

# 圆柱阵主动声纳空时混响仿真及空时特性分析

薛永华<sup>1</sup>, 唐劲松<sup>1</sup>, 陈宝柱<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033; 2. 广东湛江 91388 部队, 广东湛江 524022)

**摘要:** 经典的单元散射模型混响仿真方法无法应用于主动声纳空时自适应处理(space-time adaptive processing, STAP) 算法研究。提出了一种基于单元散射模型的适合主动声纳 STAP 算法研究的圆柱阵混响仿真方法。根据声纳发射信号的距离和多普勒分辨力将海洋空间划分成若干个散射单元, 将每个散射单元对各个通道混响的贡献在时域分别进行求和, 得到各个通道的混响时间序列。仿真综合考虑了多种影响混响的因素, 包括发射信号的参数、声纳平台的运动、海洋环境等。对仿真结果的空时特性进行了分析, 结果表明仿真数据能够满足 STAP 算法研究的需要。

**关键词:** 圆柱阵; 空时自适应政策; 混响

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-05-0472-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.05.005

## Simulation and space-time characteristics analysis of space-time reverberation for active sonar with cylindrical array

XUE Yong-hua<sup>1</sup>, TANG Jin-song<sup>1</sup>, CHEN Bao-zhu<sup>2</sup>

(1. Electronic Engineering College, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Unit 91388, PLA, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

**Abstract:** Classic approaches of reverberation simulation based on the model of scatterer cell can not be used in the research on space-time adaptive processing. An approach based on the model of scatterer cell to the simulation of reverberation for an active sonar with cylindrical array is presented to test the algorithms of space-time adaptive processing (STAP). The ocean space is divided into some scatterer cells according to the range and Doppler resolution of sonar signal, and the time series of reverberation of each channel are calculated by the sum of all the contributions of each scatterer cell. Many factors influencing the reverberation are considered in the simulation, such as the parameters of transmission signal, the motion of the platform, and the ocean environment etc. The space-time characteristics of the simulated reverberation are analyzed. The result validates the feasibility of the proposed methods and shows that the simulated data can meet the demand for the research on space-time adaptive processing.

**Key words:** cylindrical array; Space-Time Adaptive Processing(STAP); reverberation

## 1 引言

随着现代主动声纳体制向低频化方向的发展, 混响作为声纳主动工作方式下特有的干扰, 已经成为影响水声信号检测性能的重要因素。对于载体运动的主动声纳, 平台的运动会引起混响多普勒的扩展, 低速目标很容易淹没在混响多普勒扩展的带宽内, 空时二维自适应(STAP)信号处理技术在主动声纳抗混响的应用<sup>[1-4]</sup>可能是解决这一问题的一种新途径。

水声设备的研制由于条件限制无法进行大量的

实验, 很多时候需要仿真。因此, 混响仿真是声纳仿真技术中的一个重要研究领域, 国内外学者对于海洋混响作了大量的研究工作<sup>[5-8]</sup>, 提出了很多的理论模型, 主要有单元散射模型和点散射模型。但是空时自适应处理对混响的仿真提出了新的要求, 需要仿真得到的混响数据包含空间和时间二维的信息。

文献[6]提出的模型为单元散射模型, 首先是计算出相同距离处各散射元的功率谱, 再将其迭加得到某一时刻的混响谱, 通过 AR 模型得到混响时间信号, 尽管该模型综合考虑了发射信号、声纳平台运动和水声环境等参数, 但是该模型没有将混响信号空间维的信息保留下来。

文献[7]提出了一种将散射单元的时间信号直接迭加的方法, 能够保留通道间的相关性, 但是没有考虑平台运动所带来的多普勒频移, 应用受到了一定的限制。

收稿日期: 2009-06-19; 修回日期: 2009-10-13

基金项目: 国防预研基金(4010501020103)

作者简介: 薛永华(1985-), 男, 山西人, 硕士研究生, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 薛永华, E-mail: xueyhchina@163.com

