

宽频带海洋环境噪声矢量场空间相关特性建模

任超 黄益旺 夏峙

Modeling of spatial correlation characteristics of broadband ocean ambient noise vector field

Ren Chao Huang Yi-Wang Xia Zhi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 024301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211518

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211518>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用海洋环境噪声空间特性估计浅海海底分层结构及地声参数

Estimating structure and geoacoustic parameters of sub-bottom by using spatial characteristics of ocean ambient noise in shallow water

物理学报. 2019, 68(21): 214303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190824>

涡旋对深海风成噪声垂直空间特性的影响

Effect of mesoscale eddies on the vertical spatial characteristics of wind-generated noise in deep ocean

物理学报. 2020, 69(14): 144301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200059>

宽频带压缩态光场光学参量腔的设计

Design of optical parametric cavity for broadband squeezed light field

物理学报. 2020, 69(23): 234204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200890>

表面声道对深海风成噪声垂直空间特性的影响规律

Influence of surface duct on the vertical spatial characteristics of wind-generated noise in deep ocean

物理学报. 2019, 68(2): 024302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181794>

一种准零刚度声学超材料板的低频宽频带隔声行为

Broadband low-frequency sound insulation performance of quasi-zero stiffness local resonant acoustic metamaterial plate

物理学报. 2021, 70(24): 244302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211203>

基于Rydberg原子的超宽频带射频传感器

Broadband Rydberg atom-based radio-frequency field sensor

物理学报. 2018, 67(7): 073201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172636>

宽频带海洋环境噪声矢量场空间相关特性建模*

任超³⁾ 黄益旺^{1)2)3)†} 夏峙¹⁾²⁾³⁾

1) (哈尔滨工程大学, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (海洋信息获取与安全工信部重点实验室 (哈尔滨工程大学), 工业和信息化部, 哈尔滨 150001)

3) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

(2021年8月17日收到; 2021年9月22日收到修改稿)

基阵的信噪比增益与噪声场空间特性密切联系, 海洋环境噪声空间特性建模始终是水声学研究的热门问题. 声纳功能不同, 其工作频段和带宽通常也不相同, 因此, 任意频带噪声场的空间相关系数对声纳系统设计具有重要参考价值. 依据海洋环境噪声场的产生过程, 在高频近似条件下, 本文提出一种噪声场时域建模方法, 给出了水平分层介质中表面噪声时域声压和质点振速的积分表示, 为噪声矢量场宽带模型的建立奠定了基础. 根据风成噪声谱结构, 数值计算了不同频带、不同谱斜率的噪声场空间相关系数, 揭示了带宽、谱结构对风成噪声空间特性的影响规律. 随着阵元间距和带宽增大, 噪声矢量场各分量的空间相关系数的振荡周期数逐渐减少, 振荡幅度逐渐减小, 这是由于噪声场相关系数频域平均的结果. 当谱斜率小于零时, 宽频带噪声场的空间相关半径大于窄带噪声场的相关半径, 这是由于低频段噪声起主要贡献的结果, 实测海洋环境噪声声压场竖直方向空间相关特性变化规律与理论结果一致. 本文模型对换能器成阵技术研究以及环境参数反演具有潜在应用前景.

关键词: 宽频带噪声, 时域模型, 空间相关特性, 声矢量场**PACS:** 43.20.+g, 43.30.+m, 43.50.+y**DOI:** 10.7498/aps.71.20211518

1 引言

海洋环境噪声场是海洋中固有声场, 其中携带有大量海洋环境参数信息, 可用其进行环境参数反演. 例如 Deane 等^[1,2]的研究表明, 海底参数可从海洋环境噪声的垂直相关特性中进行提取; Harrison 和 Simons^[3,4]则利用噪声场的垂直指向性提取海底反射系数. 海洋环境噪声又是一般声纳系统的背景干扰, 在声纳设备设计和性能评估时需要考虑海洋环境噪声的影响. 实际海洋环境极其复杂, 且噪声源种类繁多, 特性各异, 各噪声源辐射噪声在海洋中传播, 形成了随空间和频率变化的复杂的海洋环境噪声场. 水听器基阵的信噪比增益与

噪声场空间特性密切相关, 海洋环境噪声场空间相关特性建模一直是水声学领域的热点研究方向. 鉴于不同的功能需求, 声纳系统的工作频段和工作带宽有所不同, 因此起干扰作用的噪声频带及带宽也发生变化, 理论预报系统工作频带内的噪声场空间相关系数具有迫切需求, 建立任意频带噪声场空间相关特性时域模型具有实际意义.

在过去的几十年中, 人们相继建立了单频噪声标量场空间相关特性模型. Cron 和 Sherman^[5]所提出的 C/S 模型是早期较为经典的噪声模型. Cox^[6]将噪声场看作各个方向到达观察点的非相干平面波的叠加, 由此得到一种噪声场模型, 结果与文献^[5]一致. 然而上述模型均对海洋环境进行了理想化假设, 忽略了海水声速分布和海洋上下界面对

* 国家自然科学基金 (批准号: 12074088) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huangyiwang@hrbeu.edu.cn

噪声场特性的影响. 为考虑环境参数对噪声场的影响, Kuperman 和 Ingenito^[7] 应用简正波理论建立了水平分层介质噪声场模型. Harrison^[8] 利用射线声学理论, 给出了水平分层介质噪声场空间相关系数积分表达式和噪声场垂直指向性解析表达式. Carey 等^[9] 和 Perkins 等^[10] 分别应用抛物方程方法和 $N \times 2D$ 声传播模型, 将二维噪声场模型扩展到距离有关的三维环境中. 蒋光禹等^[11,12]、张乾初等^[13]、江鹏飞等^[14,15]、周建波等^[16,17] 分别研究了涡旋、内波、表面声道、海面起伏、相关噪声源以及深度分布噪声源等因素对噪声空间特性的影响.

随着矢量传感器技术的发展, 以及矢量水听器的出现, 人们不仅能够拾取海洋中的标量声压场, 而且还能够拾取与声压共点的矢量声场, 声纳阵列信号处理方式得到极大丰富, 算法得到快速发展, 大量文献报道了矢量传感器的潜在优势^[18–21], 矢量声纳技术成为热点问题. 针对海洋环境噪声对矢量声纳的干扰问题, 人们首先研究了均匀各向同性噪声矢量场的空间相关特性, 给出相关系数解析表达式^[22–25]. Cray 和 Nuttall^[26] 以及 D'Spain 等^[18] 研究了各向同性噪声对矢量传感器的影响. Nichols 等^[27] 给出了各向同性噪声场中矢量水听器接收噪声的时间域空间相关函数, 该结果与 Hawkes 和 Nehorai^[22] 和 Cox 等^[25] 给出的互谱密度函数的逆傅里叶变换结果一致. 鄢锦等^[28]、黄益旺等^[29–31]、Thomas 等^[32] 先后对水平不变介质以及水平分层介质中噪声矢量场的空间特性进行了研究. 与噪声标量场模型类似, 上述矢量场模型也是针对单频噪声.

