

◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

## 海洋环境噪声空间相关特性建模综述\*

黄益旺<sup>1,2†</sup>

(1 哈尔滨工程大学水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

(2 工业和信息化部海洋信息获取与安全重点实验室 哈尔滨 150001)

**摘要** 相对于大多数声呐,海洋环境噪声通常被视为背景干扰。水听器基阵的信噪比增益成为了基阵设计和性能估计的重要参数。从空间相关特性的角度看,当信号场已知时,阵增益可唯一由噪声场的空间相关特性来确定,这就是海洋环境噪声空间相关特性建模的动机。根据环境和声场之不同,文献中已给出几种不同的噪声场模型。为了阐明已有模型的特点及未来的研究方向,该文对噪声场空间相关特性建模做了简要综述。

**关键词** 体积噪声,界面噪声,空间相关,水平分层介质,距离有关波导

中图法分类号: TB533 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)04-0729-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.033

### Review of the spatial correlation modeling of ocean ambient noise

HUANG Yiwang<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract** Ocean ambient noise is usually considered to be the background interference for most of sonar systems. Thus the quantity signal-to-noise ratio (SNR) gain becomes the key parameter for the design and performance estimation of a hydrophone array, which is usually called array gain. From the point of view of spatial correlation array gain can be only determined by the spatial property of the interference field when the knowledge of the expected acoustic field is given. This is the motivation for ocean ambient noise modeling and several models for the calculation of correlation coefficients were presented in the literatures corresponding to different environments and noise fields. In order to clarify the characteristics of those given models and demonstrate the research directions of ocean ambient noise in the future, some reviews of correlation modeling were presented in this paper.

**Key words** Volume noise, Surface noise, Spatial correlation, Horizontally stratified media, Range-dependent waveguide

2019-01-14 收稿; 2019-03-08 定稿

\*国家自然科学基金项目 (50909028)

作者简介: 黄益旺 (1975-), 男, 福建建瓯人, 博士, 教授, 研究方向: 海洋声场分析。

† 通讯作者 E-mail: huangyiwang@hrbeu.edu.cn

## 0 引言

海洋环境噪声是许多特性不同的噪声源辐射噪声的总和,形成了对声呐工作特性有影响的背景声场。由于噪声源空间分布不同、海洋环境参数不同,噪声场的空间特性也不相同,导致同一基阵的阵增益(Array gain, AG)发生变化。为提高接收信号强度,早在一战初期,Rutherford就曾提出在听音系统中采用多水听器的思想<sup>[1]</sup>。理论上,采用多水听器可以提高接收信号强度,本质在于多水听器输出信号同相叠加,但提高信号强度并不是最终目的。当把各水听器的输出相加后,叠加在信号上的噪声也相加在一起。从声呐系统工作要求来看,若信噪比得不到提高,则使用多水听器接收信号就失去意义。

针对均匀各向同性噪声场中单方向相干信号的检测问题,水听器基阵对噪声的抑制能力可用接收指向性指数(Directivity Index, DI)表示,定义为

$$DI = 10 \lg \frac{\text{无指向性水听器产生的噪声功率}}{\text{指向性水听器产生的噪声功率}}. \quad (1)$$

引入基阵的归一化声强指向性函数 $b(\theta, \phi)$ 后,经过简单的数学推导,式(1)可改写为

$$DI = 10 \lg \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} b(\theta, \phi) d\Omega}, \quad (2)$$

其中, $\theta, \phi$ 为空间方向角。DI只对均匀各向同性噪声场中单方向传播的相干信号有意义。当信号场和噪声场具有方向特性时,设其归一化声强指向性函数分别为 $S(\theta, \phi)$ 和 $N(\theta, \phi)$ 。根据阵增益的定义,多水听器接收信号带来的信噪比提高的分贝数可用式(3)表示:

$$AG = 10 \lg \left[ \frac{\frac{\int_0^{4\pi} S(\theta, \phi) b(\theta, \phi) d\Omega}{\int_0^{4\pi} N(\theta, \phi) b(\theta, \phi) d\Omega}}{\frac{\int_0^{4\pi} S(\theta, \phi) d\Omega}{\int_0^{4\pi} N(\theta, \phi) d\Omega}} \right]. \quad (3)$$

