

啁啾信号在水下违规抛泥监测系统中的应用

钟张婷¹, 袁飞¹, 汪佳乐², 程恩¹

(1. 水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室(厦门大学), 厦门 361005; 2. 厦门港口管理局安全监督与科技信息化处, 厦门 361005)

摘要:为找到一种高效便捷的方法判断疏浚船舶是否存在违规抛泥行为,研究了基于啁啾信号探测抛泥行为的方法。设计了 3 种实现方案:分段 FFT(Fast Fourier Transformation)快速相关、FRFT(Fractional Fourier Transform)变换、去斜脉冲压缩。结合五缘湾实验及仿真结果验证了 3 种方案的可行性,同时发现:FRFT 变换抗多径和抗噪性能最佳,而去斜脉冲压缩算法效果最差。通过分析:当多径影响较为严重时,建议使用 FRFT 算法进行检测;当多径影响较小而对数据实时性处理要求较高的时,建议使用分段 FFT 快速相关算法进行检测。

关键词:线性调频信号;分段 FFT 快速相关;FRFT 变换;去斜脉冲压缩;抛沙检测

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)05-1005-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201705010

Application of Chirp Signal in Underwater Acoustic Supervision System for Illegal Throwing Sand Behavior Detection

Zhong Zhangting¹, Yuan Fei¹, Wang Jiale², Cheng En¹

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Security Management & Technological Innovation and Information Department, Xiamen Port Authority, Xiamen 361005, China)

Abstract: To find an efficient and convenient method to determine whether a dredging is illegal is a very meaningful research content. A method of detection of throwing sand behavior based on Chirp signal was studied and three implementation schemes (*subsection FFT fast correlation*), FRFT and DeChirp were designed. The feasibility of the three schemes was verified by Wu Yuan Bay experiment and the simulation results. *Anti-multipath and anti-noise performance of FRFT transform is the best. The performance of dechirp is the worst. Through the analysis, it comes out the conclusion: when the multipath effect is serious, FRFT algorithm for detection is recommended; When the multipath effect is small and the requirement of the data real-time processing is strict, subsection FFT fast correlation algorithms for detection is recommended.*

Keywords: chirp signal; subsection FFT fast correlation; FRFT transform; dechirp pulse compression processing method; detection of throwing sand

引言

我国内河水运资源丰富,内河航运运量大、成



收稿日期: 2015-03-23 修回日期: 2015-07-05;
基金项目: 国家自然科学基金(61471308,61571377);
作者简介: 钟张婷(1990-),女,畲族,福建龙岩,硕士生,研究方向为水下目标探测;袁飞(1979-),男,福建福州,博士,副教授,研究方向为水下多媒体传输与处理。

本低、污染小、能耗低、可持续发展等特点,是国家竞争力体现的一个方面。但是随着内河航运需求量的增加和利益的驱使,使得疏浚驳船违规倾倒泥沙现象常有发生。这种现象容易造成航道内泥沙急剧淤积,导致枯水季节阻航甚至断航的发生,影响航道畅通^[1]。同时,沉积物还易成为多环芳烃(PAHs)在水环境介质中蓄积库^[2],在很大程度上破坏了海

洋生态环境。

国内为有效监控疏浚驳船载运状态及违规抛泥行为,采取了一系列措施:如目前比较流行的是周波^[3]和张少强^[4]在论文中提到的:在疏浚船舶上安装 GPS 定位系统实时检测船舶位置及轨迹,这种方法在一定程度上能约束船主违规抛泥行为,但这种做法无法检测其是否有违规抛泥行为,只能检测其轨迹。由路锦正^[5]等人在论文中提出的利用超声波测距也受到关注。其主要优点是分辨力和准确度高,且超声波传感器的体积小,结构简单,信号处理可靠。但其在水中传输距离有限,如果存在泥沙,有可能被吸收而检测接收不到反射波。

