浅海水平相关系数的频率特性研究

张燕君*, 张仁和, 李风华

中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190

*联系人, E-mail: zhangyanjun@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-11-23

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11125420)

摘要 基于一次浅海声学实验数据, 发现声场水平相关系数随频率振荡变化. 利用简正波理论和微扰理论, 分别对实验结果中纵向相关系数和横向相关系数随频率的振荡现象提供了理论解释, 给出了纵向相关系数(横向相关系数)与声强、频率的近似关系. 理论表明, 小间隔的水平相关系数具有与声强类似的干涉结构.

关键词 水平纵向相关, 水平横向相关, 频率选择特性, 声强

PACS: 43.30.Bp, 43.30.Re

doi: 10.1360/132012-836

1 引言

声场相关系数是描述声场空间相似程度的物理量, 它决定了声纳的有效孔径, 是影响声纳阵增益的重要因素. 大孔径声纳基阵的出现和应用, 对声场的空间相关性的研究提出了迫切需求.

引起水平相关性下降的两个物理因素包括简正波(多途)干涉^[1-4]和海洋信道的不均匀性^[5-8]. 声场水平相关包含纵向相关和横向相关两方面, 理论分析表明, 简正波干涉是引起水平相关下降的直接原因, 而介质起伏则通过改变简正波干涉结构进而影响声场水平相关性. 本文主要研究了水平纵向相关系数和横向相关系数随频率的分布特点, 给出了小间隔时的纵向相关系数(横向相关系数)与声强和频率的

近似关系.

2 水平空间相关基本理论及实验描述

空间相关实验数据由布设于不同位置的两个水听器接收到的声信号获得. 本文使用信号频谱归一化以后的相关系数¹⁾:

$$\Gamma(P_1, P_2) = \underset{\tau}{\text{ArgMax}} \left\{ \text{Re} \left[\frac{1}{\omega_1 - \omega_2} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{P_1 P_2^* e^{-j\omega\tau}}{\sqrt{(P_1 P_1^*) (P_2 P_2^*)}} d\omega \right] \right\}, \quad (1)$$

其中, $\underset{\tau}{\text{ArgMax}}\{a\}$ 表示选择合适的 τ 使 a 取最大值, $[\omega_1, \omega_2]$ 为相关带宽, “*” 表示取复共轭, Re 表示取实

1) 本文中, 实验数据使用爆炸信号, 为了消除二次脉动带来的声源谱影响, 求相关时先对信号谱作归一化

部, P_1 和 P_2 分别为空间两点的声压. 下文中为了表述方便使用“ $\langle \bullet \rangle$ ”表示频域平均, (1)式可以表示为

$$\Gamma = \text{ArgMax}_{\tau} \left\{ \text{Re} \left[\left\langle \frac{P_1 P_2^* e^{-j\omega\tau}}{\sqrt{(P_1 P_1^*) (P_2 P_2^*)}} \right\rangle \right] \right\}. \quad (2)$$

为了研究声场的水平相关特性, 声场声信息国家重点实验室于 2007 年 8 月在黄海海域进行了一次浅海声场水平空间相关实验, 实验海区的海深约 40 m. 图 1 是实验测得的声速剖面. 图 2 为水平空间相关示意图, 实验中使用布放在海底、长约 500 m 的潜标水平阵接收声信号, 发射船在航行过程中投掷信号弹作为宽带脉冲声源, 声源深度约 25 m. 声源与接收阵之间的水平距离约 10 km, 远大于海深, 示意图中“ $\sim$ ”表示线段长度的省略.

图 3 为通过分析两个不同方位脉冲信号估算出的海底水平阵阵形. 图 4 为本文使用到的脉冲声源信号对应的投弹点位置图, 图中的方块表示潜标位置, 虚线表示海底水平阵的布放方位, “ $\times$ ”处为水平阵纵向投弹点位置, “ $\triangle$ ”处为水平阵横向投弹点位置.

研究声场相关性时首先要确保实验数据具有较高的信噪比, 否则记录数据的相关性将不能反映信号的相关. 图 5 给出了 1/10 Oct 带宽时 (Oct 表示倍频程, 1/10 Oct 约为 6.93%), 水平阵第 1 通道记录的纵向声源的信号部分和噪声部分的功率谱, 图 6 所示为横向声源的信号部分和噪声部分的功率谱. 从图中可以看出两种情况下信号的信噪比均在 25 dB 以上, 计算所得的水平阵相关系数可以表征信号的相关系数.