另一个更为有用的计算阵增益的方法是考虑信号和噪声在阵尺寸范围的相关特性。相关特性就是在任意两个阵元之间的信号或噪声波形的相似

程度。由任意两个阵元输出之间的互相关系数表示的阵增益为

$$AG = 10 \lg \frac{\sum_i \sum_j a_i a_j (\rho_s)_{ij}}{\sum_i \sum_j a_i a_j (\rho_n)_{ij}}, \quad (4)$$

式(4)中, $a_i$ 表示第 $i$ 个阵元由信号或噪声产生的均方根电压; $\rho_s, \rho_n$ 表示水听器所在信号场和噪声场的空间相关系数。相同基阵工作于不同的信号场和噪声场时,阵增益可能不同。 $\rho_s$ 和 $\rho_n$ 均与基阵转向而插入的电延时有关。当把基阵转到信号入射的那个方向上时, $\rho_s$ 达到最大值。

显见,若信号场的空间相关系数已知,则只需给出噪声场空间相关系数便可根据式(4)计算阵增益。实际海洋环境噪声源空间分布复杂,海洋波导的传播条件时变空变,形成了极其复杂的海洋环境噪声场,但从噪声场建模的角度首先考虑体积噪声和界面噪声两种情况。

## 1 体积噪声模型

在体积噪声模型中,具有相同特性的无指向性噪声源被视为均匀分布在半径无限大的球体内部,介质为均匀自由空间。由于噪声源分布的空间对称特性,传播条件的各向同性,形成了均匀各向同性噪声场。由于声场声压是各噪声源辐射声压的标量和,因此声压的空间相关系数与空间方向角无关。相反,噪声质点振速场各分量的空间相关系数则与方向角有关,这是由于质点振速分量具有方向性。

### 1.1 噪声声压的空间相关特性

Cron等<sup>[2]</sup>假设噪声源均匀分布在球体内部,当球的半径足够大时,得到的单频噪声空间相关系数与Eckart<sup>[3]</sup>的均匀各向同性噪声场的结果及Jacobson<sup>[4]</sup>的噪声模型结果完全一致。在Jacobson的噪声模型中,噪声源假定均匀分布在大球表面。文献<sup>[5]</sup>假设噪声源均匀分布在无限大球面上,在假设噪声源辐射噪声互不相关的前提下,应用特殊函数的正交性,积分得到了与文献<sup>[2]</sup>完全一致的结果。

体积噪声声压空间相关系数为 $\sin(kd)/(kd)$ , $k$ 为波数, $d$ 为观测点间距。相关系数体现了噪声声压场的各向同性特性。当观测点间距 $d$ 为半波长的整

数倍时,空间两点的噪声声压互不相关;当各阵元接收信号场完全相关时,半波长等间距均匀直线阵可获得最大阵增益。

## 1.2 噪声质点振速的空间相关特性

对于矢量水听器基阵,除声压相关系数外,还需已知噪声质点振速、声压与质点振速的空间相关特性。2001年,Hawkes等<sup>[6]</sup>研究了均匀各向同性噪声矢量场的空间相关特性,给出了相关系数的解析表达式。随后,我国学者孙贵青等<sup>[7]</sup>再次得到了相同的结果,同时分析了单矢量水听器接收噪声的协方差矩阵,揭示了均匀各向同性噪声矢量场的能量均匀分布特性。黄益旺等<sup>[8]</sup>应用二次源思想,对均匀分布在球面上的所有噪声源辐射声场进行求解,得到了噪声矢量场的空间相关系数解析表达式,分析了阵增益随阵元间距的变化关系。从质点振速场相关函数表达式可以发现,由于质点振速分量具有方向性,导致质点振速分量的相关系数是空间方向的函数。

单频体积噪声质点振速空间相关系数表达式比声压空间相关系数表达式复杂得多,相关函数的零点不再具有周期性,但仍具有Bessel函数的形式。当获得噪声矢量场空间相关系数后,则可以用其分析声矢量水听器阵或声矢量信号处理算法的性能。Shchurov等<sup>[9]</sup>曾指出,对于频率在200 Hz~1000 Hz的深海典型相干噪声,单矢量水听器接收噪声的声压与质点振速的相关系数小至0.001~0.01,声能流的信噪比增益可达20 dB~30 dB。