近十年来, 一定带宽或宽频带噪声场空间相关性建模开始受到关注. Buckingham^[33] 利用互相关函数与互相关函数的傅里叶变换对关系, 得到了限带海洋环境噪声的互相关函数, 研究了频带对均匀各向同性噪声以及表面噪声互相关特性的影响. Barclay 和 Buckingham^[34] 利用 Philippine 海的实验数据对该方法进行了验证. 基于射线声学理论, Ren 和 Huang^[35] 建立了水平分层介质噪声标量场空间相关特性时域模型, 对比分析了带宽对声压场空间相关特性的影响. 考虑到矢量声纳系统工作频带问题, 以及矢量水听器成阵技术研究和阵增益预报问题, 本文仍从时域建模出发, 根据射线声学理论, 利用简谐平面行波声场声压与质点振速的函数关系, 解决噪声源均匀分布在无限大海面时水平分层介质噪声声压场与质点振速场计算问题, 最

终建立噪声矢量场时域模型.

在该模型中, 噪声场空间相关系数被表示为噪声源辐射噪声归一化时间相关函数的空间积分. 由于在一定条件下, 随机过程的时间相关函数可用其功率谱密度函数表示. 因此, 本文模型可用于计算水平分层介质中具有任意频谱结构的表面噪声任意频带内的矢量场空间相关系数. 根据经典的风成噪声谱级曲线, 本文揭示了不同频带内噪声矢量场的空间相关特性. 理论结果与实测结果对比显示二者吻合良好.

2 噪声矢量场时域建模

2.1 均匀介质中噪声场模型理论

在均匀的无限介质中, 统计特性相同的无数个噪声源均匀分布在曲面 $S(\mathbf{r})$ 上, \mathbf{r} 为曲面上任意一点的三维空间的矢径. 假设位于 \mathbf{r} 处的单位面积的面元噪声源在声轴方向单位距离处的辐射声压为 $p_s(t, \mathbf{r})$. 考虑面积为 dS 的面元噪声源的辐射声压, 噪声源的垂直指向性函数为 $G(\theta_s)$, θ_s 为海面处声线出射掠射角, 则在 θ_s 方向, 与该噪声源距离为 R 处的声压为

$$x_n(R, t) = p_s(t, \mathbf{r}) G(\theta_s) \frac{dS}{R}. \quad (1)$$

进一步假设观察点位于噪声源辐射声场的远场, 空间任意两个观察点的间距为 d , 取两个观察点连线的中点为坐标原点, 建立球坐标系, 则两个观察点处的声场声压及质点振速可表示为

$$\mathbf{y}(R_1, t_1) = \int_S p_s(t_1, \mathbf{r}_1) G(\theta_s) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}_1 \end{bmatrix} \frac{dS_1}{R_1}, \quad (2)$$

$$\mathbf{y}(R_2, t_2) = \int_S p_s(t_2, \mathbf{r}_2) G(\theta_s) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}_2 \end{bmatrix} \frac{dS_2}{R_2}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ 为方向向量, R_1, R_2 为噪声源到两个观察点的距离, t_1, t_2 为对应的声波传播时间. 假设噪声为平稳随机过程, 可得噪声矢量场的时空相关函数为

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{12}(\tau, d) &= \langle \mathbf{y}(R_1, t_1) \mathbf{y}^T(R_2, t_2) \rangle \\ &= \iint_S \langle p_s(t, \mathbf{r}_1) p_s(t - \tau - \tau_{12}, \mathbf{r}_2) \rangle \\ &\quad \times G(\theta_s) G(\theta_s) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{u}_2^T \end{bmatrix} \frac{dS_1}{R_1} \frac{dS_2}{R_2}, \quad (4) \end{aligned}$$

其中, 符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均, 上角标 T 表示对矩阵

进行转置, τ_{12} 表示噪声源辐射声波到达两个观察点的传播时延. 假设曲面上空间不同位置的面元噪声源辐射噪声不相关, 这符合海面风成噪声源特性^[36], 则有

$$\begin{aligned} &\langle p_s(t, \mathbf{r}_1) p_s(t - \tau - \tau_{12}, \mathbf{r}_2) \rangle \\ &= B_u(\tau + \tau_{12}) \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, δ 表示狄拉克 Delta 函数, 将 (5) 式代入 (4) 式中有:

$$B_{12}(\tau, d) = \int_S B_u(\tau + \tau_{12}) G^2(\theta_s) \mathbf{U} \frac{dS}{R^2}, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} [1 \quad \mathbf{u}^T]$. (6) 式中, B_u 表示与噪声源空间坐标无关的面元噪声源辐射声压的时间相关函数. 因此, 当声纳系统工作频带内的噪声源辐射声压时间相关函数以及指向性函数已知时, 根据 (6) 式, 对噪声源分布曲面做面积积分即可得到给定频带噪声矢量场的空间相关函数. 若假设噪声源均匀分布于半径无限大的球面上, 则可获得各向同性噪声矢量场的空间相关函数; 若假设噪声源均匀分布于无限大海面上, 则可获得均匀半空间表面噪声矢量场的空间相关函数. 对于平稳随机过程, 如果噪声源辐射声压的功率谱密度函数已知, 则根据自相关函数和功率谱密度函数互为傅里叶变换对的结论也可计算噪声矢量场的空间相关函数, 因此该模型可用于分析任意频谱结构噪声源辐射的噪声场.

2.2 水平分层介质中噪声场模型理论

假设统计特性相同的噪声源均匀分布在无限大的海面, 噪声源空间不相关, 声压垂直指向性为 $G(\theta_s)$, 根据射线理论结合 (1) 式—(3) 式, 考虑如图 1 所示的水平分层介质中的表面噪声, 点 N 代表

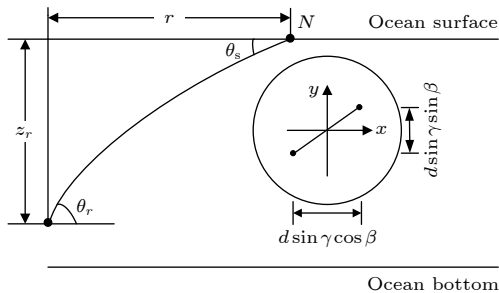


图 1 水平分层介质中表面噪声模型

Fig. 1. Schematic of surface-generated noise model in a horizontally stratified media.

面源噪声源. 位于观察点 (r, z_r) 处的噪声矢量场为

$$\mathbf{y}(t) = \int \sum_m A_m(z_r, r, \theta_r) p_s(r, t - \tau_m) G(\theta_s) \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} dS, \quad (7)$$

其中, $\mathbf{u} = [\cos \theta_r \cos \varphi \quad \cos \theta_r \sin \varphi \quad \sin \theta_r]^T$ 为方向向量, θ_r 为观察点处声线到达掠射角, φ 为观察点相对于面元噪声源的方位角, m 指第 m 条声线路径; $A_m(z_r, r, \theta_r)$ 表示第 m 条声线的幅度, τ_m 为到达观察点的第 m 条声线的传播时间. 则通过 (4) 式—(6) 式的推导可得空间任意两点噪声矢量场时空相关函数为

$$B_{12}(\tau, d) = \int \sum_m A_m^2 G^2(\theta_s) B_u(\tau + \tau_{12}) \mathbf{U} dS, \quad (8)$$

