

庆祝马远良先生 85 华诞

## 分数阶反卷积的高分辨力目标亮点提取\*

王 成<sup>1,2,3</sup> 朱广平<sup>1,2,3†</sup> 殷敬伟<sup>1,2,3</sup> 唐胜雨<sup>1,2,3</sup>

(1 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室 哈尔滨 150001)

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

(3 哈尔滨工程大学 水声工程学院 哈尔滨 150001)

2022 年 6 月 6 日收到

2022 年 10 月 27 日定稿

**摘要** 提出了一种采用分数阶反卷积的目标亮点提取方法对目标亮点进行高分辨力提取。该方法依据分数阶域卷积公式, 引入反卷积理论去除窗函数的影响, 实现了时频域去模糊, 提升了时频分辨率。仿真和实验数据表明, 基于反卷积的短时分数阶傅里叶变换对线性调频信号的频域分辨率高于分数阶傅里叶变换, 可提高时频域上检测线性调频信号的性能。从而实现时频域上目标亮点的高分辨力提取, 提升目标亮点间时延差的估计精度。与传统方法相比基于分数阶反卷积的目标亮点提取方法具有更高的分辨力, 且对混响有一定的抑制作用。

**关键词** 目标亮点, 时频分辨率, 短时分数阶傅里叶变换, 反卷积

**PACS 数** 43.30, 43.60

DOI:10.15949/j.cnki.0371-0025.2023.04.005

### Target highlight extraction method based on fractional deconvolution

WANG Cheng<sup>1,2,3</sup> ZHU Guangping<sup>1,2,3†</sup> YIN Jingwei<sup>1,2,3</sup> TANG Shengyu<sup>1,2,3</sup>

(1 National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University Harbin 150001)

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

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

Received Jun. 6, 2022

Revised Oct. 27, 2022

**Abstract** A high resolution target highlight extraction method using fractional deconvolution is proposed to extract target highlights. Based on the fractional order domain convolution formula, deconvolution theory is introduced to remove the influence of window functions in this method. The time-frequency domain deblurring is realized, and the time-frequency resolution is improved. Simulation and experimental data show that the frequency domain resolution of the short time fractional Fourier transform based on deconvolution is higher than that of the fractional Fourier transform for linear frequency modulated signals. It can improve the performance of detecting linear frequency modulated signals in the time and frequency domain, thereby achieving high resolution extraction of target highlights in the time-frequency domain and improving the estimation accuracy of time delay differences between target highlights. Compared with traditional methods, the target highlight extraction method based on fractional deconvolution has higher resolution and certain inhibition effect on reverberation.

**Keywords** Target highlight, Time-frequency resolution, Short-time fractional Fourier transform, Deconvolution

### 引言

有源声呐目标的特征提取是有源声呐探测中的

关键技术, 通过获取水下目标亮点特征来探测目标是目前应用的主要技术手段之一。根据亮点模型理论, 由于目标回波包含目标特征, 因此可以通过分析回波信号的特征来检测水下目标<sup>[1]</sup>, 且采用线性调频

\* 中央高校基本科研业务费专项资金 (XK205002102803) 资助

† 通讯作者: 朱广平, [guangpingzhu@hrbeu.edu.cn](mailto:guangpingzhu@hrbeu.edu.cn)

信号时效果最佳。对于线性调频信号这样的非平稳信号而言, 单从时域或者频域上分析不能很好地获取目标回波特征, 所以时频分析方法成为了提取目标回波亮点最常用、最有效的方法之一。

时频分析方法有很多种, 应用较为广泛的有 Wigner-Ville 变换、分数阶傅里叶变换 (FRFT)、短时傅里叶变换 (STFT) 等, 这些方法都可以有效地对目标回波进行特征提取。Wigner-Ville 变换是分析水下目标回波信号最常使用的时频分析方法之一<sup>[2]</sup>, 它具有很好的时频聚集特性。Barbarossa 等提出了基于 Wigner-Ville 变换的 WHT 检测方法<sup>[3]</sup>, 葛凤翔等将其引入到水声宽带信号的检测中<sup>[4]</sup>。然而 Wigner-Ville 变换是双线性变换, 当其用于包含多个亮点的回波信号时会出现严重的交叉项干扰。FRFT 是傅里叶变换的推广, 可以将 FRFT 看作是线性调频基分解, 因此很适合处理线性调频信号。邓兵等依据信号的分数阶特性, 提出了一种在分数阶变换域滤波从而提升信混比的目标检测方法<sup>[5]</sup>。李秀坤等研究了目标几何亮点回波在分数阶域中随入射角度变化的表达式, 提取了目标几何亮点<sup>[6]</sup>。然而 FRFT 在本质上仍是一种全局变换, 无法体现出信号随时间的变化趋势。在 FRFT 的基础上引入窗函数的短时分数阶傅里叶变换 (STFRFT) 可以解决这个问题, 但也会由于窗函数使得时频分辨率下降。针对窗函数带来的时频域模糊的问题, 刘建设等<sup>[7]</sup>提出了一种 STFT 去模糊提取水中目标回波亮点的方法, 去除了窗函数对 STFT 的影响。然而该方法用于处理宽带信号时, 其时频分辨率仍会受限于信号的调频率。

因此为了更好地提取目标回波亮点, 本文从时频分辨率入手, 以短时傅里叶变换为对比基准, 证明了短时分数阶傅里叶变换对于线性调频信号具有较高的频域分辨能力。并推导了信号与窗函数在分数阶傅里叶变换域上的卷积公式, 采用反卷积算法去除了窗函数对短时分数阶傅里叶变换频域分辨率的影响, 为水下目标回波亮点提取提供了一种高分辨率的方法, 提升了目标亮点间时延差的估计精度。

