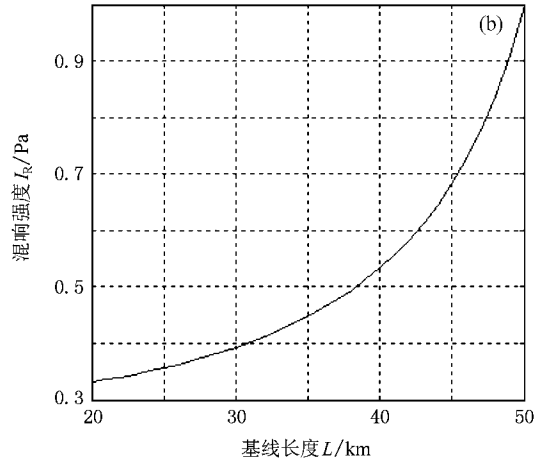
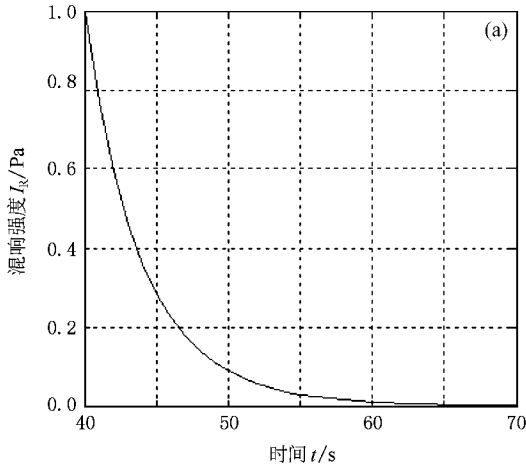


图 4 球面波声场的混响强度变化规律 (a) 随时延变化规律 (b) 随基线长度变化规律

2.4. 无指向性收、发分置与合置混响比较

根据文献 [5] 柱面波声场界面混响强度

$$I_R = \int \frac{I_0}{r^2} s_s k(\theta, \varphi) b'(\theta, \varphi) dA, \quad (17)$$

式中 $b(\theta, \varphi)$ 为发射换能器的指向性图, $b'(\theta, \varphi)$ 为接收换能器的指向性图, 对于无指向性换能器, $k(\theta, \varphi) = b'(\theta, \varphi) = 1$, s_s 为界面散射系数, 相当于 (6) 式中的 μ . (17) 式未考虑海水声吸收. 取半径 $r_1 = ct/2$, $r_2 = c(t + T/2)/2$ 圆环混响带, 可得到柱面波声场情况下, 收、发合置混响平均强度公式

$$I_R(t) = 2\mu I_0 e^{-\alpha ct} \ln \frac{t + T/2}{t}. \quad (18)$$

当 $L = 0$ 时, 柱面波声场收、发分置混响平均强度 (9) 式变为

$$I_R(t) = 2\mu I_0 e^{-\alpha ct} \ln \frac{t}{t - T/2}. \quad (19)$$

当 $t \gg T/2$ 时 (18) 与 (19) 式相等, 这表明了 (9) 式的合理性.

同样, 球面波声场界面混响强度

$$I_R = \int \frac{I_0}{r^4} s_s k(\theta, \varphi) b'(\theta, \varphi) dA. \quad (20)$$

球面波声场情况下, 收、发合置时的混响平均强度 [9]

$$I_R = 4\pi\mu I_0 e^{-\alpha ct} \frac{T(t - T/4)}{c^2 t^2 (t + T/2)^2}. \quad (21)$$

当 $L = 0$ 时, 球面波声场收、发分置混响平均强

度 (14) 式变为

$$I_R = 2\pi\mu I_0 e^{-\alpha ct} \left(\frac{T}{t - T/2} - \ln \frac{t - T/2}{t + T/2} \right). \quad (22)$$