国外违规抛泥现象比较少见,但是国外对疏浚废土的关注度很高。如利用声学多普勒流速剖面仪(简称 ADCP, Acoustic Doppler Current Profilers)走航^[6]的方法来观测待选倾倒地周边的泥沙浓度变化,以确定淤泥倾倒地后的扩散情况。但是 ADCP 在使用时间和空间上受到一定的限制,不适用于大范围且具随机性的疏浚驳船违规抛泥监测。Michael Z. Li^[7]等提到加拿大针对疏浚废土成立加拿大大西洋地质调查局(GSCA, Geological Survey of Canada Atlantic),并和环境局合作成立交叉学科研究,测量沉积物运输力和数量化模型预测。Andrew Morang^[8]等在论文中提到,美国陆军工程兵团(布法罗)已经实现区域沉积物管理(RSM, Regional Sediment Management)原则项目。这种机制主要是靠政府组织对疏浚抛沙进行统一管理,利用自然过程解决工程问题,有效节省开支。但由于我国流域众多,管理复杂,对疏浚弃土没有建立有效的解决机制,所以国外通过成立特别的机构对疏浚废土进行研究和管理的并不适合我国国情。找到一种高效便捷的方法判断疏浚船舶是否存在违规抛沙行为亟不可待。

为方便有效地解决上述问题,本文将通过在有抛泥与无抛泥 2 种信道下分别发送 Chirp 信号,利用分段 FFT(Fast Fourier Transformation)快速相关运算、FRFT(Fractional Fourier Transform)变换和去

斜压缩 3 种算法对接收信号进行处理,比较两种信道下,3 种处理算法得到的结果:FRFT 变换抗多径和抗噪性能最佳,但能量聚集效果不如相关运算,而去斜脉冲压缩算法效果最差,抗多径和抗噪性能最差。同时,基于运算复杂度的比较发现,分段 FFT 快速相关的运算复杂度最小,且能量聚集效果最佳。通过分析:当多径影响较为严重时,建议使用 FRFT 算法进行检测;当多径影响较小而对数据实时性处理要求较高的情况下,建议使用分段 FFT 快速相关算法进行检测。

1 系统框架

1.1 基本系统框架

抛泥系统框架如图 1,整个框架包括发射端、径直达到的主径信号、反射产生的多径信号、抛泥区以及接收端等部分。为简化模型,本文假设发送信号在信道传输过程中,只有主径 D_0 和多径 SS_1 和 BB_1 。在接收端对接收信号进行 3 种方法处理。

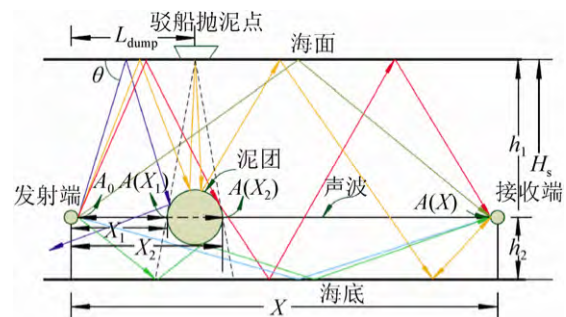


图 1 基本系统框架

Fig. 1 Framework of basic system

1.2 发送信号

发送信号选用 Chirp 信号,又称线性调频信号,是最早被研究的调频信号,被广泛应用于声纳和雷达中。由于克服了普通 CW 信号无法兼顾时宽和带宽的缺陷且具有很好的自相关性,逐渐被应用于水声通信中,常用于信道估计中的探测信号^[9]。Chirp 信号的表达式如下:

$$c(t) = \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2) \quad -T/2 < t < T/2 \quad (1)$$

瞬时频率为:

$$f(t) = f_0 + kt \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, Chirp 信号的频率随时间成线性变化, 其中: f_0 为中心频率; k 为调频率。如果 $k > 0$, 称为 Chirp 上扫频信号, 反之称为 Chirp 下扫频信号。本文采用周期性发射三段 Chirp 检测信号, 单段发送信号参数如表 1 所示。

表 1 单段信号参数
Tab. 1 Parameters of Single Segment Signal

采样频率	单段码元时间	低频/高频	带宽
100 K	0.02 s	20 kHz/30 kHz	10 K

根据表 1 的参数设定, 得到单周期内发送信号的时域图、时频图、单边幅度谱图和功率谱图如图 2。如图 2 所示, 发送端周期性发送三段 Chirp 的上调频信号, 从时域图(a)中可以清晰地看出信号的幅度为 1, 信号周期为 0.06 s; 时频图(b)中可以看出, 信号的频率随时间呈线性变化。