以上两类方法均不适合 STAP 的要求。文献[8]提出了一种用于 STAP 的混响方法。该方法将大量的散射单元按照非均匀的方式随机分布到界面(海面,海底)和海水,再根据其于声纳平台的相对位置和相对运动关系以及水声环境参数来确定每一散射单元的回波属性,包括幅度、时延、频移和多普勒扩展等。将所有散射元对接收阵元的贡献进行迭加得到某一通道的混响输出。该方法虽然考虑比较全面,但模型建立过程物理意义不甚明确。

本文提出的混响仿真方法基于单元散射模型,但与经典的单元散射模型<sup>[5,6]</sup>不同。经典的散射单元方法首先计算混响的功率谱,然后根据功率谱来模拟随机序列,得到混响的时间序列。对于给定的阵元,本文方法计算每个散射单元多普勒频率、散射特性、传播损失和随机起伏,得到该散射单元的时域波形,将各散射单元的时域波形相干叠加得到给定阵元的时域波形。

与经典散射单元方法相比,两者的相同之处是全面地考虑了发射信号和水声环境等因素的影响,并且考虑平台运动所带来的多普勒频移;不同之处是本文的方法保留了混响信号空间维的信息,能够满足空时自适应处理的需要。

此外,本文方法划分散射单元与经典散射单元法不同,经典散射单元法根据距离分辨率和发射波束的角度分辨率来确定;但本文方法根据距离分辨率和发射信号的多普勒分辨力来确定。

## 2 空时混响仿真模型

在混响模型的建立过程中,为了使计算简化并不影响其实际使用,需作一定的简化假设。假设条件如下<sup>[9]</sup>:

- (1) 假设声音在无限的或带有平面散射边界的半无限的等声速分布的媒质中传播;
- (2) 入射声波和散射声波都按球面衰减规律计算其扩展损耗,并同时考虑介质的吸收,但不考虑声的折射及其它损耗(如声泄漏等);
- (3) 对面积散射或体积散射模型,假设面积上或体积内的散射体分布是均匀的,并且取足够小的体元时散射体的密度仍然很大;
- (4) 不计及二次散射,即散射波的再次被不均匀体散射忽略不计;
- (5) 声纳载体作匀速直线运动。

建立如图 1 所示的坐标系,设所研究的主动声纳的基阵为收发合置的圆柱阵,并已经按列合成为列子阵,然后按照等间隔的均匀圆阵处理。发射时

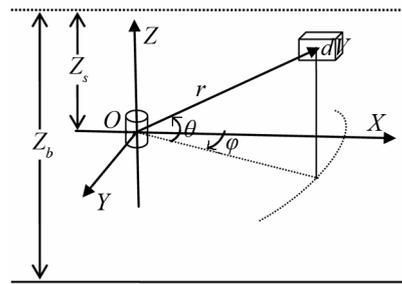


图 1 圆柱阵位置图  
Fig.1 Geometry of cylindrical array

整个基阵的归一化指向性函数计为  $B_i(\theta, \phi)$ , 接收时第  $n(n=1, 2, \dots, N)$  路列子阵的归一化接收指向性函数为  $B_n(\theta, \phi)$ 。其中  $\theta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ ,  $\phi \in [-\pi, \pi]$  分别表示俯仰角和方位角。令收发基阵位于  $O$  点,由于声纳基阵平台运动的速度与声速相比很小,故从声波发射到遇到海洋中的散射体反射回基阵这段时间内,基阵的位移可以忽略,即认为基阵在混响观测时间内一直位于  $O$  点<sup>[9]</sup>。

下面从点散射体的混响信号模型出发,建立一个接收阵元接收的混响信号模型。

### 2.1 散射体混响信号模型

理论和实验都已证明<sup>[11-13]</sup>, 不同时刻、不同位置的散射体所产生的混响具有不同特性。在发射信号  $s(t)$  满足窄带条件的情况下,位于空间位置  $(r, \theta, \phi)$  散射体产生的混响信号的复包络可以表示成式(1)所示的形式:

$$p(t, r, \theta, \phi) = \sqrt{I(r, \theta, \phi)} A(t, r, \theta, \phi) s(t - \frac{2r}{c}) e^{j2\pi \frac{2r}{\lambda} (t - \frac{2r}{c}) - \frac{4\pi r}{\lambda}} \quad (1)$$