图 5 和图 6 分别为柱面波声场和球面波声场中收、发分置与合置平均混响强度的比较, 参数取值同图 4. 从图中可以看出: 基线长度 L 越小, 收、发分置混响的平均强度与收、发合置的平均强度越接近; 传播时间 t 较大时, 收、发分置混响的平均强度等于收、发合置混响平均强度, 因此, 可以证明 (9) (14) 式的合理性. 在距离为收、发间距的 1.5 倍以内, 收、发分置混响的绝对强度大于合置的绝对强度, 这是因为收、发分置时, 混响传播损失小于收、发合置的

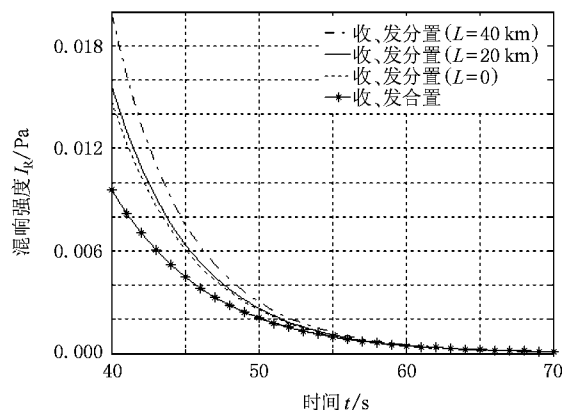


图 5 柱面波场收、发分置与合置的比较

强度几乎相同. 在距离为收、发间距的 1.5 倍以内二者差别显著, 此时必须讨论三维双基地混响模型.

发射换能器 S 及接收换能器 Q 相距为 $2L$ (为计算方便, 此处基线长度取 $2L$, 这与二维双基地混响模型有区别), 深度为 h . 接收换能器有两种: 水听器和矢量传感器.

同时到达接收点的散射声的叠加形成混响, 因此产生体积混响的散射元在一椭球面上, 因为该面上的任意一点到 S 和 Q 的距离之和为常数. 换言之, 椭球面上所有散射元产生的散射声均能同时到达接收点 Q , 从而叠加形成该时刻的混响.

S 发射声脉冲后 t 时刻, 产生混响的散射元分布在一个椭球面附近, 椭球方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2 + z^2}{b^2} = 1, \tag{23}$$

$$a^2 = \frac{c^2 t^2}{4},$$

$$b^2 = \frac{c^2 t^2 - 4L^2}{4}.$$

$2L$ 为椭球两个焦点 S 与 Q 之间的距离, 或称阵长, c 为声速, t 为传播时间. 图 7(a) 为椭球示意图, 在 $z = h$ 处切椭球得到的切面为椭圆, 如图 7(b) 和 (c) 所示.

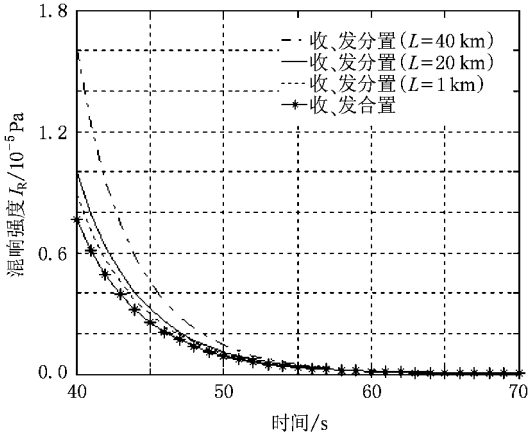


图 6 球面波场收、发分置与合置的比较

传播损失.