## 2 表面噪声模型

在表面噪声模型中,一种简单的表面噪声模型为具有 $\cos^m \theta$ 垂直指向性的噪声源均匀分布在无限大海面上或海面下方某一深度的无限大平面上,介质为均匀半空间,也即不考虑海底声反射作用。为了考虑海底声反射和海水声速分布对场的影响,表面噪声模型发展的第二阶段为水平分层介质表面噪声模型。当海底非水平时,也即一种距离有关波导,则对应三维环境中的表面噪声模型。

### 2.1 简单模型中声场的空间相关特性

Cron等<sup>[2]</sup>将噪声源视为均匀分布在海面上的圆面内,给出了噪声源无指向性和具有 $\cos \theta$ 、

$\cos^2 \theta$ 、 $\cos^3 \theta$ 垂直指向性时噪声声压场水平方向和垂直方向的相关系数,反映了噪声场的非各向同性,这是噪声源空间分布不对称的结果。

类似于体积噪声矢量场空间相关特性分析方法,黄益旺等<sup>[10]</sup>假设噪声源均匀分布在无限大海面上,给出了噪声源无指向性和具有 $\cos \theta$ 垂直指向性时噪声矢量场空间相关系数解析表达式,分析了单矢量水听器接收噪声的协方差矩阵及等间距均匀直线阵的阵增益。海洋环境噪声空间相关特性的变化改变了水听器基阵的信噪比增益。在噪声干扰下,水听器成阵有必要已知噪声场的相关特性。

### 2.2 水平分层介质中声场的空间相关特性

为了研究海水声速分布、海底声学特性对噪声场空间相关特性的影响,假设海面、海底为水平界面,海水声速仅是深度坐标的函数,无指向性噪声源均匀分布在海面下方深度 $z'$ 的无限大平面上。Kuperman等<sup>[11]</sup>应用简正波理论建立了水平分层介质表面噪声声压场空间相关特性模型,简称K/I模型。当介质的声吸收系数比最小简正波本征值之差小得多时,相关函数可用非相干简正波之和表示,得到了噪声声压相关系数解析表达式。针对简正波理论所计算的声场为点源声场这个问题,而表面噪声源通常具有 $\cos^m \theta$ 垂直指向性,Liggett等<sup>[12]</sup>曾经指出噪声源的指向性可用噪声源的空间相关函数来描述,从而解决了具有特定指向性噪声源形成噪声场的简正波建模问题。

处理水平分层介质中指向性噪声源的声场的另一种理论就是射线声学理论。Harrison<sup>[13]</sup>将噪声场声压表示为各条本征声线声压之和,利用射线声学声强表达式,给出了水平分层介质表面噪声声压空间相关系数积分表达式和垂直指向性解析表达式。相比于K/I模型,射线模型更简单直观,并且容易推广至距离有关波导中的噪声场<sup>[14]</sup>。

由于K/I模型和Harrison模型都是针对噪声声压的,根据简谐平面行波场声压与质点振速的关系,基于这两个模型,黄益旺等分别建立了水平分层介质表面噪声矢量场空间相关特性简正波模型<sup>[15]</sup>和射线声学模型<sup>[16]</sup>。当噪声源具有 $\cos \theta$ 垂直指向性时,对比分析了理想波导表面噪声矢量场空间相关特性,发现水平方向和垂直方向的相关系数仅与观测点间距有关,而与深度无关;两个模型得到的结

果完全吻合,证明了模型的正确性。应用射线声学模型得到了水平分层介质表面噪声协方差矩阵,发现声压与深度方向质点振速分量的协方差与介质声吸收系数成线性函数关系。

### 2.3 三维环境中表面噪声场的空间相关特性

当海底倾斜相对平缓,介质声学参数的水平变化又足以忽略声波的水平偏转时,利用准三维声传播理论可以解决三维海洋环境噪声场空间相关特性。对于局部海底小角度倾斜的三维海洋环境,Perkins等<sup>[17]</sup>应用简正波理论处理水平分层介质表面噪声源辐射的噪声场,应用绝热简正波理论处理距离有关波导表面噪声源辐射的噪声场,建立了三维海洋环境表面噪声声压场空间相关特性模型,简称P/K模型。周建波等<sup>[18]</sup>采用抛物方程方法和 $N \times 2D$ 近似分析了倾斜海底距离有关波导表面噪声声压场垂直方向的相关特性。至此,噪声声压场空间相关特性模型基本建立。为了获得质点振速场的空间相关特性,仍然采用欧拉公式,Huang等<sup>[19]</sup>建立了局部海底倾斜三维海洋环境表面噪声矢量场空间相关特性模型,应用数值方法分析了海底倾斜角度对噪声场空间相关特性的影响,得到初步结论。

