

纪念应崇福院士诞辰 100 周年

起伏海面环境下水声信道特性及估计方法*

陈文剑^{1,2,3} 郎鹏远^{1,2,3} 尹爽^{1,2,3} 殷敬伟^{1,2,3†} 孙辉^{1,2,3} 韩笑^{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)

摘要 为了研究随机起伏海面的散射对水声信道特性的影响,以及不同信道估计算法在该信道条件下的性能问题,该文从利用 Monte Carlo 方法模拟的基于 PM 海浪谱的二维随机起伏海面出发,提取了与风向不同夹角的一维随机起伏海面,并利用 Kirchhoff 近似法计算了其散射强度。将得到的声散射特性和海面环境信息融入到信道模型中,建立了基于 PM 海浪谱的随机信道模型。通过仿真分析了不同风速、传播距离条件下,声波的传播损失和信道冲激响应变化,并利用 l_0 -最小均方误差法、匹配追踪算法和正交匹配追踪算法进行了信道估计。给出了不同环境条件下,三种算法估计性能的综合比较结果,验证了算法针对该信道模型的有效性。

关键词 声散射,海浪谱,水声信道特性,信道估计

中图分类号: TB567

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)05-0722-010

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.017

Characteristic and estimation method of underwater acoustic channel in fluctuant sea environment

CHEN Wenjian^{1,2,3} LANG Pengyuan^{1,2,3} YIN Shuang^{1,2,3} YIN Jingwei^{1,2,3} SUN Hui^{1,2,3}
HAN Xiao^{1,2,3}

(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)

Abstract In order to study the influence of the scattering of random fluctuation sea surface on the characteristics of underwater acoustic channel, and the performance of different channel estimation algorithms under this channel condition, this paper starts from the two-dimensional random fluctuation sea surface based on the PM wave spectrum simulated by the Monte Carlo method, a one-dimensional random fluctuation sea surface with different angles to the wind direction is extracted, and the scattering intensity is calculated using the Kirchhoff approximation. The obtained acoustic scattering characteristics and sea surface environmental information were integrated into the channel model, and a random channel model based on PM wave spectrum was established. Through simulation, the propagation loss of acoustic wave and channel impulse response under different wind speeds and propagation distances were analyzed. The channel estimation was performed by

2018-06-07 收稿; 2018-07-23 定稿

*国家自然科学基金重点项目 (61631008), 国家自然科学基金青年基金项目 (11404077), 国家海洋公益性行业科研专项 (201405036)
作者简介: 陈文剑 (1981-), 男, 陕西大荔人, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 水下目标声散射、极地声学。

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

using l_0 -LMS algorithm, MP algorithm and OMP algorithm. The comprehensive comparison results of the three algorithms' estimation performance under different environmental conditions are given, and the effectiveness of the algorithms against this channel model is verified.

Key words Acoustic scattering, Wave spectrum, Characteristic of underwater acoustic channel, Channel estimation

1 引言

针对不同通信体制下水声通信系统的设计,都需要提前预知水声信道的特性,才能够保证系统的有效性与其可靠性^[1]。由于海面通常是不平整的,并随着时间的变化随机起伏。声信号在海洋中传播时,遇到不平整的海面边界会发生散射和反射作用,造成了声信号的多径传播,导致水声信道特性受随机起伏海面的声散射作用的影响很大。因此,研究随机起伏海面下的水声信道特性是水声领域的难点和热点问题,对水声通信系统的设计有着重要意义。而且经过信道传输的多径信号会在接收端互相叠加干涉,导致能量的衰减。这就需要在接收端精确地估计信道,用以抵抗衰减,提高水声通信系统的性能,因此需要研究并分析不同信道估计方法在随机起伏海面环境下水声信道估计中的性能。

近年来,国内外学者利用散射声场的不同计算方法,对随机起伏海面环境下的水声信道问题进行了诸多研究,并取得了一定的进展。周士弘等^[2]利用小斜率近似理论得到了粗糙海面的散射特性,并分析了界面散射对低频声传播的影响;王晋晋^[3]研究了海面环境下时不变信道和时变信道的声传播特性及其信道估计方法;Li等^[4]针对信道的时延多普勒扩展函数形式提出了一种稀疏信道的估计方法,其优点是不需要动态建模就可以获得信道结构;Berger等^[5]利用压缩感知技术估计了多载波水声通信系统中的水声信道,通过数值模拟和实验数据对比验证了其有效性;Guo等^[6]提出了基于压缩感知的逐块追踪信号算法,利用该算法对稀疏信道进行了估计。

本文在已有研究的基础上,考虑到海面波浪起伏情况主要受风速影响,给出了受风速变量影响的PM海浪谱,然后利用Monte Carlo方法建立基于PM海浪谱的二维随机起伏海面模型。为了解决小斜率近似法计算结果的精确度不够问题,本文采用Kirchhoff近似法计算散射声场,这种方法可以严格计算绝对软边界条件下的散射声场,并且考虑了影

区和多次散射的作用。将得到的声散射特性融入到信道模型中,仿真分析了不同情况下的信道特性,并利用 l_0 -LMS算法、MP算法和OMP算法进行了信道估计,比较了算法的性能。仿真结果很好地验证了算法的有效性和应用价值。

2 随机起伏海面的建模

科学家们开始将海面波浪看作是由若干个独立高斯随机变量的谐波叠加而成的,但是对于真实的海面,海面的横纵向特性是受风速影响的,并且根据风向夹角的不同,海面的横纵向特性也各不相同,呈各向异性。而且真实海面的功率谱并不服从高斯分布,所以通过对真实海面波浪的长期研究观测,在1964年,Pierson和Moscowitz对北大西洋充分成长型海浪的观测数据进行了理论推导,由此得到了PM海浪谱,其适用风速范围是0~20 m/s,其表达式为^[7-8]

$$S(k_j) = \frac{\alpha}{4|k_j|^3} \exp\left(-\frac{\beta g_c^2}{k_j^2 U_{19.5}^4}\right), \quad (1)$$