3. 三维双基地混响

3.1. 三维双基地混响模型

由以上讨论可知, 在远程 (即距离远大于收、发换能器之间的间距) 时, 分置混响与合置混响的平均

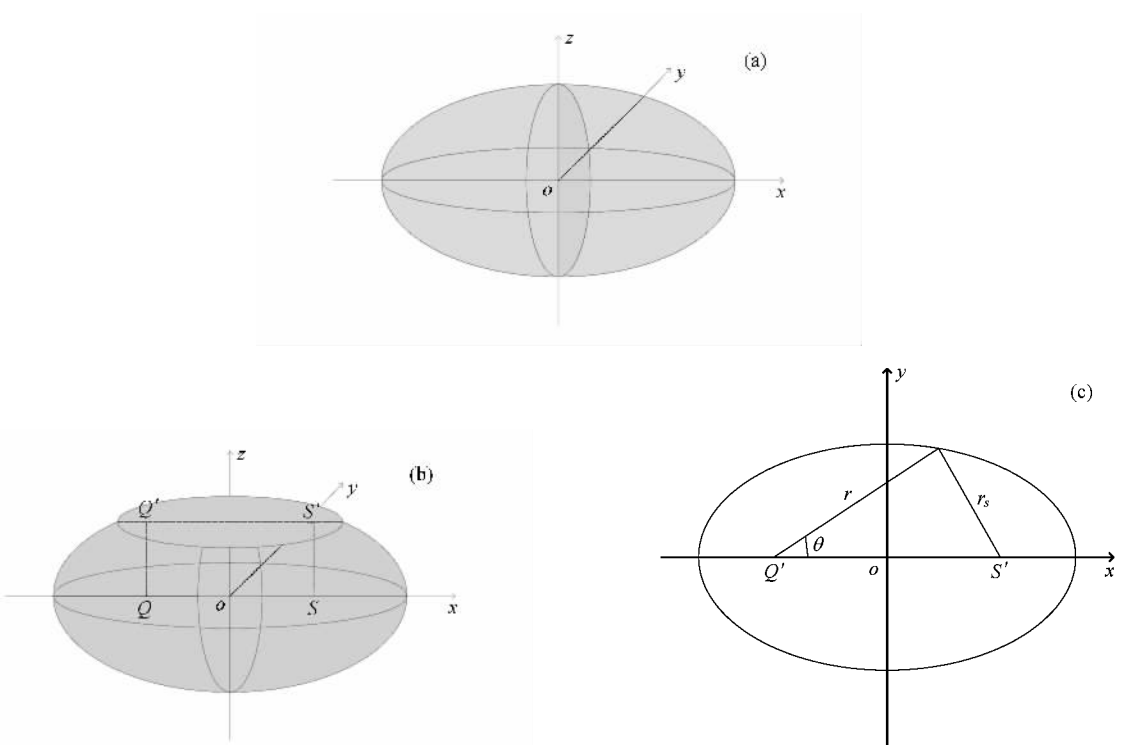


图 7 椭球及 $z = h$ 处切面示意图 (a) 椭球 (b) 在 $z = h$ 处切椭球 (c) 得到的切面



图 7 所示的椭球与海面(或海底)相交的曲线为椭圆,其方程为

$$\frac{x^2}{a^2\left(1 - \frac{h^2}{b^2}\right)} + \frac{y^2}{b^2 - h^2} = 1 \quad (z = h). \quad (24)$$

这里 h 为 S 和 Q 所在位置的深度. S' 和 Q' 是 S 和 Q 在海面 ($z = h$ 平面)上的投影.

若采用图 7(c)中的以 Q' 为原点的 (r, θ) 坐标系表示 (24) 式改写为

$$r = \frac{\eta^2 L \cos \theta + \xi \eta \sqrt{\eta^2 \cos^2 \theta - L^2 \sin^2 \theta + \xi^2 \sin^2 \theta}}{\xi^2 \sin^2 \theta + \eta^2 \cos^2 \theta}, \quad (25)$$

其中 $\xi = a \sqrt{1 - \frac{h^2}{b^2}}$, $\eta^2 = b^2 - h^2$. r 为椭圆上任意一点到 Q' 的水平距离, θ 为 r 与 x 轴的夹角. 该椭圆上的点到中心椭圆焦点 Q 的斜距为 R , 其在 $z = h$ 平面上的投影为 r . 有

$$R = \sqrt{r^2 + h^2}. \quad (26)$$

径矢量 R 的仰角为 α , 有

$$\cos \alpha = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}}. \quad (27)$$

3.2. 界面混响散射区域

首先作如下假设: 各散射元是相互独立的; 忽略二次散射, 即散射声的再散射可忽略不计; 入射声及散射声是球面波.