## 1 目标回波亮点特征提取方法

### 1.1 目标回波亮点模型

有源声呐接收的目标散射回波信号可等价于由亮点分量组成<sup>[8]</sup>。根据目标散射的相关理论, 归纳出的单个亮点的传递函数<sup>[9]</sup>为

$$H(s, \omega) = A(s, \omega) e^{i(\omega\tau + \varphi)}, \quad (1)$$

式中,  $\tau = 2\xi/c$  代表时延;  $\xi$  表示声程, 由等效亮点和

参考点以及方位角决定;  $c$  表示声速;  $A(s, \omega)$  为幅度因子;  $s$  表示距离;  $\omega$  表示角频率;  $\varphi$  是相位跳变。

根据线性叠加原理, 可以得到总的回波传递函数为

$$H(s, \omega) = \sum_{n=1}^N A_n(s, \omega) e^{i(\omega\tau_n + \varphi_n)}. \quad (2)$$

根据传递函数将目标回波信号写为

$$p(t) = \sum_{n=1}^N a_n e^{i\varphi_n} s(t - \tau_n), \quad (3)$$

其中,  $s(t)$  为发射信号,  $\tau_n$  是第  $n$  个亮点相对于参考时间点的时延。其反映了目标的尺度信息。 $a_n$  是第  $n$  个亮点的幅度, 反映了目标散射点的强度信息,  $\varphi_n$  是相位跳变信息。在实际测量过程中相位跳变信息  $\varphi_n$  不易测量, 而对  $\tau_n$  和  $a_n$  的测量相对容易且稳定, 通常采用  $\tau_n$  和  $a_n$  作为识别目标的特征参数<sup>[10]</sup>。对各个亮点的特征参数检测的越准确, 对目标的识别越有利, 因此对目标回波的检测与参数估计是目标识别的关键技术。

线性调频信号的能量在时频域上的分布是一条直线。依据文献 [11] 得到直线间的距离与亮点间时延成正比, 其中直线间的距离可通过 Hough 变换等方法获得。因此提升线性调频信号在时频域上的分辨率, 即可提升亮点间时延差得估计精度。

### 1.2 短时傅里叶变换与短时分数阶傅里叶变换

短时傅里叶变换是信号在做傅里叶变换之前乘一个窗函数, 并假设信号在窗函数内是平稳的, 该窗函数在时间轴上遍历整个信号, STFT 的函数表示为

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [s(\tau) g^*(\tau - t)] e^{-i2\pi f\tau} d\tau, \quad (4)$$

其中,  $s(t)$  是信号,  $g^*(t)$  是窗函数  $g(t)$  的共轭, 不失一般性可取  $g(t)$  为实数, 所以有  $g^*(t) = g(t)$ 。

分数阶傅里叶变换作为傅里叶变换的推广, 其定义式为<sup>[12]</sup>

$$\text{FRFT}_a(u) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) K_a(t, u) dt, \quad (5)$$

式中,  $a$  为变换角度,  $K_a(t, u)$  为变换核,  $u$  为分数阶傅里叶变换的参数,

$$K_a(t, u) = \begin{cases} A_a e^{i\pi(t^2 \cot a + u^2 \cot a - 2ut \csc a)}, & a \neq n\pi, \\ \delta(t-u), & a = 2n\pi, \\ \delta(t+u), & a = 2n\pi \pm \pi, \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $A_a = \sqrt{1 - i \cot a}$ 。

FRFT 是传统傅里叶变换的广义形式, 可以理解为线性调频基分解。当选择适当的变换角度时, 线

性调频信号在分数阶傅里叶域上将表现为一个冲激函数, 可以获得很高的能量聚集<sup>[13]</sup>。然而 FRFT 仍然是一种全局性变换, 并不能反映信号分数阶傅里叶谱随时间的变化情况。

短时分数阶傅里叶变换是一种既能利用 FRFT 的特点, 又能在一定程度上弥补其缺点的一种方法, 其定义式<sup>[14]</sup>为

$$\text{STFRFT}_\alpha(t, u) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) g(\tau - t) K_\alpha(\tau, u) d\tau. \quad (7)$$

从文献 [15] 中的结论可知, 对于 STFRFT 的窗函数采用高斯型窗时可以获得最佳的时频分析效果, 因此本文的窗函数均采用高斯窗。

### 1.3 对线性调频信号的分辨能力

设线性调频信号  $s(t) = \exp(i2\pi(f_0 + \mu t^2/2))$ ,  $g(t) = \exp(-t^2/2\sigma^2)$  是高斯窗函数, 其中  $\sigma$  是高斯窗的标准差, 因此得到信号的 STFT 表达式为

$$\text{STFT}(t, f) = \sqrt{\frac{2\pi}{1/\sigma^2 - i2\pi\mu}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{(i2\pi(f_0 - f) + t/\sigma^2)^2}{2/\sigma^2 - i4\pi\mu}\right), \quad (8)$$

信号的 STFRFT 表达式为

$$\text{STFRFT}_\alpha(t, u) = A_\alpha \sqrt{\frac{2\pi}{1/\sigma^2}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} + i\pi f^2 \sin\alpha \cos\alpha\right) \exp\left(\frac{(i2\pi(f_0 - f) + t/\sigma^2)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (9)$$

分别对式 (8) 和式 (9) 求模值的平方得到相应的能量谱为

$$|\text{STFT}(t, f)|^2 = \frac{2\pi}{\sqrt{1/\sigma^4 + 4\pi^2\mu^2}} \exp\left(-\frac{t^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{t^2/\sigma^6 + 4\pi^2\mu^2t^2/\sigma^2}{1/\sigma^4 + 4\pi^2\mu^2}\right) \exp\left(\frac{-\left(\frac{2\sqrt{2}\pi}{\sigma}(f_0 - f) + \frac{2\sqrt{2}\pi\mu t}{\sigma}\right)^2}{2(1/\sigma^4 + 4\pi^2\mu^2)}\right), \quad (10)$$

$$|\text{STFRFT}_\alpha(t, f)|^2 = \frac{2\pi(1 + \cot^2\alpha)}{\sqrt{1/\sigma^4}} \exp(-4\pi^2\sigma^2(f_0 - f)^2). \quad (11)$$