其中, α 和 β 是无量纲经验常数, $\alpha = 8.10 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$; $U_{19.5}$ 是19.5 m标准高度上的风速; g_c 是重力加速度, $g_c = 9.8 \text{ m/s}^2$; k_j 为离散波数, $k_j = 2\pi j/L$, L 为海面长度。

PM海浪谱的海面高度分布函数可以表示为

$$f(x_m, t) = \frac{1}{L} \sum_{j=-N/2+1}^{N/2} F(k_j) \exp(ik_j x_m) \times \exp(i\omega_{k_j} t), \quad (2)$$

其中,

$$\omega_{k_j} = \left\{ g_c |k_j| \left[1 + \left(\frac{k_j}{363.2} \right)^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

$$F(k_j) = \frac{2\pi}{\sqrt{2\Delta k}} \sqrt{S(k_j)} \times \begin{cases} N(0, 1) + iN(0, 1), & n \neq 0, N/2, \\ N(0, 1), & n = 0, N/2, \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, Δk 是相邻谐波的波数差; $N(0, 1)$ 是正态分布随机数。

为了给出更直观的感受, 利用 Monte Carlo 方法建立了不同风速下的基于 PM 海浪谱的二维随机起伏海面模型。图 1 分别给出了风速为 3 m/s 和 6 m/s 时, 基于 PM 海浪谱的随机起伏海面模型。

从图 1 可以看出, 随着风速的增大, 基于 PM 海浪谱的随机起伏海面的波高变大, 海面起伏变得更加剧烈。当风速分别为 3 m/s 和 6 m/s 时, 分别提取风向夹角为 0° 和 90° (顺风 and 侧风方向) 的数据, 可

以得到基于 PM 海浪谱的一维随机表面的起伏高度示意图, 如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 同一风速条件下, 由于风向夹角的不同, 随机起伏海面波浪的变换周期不相同, 海面呈现各向异性。由于相关长度影响着随机起伏表面的周期大小, 说明随机起伏海面的风向夹角对海面的相关长度有着重要影响, 风向角越大, 相关长度越大。当风速变大时, 随机起伏海面波浪的峰值变大, 海面波浪周期也随之变大。

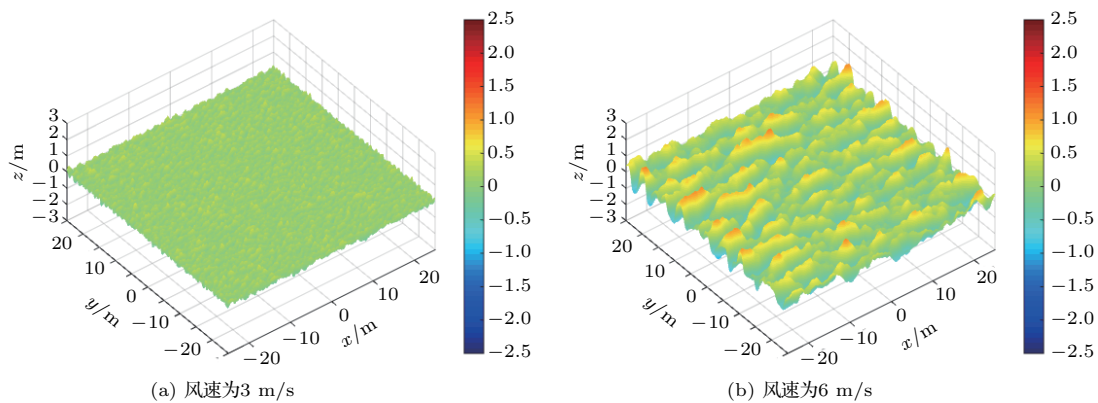


图 1 不同风速下起伏海面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of undulating sea surface at different wind speeds

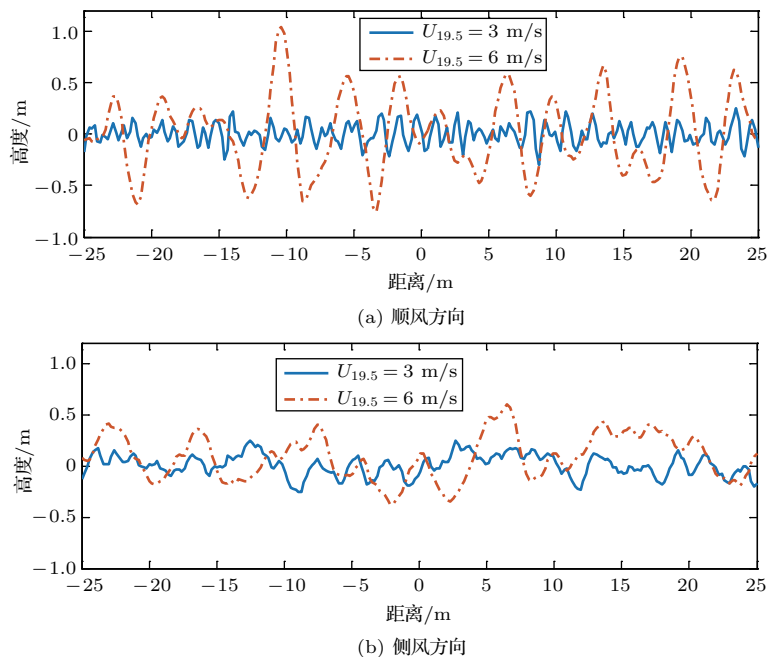


图 2 基于 PM 海浪谱的一维随机起伏海面

Fig. 2 One-dimensional random undulating sea surface based on PM wave spectrum

3 随机起伏海面的散射特性

考虑一维随机起伏表面的几何模型^[9],如图3所示。其中, θ_{in} 为入射掠射角, θ_s 为散射角, $f(x)$ 为随机起伏表面高度的函数。

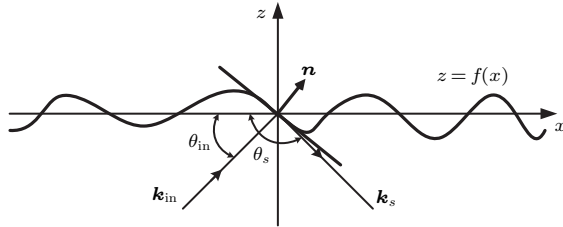


图3 一维随机起伏表面的几何模型

Fig. 3 Geometrical model of one-dimensional random undulating surface

利用提取的基于PM海浪谱的一维随机起伏海面,采用Kirchhoff近似法计算不同散射角度的散射强度,分析其散射特性。对于一维随机起伏表面的声散射问题,可以利用Helmholtz积分表达式来求解散射声场^[10]。总散射声场 $p(\mathbf{r})$ 的表达式如下:

$$p(\mathbf{r}) = p_{inc}(\mathbf{r}) - \frac{1}{4i} \int_S \mathbf{H}_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \frac{\partial p(\mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}'} dS', \quad (5)$$