其中  $c$  表示声速,  $\lambda$  表示声波波长,  $I(t, r, \theta, \phi)$  表示在  $t$  时刻位于  $(r, \theta, \phi)$  点的散射体散射声强值,它与收发基阵的位置、收发指向性函数、发射功率、散射体的散射强度等因素有关;

$V(t, r, \theta, \phi)$  表示在  $t$  时刻位于  $(r, \theta, \phi)$  点的散射单元相对于声纳接收阵的相对速度,它与两者的相对位置和各自的运动速度有关;

$A(t, r, \theta, \phi)$  表示由于信道起伏、散射体的随机运动等各种随机因素的影响而产生的幅度和相位的随机分量。

$\frac{4\pi r}{\lambda}$  表示混响的时延相移,由于散射单元反射时的初相位是随机的,因此仿真的时候可以不考虑混响的时延相移。

式(1)说明,散射体的散射特性有与声纳参数和海洋环境参数有关的确定性分量,又有随机性分量。其确定性分量可以根据声纳参数和海洋环境参数结合一些经验公式进行计算,其随机性分量可以

通过对实测数据的拟合或根据公开发表的文献得到的一些统计规律来仿真。

### 2.2 混响模型的建立

体积混响信号可以看作海洋空间中多个相邻散射单元的信号的累加。

#### 2.2.1 散射单元的划分

假定有两个分辨不开的散射体，就可以把这两个散射体对混响的贡献加起来，产生一个新的散射体。基于这种思想可以把海洋空间划分成若干个  $\Delta r \times r \Delta \theta \times r \Delta \phi$  的散射单元，如图 2 所示。其中  $r$  为散射单元相对声纳声阵中心的距离， $\Delta r$  为声纳发射信号的距离分辨单元尺寸， $\Delta \theta$ 、 $\Delta \phi$  为俯仰角和方位角散射单元尺寸，随后我们会看到，对于 STAP 来说，它应该比分辨单元尺寸小。

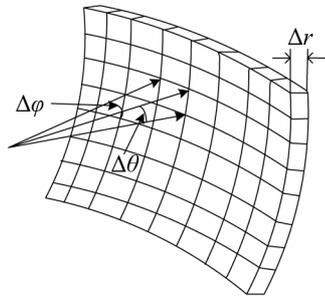


图2 散射单元划分示意图  
Fig.2 Geometry of scatterer cell division

首先，确定声纳发射信号的距离分辨单元尺寸  $\Delta r$ 。声纳 STAP 所用的波形一般为 CW 脉冲，设其脉宽为  $\tau$ ，则发射信号的距离分辨单元尺寸  $\Delta r = \frac{\tau c}{2}$ 。

其次，确定俯仰角和方位角的散射单元尺寸  $\Delta \theta$ 、 $\Delta \phi$ 。这两个角度值的确定可以根据发射波束的角度分辨力来确定，也可以根据发射信号的多普勒分辨力来确定。大多数情况下由发射信号的多普勒分辨力来确定的角度分辨值更小，对空间单元的划分更为精细，仿真更加接近实际情况，故本文采用这种方法来确定  $\Delta \theta$ 、 $\Delta \phi$ 。

散射体的多普勒频率为：

$$f_d = \frac{2v_s}{\lambda} \cos \theta \cos \phi \tag{2}$$

式中  $v_s$  为声纳平台运动速度，在  $\theta$  (方位角) 空间，对式(2)以  $\theta$  微分，可以得到：

$$|\Delta f_d| = \frac{2v_s}{\lambda} |\cos \phi| \sin \theta \cdot \Delta \theta \tag{3}$$