式 (10) 和式 (11) 都是高斯型函数, 即在任意时刻  $t$ , 信号的 STFT 和 STFRFT 在频域的能量均满足高斯分布, 高斯分布的方差越小, 能量在频域上越窄, 频域分辨力越高。为简化表达式且不失一般性, 可令  $f_0 = 0$ , 可得两式的指数项  $G_1$  与  $G_2$  分别为

$$G_1 = \exp\left(-\frac{(f - \mu t)^2}{2\left(\frac{1 + 4\pi^2\sigma^4\mu^2}{8\pi^2\sigma^2}\right)}\right), \quad (12)$$

$$G_2 = \exp\left(-\frac{f^2}{2\left(\frac{1}{8\pi^2\sigma^2}\right)}\right). \quad (13)$$

观察两个高斯型函数的方差, 有

$$\frac{1}{8\pi^2\sigma^2} \leqslant \frac{1 + 4\pi^2\sigma^4\mu^2}{8\pi^2\sigma^2},$$

并在  $\mu = 0$  时取等号。这也意味着在相同窗函数的情况下, STFRFT 的频域分辨力不低于 STFRFT, 且信号的调频率  $\mu$  越大, STFT 的频域分辨力越差, 而 STFRFT 的频域分辨力不受调频率的影响。

### 1.4 分数阶域卷积公式

由 1.3 节的结论可知, 虽然 STFRFT 的时频分辨力不低于 STFT, 且不同于 STFT 的是 STFRFT 的分辨力不受信号调频率的影响, 但是 STFRFT 的分辨力仍然会受到窗函数的制约。无论是 STFT 还是 STFRFT, 在每个窗长内的时频变换结果, 本质上都是对信号  $s(t)$  与窗函数  $g(t)$  的乘积  $h(t)$  的变换结果。对于传统的傅里叶变换而言, 两个函数相乘后的傅里叶变换的运算特性是相当明确的, 即时域的乘积对应于傅里叶变换域的卷积, 可以表示为

$$H(\omega) = \frac{1}{2\pi} S(\omega) * G(\omega), \quad (14)$$

式中,  $H(\omega)$ ,  $S(\omega)$ ,  $G(\omega)$  分别对应  $h(t)$ ,  $s(t)$ ,  $g(t)$  的傅里叶变换, “\*”为卷积符号。

接下来进行时域的乘积在分数阶傅里叶域上的形式的推导。首先为了计算方便, 经过变量代换后, 将 FRFT 的变换核变为<sup>[16]</sup>

$$K_\alpha(t, u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1 - i\cot\alpha}{2\pi}} e^{i\frac{t^2 + u^2}{2} \cot\alpha - itu \csc\alpha}, & \alpha \neq n\pi, \\ \delta(t - u), & \alpha = 2n\pi, \\ \delta(t + u), & \alpha = 2n\pi \pm \pi. \end{cases} \quad (15)$$

设  $a(\alpha) = \cot\alpha/2$ ,  $b(\alpha) = \sec\alpha$ ,  $c(\alpha) = \sqrt{1 - \cot\alpha}$ ,  $Y_\alpha(u) = [S_\alpha(u)\exp(-iau^2)] * [G_\alpha(u)\exp(-iau^2)]$ , 其中  $S_\alpha(u)$  和  $G_\alpha(u)$  分别是信号  $s(t)$  和窗函数  $g(t)$  的变换角度为  $\alpha$  的 FRFT。根据卷积定义式对  $Y_\alpha(u)$  展开, 并进行变量代换, 令  $v = u - x$ , 可得

$$\text{FRFT}_\alpha[s(t)g(t)] = \text{FRFT}_\alpha \left[ s(t)g(t)\exp\left(-i\frac{\cot\alpha}{2}t^2\right)\exp\left(i\frac{\cot\alpha}{2}t^2\right) \right] = \\ \frac{\sqrt{1 + \cot\alpha}\exp\left(i\frac{\cot\alpha}{2}u^2\right)}{\sqrt{2\pi}} \left[ \text{FRFT}_\alpha[s(t)]\exp\left(-i\frac{\cot\alpha}{2}u^2\right) \right] * \left[ \text{FRFT}_\alpha[g(t)\exp\left(-i\frac{\cot\alpha}{2}t^2\right)]\exp\left(-i\frac{\cot\alpha}{2}u^2\right) \right]. \quad (17)$$

从式(17)中可以看出, 在一个短时窗内的 FRFT 谱可转换成信号与窗函数经复数项  $\exp(\pm i(\cot\alpha/2)t^2)$  与  $\exp(-i(\cot\alpha/2)t^2)$  调制后的卷积形式。因此可应用相关的反卷积理论, 即可将结果中的窗函数项与信号项完全分离, 从而去除窗函数的影响, 实现 FRFT 域去模糊。

## 1.5 基于反卷积的短时分数阶傅里叶变换

针对式(17)中明显的卷积形式, 本文引入 Richardson-Lucy (R-L) 反卷积算法<sup>[17]</sup> 进行分数阶傅里叶变换域去模糊。R-L 算法是在贝叶斯理论中应用最大似然原理推导得出的, 通过对给定点扩散函数的退化图像进行反卷积迭代计算, 最终得到接近理想清晰图像的最大似然估计值。选择 R-L 反卷积算法的原因是由于 R-L 反卷积算法是时域反卷积, 不涉及变换域的运算, 在反卷积的过程中并不会重新引入窗函数带来的影响。基于 R-L 反卷积算法, 本文给出分数阶傅里叶域的反卷积迭代公式:

$$\text{RLFRFT}_{k+1} = \left[ H \oplus \frac{\text{FRFT}}{H * \text{RLFRFT}_k} \right] \text{RLFRFT}_k, \quad (18)$$

其中

$$\text{FRFT} = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{1 + \cot\alpha}\exp\left(i\frac{\cot\alpha}{2}u^2\right)} \text{FRFT}_\alpha[s(t)g(t)],$$

$$H = \text{FRFT}_\alpha \left[ g(t)\exp\left(-i\frac{\cot\alpha}{2}t^2\right) \right] \exp\left(-i\frac{\cot\alpha}{2}u^2\right),$$

