

随机起伏界面声散射的实验与理论研究

孟昭然, 孙 辉

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 进行了二维粗糙海面声波散射特性的水池实验, 测量了不同入射角、散射角以及方位角条件下所对应的散射强度。实验通过不同位置风扇对水面的吹拂获得粗糙水面, 分别对水平面上互相垂直的两个方向上的水面波高变化进行了测量, 利用周期图法估计出这两个方向上的空间功率谱, 验证了实验中的粗糙水面是各向同性的。利用改进的空间域处理技术去除了总声波信号中的直达波和其他固定位置散射体的散射信号, 获得了粗糙水面的声波散射信号。利用小斜率近似方法计算了二维粗糙海面的声散射特性。实验与模拟计算结果比较, 证实了计算二维粗糙海面声波散射特性的小斜率近似方法的有效性与准确性, 相互印证了实验与理论。

关键词: 起伏界面; 声散射; 小斜率近似

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-04-0299-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.04.003

Experimental and theoretical research on acoustic scattering strength of rough surface

MENG Zhao-ran, SUN Hui

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: An experiment about acoustic scattering strength of rough sea surface has been conducted at pool. The variation of the scattering strength with different incident angles, scattering angles, and azimuth angles are measured. In the experiment, fans at different positions are used to obtain the rough sea surface. And the rough sea surface's spatial power spectrum density is obtained with the method of period gram method. The horizontal spatial power spectrum density is compared with the vertical one, and the result shows that the rough sea surface is isotropic. In order to eliminate the direct signal and the scattering signals from the scatters at other fixed positions in the total rough surface scattering signal, a spatial domain processing method is introduced. Acoustic scattering from the 2-D rough surface by the small slope approximation theory is studied, and the scattering strength of the rough sea surfaces is calculated. The comparison of the results between the experiment and the simulative calculation validates that the small slope approximation theory is effective and correct. And so, the validity of both the experiment and the theory is verified.

Key words: rough surface; acoustic scattering; small slope approximation.

0 引 言

散射是水声学最基本的问题。在水声应用中, 海面、海底的声散射是必须要考虑的。特别对于界面附近的目标探测、浅海声成像等应用, 海底与海面的散射对结果影响很大, 通常是不可忽略的, 因此对海面、海底的散射特性进行深入研究十分必要。自然界中海面波高的起伏变化与海底的不均匀分布可以看成是满足某种特定概率密度分布的随机

过程。随机起伏表面散射机理复杂。通常为了简化对随机粗糙表面(随机起伏表面)的声散射问题的研究, 往往忽略海水盐分、密度、温度等对散射强度的影响, 只考虑几何尺度对散射强度的影响, 因此目前学者们更专注于探讨粗糙表面的概率密度分布、统计参数等对声散射特性的影响。由于这一过程的复杂性, 在讨论某些问题时通常会忽略这一过程或将问题简化成平面, 导致结果与实际情况大相径庭。

关于随机起伏界面声散射的实验并不多见, 为了对这一问题深入研究, 本文进行了随机起伏界面的声散射实验, 并尝试找到一种描述这一过程的简单快速的方式, 以验证实验结果的准确性。对随机粗糙界面声波散射机理和物理本质的深入研究,

收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-07-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11204051)。

作者简介: 孟昭然(1985—), 男, 哈尔滨人, 博士研究生, 研究方向为水声散射问题。

通讯作者: 孟昭然, E-mail: mengzhaoran99@163.com

为复杂背景下目标特征的提取提供了必要的理论指导。

1 起伏水面声散射强度理论计算公式

随机起伏界面声散射强度的理论计算方法有很多^[1-5], 目前比较常用的是由 Voronovich 提出的小斜率近似法^[6], 该方法是近几年才发展起来的一种用于处理粗糙表面声散射问题的数值方法, 该方法在掠射角不是特别小且表面斜率不是特别大的条件下计算粗糙表面的声散射是非常有效的。TaiqianYang 和 Broschat 等人基于 Voronovich 的方法详细讨论了流体-弹性体-固体表面的声散射特性^[7], 并给出了零阶、一阶、二阶近似的表达式。随后, Thorsos 在研究过程中发现 Voronovich 的方法在互易性条件的假设下存在缺陷并对其进行了修正^[8]。小斜率近似应用范围比较广泛, 相对于经典的计算粗糙面声波散射的方法有很多优点, 特别是小掠射角入射的情况下, 比经典方法更加准确, 而且计算速度相对于其它经典方法也比较快, 更加适用于实时运算。