其中 τ_{12} 表示同一类声线到达空间两个观察点的时间差. 当观察点位于噪声源辐射声场的远场时, 同一类声线到达两个观察点的时差近似为

$$\tau_{12} = \frac{d \sin \zeta}{c(z_r)}, \quad (9)$$

其中 $d = |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$, $\sin \zeta = \sin \theta_r \sin \gamma + \cos \theta_r \cos \gamma \times \cos(\varphi - \beta)$, d 为观察点之间的距离, γ, β 分别表示三维空间的矢径 $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ 的俯仰角和方位角, $c(z_r)$ 表示观察点处声速. 假设噪声源为偶极子源, 其指向性函数可表示为^[5,8] $G(\theta_s) = \sin \theta_s$. 将文献 [8] 中分层介质中射线强度表达式代入 (8) 式, 并将关于水平距离 r 的积分转换为关于声线到达掠射角 θ_r 的积分, 讨论零延时情况下的噪声场空间相关函数, 即令 $\tau = 0$ 可得到:

$$\begin{aligned} \rho(d) = &\int_0^{2\pi} \left[\int_{\theta_{\min}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{QB_u(\tau_{12})}{1 - R_s(\theta_s)R_b(\theta_b)e^{-aS_c}} \sin \theta_s \cos \theta_r d\theta_r \right. \\ &\left. + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{-\theta_{\min}} \frac{QB_u(\tau_{12})}{1 - R_s(\theta_s)R_b(\theta_b)e^{-aS_c}} \sin \theta_s \cos \theta_r d\theta_r \right] \mathbf{U} d\phi, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 a 为海水介质衰减系数, S_c 表示一个完整周期声线跨度的长度, R_s, R_b 分别为海面、海底的能量反射系数, θ_b 为海底界面处声线入射掠射角. 对于特殊声速分布情况, 如深海声道声速分布, 则某些声线由于折射而未能触及海底, 此时海底能量反射系数取单位值. θ_{\min} 为声线最小到达掠射角, 对于海水声速恒定这种假想情况, 到达观察点的射线掠射角范围分别为 $[-\pi/2, 0)$ 和 $(0, \pi/2]$; 对于实际海水声速分布情况, 可根据折射定律公式来确定最小到达掠射角, (10) 式中的 θ_{\min} 表达式为

$$\theta_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{c(z_r)}{c(z_s)} \cos \theta_{s\min} \right), \quad (11)$$

式中, $\theta_{s\min}$ 为声线从海面能够到达观察点的最小出射掠射角. Q 表示非整周期声线的海水声吸收和海底声反射引起的衰减, 其取值分两种情况, 如图 2 所示, 当声线从海面传播至观察点时, 到达掠射角 $\theta_r \geq 0$, 此时 $Q = e^{-aS_p}$, S_p 表示非整周期声线从海面到达接收点的路径长度; 当声线从海面出发, 经过一次海底反射到达观察点时, 到达掠射角 $\theta_r < 0$, 此时 $Q = R_b(\theta_b)e^{-a(S_c - S_p)}$, $S_c - S_p$ 表示非整周期声线从海面出发, 经海底一次反射到达接收点的路径长度.

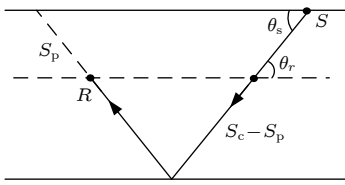


图 2 S_c 和 S_p 示意图

Fig. 2. Schematic of ray path S_c and S_p .

首先考虑一种简单情况, 上下界面平坦, 海面绝对软, 海底绝对硬, 海水声速为常数, 介质衰减系数很小, 即:

$$R_s = R_b = 1, \theta_s = |\theta_r|, S_p = z_r / \sin \theta_s,$$

$$S_c = 2H / \sin \theta_s, 1 - e^{-aS_c} \approx aS_c, \quad (12)$$

式中, H 为水深. 假设噪声源辐射噪声为理想限带白噪声, 频带为 $[\omega_1, \omega_2]$, 则该噪声的归一化时间相关函数为

$$B_u(\tau) = \frac{\sin(\omega_2\tau) - \sin(\omega_1\tau)}{(\omega_2 - \omega_1)\tau}. \quad (13)$$

将 (12) 式和 (13) 式代入 (11) 式, 考虑噪声垂直方向上的相关特性, 即令 $\gamma = \pi/2$, 此时 $\tau_{12} = d \sin \theta_r / c$. 经过简单的数学推导, 噪声场垂直方向空间相关函数为

$$\rho_{11} = \frac{\pi}{aH} \frac{2}{(k_2 - k_1)d} \left[\frac{\cos(k_1d)}{k_1d} - \frac{\cos(k_2d)}{k_2d} + \frac{\sin(k_2d)}{(k_2d)^2} - \frac{\sin(k_1d)}{(k_1d)^2} \right], \quad (14)$$

$$\rho_{22} = \rho_{33} = \frac{\pi}{aH} \frac{1}{(k_2 - k_1)d} \times \left[\frac{2\sin(k_1d)}{(k_1d)^2} + \frac{6\cos(k_1d)}{(k_1d)^3} - \frac{6\sin(k_1d)}{(k_1d)^4} - \frac{2\sin(k_2d)}{(k_2d)^2} - \frac{6\cos(k_2d)}{(k_2d)^3} + \frac{6\sin(k_2d)}{(k_2d)^4} \right], \quad (15)$$

$$\rho_{44} = \frac{\pi}{aH} \frac{2}{(k_2 - k_1)d} \left[\frac{\cos(k_1d)}{k_1d} - \frac{3\sin(k_1d)}{(k_1d)^2} - \frac{6\cos(k_1d)}{(k_1d)^3} + \frac{6\sin(k_1d)}{(k_1d)^4} - \frac{\cos(k_2d)}{k_2d} + \frac{3\sin(k_2d)}{(k_2d)^2} + \frac{6\cos(k_2d)}{(k_2d)^3} - \frac{6\sin(k_2d)}{(k_2d)^4} \right], \quad (16)$$

$$\rho_{14} = a(H - z_r) \rho_{11}, \quad (17)$$

式中, 下角标的数字 1, 2, 3, 4 分别对应三维矢量水听器的 4 个分量 p , v_x , v_y 和 v_z . 从 (14) 式—(17) 式可以看出, 在竖直方向上, 理想波导中噪声矢量场的相同分量之间相关; 除 p 与 v_z 外, 不同分量之间不相关. 同时还发现, p , v_x , v_y 和 v_z 等 4 个分量的方差随 H 和 a 的增大而线性减小, 然而 p 与 v_z 的协方差与 a 无关, 且随 H 的增大而增大. 令 $d = 0$, 可得单矢量水听器接收到的理想带限白噪声的协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a(H - Z_r) \\ 0 & \frac{1}{5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{5} & 0 \\ a(H - Z_r) & 0 & 0 & \frac{3}{5} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

可以看出 p 与 v_z 之间的归一化协方差与 a 成正比, 虽然该结果是从理想模型推导出来的, 但可以预测, 真实海面噪声的协方差具有类似的特征, 这将有助于反演海水介质衰减系数.