$\oplus$  表示相关运算,  $k$  为迭代次数, 初值  $\text{RLFRFT}_0$  一般设置为 FRFT。迭代算法求出的  $\text{RLFRFT} = \text{FRFT}_\alpha[s(t)]\exp(-i(\cot\alpha/2)u^2)$ , 通常时频变换需要的幅度谱需要取模值, 因此复指数项  $\exp(-i(\cot\alpha/2)u^2)$  可以省略, 认为迭代出的 RLFRFT 就是信号经过基于反卷积的 FRFT 结果。对于 STFRFT, 在每个短时窗内计算完

$$Y_\alpha(u) = \frac{\sqrt{2\pi}}{c(-\alpha)\exp(iau^2)} \text{FRFT}_\alpha[s(z)g(z)\exp(iaz^2)], \quad (16)$$

其中,  $\text{FRFT}_\alpha(\cdot)$  表示角度为  $\alpha$  的 FRFT。经过上述推导, 信号  $s(t)$  与窗函数  $g(t)$  乘积的分数阶傅里叶变换可写为

分数阶傅里叶变换后都进行一次反卷积运算, 完成基于反卷积的短时分数阶傅里叶变换 (RLSTFRFT)。

## 2 仿真分析

### 2.1 反卷积算法对分辨率的影响

仿真信号是线性调频信号, 采样率为 1000 Hz, 频带为 100~300 Hz, 信号时长为 0.5 s, 窗函数长度为 500 个点, FRFT 最佳变换阶次为 1.124, 反卷积迭代次数为 200。

图 1 为信号在短时窗内的分数阶傅里叶域谱, 可以看出进行分数阶反卷积运算后, 信号在分数阶傅里叶域上的分辨率有了明显的增加。在图 1(b) 中画出了幅值下降 3 dB 的直线, 本文这里定义信号的  $-3$  dB 宽度为信号在分数阶域上的分辨率, 以未经过反卷积时的  $-3$  dB 宽度为基准, 当进行反卷积算法后,  $-3$  dB 宽度减小了 73%。因此可认为在本次仿真实验条件下, 相较于未经过解卷积的分数阶傅里叶变换, 信号的分辨率提升了约 73%。该仿真实验结果表明, 分数阶解卷积算法在 FRFT 基础上进一步提升线性调频信号的分辨率。

### 2.2 时频变换仿真实验结果分析

为了评估本文提出的 RLSTFRFT 方法在时频域上提取目标亮点的能力, 开展了以下仿真实验, 并采用一些已有的方法进行对比。采用的方法有 STFT、WVD、STFRFT 和 RLSTFT。首先建立了一个 AUV 模型, 模型是一端为半球状, 另一端为圆台状的柱体, 边界条件为刚性, 模型的形态如图 2 所示。仿真中, 各个亮点的幅值与时序通过理论计算获得。

仿真的发射信号是频带为 20~40 kHz 的线性调频信号, 采样率为 200 kHz, 脉宽为 5 ms, 声波对目标

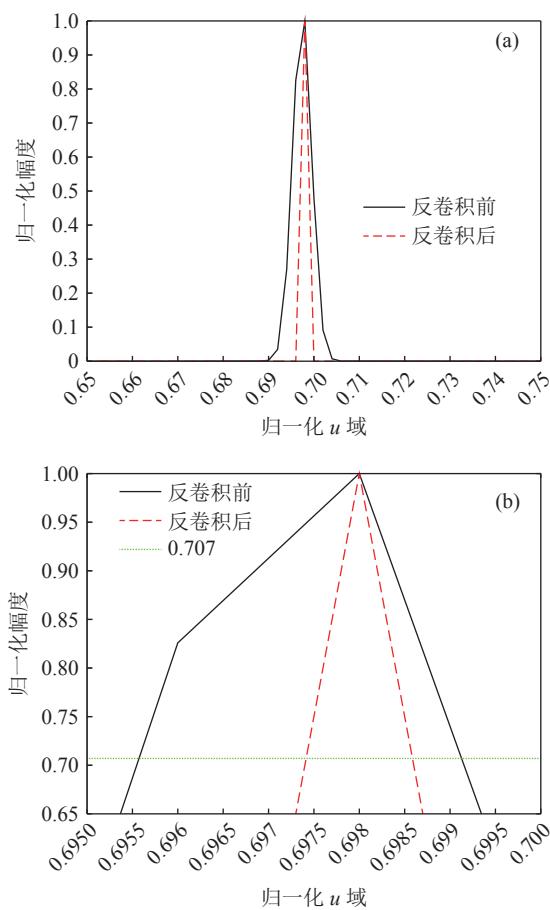


图1 短时窗内的分数阶傅里叶谱 (a) 整体图; (b) 细节图

的入射角度为 $60^\circ$ , 接收端与目标的距离为100 m。反卷积算法迭代次数为50次。对回波信号的仿真结果如图3所示。从图中可以看出, STFT在无干扰的情况下可以在时频域上将目标亮点提取出来, 但其时频分辨力是最低的, 如图3(a)所示。WVD在时频分辨力上有显著的提高, 但是存在干扰项, 如图3(b)所示。相较于STFT, STFRFT与RLSTFT的时频分辨力均有所提高, 这是因为STFRFT在STFT的基础上去除了信号调频率的影响, RLSTFT在STFT的基础上去除了窗函数带来的模糊, 如图3(c)与图3(d)所示。RLSTFRFT结合了STFRFT与RLSTFT各自的优点, 时频分辨力有着明显的提高, 且不存在交差项的干扰, 如图3(e)所示, 这与上文理论分析部分结论相符。

为了定量评估RLSTFRFT对亮点的提取能力, 本文引入3阶瑞利熵作为指标<sup>[18]</sup>。在时频分析领域, 时频能量分布越集中, 对应的熵值越小<sup>[19]</sup>。表1中列出了对于上述回波信号不同时频分析方法的3阶瑞利熵。可以看出RLSTFRFT的瑞利熵是最低的, 这表示RLSTFRFT在时频域提取目标亮点的能量最为集中, 性能最优, 这与从视觉上观测时频图的