1.1 小斜率近似下粗糙海面表达式

对于满足绝对软边界条件的二维各向同性粗糙海面而言, 其最低阶小斜率近似散射截面的表达式为^[9]:

$$\langle \sigma \rangle = \frac{|\beta|^2}{16\pi^2 Q_z^2} [2\pi \int \{ \exp[-\frac{1}{2} Q_z^2 \rho(\underline{v})] - \exp[-\frac{1}{2} Q_z^2 \rho(\infty)] \} w J_0(Qv) dv + (2\pi)^2 \exp[-\frac{1}{2} Q_z^2 \rho(\infty)] \delta(Q)] \quad (1)$$

其中: Q_z 与 Q 为波数, 详见 1.2 节。 β 是一个只与粗糙表面边界条件相关的量, 对于绝对软边界条件而言, $\beta = 4k_z Q_z$ 。 \underline{v} 为空间两点 x 方向的差值。

$$\rho(\underline{v}) = 2[A(0) - A(\underline{v})] \quad (2)$$

式(2)中: $A(\underline{v})$ 为粗糙表面的相关函数, 可采用经验公式或实验测量, 本文通过实验测量并计算出表面的相关函数。

1.2 波数 Q_z 说明

入射波与 x 轴的夹角为 θ_{in} , 散射波与 $x-y$ 平面的夹角为 θ_{out} , 方位角为 ϕ_{out} , 各个角度的取值范围为: $0^\circ < \theta_{in} \leq 90^\circ$, $0^\circ < \theta_{out} < 180^\circ$, $-180^\circ \leq \phi_{out} \leq 180^\circ$ 。

入射波与散射波波数表达式如下所示, 文中所有带下划线的量均表示二维 $x-y$ 平面上的量。 k_0 为波数的数值, 利用这一变量表达入射波数矢量 \underline{k} 与散射波数矢量 \underline{q} 。

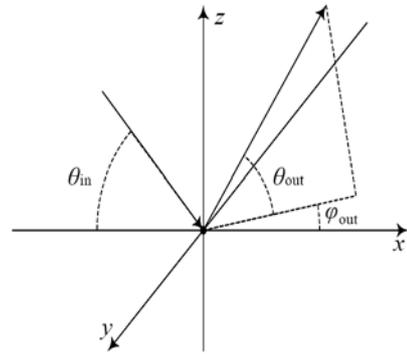


图1 二维粗糙面散射模型示意图

Fig.1 Sketch map of acoustic scattering model of two dimension rough surface

$$\underline{k} = k_0(\cos \theta_{in} \underline{x} - \sin \theta_{in} \underline{z}) \quad (3)$$

$$\underline{q} = k_0(\cos \theta_{out} (\cos \phi_{out} \underline{x} + \sin \phi_{out} \underline{y}) + \sin \theta_{out} \underline{z}) \quad (4)$$

$$\underline{Q} = \underline{k} - \underline{q} = (\underline{Q}_x, \underline{Q}_z) \quad \underline{Q}_z = -k_0(\sin \theta_{in} + \sin \theta_{out}) \quad (5)$$

$$\underline{Q}_x = k_0[(\cos \theta_{in} - \cos \theta_{out} \cos \phi_{out}) \underline{x} - \cos \theta_{out} \sin \phi_{out} \underline{y}] \quad (6)$$

$$|\underline{Q}_x| = \sqrt{\cos^2 \theta_{in} + \cos^2 \theta_{out} - 2 \cos \theta_{in} \cos \theta_{out} \cos \phi_{out}} \quad (7)$$

式(7)中: 第一项为散射场中的非相干散射部分, 第二项为相干散射部分。我们主要关注的是非相干散射部分, 从式(7)中可以看出, 只需要知道粗糙面的相关函数就可以得到其对应的散射截面的数值计算结果。

2 随机起伏水面的声散射实验

随机起伏水面的声散射实验在实验室水池中进行, 水池尺寸为 $1.7 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, 通过不同位置的风扇对水面的吹拂获得随机起伏水面。整个实验大体由两部分组成: 一部分为粗糙水面空间功率谱的测量实验, 另一部分为粗糙水面的声散射实验。