式(3)表明，当  $\theta = 90^\circ$  时，出现多普勒最大变化。声纳发射信号的多普勒分辨力为：

$$\Delta f_d = \frac{1}{\tau} \tag{4}$$

$\tau$  为发射信号的脉宽。

综合(3)、(4)两式可得：
$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{2v_s \tau |\cos \phi| \sin \theta} \geq \frac{\lambda}{2v_s \tau}$$

为了保持混响单元的分辨力，取  $\Delta \theta_{\min} = \frac{\lambda}{2v_s \tau}$  作为划分间隔，即取  $\Delta \theta = \frac{\lambda}{2v_s \tau}$ ，同理可得  $\Delta \phi = \frac{\lambda}{2v_s \tau}$ 。

在实际海洋环境中，海洋的深度是有限的，当声波没有到达边界时，对于混响有贡献的只有体积混响，当声波到达边界时，则对混响有贡献的就包括体积混响和由两个界面形成的海面 and 海底混响。

#### 2.2.2 体积混响模型

记距离分辨单元个数为  $L$ ，俯仰角、方位角散射单元的个数分别为  $P$ 、 $Q$ ，则：

$$L = \left\lceil \frac{r_{\max}}{\Delta r} \right\rceil, \quad P = \left\lceil \frac{\theta_s - \theta_b}{\Delta \theta} \right\rceil, \quad Q = \left\lceil \frac{2\pi}{\Delta \phi} \right\rceil$$

其中  $r_{\max}$  表示声纳最远探测距离， $\theta_s = \arcsin \frac{z_s}{r_i}$ ，

$\theta_b = -\arcsin \frac{z_b - z_s}{r_i}$  分别表示第  $l(l=1, \dots, L)$  个距离分辨单元中心  $r_l = (l+0.5)\Delta r$  处俯仰角的上下边界， $\Delta r = \frac{\tau c}{2}$ ，即发射信号的距离分辨值， $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。

将海洋空间根据距离、方位角、俯仰角单元的尺寸划分成若干散射单元，每个散射单元的体积为  $r^2(k) \cos \theta \Delta r \times \Delta \theta \times \Delta \phi$ 。

则由式(1)可得， $t$  时刻第  $l \times p \times q$  个距离俯仰角、方位角散射单元中散射体对体积混响的贡献为：

$$p_v(t, l, p, q) = \sqrt{I_v(l, p, q)} \cdot A(t, l, p, q) \cdot s\left(t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[j \frac{4\pi v_s \cos \theta_p \cos \phi_q}{\lambda} \left(t - \frac{2r_l}{c}\right)\right] \tag{5}$$

其中  $l=1, 2, \dots, L$ ， $p=1, 2, \dots, P$ ， $q=1, 2, \dots, Q$ ， $I_v(l, p, q)$  为该散射单元混响强度， $A(t, l, p, q)$  为随机起伏分量， $\theta_p = (p-1)\Delta \theta$ 、 $\phi_q = (q-1)\Delta \phi$  分别为第  $p \times q$  个俯仰角、方位角散射单元的坐标值。

不同的接收阵元的波程差也不同，式(5)应该加入阵元维，即：

$$p_v(n, t, l, p, q) = \sqrt{I_v(l, p, q)} \cdot A(t, l, p, q) \cdot s\left(t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[j \frac{4\pi v_s \cos \theta_p \cos \phi_q}{\lambda} \left(t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \theta_p \cos(\phi_q - \phi_n)\right] \tag{6}$$

式(6)中  $R$  表示圆柱阵的半径， $\phi_n$  表示圆柱阵第  $n(n=1, 2, \dots, N)$  个阵元的方位角坐标。

对式(6)进行求和，可以得到  $t$  时刻、第  $n$  个阵元接收的体积混响信号为：

$$p_v(n,t) = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_v(l,p,q)} \cdot A(t,l,p,q) \cdot s\left(t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_p \cos\varphi_q}{\lambda} \left(t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_p \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right] \quad (7)$$