t 时刻, 脉冲宽度为 T 的发射信号产生混响的散射区为海面(或海底)上的一个椭圆环, 其方程组为

$$r_1 = \frac{\eta_1^2 L \cos \theta + \xi_1 \eta_1 \sqrt{\eta_1^2 \cos^2 \theta - L^2 \sin^2 \theta + \xi_1^2 \sin^2 \theta}}{\xi_1^2 \sin^2 \theta + \eta_1^2 \cos^2 \theta},$$

$$r_2 = \frac{\eta_2^2 L \cos \theta + \xi_2 \eta_2 \sqrt{\eta_2^2 \cos^2 \theta - L^2 \sin^2 \theta + \xi_2^2 \sin^2 \theta}}{\xi_2^2 \sin^2 \theta + \eta_2^2 \cos^2 \theta}, \quad (28)$$

r_1 为内椭圆, r_2 为外椭圆. 这里

$$\xi_1 = a_1 \sqrt{1 - \frac{h^2}{b_1^2}},$$

$$\eta_1^2 = b_1^2 - h^2, \quad (29)$$

$$\xi_2 = a_2 \sqrt{1 - \frac{h^2}{b_2^2}},$$

$$\eta_2^2 = b_2^2 - h^2, \quad (30)$$

$$a_1^2 = \frac{c^2 t^2}{4},$$

$$b_1^2 = \frac{c^2 t^2 - 4L^2}{4}, \quad (31)$$

$$a_2^2 = \frac{c^2(t + T/2)^2}{4},$$

$$b_2^2 = \frac{c^2(t + T/2)^2 - 4L^2}{4}, \quad (32)$$

其中 T 为发射信号脉冲宽度, c 为声速, h 为阵深度, t 为时间, $2L$ 为阵长.

3.3. 散射区分割法

最强的混响是最早时刻到达的, 最早到达时刻为

$$t_{\min} = T + T/4 + 2\sqrt{L^2 + h^2}/c. \quad (33)$$

只有当 $t \geq t_{\min}$ 时, 同时到达接收点的界面散射声才能和直达声及界面反射声区分开.

如图 8 所示, 将椭圆环带分割成多个散射微元, 分别计算各个微元的散射声强度, 在接收点处叠加, 从而得到接收点的混响强度. 这种分割方法使用灵活, 可以计算漫散射和 Lambert 散射混响, 可以计算声压混响, 亦可以计算矢量混响.

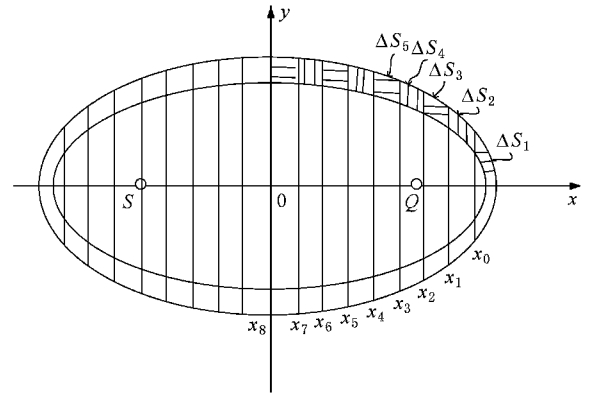


图 8 椭圆散射带的分割示意图

根据椭圆的相关公式^[10], 可将第 i 个微元的面积 Δs_i 表示如下:

$$\Delta s_i = \frac{1}{2}(\Delta s_{i+} - \Delta s_{i-}), \quad (34)$$

其中

$$\Delta s_{i+} = s_{i+} - s_{(i-)+}$$

$$\Delta s_{i-} = s_{i-} - s_{(i-)-},$$

$$s_{i+} = \frac{\pi}{2} \xi_1 \eta_1 - \frac{\eta_1}{\xi_1} \left[x_i \sqrt{\xi_1^2 - x_i^2} + \xi_1^2 \arcsin \frac{x_i}{\xi_1} \right],$$

$$s_{i-} = \frac{\pi}{2} \xi_2 \eta_2 - \frac{\eta_2}{\xi_2} \left[x_i \sqrt{\xi_2^2 - x_i^2} + \xi_2^2 \arcsin \frac{x_i}{\xi_2} \right],$$

$$\begin{aligned} x_i &= x_0 - i\Delta x, \\ \Delta x &= \left\| \frac{\xi_1}{N} \right\|, \end{aligned} \quad (35)$$

$4N$ 为椭圆环的分割数,若 $N = 16$,则椭圆环分割成 64 个散射微元.根据对称性,只计算第一象限内的 N 个散射微元面积即可.