2.1 根据测量数据计算空间功率谱

第一部分实验是风吹水面所形成的粗糙水面涟漪的空间功率谱的测量实验, 整个实验系统由摄像头、计算机、3个风扇组成, 3个风扇的坐标分别为 $A(0.85, 0.75)$ 、 $B(0, 0.75)$ 和 $C(0, 0)$ 。为了判断实验中所制造出来的粗糙水面是否为各向同性的, 分别对水平面上互相垂直的两个方向上的水面波高变化进行了测量, 测量时间均为 30 s , 横向测量长度为 0.28 m , 纵向测量长度为 0.16 m , 采样点数均为 240 个点。

随后将摄像头记录的视频逐帧输出, 并随机抽取 20 幅图并对每幅图的水面波高进行读数^[10], 随

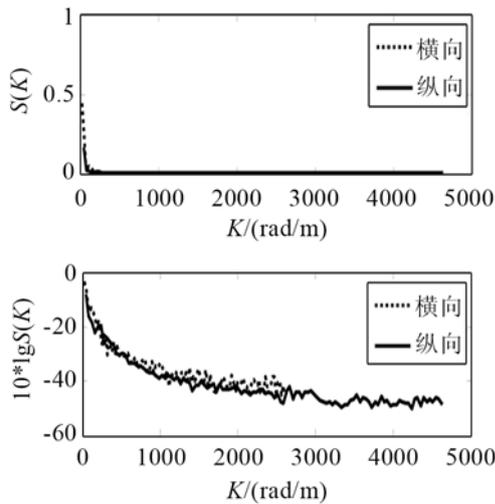


图 2 不同方向粗糙水面空间功率谱估计

Fig.2 Spatial spectrums of rough surface in different directions

后利用周期图法^[11]对其进行空间功率谱估计，结果如图 2 所示，图中 S 为高度起伏的功率谱密度， K 为波数。

从图 2 中可以看出横向和纵向空间功率谱估计结果基本一致，因此可以认为实验中的随机起伏水面是近似各向同性的。根据功率谱密度计算出浪高的自相关函数，代入公式(1)中即可得到散射强度。

2.2 随机起伏水面的声散射实验

第二部分实验是随机起伏水面的声散射实验。实验用换能器基阵如图 3 所示。

基阵由两个基阵架构成，可以通过旋转其中一个基阵架的位置来调整方位角 φ ，基阵架上各片角

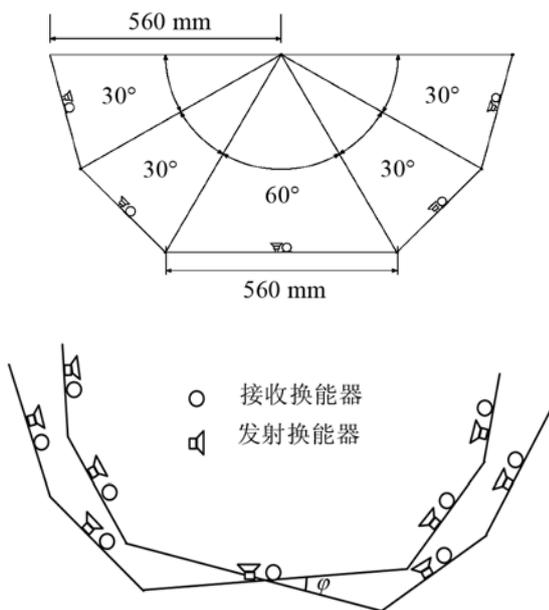


图 3 换能器基阵示意图

Fig.3 Sketch map of transducer array

铁与铅垂线的夹角分别为 15° 、 45° 、 90° 、 135° 和 165° ，每片角铁上固定两个换能器，换能器的 -3 dB 波束角为 50° 。

实验选用的发射信号为 CW 脉冲信号，声波频率为 100 kHz，填充 20 个周期，重复周期为 0.5 s。

3 实测数据与理论结果的对比分析

本实验对不同入射角、散射角以及方位角情况下的粗糙水面的散射强度进行了测量，计算得到了不同时间点所对应的散射强度值，最后取均值以此作为该种情况下的散射强度值。实验中发射换能器的声源级为 166 dB，水听器在 100 kHz 的灵敏度为 -170 dB。