根据文献[9]中的推导,可得到体积散射单元中的散射体产生的混响强度为:

$$I_v(l,p,q) = \frac{P_t \gamma \tau c}{8\pi r_l^2} B_t^2(\theta_p, \varphi_q) B_n^2(\theta_p, \varphi_q) \cos\theta \cdot 10^{0.1S_v - 0.2\alpha r_l} \cdot \Delta\theta \cdot \Delta\varphi \quad (8)$$

式(8)中  $P_t$  为声纳发射功率,  $\gamma$  为发射基阵的聚集系数,  $S_v$  为体积散射强度,  $\alpha$  为海水声吸收系数。

### 2.2.3 海面混响模型

记声纳基阵距海面的距离为  $z_s$ , 则声波到达海面的时刻  $t_{s\_begin} = \frac{2z_s}{c}$ 。当声波到达海面后,将海洋表面根据距离、方位角单元的尺寸划分成若干散射单元,每个散射单元的面积为  $r\Delta r \times \Delta\varphi$ ,将散射单元中的散射体看作一个散射体。计算在时刻  $t$  所有散射单元的贡献,然后对所有的散射单元求和即可得到这一时刻的表面混响值。

因海面散射单元的划分只有距离和方位角两个纬度,故与体积混响的表达式相比,表面混响表达式应变为二维的求和,并考虑海面混响开始时间,即:

$$p_s(n,t) = u(t - t_{s\_begin}) \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_s(l,q)} \cdot A_s(t,l,q) \cdot s\left(t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_s \cos\varphi_q}{\lambda} \left(t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_s \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right]$$

$$\text{其中 } \theta_s = \arcsin \frac{z_s}{r_l}, \quad u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

另外,应该计入海水表面风吹动海洋表面散射体运动而引入的多普勒因子:

$$f_{dw} = -\frac{2K_w v_w \cos\theta_s \cos(\varphi_q - \varphi_w)}{\lambda}$$

其中  $v_w$  为风速,  $K_w$  为海风吹动海面散射体运动的平均速度因子,  $\varphi_w$  为风向。表面混响为:

$$p_s(n,t) = u(t - t_{s\_begin}) \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_s(l,q)} \cdot A_s(t,l,q) \cdot s\left(t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_s \cos\varphi_q - 4\pi K_w v_w \cos\theta_s \cos(\varphi_q - \varphi_w)}{\lambda} \left(t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_s \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right] \quad (9)$$

仿照上节  $I_v(l,p,q)$  的计算,可得:

$$I_s(l,q) = \frac{P_t \gamma \tau c z_s}{16\pi r_l^4} B_t^2(\theta_s, \varphi_q) B_n^2(\theta_s, \varphi_q) \cdot 10^{0.1S_s - 0.2\alpha r_l} \cdot \Delta\varphi$$

其中  $S_s$  为表面散射强度。

### 2.2.4 海底混响模型

海底混响的表达式与海面混响的计算类似,但应该除去风吹动海洋表面散射体运动而引入的多普勒因子的影响项,于是海底混响的表达式为:

$$p_b(n,t) = u(t - t_{b\_begin}) \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_b(l,q)} \cdot A_b(t,l,q) \cdot s\left(t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_b \cos\varphi_q}{\lambda} \left(t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_b \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right] \quad (10)$$

$$\text{式中, } \theta_b = -\arcsin \frac{z_b - z_s}{r_l}, \quad t_{b\_begin} = \frac{2(z_b - z_s)}{c},$$

$$I_b(l,q) = \frac{P_t \gamma \tau c (z_b - z_s)}{16\pi r_l^4} B_t^2(\theta_b, \varphi_q) B_n^2(\theta_b, \varphi_q) \cdot 10^{0.1S_b - 0.2\alpha r_l} \cdot \Delta\varphi,$$