其中, $p_{inc}(\mathbf{r})$ 是入射声场, S 是起伏表面, $\mathbf{H}_0^{(1)}$ 是零阶第一类Hankel函数, k 是波数, $\partial p(\mathbf{r}')/\partial \mathbf{n}'$ 为未知的表面总声压的法向导数。

当表面边界条件为绝对软边界,即 $p(\mathbf{r}) = 0$ 时,可以得到

$$p_{inc}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4i} \int_S \mathbf{H}_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \frac{\partial p(\mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}'} dS'. \quad (6)$$

当表面总长度为 L 时,将 L 分解为 N 个子区间,得到 $\Delta x = L/N$,利用数值积分方法可以将公式(6)转化为以下形式:

$$\mathbf{a}_m = \sum_{n=1}^N \mathbf{A}_{mn} \mathbf{b}_n, \quad m = 1, \dots, N, \quad (7)$$

其中,

$$\mathbf{a}_m = p_{inc}(\mathbf{r}_m), \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_{mn} = \begin{cases} \mathbf{H}_0^{(1)}(k|\mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n|), & m \neq n, \\ \mathbf{H}_0^{(1)}[(k\Delta x/2e)\gamma_m], & m = n, \end{cases} \quad (9)$$

$$\mathbf{b}_n = \frac{\Delta x}{4i} \gamma_n \left. \frac{\partial p(\mathbf{r}')}{\partial \mathbf{n}'} \right|_{\mathbf{r}_n}, \quad (10)$$

其中, \mathbf{a}_m 是入射声场; \mathbf{A}_{mn} 是Hankel函数且为 N 阶对称矩阵; \mathbf{r}_m 可以用单位向量 \mathbf{x} 和 \mathbf{z} 表示,即 $\mathbf{r}_m = x_m \mathbf{x} + \mathbf{f}(x_m) \mathbf{z}$, $x_m = (m - 1/2)\Delta x - L/2$; $\gamma_m = \gamma(x_m)$, $\gamma^2(x') = 1 + [df(x')/dx']^2$ 。

当满足远场条件时,Hankel可以表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{H}_0^{(1)}(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \\ & \cong (2/(\pi k))^{1/2} e^{-i\pi/4} (e^{ikr}/\sqrt{r}) e^{-i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{k}_s = k\mathbf{r}/r$, $r = |\mathbf{r}|$ 。

结合以上公式,可以将散射声场表示为

$$\begin{aligned} p_s(\mathbf{r}) = & - \left(\frac{2}{\pi k} \right)^{0.5} e^{-i\pi/4} \frac{e^{ikr}}{\sqrt{r}} \\ & \times \sum_{n=1}^N e^{-i\mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r}_n} \mathbf{b}_n. \end{aligned} \quad (12)$$

由于表面长度区间为 $[-L/2, L/2]$, $|x| > L/2$ 的声波并未入射至表面,此时利用Thorsos等^[11]提出的锥形波,在入射场中应用高斯锥形函数来表征入射声压。为了保证 $p_{inc}(\mathbf{r})$ 满足第 $1/(kg \sin \theta_{in})$ 阶波动方程(其中 $kg \sin \theta_{in} \gg 1$),引入参数 $\omega(\mathbf{r})$,于是得到修正的入射波的声压表达式:

$$\begin{aligned} p_{inc}(\mathbf{r}) = & \exp \left\{ i\mathbf{k}_{in} \cdot \mathbf{r} [1 + \omega(\mathbf{r})] \right. \\ & \left. - (\mathbf{x} - \mathbf{z} \cot \theta_{in})^2 / g^2 \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $\omega(\mathbf{r}) = \frac{2(\mathbf{x} - \mathbf{z} \cot \theta_{in})^2 / g^2 - 1}{(kg \sin \theta_{in})^2}$; $\mathbf{k}_{in} = k(\cos \theta \mathbf{x} + \sin \theta \mathbf{z})$; g 为锥形控制参量, $g = L/4$ 。

对于表面长度为 L 的一维随机起伏界面,利用Thorsos等^[11]的推导可以得到一维随机起伏界面的散射截面表达式:

$$\sigma(\theta_{in}, \theta_s) = \frac{\langle |p_s(\mathbf{r})|^2 \rangle}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} g \left[1 - \frac{1 + 2 \cot^2 \theta_{in}}{2(kg \sin \theta_{in})^2} \right]}, \quad (14)$$

由此得到散射强度的表达式:

$$SS = 10 \lg \sigma(\theta_{in}, \theta_s). \quad (15)$$

由Kirchhoff近似法可求得基于PM海浪谱的一维随机起伏海面的面内散射强度。仿真计算均是先模拟50组基于PM海浪谱的一维随机起伏海面,然后用Kirchhoff近似法对散射强度进行求解,最后取均值而得到的,具有统计意义。仿真条件:声波频

率为2 kHz,入射角为 $\theta_{in} = 45^\circ$,风速分别为3 m/s、4 m/s和6 m/s时,分别计算了顺风方向和侧风方向下的面内散射强度,结果如图4所示。