图 1 实验测得的声速剖面
Figure 1 Measured sound-speed profile.

图 2 水平空间相关实验示意图
Figure 2 Experimental configuration of horizontal correlation.

图 3 位于海底的潜标水平阵阵形
Figure 3 The elements distribution of the Horizontal Linear Array (HLA).

图 4 投弹示意图
Figure 4 Location of the explosive bombs.

图5 1/10 Oct (6.93%)平滑后的第1通道记录的纵向声源信号与噪声的功率谱

Figure 5 The signal and noise power spectral of a single hydrophone in the HLA, the explosive bomb was detonated in longitudinal direction of the HLA, and the bandwidth is 1/10 Oct.

图6 1/10 Oct 平滑后的第1通道记录的横向声源信号与噪声的功率谱

Figure 6 The signal and noise power spectral of a single hydrophone in the HLA, the explosive bomb was detonated in transverse direction of the HLA, and the bandwidth is 1/10 Oct.

另外, 如无特别说明, 本文中实验数据获得的相关系数均采用满足一定纵向(横向)间隔的所有阵元组合得到的相关系数的平均值, 声强为通道平均后的相对声强. 这里的相对声强为声强中滤去随频率缓变项后, 剩余的随频率振荡项.

3 纵向相关

在 1/10 Oct (6.93%)带宽下, 由实验数据获得的纵向相关系数随中心频率和纵向间隔的分布如图 7 所示. 图 8 给出了不同纵向间隔时的相关系数随频率的变化曲线. 可见, 纵向相关系数具有一定的频率选择性, 且不同间隔下的纵向相关系数随频率振荡的趋势大体相同. 图 9 比较了纵向相关系数与相对声强

图7 1/10 Oct (6.93%)带宽下, 纵向相关系数相对于中心频率和纵向间隔的分布

Figure 7 Longitudinal correlation coefficients versus longitudinal separation and frequency, and the frequency bandwidth is 1/10 Oct (6.93%).

图8 水平纵向间隔分别为 20 m, 50 m, 100 m, 200 m 时的相关系数-频率曲线(曲线依次沿纵坐标下移 0.1)

Figure 8 Longitudinal correlation coefficients at different separations versus frequency, and each curve removed by 0.1 along the reverse of the y-axis.

图 9 纵向相关系数与相对声强随频率的变化关系, 纵向间隔为 50 m

Figure 9 Longitudinal correlations coefficient and related Intensity versus frequency.

随频率的变化曲线, 图中, 实线表示纵向间隔为 50 m 的纵向相关系数随频率的变化, 虚线表示相对声强随频率的变化, 可见, 纵向相关系数与声强随频率变化的趋势基本一致.

3.1 纵向相关理论分析

为了得到水平纵向相关系数与声强和频率的关系, 我们从简正波理论出发进行如下分析.

距离声源 r 近, 纵向相距为 Δ 两点上的声压可分别表示为

$$P(\omega, r - \Delta/2) \approx \sum_m A_m(\omega, r - \Delta/2) \times \exp[i\mu_m(r - \Delta/2)], \quad (3)$$

$$P(\omega, r + \Delta/2) \approx \sum_m A_m(\omega, r + \Delta/2) \times \exp[i\mu_m(r + \Delta/2)], \quad (4)$$

其中, $A_m(\omega, r)$ 表示第 m 号简正波的幅度,

$$A_m(\omega, r) = \frac{1}{\sqrt{8\pi\mu_m r}} \psi_m(z_r) \psi_m(z_s) \exp(-\beta_m r),$$

其随距离和频率缓变, 有 $A_m(\omega, r \pm \Delta/2) \approx A_m(\omega, r)$, k 为波数, μ_m , ψ_m 和 β_m 分别表示第 m 号简正波的本征值、本征函数和衰减系数.