3 噪声矢量场的空间相关系数

针对水平分层介质问题, 对我国南海某海底平坦海域进行仿真, 海水深度为 103 m, 密度取 1 g/cm^3 , 海水中介质衰减系数由经验公式获得^[37]:

$$a \approx \frac{1.09 \times 10^{-4} f^2}{1 + f^2} + \frac{4.37 \times 10^{-2} f^2}{4100 + f^2} + 3.01 \times 10^{-7} f^2, \quad (19)$$

式中, a 的单位 dB/m, f 表示声波频率, 单位为 kHz. 对于频率为 1000 Hz 的声波, 海水中介质衰减系数约为 6.5×10^{-5} dB/m. 实测声速剖面如图 3 所示; 海面绝对软, 即声强反射系数 $R_s = 1$; 海底视为均匀液态半空间, 假设底质为砂质海底, 声速为 1700 m/s, 密度为 1.8 g/cm^3 , 对于 100—2000 Hz 频段, 砂质海底纵波衰减系数 α_b (dB/m) 的经验公式为^[38]

$$\alpha_b = (0.25 \pm 0.01) f^{(2.16 \pm 0.04)}. \quad (20)$$

1000 Hz 频率砂质海底的纵波衰减系数大致为 0.25 dB/m, 部分参数整理于表 1 中. 根据两种流体介质界面的平面波声压反射系数计算得到海底声强反射系数 R_b .

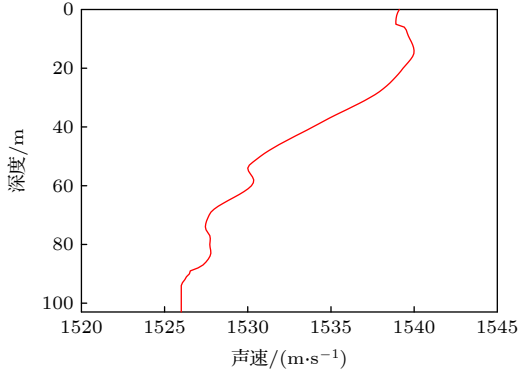


图 3 声速剖面

Fig. 3. Sound speed profile.

表 1 环境参数

Table 1. Environmental parameters.

介质	声速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	衰减系数/(dB·m ⁻¹)
海水	声速剖面	1.0	6.5 × 10 ⁻⁵
海底	1700	1.8	0.25

噪声源位于海面下 0.1 m 深度的无限大平面上, 上下界面平坦, 根据 Bellhop 模型求出声场中各条声线的坐标和初始掠射角, 使用 Snell 定律求得观察点处的到达掠射角, 利用声线轨迹计算出 S_c , S_p 的长度.

在 500 Hz—10 kHz 范围内, 海洋表面风成噪声是主要噪声源, 噪声谱级按每倍频程 5—6 dB 规律衰减^[39]. 取每倍频程衰减 6 dB 的斜率, 风成噪

声的功率谱密度函数可表示为

$$S(\omega) = \begin{cases} A\omega^{-2}, & \omega_0 - \frac{W}{2} < |\omega| < \omega_0 + \frac{W}{2}, \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (21)$$

其中, ω_0 表示中心频率, W 表示频率变化范围, A 为 1 Hz 频点处单位带宽的噪声功率. 在大多数实际情况下, 水听器接收到的海洋环境噪声谱与海面噪声源的辐射谱是一致的^[31], 因此可以使用噪声谱特性来表示噪声源的辐射谱特性. 下面分别分析噪声源辐射谱均匀及辐射谱不均匀时噪声矢量场的空间相关特性, 选择频带范围为 500—1500 Hz 的宽频带噪声进行仿真研究, 观察点深度 40 m, 其中噪声源辐射谱不均匀时谱特性使用如 (21) 式所示风成噪声谱特性来表示. 噪声场水平方向的相关系数计算中, 观察点连线的方位角取 $\beta = \pi/6$. 两种不同辐射谱条件下的噪声场的空间相关系数分别如图 4 和图 5 所示, 图中 λ 为声波波长. 为了将宽频带噪声场与窄带噪声场的相关特性做对比分析, 应用本文模型再次计算了 1000 Hz 频点的相关系数, 结果见图中的无符号曲线.

无论频带内的噪声源辐射谱是否均匀, 对比单频噪声和宽频带噪声的空间相关系数可以发现, 随着观察点间距的增大, 后者振荡幅度均小于前者; 当辐射谱均匀时, 两种噪声场的空间相关半径基本一致; 当辐射谱不均匀时, 宽频带噪声场的空间相关半径均大于单频噪声场的相关半径. 由于风成噪声辐射谱的非均匀性, 噪声场相关半径的这个特点意味着宽带接收系统的阵元间距应当适当增大, 以获得更高的阵增益.

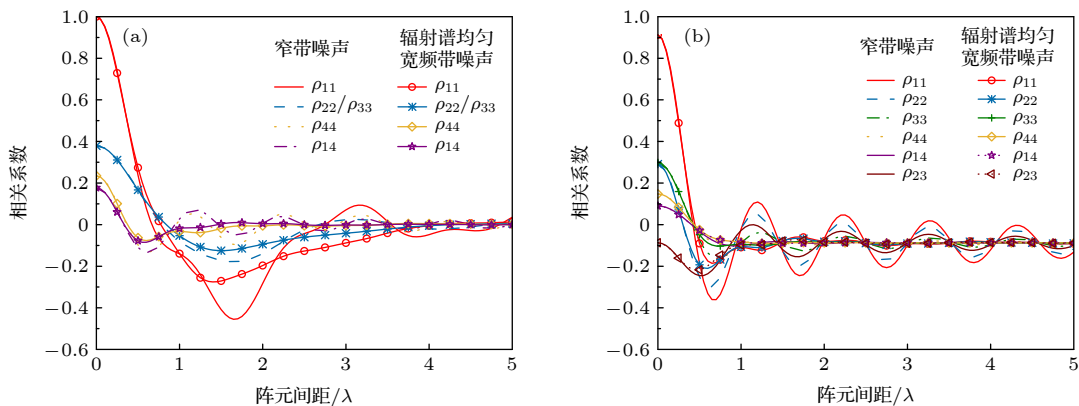


图 4 辐射谱均匀时噪声场的空间相关系数 (a) 垂直方向; (b) 水平方向

Fig. 4. Spatial correlation of noise with flat spectrum in a horizontally stratified media: (a) Vertical direction; (b) horizontal direction.

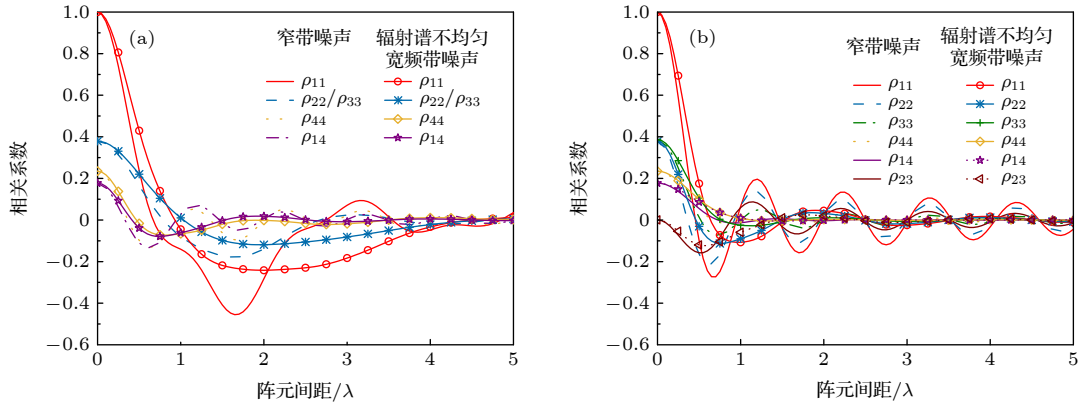


图 5 辐射谱不均匀时噪声场的空间相关系数 (a) 垂直方向; (b) 水平方向

Fig. 5. Spatial correlation of noise with sloped spectrum in a horizontally stratified media: (a) Vertical direction; (b) horizontal direction.