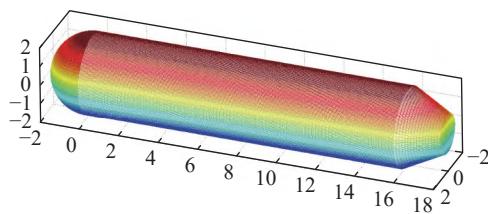


图2 AUV模型

表1 不同时频分析方法的瑞利熵比较

| 时频分析方法 | STFT  | WVD   | STFRFT | RLSTFT | RLSTFRFT |
|--------|-------|-------|--------|--------|----------|
| 瑞利熵    | 17.39 | 15.28 | 15.19  | 15.66  | 14.26    |

结果一致。

为了评估RLSTFRFT法在混响情况下提取目标亮点的性能, 向上述回波信号中加入由单元散射模型产生的不同信混比的混响, 从而得到接收信号。并对接收信号做时频分析, 以信混比5 dB时结果为例, 如图4所示。当信混比为5 dB时, STFT的效果受到了较大的影响, 仅能粗略观测到亮点的形状, 如图4(a)所示。WVD在混响情况下交叉项现象更加明显, 对亮点的观测效果较差, 如图4(b)所示。STFRFT可以观测到所有的目标亮点, 但是时频分辨力有限, 如图4(c)所示。RLSTFRFT也可以观测到亮点的存在, 但亮点的时频谱受到了较大的干扰, 如图4(d)所示。RLSTFRFT保持着较高的时频分辨力, 可以清晰地观测到目标回波亮点, 并且周围的混响得到的一定程度的抑制, 性能最佳, 如图4(e)所示。

为定量评估RLSTFRFT在混响背景下提取目标亮点的性能, 考察时频分析结果的瑞利熵随着信混比的变化情况。如图5所示, 随着信混比的增加, 时频能量聚集性通常呈现增加的趋势, 而在仿真实验的所有信混比下RLSTFRFT的时频分辨力都是最好的。上述结果表明, 与其他时频分析方法相比, RLSTFRFT在混响背景下提取目标亮点的性能最优。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验概述

目标回波亮点提取实验于松花江上进行, 江面被厚度为50 cm的冰层覆盖。松花江水深约为6 m, 发射换能器和接收阵入水深度为1 m左右, 实验环境和设备布放图如图6所示。目标模型由一个钢制外壳的空心球体构成, 其直径为0.1 m, 代表一个亮点, 将目标模型悬挂在冰盖下1 m处, 声呐与目标的几何中心距离约为20 m。发射信号采用线性调频信