3.4. 接收混响级计算

假定界面散射特性遵循 Lambert 规律,即散射系数 μ 为

$$\mu(\alpha, \alpha') = \mu_0 \sin^m \alpha \sin^n \alpha', \quad (36)$$

其中 α 为声波到达散射微元的入射仰角, α' 为到达 Q 的散射声仰角.本文取 $m = n = 1$. μ_0 为常数,对于海面散射, $10\log\mu_0 = -30$ dB,对于海底散射, $10\log\mu_0 = -20$ dB.

计算各微元 i 中心到 Q 方位角 θ_i ,声波从声源 S 到微元 i 中心的仰角 α_i , Q 到微元 i 中心的仰角 α'_i ,按 (36) 式 Lambert 散射定律计算每个微元的散射系数 $\mu_i(\alpha, \alpha')$.

按球面波声波传播规律计算源 S 到微元 i 及微元 i 到接收点 Q 的传播强度损失

$$\begin{aligned} L_{Ti} &= 10\lg \left\{ \frac{1}{r_{si}^2 r_{Qi}^2} \exp[-\alpha(R_{si} + R_{Qi})] \right. \\ &\quad \left. \times \mu_i(\alpha, \alpha') \Delta s_i \right\}. \end{aligned} \quad (37)$$

Q 点接收到的混响强度级为

$$L_{RQ} = L_s + \sum_{i=1}^N 4L_{Ti}, \quad (38)$$

$$\begin{aligned} L_{RQ} &= L_s + 10\lg \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{4}{R_{si}^2 R_{Qi}^2} \exp[-\alpha(R_{si} + R_{Qi})] \right. \\ &\quad \left. \times \mu_i(\alpha, \alpha') \Delta s_i \right\}. \end{aligned} \quad (39)$$

(39) 式可以作为双基地声呐在 $z = h$ 处的界面混响预报公式.这里, L_s 为发射声源强度级; α 为声吸收系数; Δs_i 见 (34) 和 (35) 式. R_{si} 为声源到微元 i 的距离, R_{Qi} 为微元 i 到接收点 Q 的距离,可由 (26) 式计算得到.

3.5. 仿真分析

按图 8 分割散射区的方法 $z = h$ 计算海面混响级,并分析其与几何态势及发射脉冲宽度之间的关系.仿真中取 $N = 16$ ($4N$ 为椭圆环被分割的数量).

图 9 为海面混响随时间的变化规律,仿真条件

如下:基线长度 $2L = 1500$ m,基阵深度 $h = 40$ m,发射脉冲宽度 $T = 1$ s,声源级 190 dB, $f = 2$ kHz,海面散射系数 $10\log\mu_0 = -30$ dB.可以看出, $t = 2$ s 时,接收点的混响级约为 65 dB;传播时间越长,传播距离越远,因而混响强度越小.

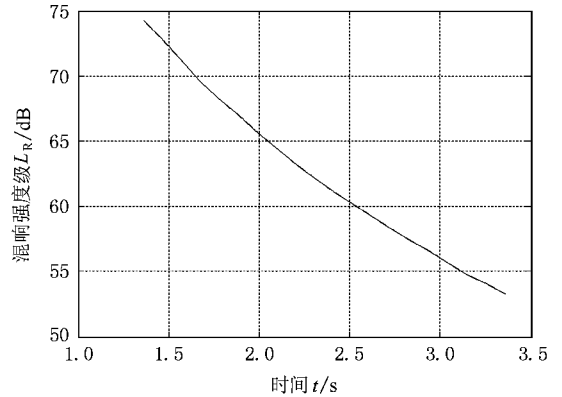


图 9 海面混响随时间的变化规律

图 10—图 12 为海面混响强度随阵长、深度及发射脉冲宽度的变化规律,观察时刻为 $t = 3$ s,仿真条件同图 9.仿真结果表明,在同一观察时刻,基阵深度越大,基线越长,发射脉冲宽度越大,海面混响强度越大.