其中  $z_b$  为海深,  $S_b$  为海底散射强度。

综上所述,由式(7)、(9)、(10)可得,第  $n$  个阵元接收到的混响信号的最终表达式为:

$$p(n,t) = p_v(n,t) + p_s(n,t) + p_b(n,t) \quad (11)$$

## 3 仿真实现

进行仿真,首先根据奈奎斯特采样定理,在一定的采样频率下,式(11)离散化得到:

$$p(k,n) = p_v(k,n) + p_s(k,n) + p_b(k,n) \quad (12)$$

其中  $p_v(k,n)$ ,  $p_s(k,n)$ ,  $p_b(k,n)$  分别由式(7)、(9)、(10)离散化得到,即:

$$p_v(n,k) = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_v(l,p,q)} \cdot A(k\Delta t, l, p, q) \cdot s\left(k\Delta t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_p \cos\varphi_q}{\lambda} \left(k\Delta t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_p \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right] \quad (13)$$

$$p_s(n,k) = u(k\Delta t - t_{s\_begin}) \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_s(l,q)} \cdot A_s(k\Delta t, l, q) \cdot s\left(k\Delta t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_s \cos\varphi_q}{\lambda} \left(k\Delta t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_s \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right] \quad (14)$$

$$p_b(n,k\Delta t) = u(k\Delta t - t_{b\_begin}) \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^Q \sqrt{I_b(l,q)} \cdot A_b(k\Delta t, l, q) \cdot s\left(k\Delta t - \frac{2r_l}{c}\right) \cdot \exp\left[ j \frac{4\pi v_s \cos\theta_b \cos\varphi_q}{\lambda} \left(k\Delta t - \frac{2r_l}{c}\right) + j \frac{2\pi R}{\lambda} \cos\theta_b \cos(\varphi_q - \varphi_n) \right] \quad (15)$$

$\Delta t = \frac{1}{f_s}$  为采样间隔。

由以上讨论可知,混响仿真主要是式(13)、(14)、(15)中起伏分量的仿真,即  $p_v(k, n)$ 、 $p_s(k, n)$ 、 $p_b(k, n)$  表达式中起伏分量  $A(k, l, p, q)$ 、 $A_s(k, l, q)$ 、 $A_b(k, l, q)$  的仿真。

对于体积混响和海面混响而言,海洋表面风速、洋流和海洋生物的运动等因素的影响使得散射单元的散射体具有一定的速度分布,因此,混响的多普勒频谱也会有一定的分布。在混响仿真中,高斯型的频谱是一种令人满意的模型,其功率谱密度函数为:

$$S_{v,s}(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{v,sf}^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{f^2}{2\sigma_{v,sf}^2}\right\}$$

其中  $\sigma_{v,sf}$  为体积(或海面)混响多普勒谱的标准差,它与体积(或海面)散射体速度起伏标准差  $\sigma_{v,s}$  的关系如下:

$$\sigma_{v,sf} = \frac{2\sigma_{v,s}}{\lambda}$$

因此体积混响和海面混响随机分量  $A(k, l, p, q)$ 、 $A_s(k, l, q)$  可以利用实部和虚部均服从均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声序列,通过频率响应为  $H_{s,v}(f) = \sqrt{S_{s,v}(f)}$  的滤波器来产生<sup>[10]</sup>。

由于本文研究的是对混响基带信号的仿真,所以海底混响随机分量  $A_b(k, l, q)$  可以用均值为 0、方差为 1 的复高斯随机序列来仿真。

### 4 仿真结果及分析

仿真用的参数为:声纳基阵半径  $R=0.4\text{m}$ ,高  $H=1\text{m}$ ,由 24 个条阵构成圆柱阵,在方位上无指向性,声纳载体处于距海面  $Z_s=7\text{m}$  处,以  $v_s=10\text{m/s}$  的速度做匀速直线运动。发射信号为载频  $f_0=7\text{kHz}$ ,脉宽  $\tau=0.2\text{s}$  的 CW 波形。