将(3)和(4)式带入(1)式中, 在小纵向间隔

$$(\mu_m - \bar{\mu})\Delta \ll 1 \quad (5)$$

时, 保留二阶小量可得

$$\Gamma_L \approx 1 - \frac{\omega^2 \Delta^2}{2c_0^2} \langle K(\omega, r) \rangle \left\langle \frac{1}{I(\omega, r)} \right\rangle, \quad (6)$$

其中, c_0 为有效声速, $c_0 = \Delta/\tau$, τ 为相关延时,

$$I(\omega, r) = \sum_m A_m^2 + 2 \sum_{m>n} A_m A_n \cos[(\mu_m - \mu_n)r],$$

$$K = \sum_m A_m^2 \left(\frac{\mu_m - \bar{\mu}}{\bar{\mu}} \right)^2 + 2 \sum_{m>n} A_m A_n \cos[(\mu_m - \mu_n)r] \times \left(\frac{\mu_{mn} - \bar{\mu}}{\bar{\mu}} \right)^2,$$

$$\mu_{mn} = (\mu_m + \mu_n)/2, \quad \bar{\mu} = \omega/c_0.$$

由(6)式可知, 小纵向间隔时, $\Gamma_L(\omega, r)$ 与 $I(\omega, r)$ 在距离-频率空间上具有近似的极值分布. 也即, 小间隔的水平相关系数具有与声强类似的干涉结构. 令 $E_L = (1 - \Gamma_L)/\langle 1/I \rangle$, 纵向间隔固定不变时, 公式(6)可以表示为

$$E_L \propto \langle K \rangle \omega^2. \quad (7)$$

由前面的分析可知 $\langle K \rangle$ 随频率振荡变化, (7)式中 $\langle K \rangle$ 的存在使得 E_L 随频率平方变化的曲线存在一定的振荡. (7)式可以近似写为

$$E_L \propto \omega^2. \quad (8)$$

3.2 纵向相关实验结果

为了验证(8)式的正确性, 对其左右两边取以 10 为底的对数得

$$\log_{10}(E_L) = 2 \log_{10}(\omega) + \text{常数}. \quad (9)$$

在(9)式中, $\log_{10}(E_L)$ 与 $\log_{10}(\omega)$ 关系曲线的斜率即为(8)式中的频率幂次. 以下通过实验数据验证小间隔下 E_L 与频率平方的正比关系.

图 10 左图为 1/10 Oct (6.93%) 带宽下纵向间隔为 20 m 的相关处理结果, x 轴为 $\log_{10}(\omega)$, y 轴为 $\log_{10}(E_L)$, 实验数据拟合直线斜率为 2.03, 与(9)式中的斜率 2 很接近. 图 10 右图为纵向间隔为 50 m 的相关数据处理结果, 实验数据拟合直线斜率为 1.84.

图 11 为 1/3 Oct (23.16%) 带宽下的相关处理结果, 纵向间隔为 20 m 和 50 m 时, 拟合直线斜率分别为 2.01 和 1.76.

可见, 在 1/10 Oct 和 1/3 Oct 带宽下的纵向相关结果均符合(9)式.

图 10 1/10 Oct 带宽下, 纵向相关实验数据处理结果

左图: 纵向间隔为 20 m 时, $\log_{10}(E_L)-\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 2.03; 右图: 纵向间隔为 50 m 时, $\log_{10}(E_L)-\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 1.84

Figure 10 Longitudinal correlation at the frequency bandwidth of 1/10 Oct, and the longitudinal separations are 20 m (left figure) and 50 m (right figure), respectively.

图 11 1/3 Oct (23.16%) 带宽下, 纵向相关实验数据处理结果

左图: 纵向间隔为 20 m 时, $\log_{10}(E_L)-\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 2.01; 右图: 纵向间隔为 50 m 时, $\log_{10}(E_L)-\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 1.76

Figure 11 Longitudinal correlation, at the frequency bandwidth of 1/3 Oct, and the longitudinal separations are 20 m (left figure) and 50 m (right figure), respectively.

综上所述可以得到如下结论:

(1) 不同间隔时的纵向相关系数随频率的变化趋势基本一致, 它们与声强随频率的变化趋势一致.

(2) 理论和实验数据显示: 在固定的小纵向间隔下, E_L 近似与频率的平方成正比.

4 横向相关

在处理声场水平横向相关数据时, 还要排除纵

向间隔的影响.