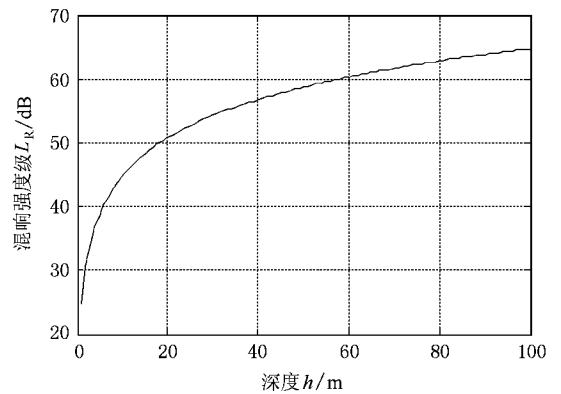


图 10 海面混响随阵深度的变化规律

4. 矢量传感器指向性抑制双基地混响

传统的水声传感器是水听器,它仅响应声场的标量——声压.同时,同点输出声压和振速的传感器称为“声矢量传感器”.矢量传感器拾取了声场的标量和矢量信息,因而有更多的技术途径能更有效地取得声场(包括混响场)的信息,从而可设计性能更好的水声系统^[7].这里仅以抗混响为例来说明.

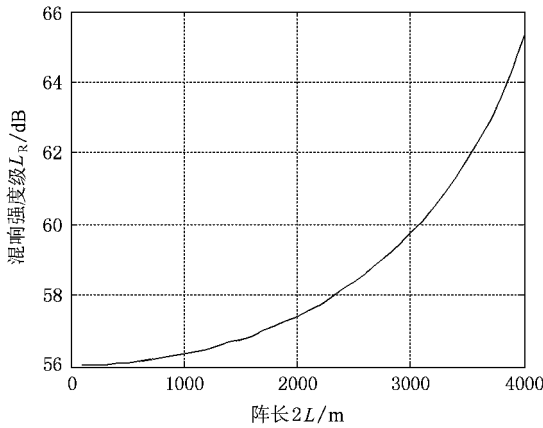


图 11 海面混响随阵长的变化规律

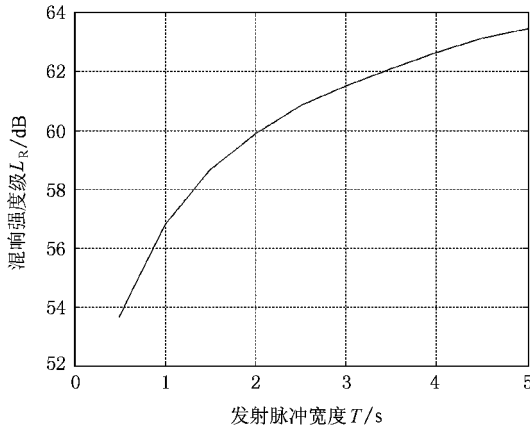


图 12 海面混响与发射脉冲宽度的关系

声压 p 与振速 v 的乘积称为瞬时声强流 $I(t) = p(t)v(t)$, 它的期望值 $\overline{I(t)} = \overline{p(t)v(t)}$ 称为平均声强流, 即对瞬时声强流的时间平均. 对于声压混响, 其声强为 $\overline{I_R} = \overline{p_R^2(t)}$, 下标 R 表示混响. 混响过程假定为各态历经的, 集合平均与时间平均是等价的, 平均时间长度为脉冲宽度的一半. 因而构成混响的散射面积(或体积)越大, 混响越强. 但是对于矢量混响 $\overline{I_R(t)} = \overline{p_R(t)v_R(t)}$, 它是矢量和, 若散射体在界面(海面或海底)上或水层(体积混响)中是随机均匀分布的, 则各向同性混响声强流矢量和的期望值为零. 事实上, 由于平均时间长度有限, 因而对该期望值的估计有误差而不会为零. 尽管如此, 矢量混响强度必定显著小于标量(声压)混响强度. 下面分析矢量传感器组合指向性 $(p - v_c)$ 抑制双基地混响.