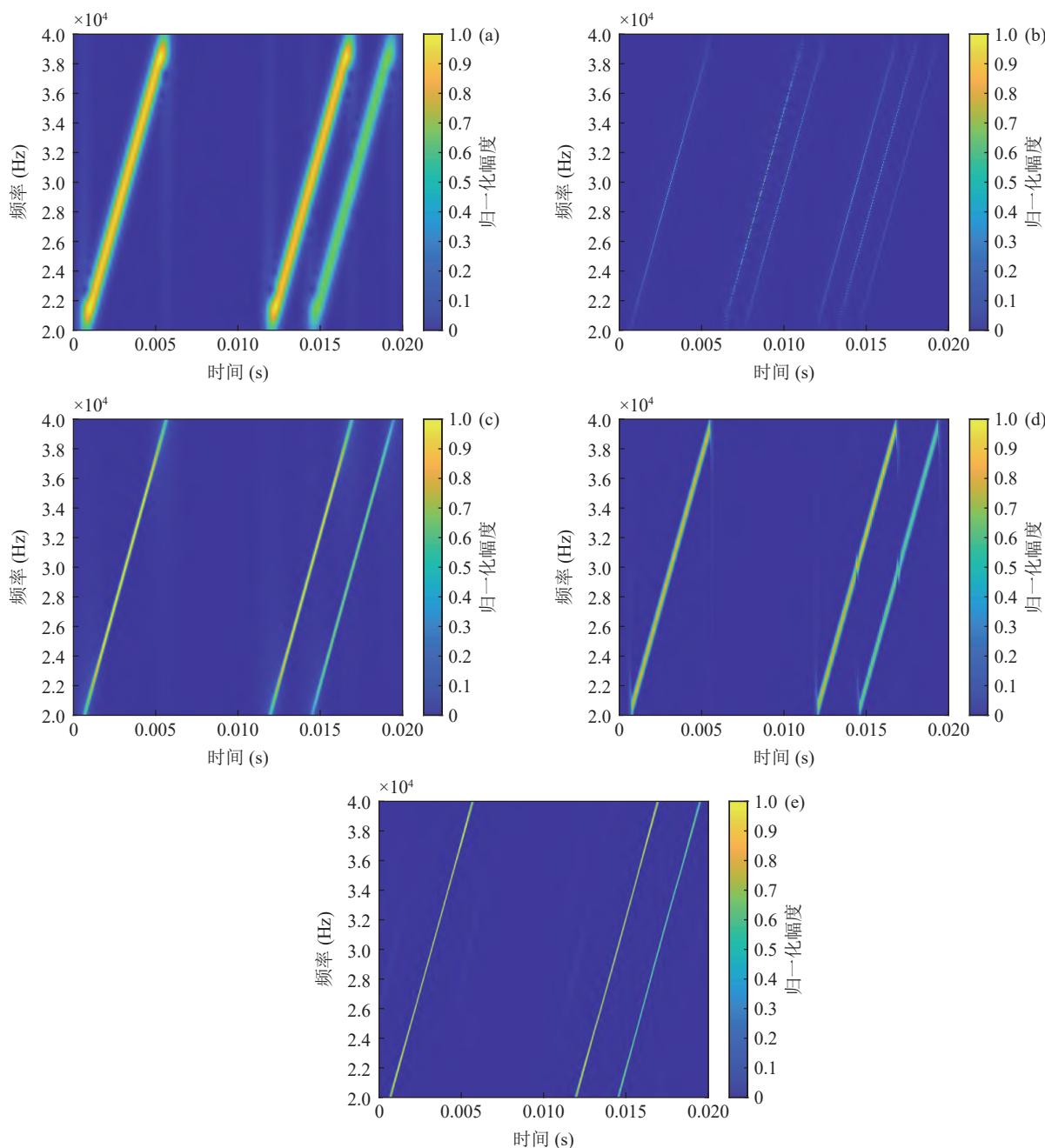


图 3 回波信号时频分析结果 (a) STFT; (b) WVD; (c) STFRFT; (d) RLSTFT; (e) RLSTFRFT

号, 信号的频带为 35~40 kHz, 脉冲周期为 20 ms, 填充宽度为 0.5 ms, 利用采集器采集回波信号, 采样频率为 1 MHz。

### 3.2 实验结果分析

根据声程截取目标亮点回波数据, 回波数据的时域图如图 7 所示。

对接收到的回波数据进行时频变换结果如图 8 所示。其中需要设置反卷积次数的时频分析方法, 反卷积次数均选择 50 次。从图中可以看出, STFT 可以检测到亮点存在, 然而时频分辨力较差, 如

图 8(a) 所示。WVD 中存在相当多的干扰, 难以有效地检测到亮点, 效果并不理想, 如图 8(b) 所示。STFRFT 也可以检测到亮点, 然而由于实验信号的调频率相对于中心频率较小, 受此限制, STFRFT 的时频分辨力仅仅略好于 STFT, 如图 8(c) 所示。RLSTFT 的时频分辨力相较于 STFT 有所提升, 但是与图 4(d) 中的现象相似的是, 亮点的时频谱被干扰, 出现了较为严重的间断现象, 如图 8(d) 所示。RLSTFRFT 在 STFRFT 的基础上去除了窗函数对时频分辨力的限制, 在众多时频分析方法中表现最好, 且在一定程度上抑制了背景干扰。然而观察实验结果图, 可以发