3.1 水面散射信号提取

在进行随机粗糙水面的声散射实验时采集器所接收到的声脉冲信号由电串漏信号、直达波信号、水面和池壁散射信号以及其它固定位置散射体的散射信号五部分组成。其中只有水面散射信号是随机的，而其他信号都是固定的。由于在某些角度发射和接收声波时这些固定的信号与水面散射波的声程比较接近，不同贡献的声波很容易混叠到一起，因此如何从接收到的混叠后的信号中提取出水面散射信号就显得尤为重要。

本论文借鉴空间域处理技术^[12]来获得水面散射信号。其基本思想为：在发射和接收换能器保持相对位置不变的情况下，开启风扇，让水面反射声波的贡献随机化和无规则化，利用采集器连续采集信号，最终将不同时间点接收的信号同步叠加而将水面反射声波信号消除，从而提取出声程固定的干扰信号部分，然后用原始信号减去固定信号就可以获得水面散射信号。

图 4 是直达波和其他散射体散射信号干扰比较严重的两个角度脉冲信号处理前后的对比图。由图 4 可以看出利用空间域处理技术处理后，其固定信号部分被有效地去除了，剩下的部分就是我们所需要关注的水面散射信号。

3.2 收发合置系统下随机起伏界面的声散射

图 5 反映的是收发合置时散射强度随散射角变化的情况，散射强度随角度增加而增大，这是因为合置系统相干成分增加。可以看出实验结果与理论计算结果基本一致。

3.3 收发分置系统下随机起伏界面的声散射

图 6 反映的是方位角为 0° 时散射强度随散射角

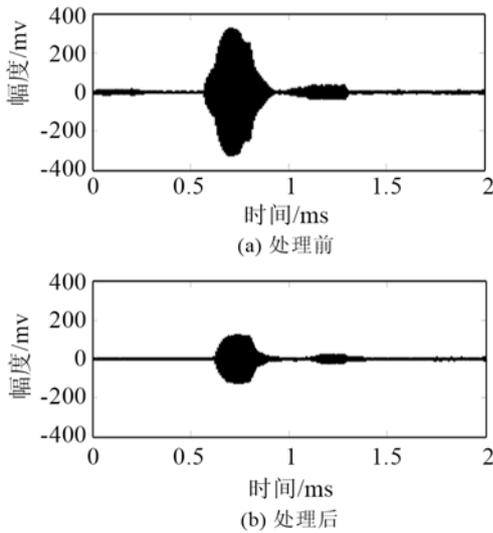


图 4 $\varphi_{out}=0^\circ, \theta_{in}=15^\circ, \theta_{out}=45^\circ$ 信号处理前后对比图
 Fig.4 Comparison of the signals before and after spatial domain processing for $\varphi_{out}=0^\circ, \theta_{in}=15^\circ, \theta_{out}=45^\circ$

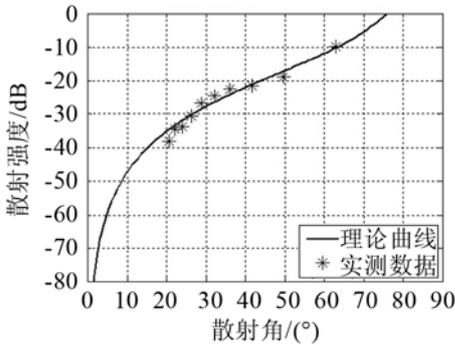
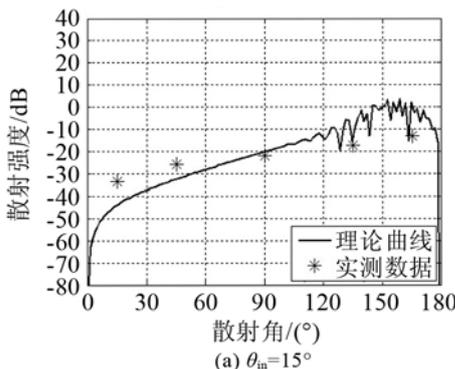


图 5 散射强度随散射角的变化关系曲线(收发合置)
 Fig.5 Variation of acoustic scattering strength with scattering angle (monostatic case)

掠射角变化的情况, 从图中可以看出, 在镜面方向散射强度最大, 实测结果与理论结果基本一致。图 7 是入射角为 15° 、极角分别为 40° 、 60° 、 90° 时散射强度随散射角变化的曲线。在接近镜面反射角处强度最大, 实验与理论相一致。