4 海上实验验证

实验数据于 2021 年 4 月在中国南海某浅水海域采集, 实验海域水深约 103 m, 实测声速剖面如图 3 所示. 实验采用 1 条 64 元充油缆线列阵, 阵间距为 1 m, 悬挂于船尾, 阵尾端连接配重, 以确保阵姿态保持竖直状态, 系统本身自噪声低于 1 级海况海洋环境噪声. 实验期间为休渔期, 实验站点远离航道, 在进行噪声测量实验期间关闭实验船自身的主机和辅机, 从而最大程度上减弱航船噪声的干扰. 通过查阅相关资料得知, 实验海区海底较为平坦, 可认为是水平不变环境, 海底底质为粉砂质沙^[40], 海底声速、密度^[41]分别为 1617 m/s, 1.8 g/cm³;

参考 (19) 式和 (20) 式可知, 频率为 400 Hz 的声波在砂质海底中纵波衰减大致为 0.035 dB/m; 海水中介质衰减系数约为 1.7×10^{-5} dB/m.

本次实验使用的水听器阵为声压阵, 仅能得到噪声声压场垂直方向空间相关系数, 但也足以体现频带宽度和频谱结构对宽频带噪声模型的影响规律. 参考文献 [42] 所描述的噪声时间噪声平稳性分析方法, 本文噪声数据平稳时间约为 5 min, 因此处理结果为 5 min 噪声数据的平均相关系数, 将剔除干扰后的有效数据以 0.5 s 窗长分为若干段进行计算, 然后将计算结果进行平均来表示该段时间噪声的垂直方向空间相关系数, 设任意两个通道滤波后噪声信号时间序列分别为 x_i 和 x_j , 得到第 i 通道和第 j 通道噪声场空间相关系数 ρ_{ij} 为

$$\rho_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\int_{nT}^{(n+1)T} x_i(t) x_j(t) dt}{\sqrt{\int_{nT}^{(n+1)T} |x_i(t)|^2 dt \int_{nT}^{(n+1)T} |x_j(t)|^2 dt}}, \quad (22)$$

式中, N 为时间平均次数, T 为窗长, 分别选取实验中两个不同时间段的 5 min 噪声数据进行处理, 两段数据分别记作为数据 1、数据 2, 对应平均风速分别为 2.5, 5.0 m/s. 同时考虑水听器间距与波长的关系以及射线声学的适用条件^[39], 宽频带噪声相关系数处理选取噪声中心频率 $f_0 = 400$ Hz, 带宽 W 分别为 100, 200, 400 Hz, 并与 400 Hz 频点的窄带噪声相关系数进行比较.

两组数据噪声谱如图 6(a), (b) 所示, 在噪声处理中感兴趣的 200—600 Hz 频段处, 噪声谱级随

频率增加分别满足 $f^{-2.3}$, $f^{-2.2}$ 的衰减规律, 理论计算中选取噪声谱级斜率与实际相同. 图 7 和图 8 给出了两组数据噪声垂直方向空间相关系数与理论结果的对比, 图中编号 (a), (b), (c), (d) 分别对应窄带噪声以及带宽为 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz 的宽频带噪声垂直方向空间相关系数. 表 2 给出了两组数据理论值与实验值的相关系数以评价二者相似程度, 两组数据各频段实验与理论结果的相关系数均大于 0.92, 最高可达 0.97, 证明实验与理论结果符合得非常好. 从图 6 中可以看出, 所处时间

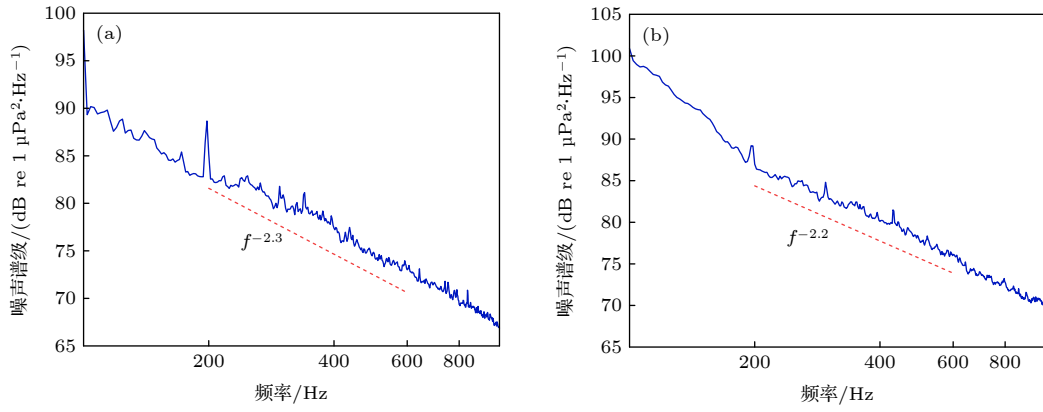


图 6 环境噪声谱 (a) 数据 1; (b) 数据 2

Fig. 6. Spectrum of ambient noise: (a)Data 1; (b)data 2.

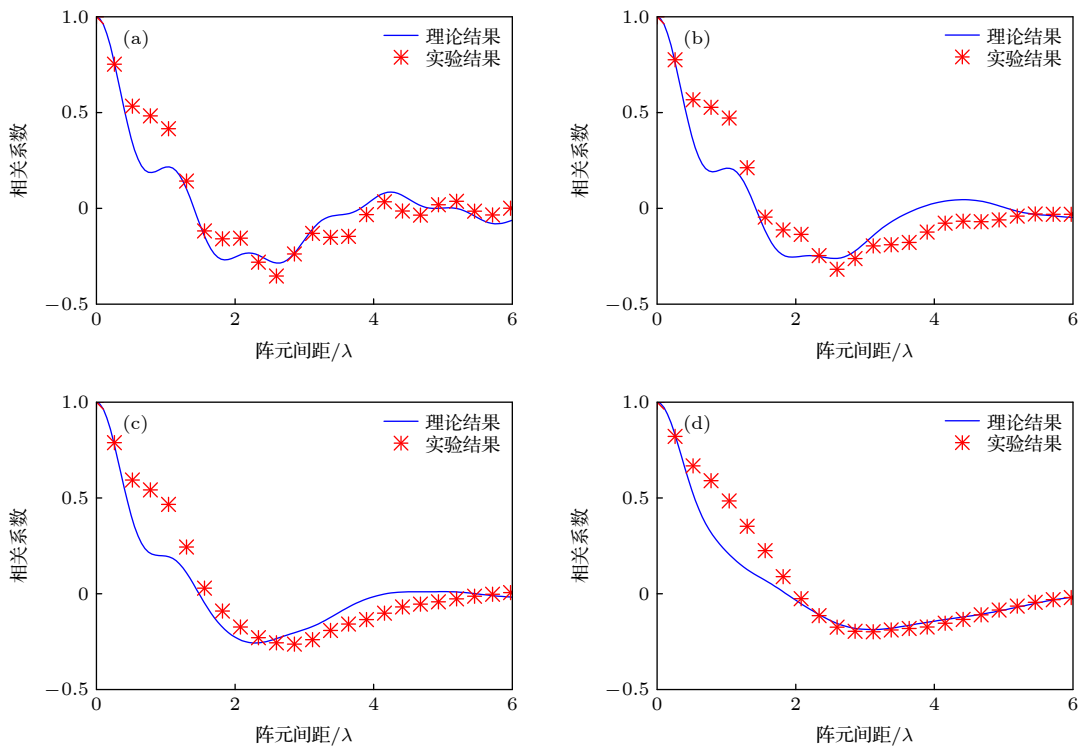


图 7 数据 1 噪声垂直方向空间相关系数 (a) 窄带噪声; (b) $W = 100$ Hz; (c) $W = 200$ Hz; (d) $W = 400$ Hz

Fig. 7. Noise vertical spatial correlation coefficient of data 1: (a) narrowband noise; (b) $W = 100$ Hz; (c) $W = 200$ Hz; (d) $W = 400$ Hz.