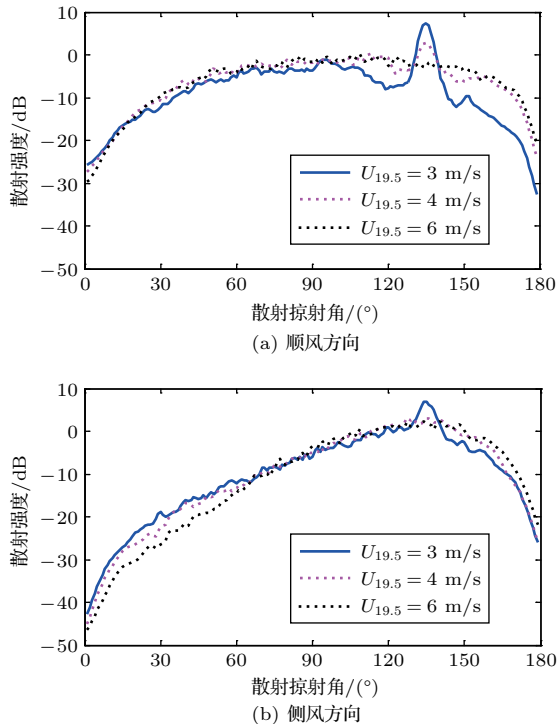


图4 一维随机起伏海面的面内散射强度

Fig. 4 In-plane scattering intensity of one-dimensional random undulating sea surface

由图4可知,顺风和侧风方向上的散射特性有着明显的不同,同一风速下,当 $\theta_s < 135^\circ$ 时,在顺风方向上,面内散射强度呈现先增大后减小的趋势;而侧风方向上,散射角增加,散射强度增大。当 $\theta_s > 135^\circ$ 时,随着散射角的增大,两种风向角情况下的面内散射强度均减小。不同风向夹角下的散射特性不相同的原因可能是随机起伏海面的各向异性引起的。从图4中也可以看出,散射声场的能量主要集中在镜反射方向($\theta_s = 135^\circ$)上,当风速增大时,镜反射方向能量明显减小,在其他方向上的散射能量逐渐增强。

由于镜反射方向上的散射声场能量与其他方向上存在明显的差异性,因此针对镜反射造成的散射损失进行具体研究,并利用相干反射系数来进行描述。本文考虑大尺度起伏海面($kl \gg 1$)且海面发生全反射的情况,研究其镜反射方向上的反射声波对水声信道的影响。

定义平面波瑞利参数 Q ,用来度量由反射带来的相位差,表征随机海面的不平整程度,其定义式为^[12]

$$Q = 2k\sigma \sin \theta_{in}, \quad (16)$$

其中, σ 为均方根高度。

当瑞利参数 Q 较小时,可以用微扰法得到相干反射系数的表达式:

$$|R_c|^2 = 1 - 4k^2\sigma^2 Y \sin \theta_{in}, \quad (17)$$

其中, Y 是一个无量纲的参数。

(1) 当小入射掠射角情况下,即 $2kl \sin^2 \theta_{in} \ll 1$ 时:

$$Y = \frac{E_{PT} \Gamma\left(\frac{3}{4}\right) \alpha^{1/4}}{(k\sigma_{PM})^{1/2}}, \quad (18)$$

其中, $E_{PT} \approx 0.3814$, α 为方向角, σ_{PM} 为均方根高度。

(2) 当大入射掠射角情况下,即 $2kl \sin^2 \theta_{in} \gg 1$ 时:

$$Y = \sin \theta_{in}. \quad (19)$$

当瑞利参数 Q 值较大时,相干反射系数的表达式可以通过Kirchhoff近似得到:

$$R_c = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-2ik\phi \sin \theta_{in}) \omega(\phi) d\phi, \quad (20)$$

其中, $\omega(\phi)$ 表示海面高度位移的谱函数。

利用不同情况下相干反射系数的表达式,可以计算得到基于PM海浪谱的一维随机起伏海面的相干反射系数的模值。如图5所示,给出了瑞利参数 Q 较大时,不同入射掠射角、不同声波频率下基于PM海浪谱的随机起伏海面的相干反射系数。

从图5中可以看出,随着入射掠射角的增加,相干反射系数逐渐减小,说明镜反射变弱;并且风速越大,海浪的波高越高,其均方根高度越大,相干反射系数的下落速度越快,说明风速对海面的多径传播有着控制作用。由图5(b)可知,相干反射系数随着声波频率的增加和风速的增大而逐渐减小,当风速很大、声波频率很高时,镜反射几乎消失。此时海浪粗糙度很大,镜反射方向的散射声场能量较弱,声信号传播一定距离后,所携带能量经多次海面反射后就会消耗殆尽;而海面的粗糙度较小时,镜反射方向上散射声场的能量值很大,声信号经远距离传播后,依旧存在着多次海面反射,信道的多径效应比较明显。

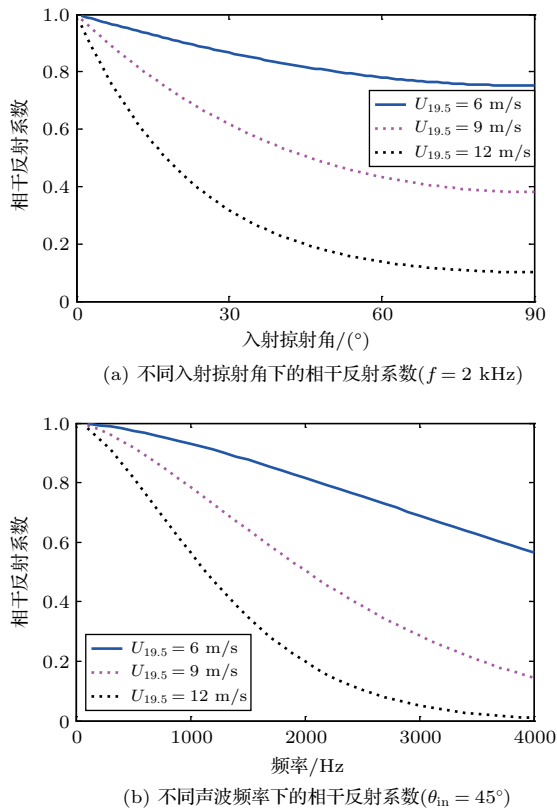


图5 不同条件下的相干反射系数

Fig. 5 Coherent reflection coefficient under different conditions

4 随机起伏海面下的信道特性

4.1 信道模型

通过前面的研究,可以得到特定风速条件下的一维随机起伏海面模型及该环境下的相干反射系数,然后采用BELLHOP射线模型在高频情况下建立该环境下的水声信道模型。射线理论是一种近似理论,属于波动方程达到某种条件下的近似。射线理论中对本征声线的定义为在沿声线向四面八方传播的辐射声能量中,能够按照特定路径传播到接收端的声线。每条声线均有着各自的传播轨迹和到达时间,并且各自携带一部分声能量,对全部本征声线进行叠加就可以得到接收端的声场。每条声线的传播路径和传播时间由程函方程决定,程函方程表达式为