图 8 是入射角为 45° 、极角分别为 40° 、 60° 、 90° 时散射强度随散射角变化的曲线。由图 8 可以看出, 实测结果与理论计算结果基本一致。



(a) $\theta_{in}=15^\circ$

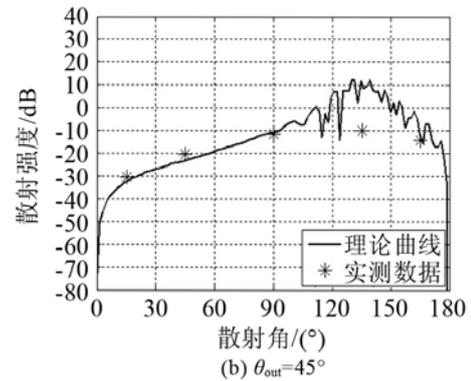
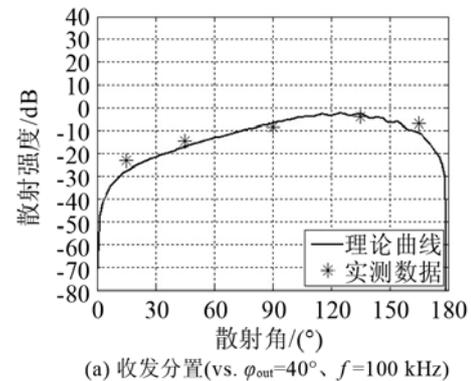
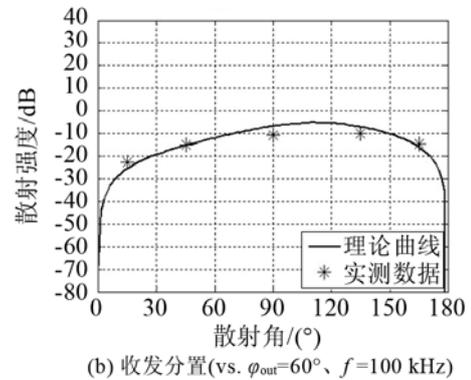


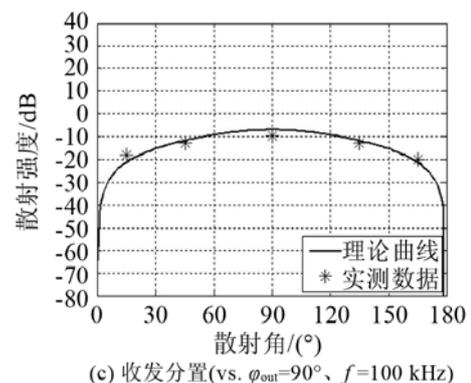
图 6 散射强度随散射角的变化关系曲线(收发分置)
 Fig.6 Variation of acoustic scattering strength with scattering angle (bistatic case)



(a) 收发分置(vs. $\varphi_{out}=40^\circ, f=100 \text{ kHz}$)



(b) 收发分置(vs. $\varphi_{out}=60^\circ, f=100 \text{ kHz}$)



(c) 收发分置(vs. $\varphi_{out}=90^\circ, f=100 \text{ kHz}$)

图 7 $\theta_{in}=15^\circ$ 时散射强度随散射角的变化关系曲线
 Fig.7 Variation of acoustic scattering strength with scattering angle for $\theta_{in}=15^\circ$