若声压 p 为

$$p(t) = x(t), \quad (40)$$

令声阻抗 $\rho c = 1$, 对于平面波或球面波(在大于波长的距离上)有

$$v_x(t) = x(t) \cos\theta \cos\alpha, \quad (41)$$

$$v_y(t) = x(t) \sin\theta \cos\alpha, \quad (42)$$

其中 θ 为水平方位角, 以 x 轴正向为 0° ; α 为仰角, 以水平面为 0° . v_x 和 v_y 是振速的水平分量, 二者的组合振速 v_c 为

$$v_c(t) = x(t) \cos(\theta - \varphi) \cos\alpha, \quad (43)$$

φ 为引导方位, 改变 φ 值可旋转 v_c 指向性.

当 $\varphi = 0^\circ$ 时, $\frac{1}{2}(p - v_c)$ 指向性为

$$\epsilon(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta \cos\alpha). \quad (44)$$

相应的功率指向性为

$$\begin{aligned} K(\theta) &= e^2(\theta) \\ &= \frac{1}{4}(1 - \cos\theta \cos\alpha)^2. \end{aligned} \quad (45)$$

本文采用(45)式的指向性抑制混响, 它的指向性零点指向声源 S , 从而抑制了从 S 到 Q 的直达声、界面反射声和双基地混响. 它的垂直指向性 $\cos\alpha$ 抑制了 Q' 邻近处散射元产生的混响.

若接收器 Q 为二维矢量传感器, 它同点输出 p, v_x 和 v_y . 采用(45)式 $\frac{1}{2}(p - v_c)$ 的组合指向性, 可抑制双基地混响.

对于图 8 中所示的每个散射微元, 其产生的声压混响强度为

$$dI_p = \frac{P}{(RR_s)^2} e^{-\alpha(R+R_s)} \mu ds, \quad (46)$$

式中 P 为与发射功率有关的常数, 若界面是漫散射的, 则 μ 为常数, ds 为散射微元的面积. 散射微元到 Q 的斜距为 R , 到 S 的斜距为 R_s , α 为声吸收系数. (46)式假定散射声满足球面波传播损失规律.

矢量传感器采用 $\frac{1}{2}(p - v_c)$ 时, 接收点接收到微元的散射声强度为

$$dI_{p,v_c} = \frac{P}{(RR_s)^2} e^{-\alpha(R+R_s)} \frac{\mu}{4} (1 - \cos\theta \cos\alpha)^2 ds, \quad (47)$$

根据(46)和(47)式, 将散射区所有微元产生的混响求和, 即可分别得到双基地声压混响强度和矢量混响强度如下:

$$I_p = 4 \sum_{i=1}^N dI_{p,i}, \quad (48)$$

$$I_{p,v_c} = 4 \sum_{i=1}^N dI_{p,v_c,i} \quad (49)$$

其中, i 为散射微元序号 $A \times N$ 为散射区分割数。

图 13 为声压混响和矢量混响的比较,可以看出矢量传感器对双基地混响有一定的抑制作用,在 $t = 2 \text{ s}$ 时,抑制混响增益约为 7 dB,并且随着传播时间的增大而增大。