$$[\nabla P]^2 = k^2, \quad (21)$$

其中, $P = P(x, y, z)$ 是声压的相位函数。

设 $A = A(x, y, z)$ 是声压的幅度函数,射线理论

成立的基本条件为

$$\frac{1}{A} \nabla^2 A \ll k^2. \quad (22)$$

基本条件要求声波波长较短,并且传播介质缓慢变化。这个条件说明射线理论仅适用于高频情况,但不适用于焦散区和声影区。针对经典射线模型的弊端,BELLHOP射线模型对此进行了修正。BELLHOP模型^[13]基于高斯束射线跟踪方法,其声束中心线处的声场,可以通过声束宽度、曲率以及标准射线方程的积分求得。

利用BELLHOP射线模型可以得到特定传播距离下海面不同声线路径的到达时延和幅度,即信道冲激响应。记第 i 条本征声线上传播幅度为 A_i ,传播时间为 τ_i ,则此时信道的冲激响应为

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_i). \quad (23)$$

如果考虑表面反射导致的相位变化,则 $A_i = a_i \exp(j\theta_i)$,其中 A_i 为幅度衰减, θ_i 为相位变化,此时公式(23)变化为

$$g(t) = \text{R} \left[\sum_{i=1}^N A_i s(t - \tau_i) \right] + v(t), \quad (24)$$

其中, $\text{R}[\cdot]$ 表示取实部, $v(t)$ 为噪声。

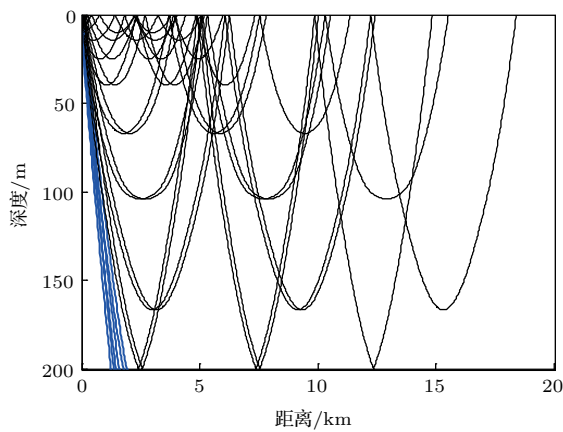
4.2 信道特性

由第3节中的结果可知,随机起伏海面引发的散射对声传播的影响主要体现在镜反射方向上。为了减少海底的吸收损失对声线的影响,选取声速呈正梯度分布的情况,此时声线均向上折射,其传播损失将取决于随机起伏海面的相干反射系数。

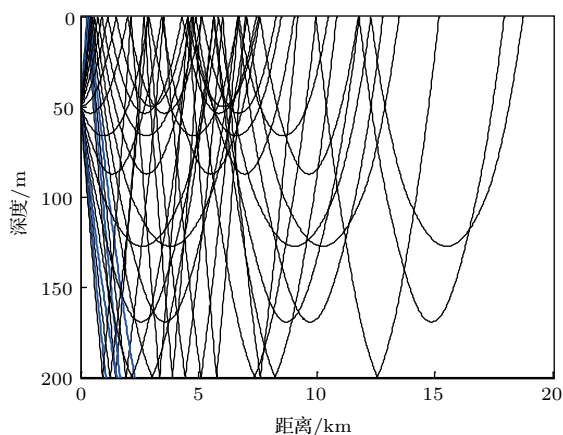
4.2.1 声线轨迹

仿真条件:声波频率为2 kHz,海深为200 m,声源位置分别在10 m和50 m,风速为12 m/s。随机起伏海面下的声线轨迹如图6所示,通过声线轨迹可看出随机起伏海面下的声信号传播情况。

从图6中可以看出,由于海面波浪的随机起伏,使得部分声线无法远距离传播。当声源位于距离海面不同位置时,声线传播轨迹各不相同。当声源距离海面较近时,与海面反射次数比声源位置较深时要多,受海面的影响更大,反射损失更大,部分声线在较近距离处就停止了传播。



(a) 声源深度10 m



(b) 声源深度50 m

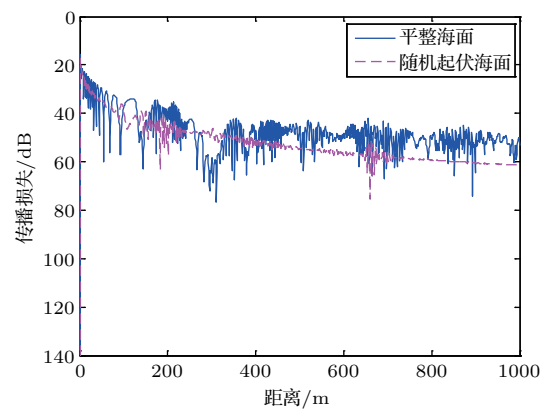
图6 随机起伏海面下不同声源深度的声线轨迹

Fig. 6 The ray tracing of different depths of sound under random undulating sea surface