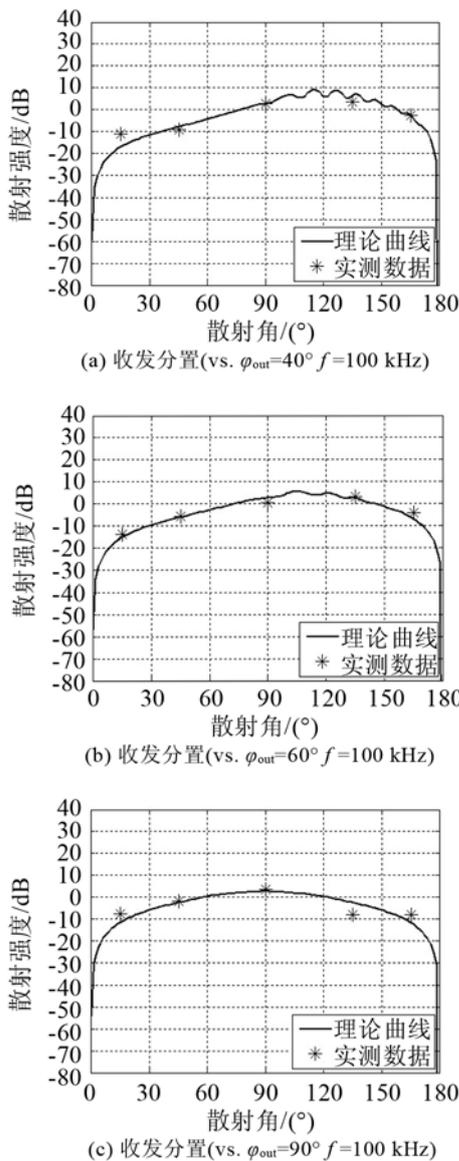


图 8 $\theta_{in}=45^\circ$ 时散射强度随散射角的变化关系曲线

Fig.8 Variation of acoustic scattering strength with scattering angle for $\theta_{in}=45^\circ$

4 结论

本文根据前人经验，找到了一种准确而又快速地计算随机起伏界面下的声散射问题的方法——小斜率近似，将这一方法进行了简述和提炼。在特定角度入射与反射条件下，公式中仅有一个未知量——界面的空间相关函数。这一未知量通常通过实验测量可获得，也可用经验函数代替。

在随机起伏界面强度测量实验中，从图 5 可以看到，对于收发合置系统，散射强度随着掠射角的增大而增加。这是因为相干部分逐渐增加的缘故。

对于收发分置系统，从图 6~8 可以看到，反射强度在掠射角小于镜反射角时随着掠射角的增加而增加，通常在镜反射角位置出现极大值，之后随着掠射角的增加而减小，这一点对于方位角为 0° 时尤为明显(见图 6)。在理论上的图像也同样有这样的趋势。

将图 7 与图 8 进行比较，发现对于相同散射方位角，不同入射角(15° 与 45°)下散射强度的差异达 10 dB 左右。这是由于入射方向与表面越接近垂直，相干成分越多，散射强度越大。

本文的结论为后续更为复杂的工作奠定了基础。如海底混响问题、浅海声传播问题、浅海声成像问题、界面附近目标特征提取问题等。

参 考 文 献

- [1] Thorsos E L, Jackson D R. Studies of scattering theory using numerical methods[J]. Waves Random Media, 1991, 1(3): 165-190.
- [2] Holford R L. Scattering of sound waves at a periodic pressure release surface: An exact solution[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1981 70 (4): 1116-1128.
- [3] Harper E Y, Labianca F M. Perturbation theory for scattering of Sound from a point source by a moving rough surface in the presence of refraction[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1975, 57(5): 1044-1051.
- [4] Thorsos E I, Jackson D R. The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1989, 86(1): 261-277.
- [5] Kuperman. Coherent component of specular reflection and transmission at a randomly rough two-fluid interface[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1975, 58(2): 365-370.
- [6] Voronovich. Small slope-approximation in wave scattering by rough surfaces[J]. Sov. Phys. JETP, 1985, 62(1): 65-70.
- [7] YANG Taiqian, Broschat. Acoustic scattering from a fluid-elastic-solid interface using the small slope approximation[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1994, 96(3): 1796-1804.
- [8] Thorsos E L. An investigation of the small slope approximation for scattering from rough surfaces[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1995, 97(4): 2082-2093.
- [9] Daniel Wurmser. Stochastic cross-sections based on the small slope approximation: theory[R]. Washington DC, Naval Research Laboratory.
- [10] 王伟. 图像复原中的模糊参数估计[J]. 智能系统学报, 2012, 7(4): 1-6.
WANG Wei, Estimation of blur parameters in image restoration[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2012, 7(4): 1-6.
- [11] 姚武川, 姚天任. 经典谱估计方法的 Matlab 分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(4): 45-47.
YAO Wuchuan, YAO Tianren. Analyzing classical spectral estimation by MATLAB[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(4): 45-47.
- [12] 吴本玉, 莫喜平, 崔证. 非消声水池中低频换能器测量的空间域处理方法[J]. 声学学报, 2010, 35(4): 434-440.
WU Benyu, MO Xiping, CUI Zheng. A spatial domain processing method for low frequency transducer measurement in a reverberant tank[J]. Acta Acustica, 2010, 35(4): 434-440.