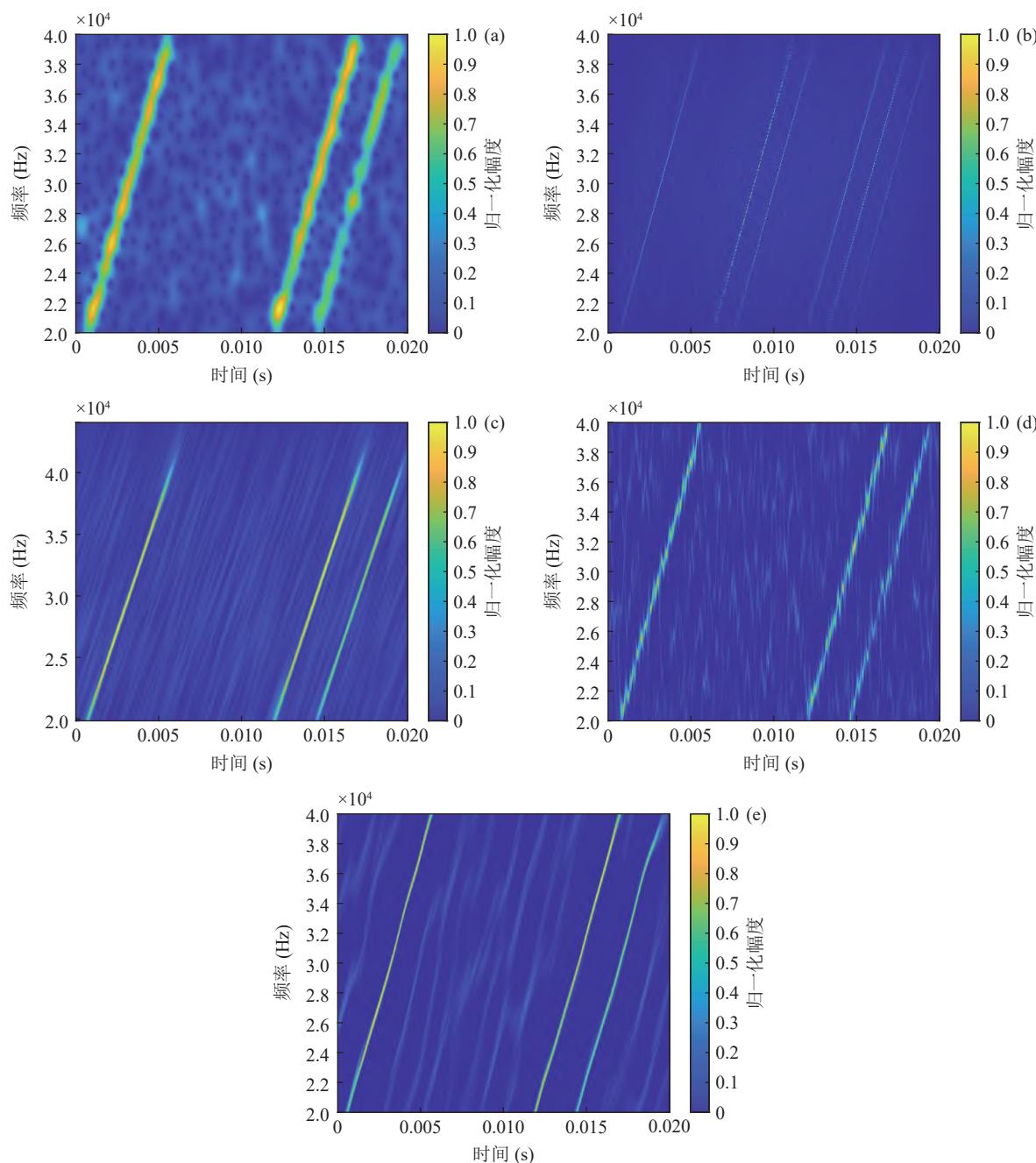


图4 信混比为5 dB时的时频分析结果 (a) STFT; (b) WVD; (c) STFRFRT; (d) RLSTFT; (e) RLSTFRFRT

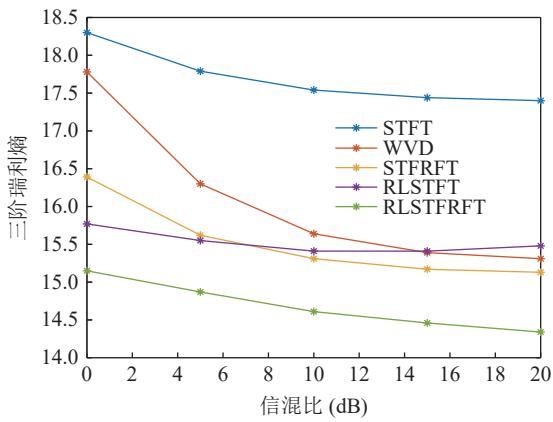


图5 瑞利熵随信混比的变化曲线

现 RLSTFRFRT 中也出现了一定程度的间断, 这是由于 R-L 反卷积算法带来的“振铃现象”<sup>[20]</sup>。对于 RLSTFRFRT 方法, 由于混响等干扰的存在, 使得分数阶傅里叶变换的最佳变换角度的确定会存在偏差, 变换角度与式(18)中的卷积核  $H$  直接相关, 卷积核的不准确也会放大“振铃现象”<sup>[21]</sup>。但是从图中观察到, 即使受到“振铃现象”的影响, RLSTFRFRT 仍可以较好地检测到目标亮点, 保持着良好的性能。