### 3 讨论

从海洋环境噪声模型的角度看,上述体积噪声模型和表面噪声模型已经较为完善。在给定噪声源的参数和海洋环境参数时,应用现有模型可以分析不同噪声场的空间相关特性,给出特定条件下噪声场空间相关系数,为水听器成阵和阵增益分析提供理论支撑。在模型的支撑下,我们掌握了海洋环境对噪声场特性的影响规律,这为利用海洋环境噪声实施参数反演开辟了途径<sup>[20]</sup>。

不过需要注意,上述结果仍仅属于模型结果。其一为模型中的噪声源的特性、空间分布与实际海洋环境噪声源不一定相符,如航道上的航船噪声源、局部风暴噪声源、局部降雨噪声源。针对这些具体情况,可通过修改上述对应模型中噪声源空间分布形状、大小、深度,以及噪声源的空间指向性进行建模,讨论噪声源非均匀分布或各向异性噪声源形成噪声场的空间相关特性。由于这类噪声源的复杂性,结合时变空变的海洋环境,噪声场空间特性

则复杂多变。就目前而言,虽这方面研究已有所讨论<sup>[21-22]</sup>,但仍有待完善、深入研究和进一步拓展。其二为模型中的环境与实际海洋环境也不一定完全相符,如海面粗糙起伏、海水声速时空变化、海底不平整,这些情况需要采用改进声传播模型加以解决。江鹏飞等<sup>[23]</sup>针对噪声源深度分布问题展开了探讨,指出声源深度显著影响大掠射角海底反射损失反演结果。周建波等<sup>[24]</sup>基于抛物方程方法和传输理论分析了海面随机起伏对噪声场空间特性的影响。

### 4 结论

噪声场空间相关特性建模仍是目前水声建模的重要研究内容之一,目的是使理论模型更加逼近真实海洋环境噪声,能够给出更加符合实际的噪声场空间相关系数。海洋环境噪声是无数噪声源与海洋环境相互作用的结果,噪声场建模包括噪声源和海洋中的声传播建模两部分。就体积噪声和表面噪声两种经典噪声模型而言,其噪声场空间相关特性建模已相对完善。它不仅包含了噪声声压场模型,同时也包含了噪声质点振速场模型,为声压水听器和矢量水听器的成阵及阵增益估计提供了理论支撑。从海洋环境的空间特性看,不仅有水平分层介质表面噪声空间相关特性模型,而且还有倾斜海底三维海洋环境表面噪声空间相关特性模型,初步满足了海洋环境表面噪声场空间相关特性分析的需求。无论是均匀各向同性体积噪声还是非各向同性表面噪声,单频或窄带噪声场空间相关系数均具有Bessel函数的性质。随着观测点间距增大,噪声相关系数振荡减小直至趋于零。

但从上述噪声场模型可以看出,模型中的噪声源的统计特性、空间分布特性均是假定的。若假定的噪声源与实际海洋环境中的噪声源不相符,则模型计算结果将与实际噪声场空间特性存在差别,因此未来噪声场空间相关特性理论建模中有必要将噪声源建模一同纳入进来,对源和场共同进行建模,这是海洋环境噪声空间相关特性研究的方向之一;另外,已有噪声场空间相关特性模型基本是针对单频或窄带噪声的,然而实际声呐信号通常具有一定带宽,有些甚至还是宽带信号,在此情况下,现有单频或窄带噪声模型也许不能很好满足实际应用的