海深  $Z_b=200\text{m}$ ,海面风速  $v_w=4\text{m/s}$ ,风向  $\phi_w=180^\circ$ ,海洋声速  $c=1500\text{m/s}$ ,海面散射体随机运动速度的标准差  $\sigma_s=0.2\text{m/s}$ ,海水中散射体随机运动速度的标准差  $\sigma_v=0.1\text{m/s}$ 。设声纳工作的最大探测距离  $R_m=3000\text{m}$ 。在上述参数下仿真得到的混响空时数据,对 1.8s 处一个脉宽内的数据样本进行分析,在这个样本的前后各取 2 个样本共 5 个样本对该数据样本的协方差矩阵  $\mathbf{R}$  进行距估计,即:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{X}_m \mathbf{X}_m^T$$

式中  $\mathbf{X}_m = [\mathbf{X}_s^T(1) \ \mathbf{X}_s^T(2) \ \cdots \ \mathbf{X}_s^T(K_m)]^T$

其中  $\mathbf{X}_s(k_m) = [x(1, k_m) \ x(2, k_m) \ \cdots \ x(N, k_m)]^T$ ,  $k_m = 1, 2, \dots, K_m$ , 为第  $k_m$  个采样时刻的阵列数据,  $K_m$  为一个脉宽内数据的长度,  $m=1, 2, \dots, M$  为样本序号,  $M$  为所取样本的个数。

在图 1 所示的坐标系下,圆柱阵空时导向矢量可以表示为:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_t \otimes \mathbf{S}_s$$

其中空间导向矢量为:

$$\mathbf{S}_s = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{j\omega_{s,1}} \ \cdots \ e^{j\omega_{s,N-1}} \ e^{j\omega_{s,N}}]^T$$

$$\omega_{s,n} = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos(\varphi_n - \varphi), \quad \varphi_n = \frac{n}{N} 2\pi, \quad n=0, 1, \dots, N-1$$

时间导向矢量为:

$$\mathbf{S}_t = \frac{1}{\sqrt{K}} [1 \ e^{j\omega_t} \ \cdots \ e^{j(K-1)\omega_t} \ e^{jK\omega_t}]^T, \quad \omega_t = \frac{4\pi v_s}{\lambda f_s} \cos\varphi$$

混响信号的空时傅立叶谱为:

$$F(\varphi, f_d) = \mathbf{S}^T(\varphi, f_d) \hat{\mathbf{R}} \mathbf{S}(\varphi, f_d) \tag{16}$$

根据式(16)计算得到混响信号的空时傅立叶谱如图 3 所示,圆柱阵混响空时傅立叶谱等高线图如图 4 所示。

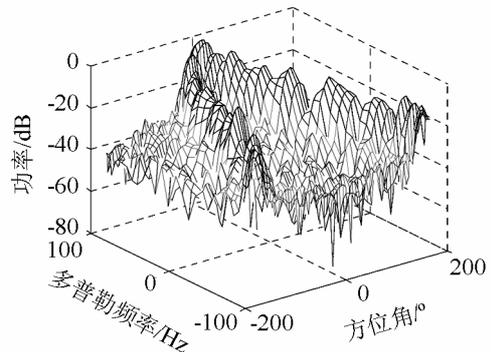


图 3 圆柱阵混响空时傅立叶谱三维图  
Fig.3 Three dimensional diagram of Fourier spectrum for cylindrical array

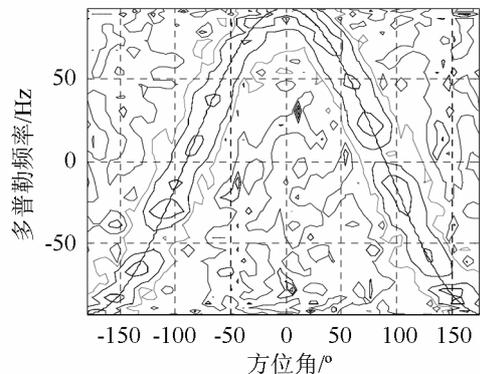


图 4 圆柱阵混响空时傅立叶谱等高线图  
Fig.4 Contour of Fourier spectrum for cylindrical array

由该图 4 分析可知,混响的多普勒频率  $f_d$  随方位角  $\varphi$  在频域形成多普勒扩展,在空时平面上的分

布近似一条余弦曲线。在方位角  $\varphi=0^\circ$  的方向上, 即声纳载体运动的方向上,  $f_d$  最大, 随着  $|\varphi|$  的增大逐渐减小。