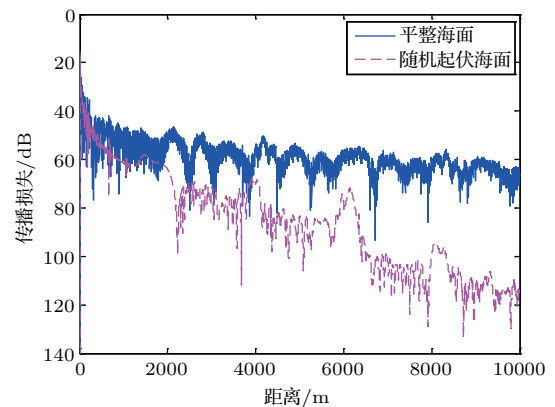
4.2.2 传播损失

仿真条件: 声波频率为2 kHz, 海深为200 m, 风速为12 m/s, 发射和接收深度均在10 m, 忽略海底反射对声传播的影响, 设海底反射系数为1。此时仿真了最远距离分别为1 km和10 km时的声信号传播损失, 如图7所示。

图7比较了风速为12 m/s时的随机起伏海面和平整海面下的传播损失, 从图中可以看出, 二者的传播损失存在着很大差异, 由于不同路径上传播的声能量相互干涉, 两种海面环境下传播损失的峰值范围发生了较大的变化。这说明风速引起的海浪起伏对声传播有着很大影响。在远距离传播时, 12 m/s风速情况下海面的传播损失同平整海面相比, 衰减幅度更大、衰减速度更快, 这说明声波在远距离传播时, 经过多次海面的散射, 能量消耗的速度很快, 这对声信号的远距离传播是很不利的。



(a) 距离1 km内的传播



(b) 距离10 km内的传播

图7 平整海面和随机起伏海面的传播损失对比

Fig. 7 Contrast of propagation loss between flat sea surface and random undulating sea surface

4.2.3 冲激响应

仿真条件: 声波频率为2 kHz, 海深200 m, 风速为6 m/s, 发射和接收的深度均为10 m, 通信距离为1 km和10 km时, 基于PM海浪谱的随机起伏海面环境下的水声信道的冲激响应结果如图8所示。从图8中可以看出, 当通信距离变远时, 幅值明显下降, 并且到达声线的数目明显减少, 说明随机起伏海面的反射对到达声线的幅值和数目有着很大影响。

为了研究随机起伏海面的风速对信道冲激响应的影响, 在通信距离为1 km时, 对风速为9 m/s和12 m/s时信道的冲激响应进行了仿真, 海深和收发换能器深度参数与图8中的相同, 结果如图9所示。

从图9中可以看出, 随着风速的增加, 到达声线的幅值有着明显的下降, 并且到达路径的数目随风速的增加而减少。说明风速的增加对多途有着控制作用, 在传播一定距离后, 声线的能量经多次反射消耗殆尽, 不能到达接收端。

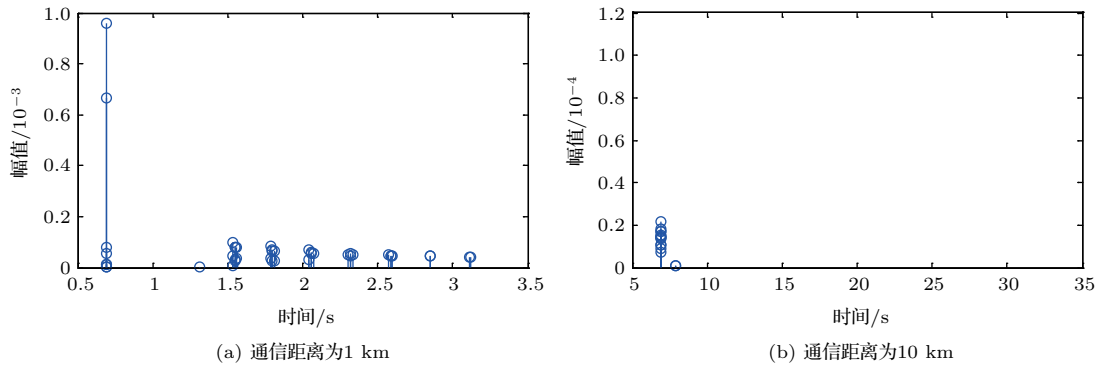


图8 不同通信距离下的信道冲激响应

Fig. 8 Channel impulse response at different communication distances

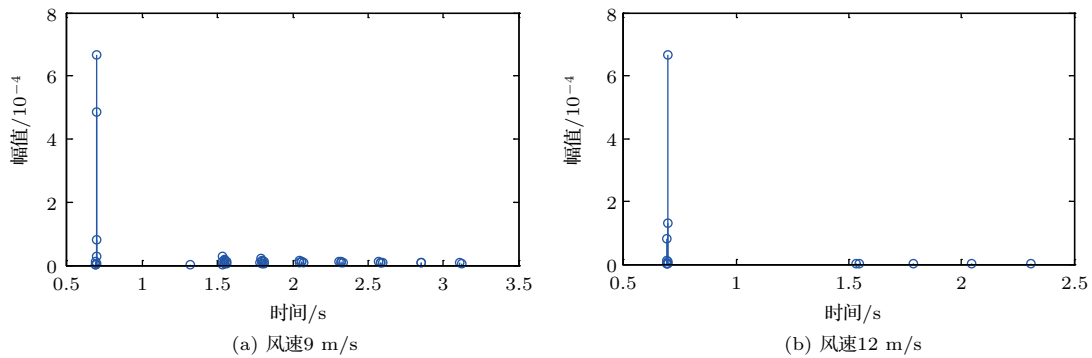


图9 不同风速下的信道冲激响应

Fig. 9 Channel impulse response at different wind speeds

5 随机起伏海面下的信道估计

信道估计就是求解一个信道的近似冲激响应^[14],在接收端获得信道的瞬时状态信息。信道估计的准确与否对通信系统的性能有着重要作用,直接影响了接收信号恢复的准确性。信道估计的方法有很多,其中经典信道估计算法有最小二乘法(LS算法)和最小均方误差法(LMS算法)^[15]。虽然这两种算法结构简单,计算复杂度低,但是它们均没有考虑到水声信道的稀疏特性,因此估计效果并不理想。而 l_0 -最小均方误差法(l_0 -LMS算法)^[16]、匹配追踪算法(MP算法)和正交匹配追踪算法(OMP算法)^[17-18]充分考虑到了水声信道的稀疏特性,利用少量观测信号就能重构信道,并且估计效果良好。