水平相关通常是纵向相关和横向相关的综合作用, 在实验中很难获得纯粹的纵向相关数据或横向相关数据. 通常在相同频段, 横向相关系数随横向间隔下降的速度要比纵向相关系数随纵向间隔下降慢得多. 在处理纵向相关系数时, 实验中引入的小横向间隔对纵向相关系数影响很小, 可以忽略不计. 但在处理横向相关的实验数据时, 微小的纵向间隔引起的去相关就可能不再被忽略了. 因此, 有必要考虑横

向相关实验数据处理中纵向间隔的影响。

图 12 为声源位于横向投弹点时, 水平阵接收到的声信号波形. 可见, 位于水平阵两端的水听器接收信号存在 40 ms 左右的延时, 也即, 471 m 长的水平阵在信号到达方向上的纵向投影约为 63 m. 由图 3 可知, 水平接收阵阵元呈线性分布, 当接收距离远大于接收阵孔径时, 对于接收阵的每一对阵元, 其横向间隔与纵向间隔之间的比近似相等. 对本文的横向相关实验数据, 当横向间隔为 111 m 时, 对应的纵向间隔为 15 m. 如图 13 所示为纵向间隔均为 15 m 的横向相关系数(横向投弹点数据, 横向间隔 111 m)与纵向相关系数(纵向投弹点数据)随频率变化的曲线, 可见, 横向相关系数的下降远大于纵向相关系数的下降. 因此, 本文中的横向相关实验数据, 在横向间隔小于 111 m 时, 可忽略其中纵向间隔的影响。

补充一点, 纵向投弹点和横向投弹点与接收阵的距离均为 10 km 左右, 且本文中的相关系数已对阵元组合取平均, 在图 13 中的比较可以排除距离与阵元选择的影响。

1/10 Oct (6.93%) 带宽下, 水平横向相关系数随中心频率和横向间隔的分布如图 14 所示, 从图中可见水平横向相关系数随频率振荡变化. 图 15 为不同横向间隔下的横向相关系数随频率变化的曲线, 它们的变化趋势一致. 图 16 给出横向间距为 100 m 时的水平横向相关曲线与相对声强随频率的变化关系, 两者的变化趋势也是一致的。

图 12 声源位于阵横向时, 各阵元接收到的波形

Figure 12 The sound signal recorded by the HLA, and the explosive bomb was detonated in transverse direction of the HLA.

图 13 纵向间隔均为 15 m 时, 纵向相关系数和横向相关系数(横向间隔 111 m)随频率变化曲线

Figure 13 The longitudinal correlation coefficients and the transverse correlation coefficients verse frequency, and the longitudinal separations are both 15 m.

图 14 1/10 Oct 带宽下, 水平横向相关系数随中心频率和横向间隔的分布

横坐标表示相关中心频率, 纵坐标表示水平横向间隔

Figure 14 Transverse correlation coefficients versus transverse separation and frequency, and the frequency bandwidth is 1/10 Oct (6.93%).

4.1 声场横向相关理论分析

存在微扰时, 声速可表示为

$$c(z) = c_0(z) + \delta c(z), \quad (10)$$

其中 $c_0(z)$ 为无扰动时的声速分布, $\delta c(z)$ 为声速扰动项. 根据波动方程微扰理论, 声速扰动引起的本征值扰动可以表示为

图 15 不同水平横向间距下, 横向相关系数随频率的变化曲线(曲线之间沿着纵坐标下移 0.1)

Figure 15 Transverse correlation coefficients at different separations versus frequency, each curve removed by 0.1 along the reverse of the y-axis.

图 16 横向相关系数与相对声强随频率的变化曲线
横向间隔为 100 m

Figure 16 Transverse correlation coefficients and related Intensity versus frequency.

$$\delta\mu_m(r) \approx \omega \int_0^D \delta c(r, z) T_m(z) dz, \quad (11)$$

其中, D 为海深, μ_m 和 ψ_m 分别为第 m 号简正波的本征值和本征函数, ρ 为海水密度,

$$T_m(z) = \frac{-k_0(z)\psi_m^2(z)}{\rho\mu_m c_0^2(z)},$$

不受声速扰动影响。

由简正波理论, 距离声源 r 处, 存在一定横向间距的两个接收点的声压可表示为

$$\begin{aligned} P_1 &= \sum_m A_m \exp \left[i \int_{s1} (\mu_m + \delta\mu_{m1}) dr \right] \\ &= \sum_m A_m \exp(i\mu_m r + i\Delta_{m1}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \sum_m A_m \exp \left[i \int_{s2} (\mu_m + \delta\mu_{m2}) dr \right] \\ &= \sum_m A_m \exp(i\mu_m r + i\Delta_{m2}), \end{aligned} \quad (13)$$