段平均风速较高的数据 2 噪声谱级高于数据 1, 噪声谱也更平坦, 数据 2 各频段理论与实验值相关系数均略大于数据 1, 可知风速较大时噪声相关系数理论与实验值更相符, 这是由于在所关注的频段内, 噪声主要受风成噪声和远处航船噪声影响 [32], 当风速增大时, 风成噪声对该频段噪声贡献增大, 噪声源特性更符合本模型所假设的偶极子源特性, 因此理论与实验值相似度更高. 实验结果还显示, 随着观察点间距的增大, 宽频带噪声相关系

数振荡幅度均小于单频噪声; 同时, 带宽为 400 Hz 的宽频带噪声相关半径略大于单频噪声的相关半径, 这对第 3 节中由仿真得出的结论进行了验证.

表 2 噪声相关特性理论与实验值的相关系数
Table 2. Correlation coefficient of theoretical and experimental correlation characteristic of noise.

带宽	窄带噪声	100 Hz	200 Hz	400 Hz
数据1	0.948	0.920	0.938	0.964
数据2	0.963	0.961	0.969	0.970

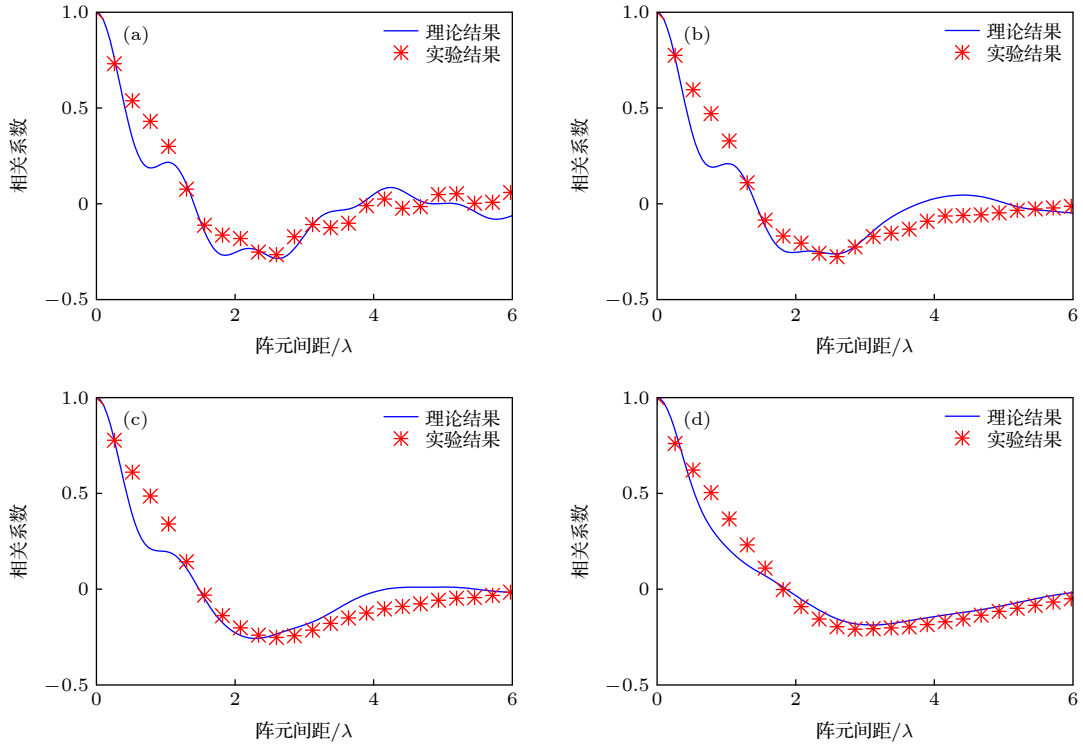

 图 8 数据 2 噪声垂直方向空间相关系数 (a) 窄带噪声; (b) $W = 100$ Hz; (c) $W = 200$ Hz; (d) $W = 400$ Hz

Fig. 8. Noise vertical spatial correlation coefficient of data 2: (a) Narrowband noise; (b) $W = 100$ Hz; (c) $W = 200$ Hz; (d) $W = 400$ Hz.

5 讨论

基于前文的理论模型, 进一步讨论噪声谱对宽频带噪声矢量场空间相关特性的影响机理. 首先根据自相关函数和功率谱密度函数互为傅里叶变换

对关系, 有

$$B_u(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega, \quad (23)$$

式中 $S(\omega)$ 为噪声源自功率谱, 将 (23) 式代入 (10) 式中可得:

$$\rho(d) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\int_{\theta_{\min}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{Q \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{-j\omega\tau_{12}} d\omega}{1 - R_s(\theta_s) R_b(\theta_b) e^{-a S_c}} \sin\theta_s \cos\theta_r d\theta_r + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{-\theta_{\min}} \frac{Q \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{-j\omega\tau_{12}} d\omega}{1 - R_s(\theta_s) R_b(\theta_b) e^{-a S_c}} \sin\theta_s \cos\theta_r d\theta_r \right] U d\varphi, \quad (24)$$

当噪声源辐射单频噪声时, 角频率为 ω_0 , 则 $S(\omega) = \delta(\omega - \omega_0)$, 此时单频噪声矢量场空间相关函数为

$$\rho'(d) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[\int_{\theta_{\min}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{Q e^{-j\omega_0\tau_{12}}}{1 - R_s(\theta_s) R_b(\theta_b) e^{-a S_c}} \sin\theta_s \cos\theta_r d\theta_r + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{-\theta_{\min}} \frac{Q e^{-j\omega_0\tau_{12}}}{1 - R_s(\theta_s) R_b(\theta_b) e^{-a S_c}} \sin\theta_s \cos\theta_r d\theta_r \right] U d\varphi, \quad (25)$$

该结果与文献 [31] 结果一致. 对于宽频带噪声谱 $S(\omega)$, 假定在一定频带范围内, 介质衰减系数 a , α_b 与频率无关, 那么宽频带噪声矢量场空间相关函数可表示为

$$\rho(d) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \rho'(d) d\omega. \quad (26)$$

由此可知, 宽频带噪声矢量场相关函数可以看作噪声谱频率范围内各单频噪声矢量场相关函数之和, $S(\omega)$ 相当于各频点相关函数的加权系数. 当噪声谱如 (21) 式所示时, $S(\omega)$ 随频率增大而减小, 较低频点处相关函数加权系数增大, 因此积分所得宽频带噪声矢量场空间相关函数的相关半径随之增大.