图10是分别利用LMS算法和 l_0 -LMS算法对不同信噪比条件下的信道进行估计的结果。其中,LMS算法和 l_0 -LMS算法的迭代步长均为 $\mu = 0.01$; l_0 -LMS算法的稀疏性约束参数 $k' = 5 \times 10^{-5}$, $\beta' = 5$ 。

从图10中可知, l_0 -LMS算法同LMS算法相比,

很好地还原了信道的稀疏性。当风速为6 m/s、信噪比为0 dB时,由于受到噪声的影响, l_0 -LMS算法在没有多途的位置出现了一些伪峰,但当信噪比较大时,伪峰数目逐渐减少,信道估计的结果变得更精确。

图11是分别利用MP算法和OMP算法对通信距离为10 km、风速为6 m/s的信道进行估计的结果。从图11的整体结果中可以看出,MP算法和OMP算法可以比较好地还原信道的稀疏特性。从图11(a)中可以看出,在信噪比较低的条件下,利用MP算法和OMP算法得到的估计信道有较大的误差,精度不高;从图11(b)中可以看出,信噪比相对较高时,两种算法的估计信道的误差很小,只是有一些幅值较小的峰被当作了噪声处理,没有被还原。由此可知,MP算法和OMP算法受噪声的影响较大,当信噪比较高时,MP算法和OMP算法可以较精确地估计信道。

为了进一步分析信噪比对 l_0 -LMS算法、MP算法和OMP算法估计精度的影响,下面针对不同风速环境,分别计算了上述三种算法在不同信噪比条

件下的均方误差,结果如图12所示。

从图12(a)中可知,当风速为6 m/s时,随着信噪比的增大,三种算法的均方误差均下降,并

且 l_0 -LMS算法的下降速率更快。当信噪比较小时,MP算法和OMP算法的性能更好;当信噪比大约在5~20 dB范围内时, l_0 -LMS算法的均方误差小于

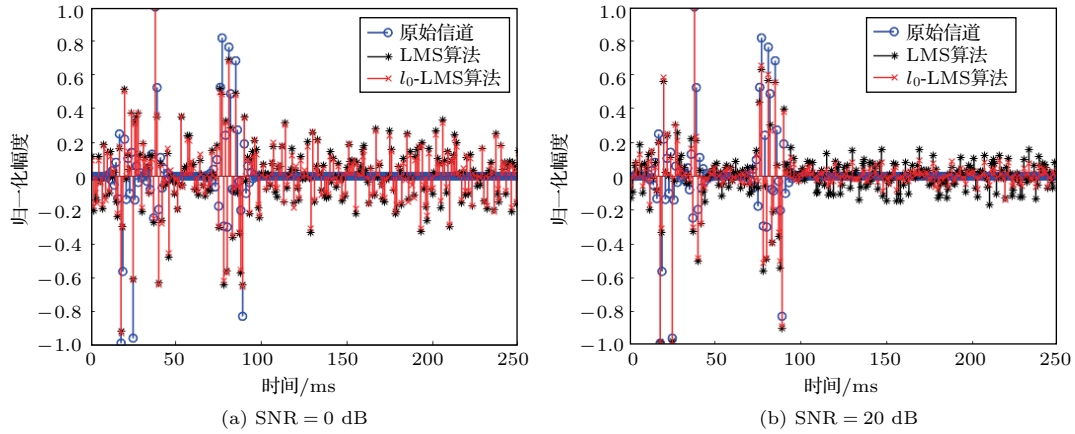


图10 LMS算法和 l_0 -LMS算法信道估计的对比

Fig. 10 Comparison of channel estimation between LMS algorithm and l_0 -LMS algorithm