图4中深色的细线为不同方位上多普勒频率随方位角变化的关系曲线, 即  $f_d = \frac{2v_s}{\lambda} \cos\varphi$ , 可见仿真得到的空时谱与该曲线吻合得较好。

## 5 结论

本文提出了一种能够满足 STAP 算法研究需要的圆柱阵主动声纳混响仿真方法, 并对圆柱阵混响的空时特性进行了分析。该方法物理意义明确并且比较全面地考虑了发射信号、声纳平台运动和水声环境等因素的影响, 并且保留了混响信号时间、空间两个维度的信息, 对检验圆柱阵主动声纳空时自适应抑制混响的性能有重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] 赵申东. 主动声纳空时自适应处理方法研究[D]. 武汉: 海军工程大学博士学位论文, 2008.  
ZHAO Shendong. Study on space time adaptive processing for active sonar[D]. Wuhan: Navy Univ of Engineering Ph. D. thesis, 2008.
- [2] Mio K, Chocheyras Y, Doisy Y. Space time adaptive processing for low frequency sonar[C]. Oceans Conference Record (IEEE), USA, 2000, 1315-1319.
- [3] Richard Klemm. Applications of space-time adaptive processing[C]. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. 2004.
- [4] 王磊, 朱楚. 运动平台低频混响的方位-多普勒谱特性研究[J]. 声学学报, 2009, 34(2): 110-116.  
WANG Lei, ZHU Ye. The azimuth-doppler distribution characteristics of the low-frequency reverberation on the platform-movement condition[J]. Acta Acustica, 2009, 34(2):110-116.
- [5] Hodgkiss W S. An oceanic reverberation model[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1984, 9(2): 63-72.
- [6] Chamberlain S G, Galli J C. A model for numerical simulation of nonstationary sonar reverberation using linear spectral prediction[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1983, 8(1):21-36.
- [7] 徐新盛, 张燕. 海底混响仿真研究[J]. 声学学报, 1998, 23(2): 141-148.  
XU Xinsheng, ZHANG Yan. A Model for Seafloor Reverberation Simulation[J]. Acta Acustica, 1998, 23(2): 141-148.
- [8] 赵申东. 多通道运动声纳混响仿真[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(4):117-120.  
ZHAO Shendong. Simulation of multi-channel moving sonar reverberation[J]. Ship Science and Technology, 2007, 29(4): 117-120.
- [9] 顾金海, 叶学千. 水声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.  
GU Jinhai, YE Xueqian. Foundation of Underwater Acoustics[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 1981.
- [10] R. L. 米切尔著, 陈训达译. 雷达系统模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1982.  
Michell R L. Translated by CHEN Xunda. Radar system simulation[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [11] B. B. 奥里雪夫斯基著, 罗耀杰等译. 海洋混响的统计特性[C]. 北京: 科学出版社, 1977.  
Ol'shevskii B B, Translated by LUO Yaojie. Oceanic reverberation statistic characteristics[C]. Beijing: Science Press, 1977.
- [12] 詹昊可, 蔡志明. 一种共形阵主动声纳空时自适应混响抑制方法[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 488-492.  
ZHAN Haoke, CAI Zhiming. Space-time adaptive reverberation suppression in active conformal sonar of torpedo[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(3): 488-492.
- [13] 卫红凯, 王平波. 混响的混合高斯概率密度建模[J]. 声学技术, 2007, 26(3): 514-518.  
WEI Hongkai, WANG Pingbo. Gaussian mixture model for reverberation[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(3): 514-518.