需要强调一下, 在使用 (26) 式计算 $\rho(d)$ 时, 本节中介质衰减与频率无关的假设并不是必须的, 仅为保证模型条件与前文一致. 若无该假设条件, 假设界面平整, 则只需针对不同频率下的 a , α_b , 计算对应的与频率相关的 $\rho'(d, \omega)$, 再代入 (26) 式中进行积分即可. 考虑噪声谱均匀时 500—1500 Hz 频带内噪声矢量场的空间相关性. 计算中, a 的频率函数取 (19) 式, α_b 的频率函数取 (20) 式, 其他参数与前文仿真参数一致, 并与介质衰减与频率无关时的仿真结果 (见图 4) 进行比较, 结果见图 9. 从图中可以看出, 两种条件下, 噪声矢量场各分量的空间相关系数均有一定差别. 介质衰减与频率有关时, 在竖直方向上, ρ_{11} , ρ_{22} , ρ_{33} 的相关半径增大; 水平方向上, ρ_{11} , ρ_{22} , ρ_{33} , ρ_{23} 也有相同的变化, 但变化范围较小. 这类似于噪声谱不均匀对宽频带噪声声压空间相关系数的影响, 但介质衰减的变化导致 $\rho'(d, \omega)$ 随频率发生变化, 与 $S(\omega)$ 对宽频

带噪声矢量场的空间相关性影响机理不一致. 而 ρ_{44} 和 ρ_{14} 在水平及竖直方向上仅振荡幅度略有变化. 虽然采用 (26) 式的方法可对介质衰减随频率变化的情况求解, 但该方法数值计算过程繁琐, 所需计算时间远远超过直接使用噪声自相关函数 $B_u(\tau)$ 来计算 $\rho(d)$ 的 (10) 式, 对于低频或带宽较窄的目标频段, 介质衰减随频率变化不明显, 二者的计算结果将基本一致.

6 结 论

海洋环境噪声的空间特性是影响声纳性能的重要因素之一. 不同功能声纳系统的工作频段及工作带宽可能有所不同, 不同种类的海洋环境噪声源辐射噪声的频谱特性和空间特性也可能存在差异. 为了获取任意频带海洋环境噪声矢量场的空间相关性, 揭示噪声源辐射噪声的频带宽度、频谱结构与噪声矢量场空间特性的内在联系, 本文基于射线声学理论, 采用时域建模方法, 在统计特性相同的不相关噪声源均匀分布在无限大的海面上的假设条件下, 推导出水平分层介质中表面噪声矢量场空间任意方向上零延时相关系数的积分表示. 分别研究了噪声源的功率谱均匀及不均匀时宽频带噪声矢量场的空间相关性, 并与窄带噪声场的相关特性做对比分析. 竖直和水平两个特殊方向上的数值结果表明, 频带宽度的增加会使噪声矢量场空间相关系数的振荡幅度变小; 频谱结构的改变会对噪声矢量场空间相关半径产生影响, 实测宽频带海洋环境噪声声压场竖直方向空间相关性变化规律与理论结果一致. 因此应将工作频段、带宽以及频带内噪声频谱结构作为声纳设计和使用时的重要参考因素.

本文所提出的时域建模方法很容易推广至宽频带噪声模型的分析中, 如各向同性噪声模型及表面噪声模型. 同时, 对于一些只有通过时间序列分析才能详细了解的问题, 如利用噪声场互相关函数提取波导的多途结构, 本文方法则可以直接给出该函数, 而无需对噪声场的频域解进行傅里叶合成. 相比于已有的时域建模方法 [27], 本文方法可应用于水平分层介质等海洋环境, 更具备实际意义.

本文的研究工作进一步加深了人们对海洋环境噪声场的认识, 对矢量声纳的设计、应用、性能提升以及矢量信号处理技术的发展均有潜在应用

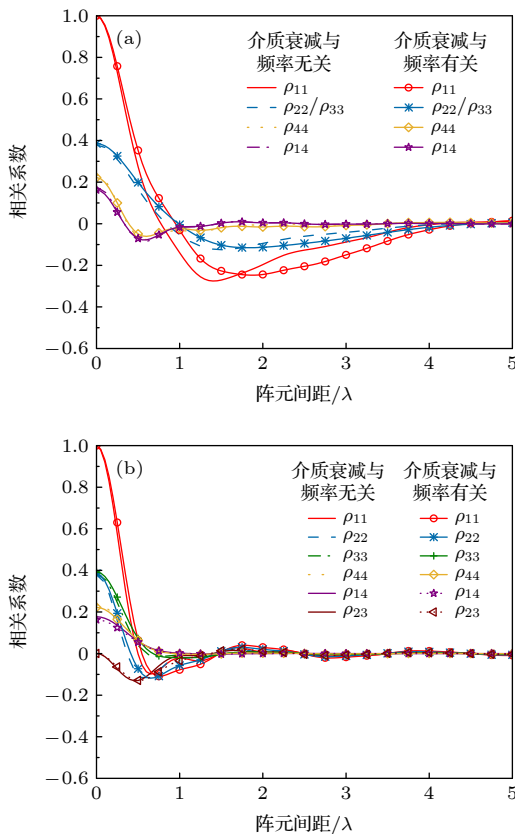


图 9 介质衰减与频率关系对宽频带噪声矢量场空间相关系数的影响 (a) 竖直方向; (b) 水平方向

Fig. 9. Influence of relationship between frequency and attenuation on the spatial correlation coefficient of broadband noise vector field: (a) Vertical direction; (b) horizontal direction.

前景. 应用本文模型还可分析海水参数、海底参数对噪声场的影响, 为反演海洋环境参数提供新途径. 在未来的工作中, 将进一步考虑海底、海面的反射损失以及介质衰减系数的频率特性, 把它们引入到时域模型中, 以完善模型, 提升模型的适用性.