其中, A_m 为第 m 号简正波的幅度, $\delta\mu_{m1}$ 和 $\delta\mu_{m2}$ 分别为在声传播路径 1 和路径 2 上距离声源 r 处的本征值扰动. Δ_{m1} 和 Δ_{m2} 分别表示第 m 号简正波本征值扰动在路径 1 和路径 2 上的相位积累, 结合(11)式可得

$$\Delta_{m1} = \int_{s1} \delta\mu_{m1} dr = \omega \int_{s1} \int_0^D \delta c(r, z) T_m(z) dz dr, \quad (14)$$

$$\Delta_{m2} = \int_{s2} \delta\mu_{m2} dr = \omega \int_{s2} \int_0^D \delta c(r, z) T_m(z) dz dr. \quad (15)$$

横向相关系数(不考虑延时)可以表示为

$$\Gamma_T = \left\langle \frac{\text{Re}(P_1 P_2^*)}{\sqrt{(P_1 P_1^*)(P_2 P_2^*)}} \right\rangle, \quad (16)$$

其中, 上横线表示系综平均. 假设声速扰动项在水平面内统计均匀且满足高斯分布, 将(12)和(13)式带入(16)式, 忽略 $\Delta_{m1,2}^2$ 以上的高阶小量后, 相关系数可以表示为

$$\Gamma_T \approx 1 - \left\langle \frac{\sum_m A_m^2 (\Delta_{m1}^2 + \Delta_{m2}^2)}{2I_0} \right\rangle \approx 1 - \langle B \rangle \left\langle \frac{1}{I_0} \right\rangle \omega^2, \quad (17)$$

其中, I_0 表示不考虑起伏时的声强,

$$B = \sum_m A_m^2 \Theta_{mm} + 2 \sum_{m>n} A_m A_n \cos[(\mu_m - \mu_n)r] \Theta_{mn},$$

$$\Theta_{mn}(\alpha, R) = \int_0^D \int_0^D \sigma^2 T_m(z_1) T_n(z_2) dz_1 dz_2,$$

$$\int_0^R \int_0^R \gamma \left(\frac{z_1 + z_2}{2}, |z_1 - z_2|, |r_1 - r_2| \right)$$

$$- \gamma \left(\frac{z_1 + z_2}{2}, |z_1 - z_2|, \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos \alpha} \right) dr_1 dr_2,$$

σ^2 为声速扰动方差, γ 为声速扰动的空间相关系数。

由(17)式可知, 在弱起伏 ($\Delta_{m1,2}$ 为小量) 时的横向

相关系数与声强随频率的变化趋势一致. 令 $E_T = (1 - \Gamma_T) / (1/I_0)$, 横向间隔固定时, (17)式可以表示为

$$E_T \propto \langle B \rangle \omega^2, \quad (18)$$

$\langle B \rangle$ 随频率振荡变化, (18)式中 $\langle B \rangle$ 的存在使得 $\langle E_T \rangle$ 随频率平方变化的曲线存在一定的振荡. 忽略这种振荡, (18)式可以近似写为

$$E_T \propto \omega^2. \quad (19)$$

4.2 横向相关实验数据

为了验证(19)式的正确性, 对其左右两边取以 10

为底的对数得

$$\log_{10}(E_T) = 2 \log_{10}(\omega) + \text{常数}. \quad (20)$$

图 17 左图所示为 1/10 Oct (6.93%)带宽时, 横向间隔为 20 m 时的实验数据, x 轴为 $\log_{10}(\omega)$, y 轴为 $\log_{10}(E_T)$, 由实验数据获得的拟合直线斜率为 2.34. 图 17 右图为横向间隔为 50 m 时的相关系数处理结果, 由实验数据拟合得到的拟合直线斜率为 2.05.

图 18 为 1/3 Oct (23.16%)带宽下的相关结果, 横向间隔为 20 m 和 50 m 时, 实验数据得到的拟合直线斜率分别为 2.29 和 1.87.