需求,因此海洋环境噪声空间相关特性研究的另一个方向是任意宽带噪声场空间相关特性建模。

### 参 考 文 献

- [1] Ainslie M A. Principles of sonar performance modeling[M]. Heidelberg: Springer, 2010: 7–15.
- [2] Cron B F, Sherman C H. Spatial-correlation functions for various noise models[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(11): 1732–1736.
- [3] Eckart C. The theory of noise in continuous media[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1953, 25(2): 195–199.
- [4] Jacobson M J. Space-time correlation in spherical and circular noise fields[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(7): 971–978.
- [5] 黄益旺, 杨士莪. 海洋环境噪声的一般模型及声压空间相关系数[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 1004–1005.  
Huang Yiwang, Yang Shie. Spatial correlation coefficients of sound pressure for general ambient noise models[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 1004–1005.
- [6] Hawkes M, Nehorai A. Acoustic vector-sensor correlations in ambient noise[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(3): 337–347.
- [7] 孙贵青, 杨德森, 时胜国. 基于矢量水听器的声压和质点振速的空间相关系数[J]. 声学学报, 2003, 28(6): 509–513.  
Sun Guiqing, Yang Desen, Shi Shengguo. Spatial correlation coefficients of acoustic pressure and particle velocity based on vector hydrophone[J]. Acta Acustica, 2003, 28(6): 509–513.
- [8] 黄益旺, 杨士莪, 朴胜春. 体积噪声矢量场空间相关特性研究的一种方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(11): 1209–1212.  
Huang Yiwang, Yang Shie, Piao Shengchun. Research on the spatial correlation of acoustic vector field of volume noise[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(11): 1209–1212.
- [9] Shchurov V A, Shchurov A V. Combined sensor noise-immunity[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2002, 21(2): 97–109.
- [10] 黄益旺, 杨士莪. 界面噪声声压与质点振速的时空相干特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(2): 137–143.  
Huang Yiwang, Yang Shie. Spatial-temporal coherence of acoustic pressure and particle velocity in surface-generated noise[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(2): 137–143.
- [11] Kuperman W A, Ingenito F. Spatial correlation of surface-generated noise in a stratified ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67(6): 1988–1996.
- [12] Liggett W S, Jacobson M J. Covariance of surface-generated noise in a deep ocean[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1965, 38(2): 303–312.
- [13] Harrison C H. Formulas for ambient noise level and coherence[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(4): 2055–2066.
- [14] Harrison C H. Noise directionality for surface sources in range-dependent environments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(5): 2655–2662.
- [15] 黄益旺, 李婷, 于盛齐, 等. 水平分层介质表面噪声矢量场空间相关特性[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 975–981.  
Huang Yiwang, Li Ting, Yu Shengqi, et al. Spatial correlation of the surface noise in horizontally stratified medium based on acoustic vector sensor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 975–981.
- [16] Huang Y, Ren Q, Li T. A geometric model for the spatial correlation of an acoustic vector field in surface-generated noise[J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11(1): 119–125.
- [17] Perkins J S, Kuperman W A, Ingenito F, et al. Modeling ambient noise in three-dimensional ocean environments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(2): 739–752.
- [18] 周建波, 黄益旺, 朴胜春, 等. 距离有关波导中噪声场空间特性建模与研究[C]//中国声学学会水声学分会2015年学术会议论文集, 2015.
- [19] Huang Y, Guo J. Spatial correlation of the acoustic vector field of the surface noise in three-dimensional ocean environments[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(4Pt2): 2397.
- [20] 郭新毅, 李凡, 铁广朋, 等. 海洋环境噪声研究发展概述及应用前景[J]. 物理, 2014, 43(11): 723–731.  
Guo Xinyi, Li Fan, Tie Guangpeng, et al. Overview of ocean ambient noise and application prospects[J]. Physics, 2014, 43(11): 723–731.
- [21] 李家亮, 林建恒, 郭圣明, 等. 噪声源非均匀分布海洋环境噪声水平声能流理论分析[J]. 声学学报, 2014, 39(6): 673–684.  
Li Jialiang, Lin Jianheng, Guo Shengming, et al. Theoretical analysis of acoustic energy flux of ocean ambient noise caused by non-uniform distributed noise sources[J]. Acta Acustica, 2014, 39(6): 673–684.
- [22] 衣雪娟, 林建恒, 孙军平, 等. 海上航船分布及其对海洋环境噪声的影响[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 1270–1278.  
Yi Xuejuan, Lin Jianheng, Sun Junping, et al. Ship distribution in open sea and its impact on ocean ambient noise[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 1270–1278.
- [23] 江鹏飞, 林建恒, 孙军平, 等. 考虑噪声源深度分布的海洋环境噪声模型及地声参数反演[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 014306.  
Jiang Pengfei, Lin Jianheng, Sun Junping, et al. Ocean ambient noise model considering depth distribution of source and geo-acoustic inversion[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 014306.
- [24] 周建波, 朴胜春, 刘亚琴, 等. 海面随机起伏对噪声场空间特性的影响规律[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 014301.  
Zhou Jianbo, Piao Shengchun, Liu Yaqin, et al. Ocean surface wave effect on the spatial characteristics of ambient noise[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 014301.