参考文献

- [1] Deane G B, Buckingham M J, Tindle C T 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **102** 3413
- [2] Carbone N M, Deane G B, Buckingham M J 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **103** 801
- [3] Harrison C H, Simons D G 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 1377
- [4] Harrison C H 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 1505
- [5] Cron B F, Sherman C H 1962 *J. Acoust. Soc. Am.* **34** 1732
- [6] Cox H 1973 *J. Acoust. Soc. Am.* **54** 1289
- [7] Kuperman W A, Ingentio F 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1988
- [8] Harrison C H 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **99** 2055
- [9] Carey W M, Evans E B, Davis J A, Botseas G 1990 *IEEE J. Oceanic. Eng.* **15** 324
- [10] Perkins J S, Kuperman W A, Ingentio F, Fialkowski L T 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 739
- [11] Jiang G Y, Sun C, Xie L, Liu X H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 024302 (in Chinese) [蒋光禹, 孙超, 刘雄厚, 谢磊 2019 *物理学报* **68** 024302]
- [12] Jiang G Y, Sun C, Li Q R 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 144301 (in Chinese) [蒋光禹, 孙超, 李沁然 2020 *物理学报* **69** 144301]
- [13] Zhang Q C, Guo X Y, Ma L 2019 *Acta Acustica* **44** 189 (in Chinese) [张乾初, 郭新毅, 马力 2019 *声学学报* **44** 189]
- [14] Jiang P F, Lin J H, Ma L, Jiang G J 2013 *Acta Acustica* **38** 724 (in Chinese) [江鹏飞, 林建恒, 马力, 蒋国健 2013 *声学学报* **38** 724]
- [15] Jiang P F, Lin J H, Sun J P, Yi X J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 014306 (in Chinese) [江鹏飞, 林建恒, 孙军平, 衣雪娟 2017 *物理学报* **66** 014306]
- [16] Zhou J B, Piao S C, Huang Y W, Liu Y Q, Ou Y Q 2017 *J. Harbin Engin. Univ.* **38** 1056 (in Chinese) [周建波, 朴胜春, 黄益旺, 刘亚琴, 欧焱青 2017 *哈尔滨工程大学学报* **38** 1056]
- [17] Zhou J B, Piao S C, Liu Y Q, Zhu H H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 014301 (in Chinese) [周建波, 朴胜春, 刘亚琴, 祝捍皓 2017 *物理学报* **66** 014301]
- [18] D'Spain G L, Luby J C, Wilson G R, Gramann R A 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **120** 171
- [19] Zhou J B, Piao S C, Qu K, Iqbal K, Yang D, Zhang S Z, Zhang H G, Wang X H, Liu Y Q 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **142** EL507
- [20] Hawkes M, Nehorai A 1998 *IEEE Trans. Signal Process.* **46** 2291
- [21] Nehorai A, Paldi E 1994 *IEEE Trans. Signal Process.* **42** 2481
- [22] Hawkes M, Nehorai A 2001 *IEEE J. Oceanic. Eng.* **26** 337
- [23] Sun G Q, Yang D S, Shi S G 2009 *Acta Acustica* **28** 509 (in Chinese) [孙贵青, 杨德森, 时胜国 2009 *声学学报* **28** 509]
- [24] Huang Y W, Yang S E, Piao S C 2009 *J. Harbin Engin. Univ.* **30** 1209 (in Chinese) [黄益旺, 杨士莪, 朴胜春 2009 *哈尔滨工程大学学报* **30** 1209]
- [25] Cox H, Lai H, Bell K 2009 *Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals CA, USA, November 1-4, 2009* p459
- [26] Cray B A, Nuttall A H 2001 *J. Acoust. Soc. Am.* **110** 324
- [27] Nichols B, Martin J, Verlinden C, Sabra K G 2019 *J. Acoust. Soc. Am.* **145** 3567
- [28] Yan J, Luo X Z, Hou C H 2006 *Acta Acustica* **31** 310 (in Chinese) [鄢锦, 罗显志, 侯朝焕 2006 *声学学报* **31** 310]
- [29] Huang Y W, Yang S E 2010 *J. Harbin Engin. Univ.* **31** 137 (in Chinese) [黄益旺, 杨士莪 2010 *哈尔滨工程大学学报* **31** 137]
- [30] Huang Y W, Li T, Yu S Q, Zhang W 2010 *J. Harbin Engin. Univ.* **31** 975 (in Chinese) [黄益旺, 李婷, 于盛齐, 张维 2010 *哈尔滨工程大学学报* **31** 975]
- [31] Huang Y W, Ren Q Y, Li T 2012 *J. Mar. Sci. Appl.* **11** 119
- [32] Deal T J 2018 *J. Acoust. Soc. Am.* **143** 605
- [33] Buckingham M J 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **131** 2643
- [34] Barclay D R, Buckingham M J 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 62
- [35] Ren C, Huang Y W 2020 *J. Acoust. Soc. Am.* **147** EL99
- [36] Бреховских И М (translated by Department of Oceanophysics Shandong College of Oceanology, Laboratory of Underwater Acoustic Institute of Acoustics Chinese Academy of Science) 1983 *Fundamentals of Ocean Acoustics* (Beijing: Science Press) pp511-520 (in Chinese) [布列霍夫斯基 И М (山东海洋学院海洋物理系, 中国科学院声学研究所水声研究室 译) 1983 *海洋声学* (北京: 科学出版社) 第511—520页]
- [37] Thorp W H 1967 *J. Acoust. Soc. Am.* **42** 240
- [38] Zhou J X 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 2847
- [39] Liu B S, Huang Y W, Chen W J, Lei J Y 2019 *Principles of Underwater Acoustics* (3rd edition) (Beijing: Science Press) pp243 (in Chinese) [刘伯胜, 黄益旺, 陈文剑, 雷家煜 2019 *水声学原理* (第三版) (北京: 科学出版社) 第243页]
- [40] Shi X F 2012 *China Offshore Ocean: Seafloor Material* (Beijing: China Ocean Press) pp375-380 (in Chinese) [石学法 2012 *中国近海海洋: 海洋底质* (北京: 海洋出版社) 第375—380页]
- [41] Jackson D R, Richardson M D (translated by Liu B H, Kan G M, Li G B, Han T C, Meng X M, Zhang D Y) 2014 *High-Frequency Seafloor Acoustics* (Beijing: China Ocean Press) pp107-110 (in Chinese) [杰克逊 D R, 理查德森 M D (刘保华, 阚光明, 李官保, 韩同城, 孟祥梅, 张德玉 译) 2014 *高频海底声学* (北京: 海洋出版社) 第107—110页]
- [42] Jiang D G, Lin J H, Sun J P, Jiang P F, Yi X J, Ma L, Jiang G J 2017 *Per. Ocean. Univ. China. (Nat. Sci.)* **47** 140 (in Chinese) [蒋东阁, 林建恒, 孙军平, 江鹏飞, 衣雪娟, 马力, 蒋国健 2017 *中国海洋大学学报(自然科学版)* **47** 140]

Modeling of spatial correlation characteristics of broadband ocean ambient noise vector field*

Ren Chao³⁾ Huang Yi-Wang^{1)2)3)†} Xia Zhi¹⁾²⁾³⁾

1) (*Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China*)

3) (*College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 17 August 2021; revised manuscript received 22 September 2021)

Abstract

The signal-to-noise ratio gain of the array is closely related to the spatial characteristics of the noise field. The modeling of the spatial characteristics of marine environmental noise is always a hot spot. For sonar with different functions, the working frequency band and bandwidth are usually different. Therefore, the spatial correlation coefficient of the noise field in arbitrary frequency band has important reference value for designing sonar systems. According to the process of generating the marine environmental noise field under the high frequency approximation condition, a noise field time-domain modeling method is proposed, and the integral expression of the time-domain sound pressure and particle vibration velocity of marine environmental noise in a horizontally layered medium is given. This lays the foundation for establishing a broadband model of the noise vector field. In particular, the analytical expression of the spatial correlation coefficient of the broadband white noise vector field in the vertical direction under specific condition is also given. Following the spectral structure of wind-generated noise, the spatial correlation coefficients of noise fields with different frequency bands and different spectral slopes are numerically calculated, revealing the influence of bandwidth and spectral structure on the spatial characteristics of marine environmental noise, and the principle behind the result is explained through theoretical derivation. With the increase of the array element spacing and bandwidth, the number of oscillation periods and the oscillation amplitude of the spatial correlation coefficient of each component of the noise vector field gradually decrease, which is caused by the frequency domain average of the noise field correlation coefficient. When the spectral slope is less than zero, the low-frequency noise plays a major role, causing the spatial correlation radius of the broadband noise field to be larger than that of the narrowband noise field. The result of the experiment conducted in South China Sea shows that the measured vertical spatial correlation coefficient of the sound pressure field of marine environmental noise is in good agreement with the theoretical result. The model has potential application prospects for the research of transducer array technology and the inversion of environmental parameters.

Keywords: broadband noise, time domain model, spatial correlation, acoustic vector field

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m, 43.50.+y

DOI: 10.7498/aps.71.20211518

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12074088).

† Corresponding author. E-mail: huangyiwang@hrbeu.edu.cn