图8中时频分析结果的瑞利熵如表2所示, 可以看出, RLSTFRFRT 的瑞利熵最低。综上所述, 无论是从时频谱图直观观察, 还是从瑞利熵量化分析, 都

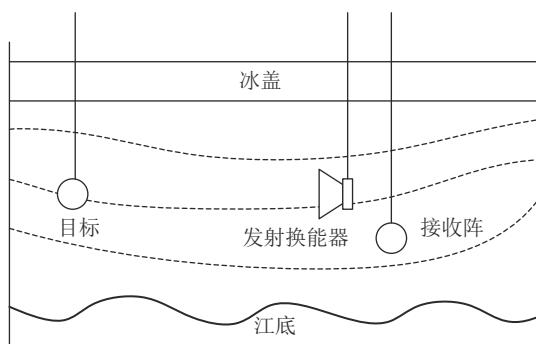


图 6 实验环境及仪器布放图

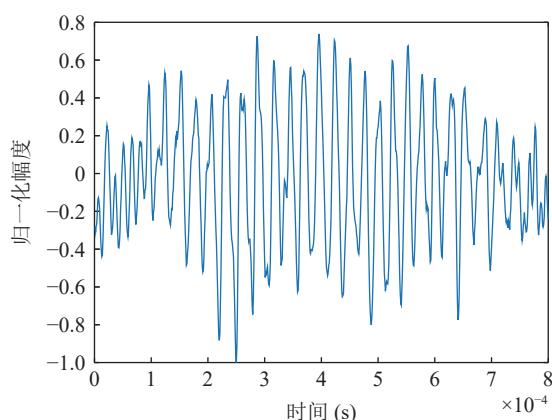


图 7 回波数据时域图

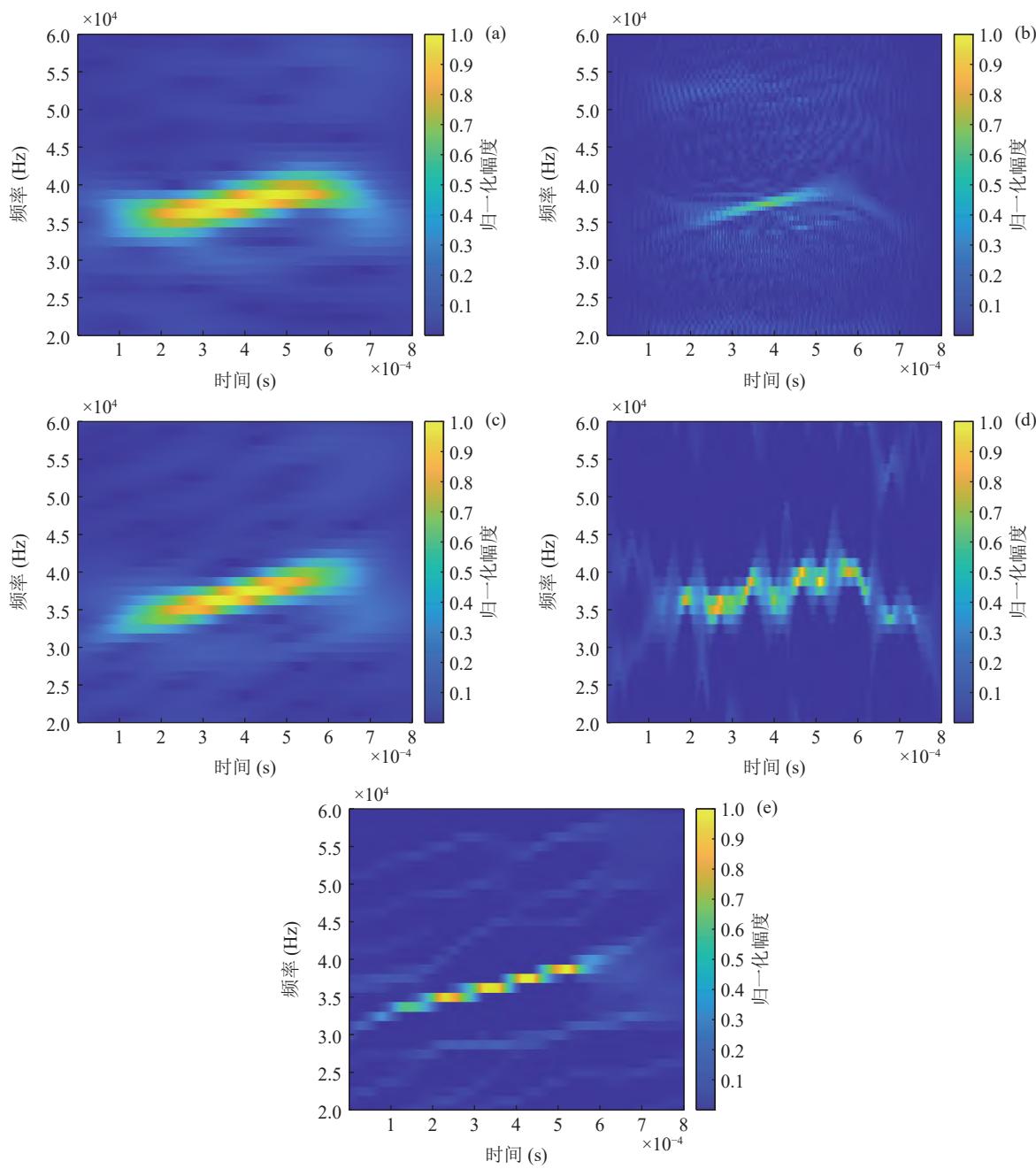


图 8 目标回波亮点实验数据处理结果 (a) STFT; (b) WVD; (c) STFRFT; (d) RLSTFT; (e) RLSTFRFT

表 2 实验中不同时频分析方法的瑞利熵比较

| 时频分析方法 | STFT  | WVD   | STFRFT | RLSTFT | RLSTFRFT |
|--------|-------|-------|--------|--------|----------|
| 瑞利熵    | 11.66 | 11.48 | 11.42  | 10.47  | 9.36     |

可以表明 RLSTFRFT 相较于其他的时频分析方法具有更好的时频分辨力、最高的能量聚集性, 提取目标回波亮点的性能最优。

## 4 结论

当使用有源声呐在时频域上进行目标亮点提取时, 传统方法的分辨力由于窗函数的限制而降低, 存在亮点间的时延差估计精度低的问题。本文提出了一种基于分数阶反卷积的高分辨力目标亮点提取方法, 该方法通过反卷积算法去除了窗函数对短时分数阶傅里叶变换频域分辨率的限制, 进一步提高了其对线性调频信号的频域分辨率。仿真及实验数据研究结果表明, 基于反卷积的短时分数阶傅里叶变换对线性调频信号有着很好的时频分辨率, 并且对混响背景有着一定的抑制作用, 能够有效地提取目标回波亮点, 提高有源声呐对目标回波的识别性能。然而, 该方法仍存在一些不足, 例如受反卷积算法本身的限制, 本文方法的计算量要高于常规方法, 且方法在低信噪比情况下的效果会受到一定的限制; 同时并未考虑声传播、声散射以及信号频率对亮点带来的影响。要改善上述问题, 一方面需要从反卷积算法入手提升反卷积的计算速率与鲁棒性, 另一方面也需要对声学特性对目标亮点的影响以及高频亮点与低频亮点特性差异进行研究, 提升方法实用性。

## 参 考 文 献

- 陈云飞, 李桂娟, 王振山, 等. 水中目标回波亮点统计特征研究. *物理学报*, 2013; **62**(8): 084302
- Trucco A. Detection of objects buried in the seafloor by a pattern-recognition approach. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2001; **26**(4): 769—782
- Barbarossa S, Zanalda A. A combined Wigner-Ville and Hough transform for cross-terms suppression and optimal detection and parameter estimation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, San Francisco, CA, USA, 1992: 173—176
- 葛凤翔, 蔡平, 惠俊英, 等. 混响背景中目标回波检测和参数估计的一种新方法. *电子学报*, 2001; **29**(3): 304—306
- 邓兵, 陶然, 齐林, 等. 基于分数阶傅里叶变换的混响抑制方法研究. *兵工学报*, 2005; **26**(6): 761—765
- 李秀坤, 孟祥夏, 夏峙. 水下目标几何声散射回波在分数阶傅里叶变换域中的特性. *物理学报*, 2015; **64**(6): 064302
- 刘建设, 朱广平, 刘冰, 等. 时频域去模糊提取目标回波亮点. *哈尔滨工程大学学报*, 2020; **41**(9): 1340—1345
- 朱兆彤, 彭石宝, 许稼, 等. 水下目标亮点拓扑特征提取及自动识别方法. *声学学报*, 2018; **43**(2): 154—162
- 范军, 朱蓓丽, 汤渭霖. 非刚性表面声呐目标回波的修正几何亮点模型. *声学学报*, 2001; **26**(6): 545—550
- 朱广平, 宋泽林, 殷敬伟, 等. 混响背景下低秩矩阵恢复的目标亮点特征提取. *声学学报*, 2019; **44**(4): 471—479
- 朱广平, 王飞, 孙辉. 时频域滤波沉底目标亮点特征提取方法研究. *哈尔滨工程大学学报*, 2015; **36**(5): 616—622
- 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998: 87
- 陈文剑, 孙辉, 朱建军, 等. 基于分数阶傅里叶变换混响抑制的目标回波检测方法. *声学学报*, 2009; **34**(5): 408—415
- 庞存锁, 刘磊, 单涛. 基于短时分数阶傅里叶变换的时频分析方法. *电子学报*, 2014; **42**(2): 347—352
- Tao R, Li Y L, Wang Y. Short-time fractional Fourier transform and its applications. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2010; **58**(5): 2568—2580
- 陶然, 齐林, 王越. 分数阶Fourier变换的原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004: 35—37
- Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972; **62**(1): 55—59
- Stanković L. A measure of some time-frequency distributions concentration. *Signal Process.*, 2001; **81**(3): 621—631
- Shannon C E. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.*, 1948; **27**(3): 379—423
- Levin A, Fergus R, Durand F, et al. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. *ACM Trans. Graphics*, 2007; **26**(3): 70
- Yuan L, Sun J, Quan L, et al. Progressive inter-scale and intra-scale non-blind image deconvolution. *ACM Trans. Graphics*, 2008; **27**(3): 1—10