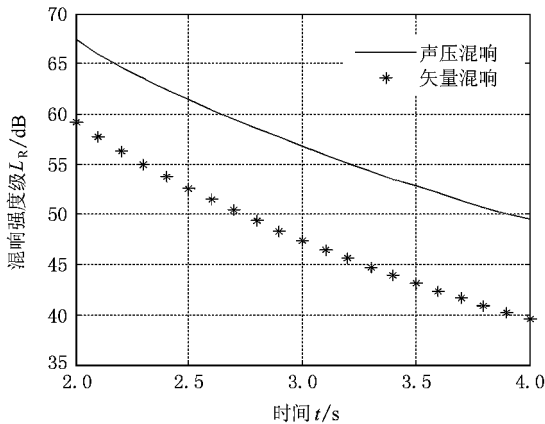


图 13 声压混响与矢量混响比较

5. 结 论

对二维和三维双基地混响进行理论建模分析,推导出二维和三维模型的双基地声压混响理论预报公式,并对三维矢量混响作仿真研究,讨论矢量传感器组合指向性抗混响,得到以下结论:(1)二维双基地混响的散射区为一椭圆环带,三维双基地混响的散射元分布在椭球面上,该模型利用 GPS 即可同步工作,便于双基地系统的集成。(2)对于二维双基地混响,收、发分置情况下,基线长度为零时混响强度与合置情况相等;当传播时延较大时,收、发分置混响强度与合置情况相等。(3)对于三维双基地混响,在 $z = h$ 截面处的界面混响可用分割混响散射区的方法计算其强度,该方法不但可以计算声压混响,亦可以计算矢量混响。(4)在同一观察时刻,基阵深度越大、基线越长、发射信号脉冲宽度越宽,界面混响强度就越大。(5)采用矢量传感器 $\frac{1}{2}(p - v_c)$ 指向性可有效抑制约 7—10 dB 的双基地混响。

- [1] Shang E C, Zhang R H 1975 *Acta Phys. Sin.* **24** 260 (in Chinese) [尚尔昌、张仁和 1975 物理学报 **24** 260]
- [2] Qiu X F 1976 *Acta Phys. Sin.* **25** 47 (in Chinese) [裘辛方 1976 物理学报 **25** 47]
- [3] Olishevskii V V 1964 *Sov. Phys. Acoust.* **9** 378
- [4] Middleton D 1967 *IEEE Trans. Inform. Theory* **13** 372
- [5] Urlick R J 1990 *Principle of Underwater Acoustics* (Harbin: Harbin Engineering University Press) (in Chinese) [Urlick R J 1990 水声工程原理(中译本)(哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社)]
- [6] Hui J Y, Hui J 2009 *The Fundment of Vector-Signal Processing* (Beijing: National Defense Industry Press) pp9—25 (in Chinese) [惠俊英、惠娟 2009 矢量信号处理基础(北京:国防工业出

版社)第9—25页]

- [7] Chris H H 2004 *J. Comput. Acoust.* **13** 317
- [8] Chris H H 2005 *IEEE J. Ocean. Eng.* **30** 660
- [9] Hui J, Hui J Y, Wang Z J 2009 *Acta Acoust.* **34** 47 (in Chinese) [惠娟、惠俊英、王自娟 2009 声学学报 **34** 47]
- [10] Korn G A 1961 *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers* (New York, Toronto, London: McGraw-Hill Company)
- [11] Gradshteyn I S, Ryzhik I M 1980 *Table of Integrals, Series, and Products* (New York: Academic Press)
- [12] Ye Q X, Shen Y H 2002 *Applied Mathematics Handbook* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [叶其效、沈永欢 2002 实用数学手册(北京:科学出版社)]

The theoretical and simulation prediction of bistatic reverberation average strength^{*}

Hui Juan[†] Wang Zi-Juan Hui Jun-Ying He Wen-Xiang

(Harbin Engineering University , Harbin 150001 , China)

(Received 11 October 2008 ; revised manuscript received 5 December 2008)

Abstract

In researching long-distance interface bistatic reverberation , the scattering area is taken as an elliptical ring. In researching short-distance bistatic reverberation , the model should be a three-dimensional ellipsoid. The ellipse and ellipsoid models can work without wireless communication , only using GPS clock to make sure the systems work synchronously so as to realize ranging and orienting. It is convenient for the integration of bistatic sonar system. The two-dimensional and three-dimensional prediction formulas of bistatic pressure reverberation are deduced , the vector-sensor three-dimensional reverberation is simulated and the anti-reverberation performance of vector-sensor directivity composite is discussed.

Keywords : bistatic reverberation , pressure reverberation , vector-sensor reverberation

PACC : 4330 , 9210

^{*} Project supported by the Foundation for Basic Research of Harbin Engineering University , China (Grant No. HEUFT07018) and the Foundation for the Key Laboratory of National Defense Science and Technology for Underwater Acoustic Technology , China (Grant No. 9140C2001010801).

[†] E-mail : huijuan@hrbeu.edu.cn