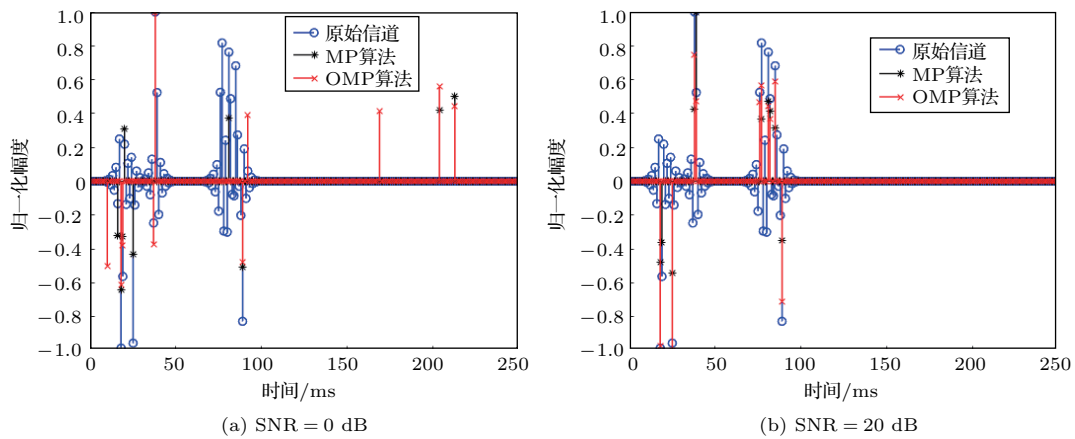


图11 MP算法和OMP算法信道估计的对比

Fig. 11 Comparison of channel estimation between MP algorithm and OMP algorithm

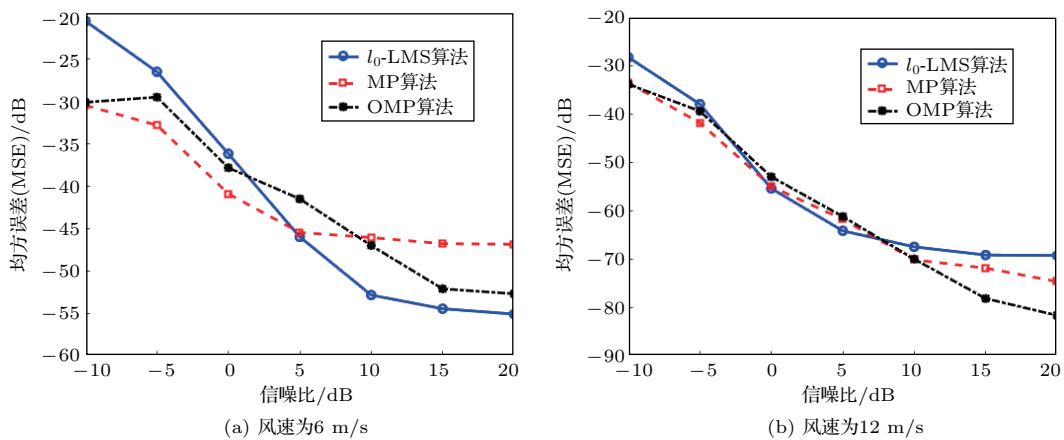


图12 不同风速条件下算法估计的均方误差

Fig. 12 Mean square error of algorithm estimation under different wind speed conditions

MP算法和OMP算法的均方误差,此时 l_0 -LMS算法的信道估计性能更好。从图12(b)中可知,当风速为12 m/s时,三种算法的均方误差曲线较为相似。当信噪比较高时,OMP算法的均方误差的下降速度明显变快。因此,在此风速条件下,如果信噪比较高,则OMP算法的信道估计性能更好。

6 结论

本文针对随机起伏海面环境下的水声信道特性和估计方法展开研究,利用Monte Carlo方法建立了基于PM海浪谱的随机起伏海面模型,讨论了随机起伏海面的声散射对水声信道特性的影响以及此信道环境下的信道估计方法的性能,主要结论如下:

(1) 随着声波频率的增加和风速的增大,相干反射系数逐渐减小,镜反射方向的反射场较弱,声信号传播一定距离后,所携带的能量经多次海面反射后就会消耗殆尽;而海面的粗糙度较小时,镜反射方向上散射场的能量值很大,声信号经远距离传播后,依旧存在着多次海面反射,信道的多径效应比较明显。

(2) 由于海面波浪起伏的影响,随机起伏海面存在散射损失,使得部分声线无法远距离传播,并且声源越靠近海面,与海面的反射次数越多,受海面起伏的影响越大,能远距离传播的声线数目越少;波浪起伏会导致声波能量的快速衰减,并且风速的大小对传播损失的峰值范围有着较大的影响,风速越大,传播损失的峰值范围越大,并随着传播距离的增加,能量衰减越大;同平整海面相比,随机起伏海面下到达声线幅值变小,并且风速越大,海况越差,到达声线的幅值越小,有效到达路径数目越少,这也是由于随机起伏海面的散射损失造成的。

(3) 由于海面散射,信道呈现明显的稀疏特性,因此增加稀疏性约束条件的 l_0 -LMS算法和基于压缩感知的MP算法和OMP算法性能远远优于LS、LMS算法。当风速较小,或者风速较大且信噪比较低时, l_0 -LMS算法的性能更好;当风速较大且信噪比较高时,MP算法和OMP算法的性能更好。

参 考 文 献

- [1] 惠俊英, 生雪莉. 水下声信道 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [2] 周士弘, 田玲爱. 粗糙海洋界面散射对低频声传播的影响分析 [C]. 全国声学学术会议, 2008.
- [3] 王晋晋. 基于声传播模型的信道模拟与应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [4] Li W, Preisig J C. Estimation of rapidly time-varying sparse channels[J]. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 2007, 32(4): 927-939.
- [5] Berger C R, Wang Z H, Huang J Z, et al. Application of compressive sensing to sparse channel estimation[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(11): 164-174.
- [6] Guo S, He Z, Jiang W, et al. Channel estimation based on compressed sensing in high-speed underwater acoustic communication[C]// *Communications and Signal Processing, IEEE*, 2014: 1-5.
- [7] 郭立新. 随机粗糙面散射的基本理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [8] 孟昭然, 孙辉. 随机起伏界面声散射的实验与理论研究 [J]. *声学技术*, 2014, 33(4): 299-303.
Meng Zhaoran, Sun Hui. Experimental and theoretical study on acoustic scattering at random fluctuations[J]. *Acoustics Technology*, 2014, 33(4): 299-303.
- [9] 王永棒, 尹爽, 陈文剑, 等. 基于PM谱的随机起伏界面声散射特性研究 [C]// 2017中国西部声学学术交流会议论文集, 2017.
- [10] Pierson W J Jr, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1964, 69(24): 5181-5190.
- [11] Thorsos E I, Jackson D R. The validity of the perturbation approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1988, 83(S1): 20.
- [12] Ainslie M A. 声呐性能建模原理 [M]. 张静远, 颜冰, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [13] Rodriguez O C. General description of the BELLHOP ray tracing program[EB/OL]. [2008-06-13]. <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/GeneralDescription.pdf>.
- [14] 王英志, 章新华. 浅海水声信道冲激响应空变特性研究 [J]. *应用声学*, 2009, 28(2): 107-110.
Wang Yingzhi, Zhang Xinhua. Research on space-time characteristics of shallow seawater acoustic channel impulse response[J]. *J. Appl. Acoust.*, 2009, 28(2): 107-110.
- [15] 张刚强, 童峰. 基于LMS/SOLMS算法的时变多径水声信道估计方法 [J]. *应用声学*, 2008, 27(3): 212-216.
Zhang Gangqiang, Tong Feng. Time-variable multipath underwater acoustic channel estimation method based on LMS/SOLMS algorithm[J]. *J. Appl. Acoust.*, 2008, 27(3): 212-216.
- [16] Gu Y, Jin J, Mei S. l_0 norm constraint LMS algorithm for sparse system identification[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(9): 774-777.
- [17] 尹艳玲, 乔钢, 刘淞佐. 基于虚拟时间反转镜的水声OFDM信道均衡 [J]. *通信学报*, 2015, 36(1): 2015011.
Yin Yanling, Qiao Gang, Liu Songzuo. Underwater acoustic OFDM channel equalization based on virtual time reversal mirror[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(1): 2015011.
- [18] 吴少娟. 基于压缩感知的水声信道估计技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.