可见, 在 1/10 Oct 和 1/3 Oct 带宽下的相关结果

图 17 1/10 Oct 带宽下, 横向相关实验数据处理结果

左图: 横向间隔为 20 m 时, $\log_{10}(E_T)$ - $\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 2.34; 右图: 横向间隔为 50 m 时, $\log_{10}(E_T)$ - $\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 2.05

Figure 17 Transverse correlation, at the frequency bandwidth of 1/10 Oct, and the transverse separations are 20 m (left figure) and 50 m (right figure), respectively.

图 18 1/3 Oct (23.16%)带宽下, 横向相关实验数据处理结果

左图: 横向间隔为 20 m 时, $\log_{10}(E_T)$ - $\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 2.29; 右图: 横向间隔为 50 m 时, $\log_{10}(E_T)$ - $\log_{10}(\omega)$ 实验数据与曲线拟合结果, 斜率为 1.87

Figure 18 Transverse correlation, at the frequency bandwidth of 1/3 Oct, and the transverse separations are 20 m (left figure) and 50 m (right figure), respectively.

均符合(20)式.

综上所述可以得到如下结论:

(1) 不同间隔时的横向相关系数随频率的变化基本一致, 它们与声强随频率的变化趋势一致.

(2) 在小横向间隔下, E_T 均近似与频率平方成正比; 随着横向间隔增大, $\log_{10}(E_T)$ 随 $\log_{10}(\omega)$ 的线性关系变差, 频率的幂值拟合结果变小.

5 结论

在对一次海上实验数据进行声场水平相关性分析处理过程中, 发现水平纵向相关系数和水平横向相关系数的衰落均具有频率选择性. 对此开展了研究得到的主要结论如下:

(1) 由实验数据分析结果发现固定间隔下的水平纵向相关系数与声强随频率的变化趋势一致, 对此文中给出了理论证明.

(2) Γ_L 表示水平纵向相关系数, I 表示声强, $\langle \bullet \rangle$ 表示相关带宽上的频域平均, $(1-\Gamma_L)/\langle 1/I \rangle$ 近似与频率平方成正比.

(3) 由实验数据得到固定间隔下的近似的水平横向相关系数与声强随频率的变化趋势一致, 对此从水体的声速扰动出发给出了理论证明.

(4) Γ_T 表示横向相关系数, I_0 为不考虑起伏时的声强, 在弱起伏时, $(1-\Gamma_T)/\langle 1/I_0 \rangle$ 近似与频率平方成正比.

参考文献

- 1 Wang Q, Zhang R H. Sound spatial correlations in shallow water. J Acoust Soc Am, 1992, 92(2): 932-938
- 2 Smith P W Jr. Spatial coherence in multipath or multimodal channels. J Acoust Soc Am, 1976, 60(2): 305-310
- 3 Zhang R H, Su X X, Li F H. Improvement of low-frequency acoustic spatial correlation by frequency-shift compensation. Chin Phys Lett, 2006, 23: 1838-1841
- 4 Li X L, Ni M, Li Z L, et al. Study of horizontal correlation based on fiber-optic hydrophone (in Chinese). Appl Acoust, 2005, 1: 11-14 [李秀林, 倪明, 李整林, 等. 基于光纤水听器的声场水平相关性研究. 应用声学, 2005, 1: 11-14]
- 5 Clay C S, Wang Y Y, Shang E C. Sound field fluctuations in a shallow water waveguide. J Acoust Soc Am, 1985, 77(2): 424-428
- 6 张仁和. 海面与海水介质起伏对不同路径相干性的影响. 声学学报, 1979, 2: 109-113
- 7 尚尔昌. 随机浅海信道中信号场横向相干理论. 声学学报, 1979, 1: 33
- 8 Zhu R C, Guan D H. Spatial horizontal coherence of sound in shallow water. J Acoust Soc Am, 1992, 92(2): 956-961

Frequency dependence of horizontal correlation coefficients in shallow water

ZHANG YanJun*, ZHANG RenHe & LI FengHua

National Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

It was observed in a shallow water experiment that the horizontal correlation coefficients oscillated with frequency. The relationship among the longitudinal correlation, the intensity and frequency is given according to the normal mode theory and verified by the experimental data. The transverse correlation was also studied. In theory, the relationship among the transverse correlation coefficient, the intensity and frequency is obtained from the sound speed fluctuation.

longitudinal correlation, transverse correlation, characteristic of frequency dependence, sound intensity

PACS: 43.30.Bp, 43.30.Re

doi: 10.1360/132012-836