2 啁啾信号检测方法分析

Chirp 信号的检测方法主要有匹配相关、FRFT 变换及去斜压缩 3 种算法: (1) 相关法进行处理, 其与匹配处理相类似, 可以获得大的输出信噪比, 有效抑制噪声影响, 抗噪性能好。其缺点是需要在本地图存储模板信号与之匹配, 且运算量大。故本文介绍一个分段 FFT 快速相关法, 能够有效降低运算复杂度; (2) 分数阶傅里叶变换(FRFT)是近年来新兴的一种时频分析工具, 基于 FRFT 的 Chirp 信号的检测与参数估计在雷达, 水声通信等领域获得极大的关注和应用, 是目前检测 Chirp 信号的主流方法; (3) Chirp 信号的去斜脉冲思想最早应用于无线雷达信号处理中, 它是根据 Chirp 信号的时频分布特点, 利用本地 Chirp 信号与接收信号的混频, 实现对接收 Chirp 信号的频谱压缩。下面将依次介绍 3 种算法理论。

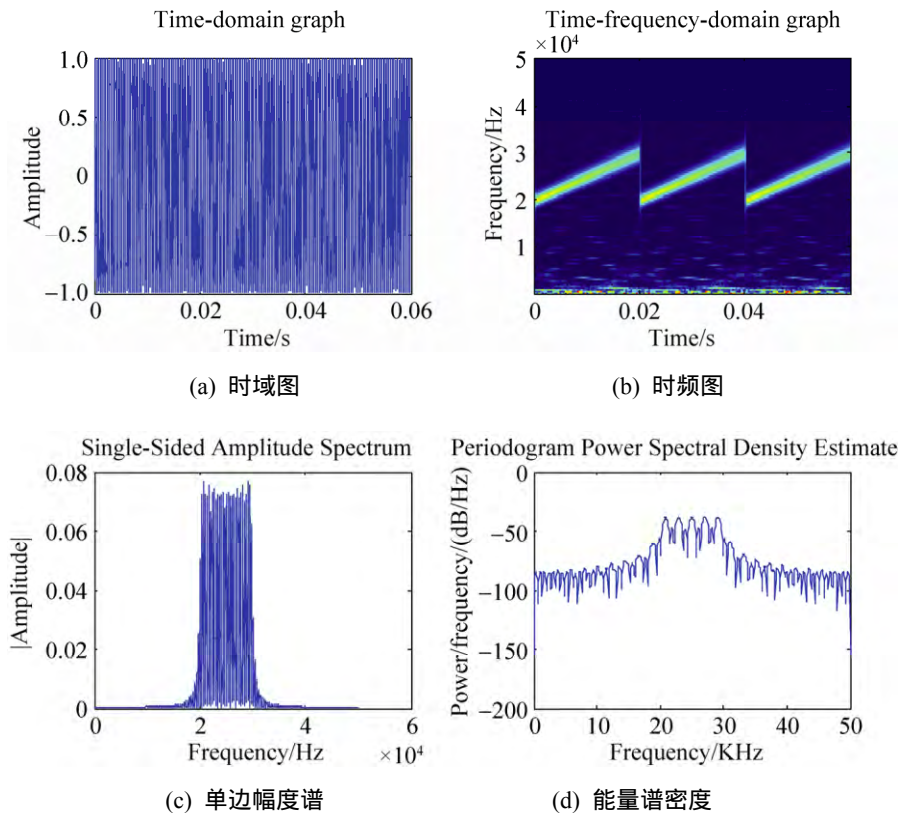


图 2 发送端发送信号的特征图

Fig. 2 The feature map of transmission signal.

2.1 匹配相关

FFT 运算时需要将短序列补零,如果两个序列长度相差很大,短序列补零过多,浪费存储空间且降低计算效率。处理较大数据时,实时性无法保证。故可以对长序列进行分段,提高计算效率^[10]。由重叠相加块的卷积算法^[11],可以类似地研究分段 FFT 的快速相关算法。类似于分块重叠相加块的卷积运算,可以将长序列根据短序列的长度进行分段,对每一段利用 FFT 计算相关值,然后将每一段的相关值进行相加即可。Chirp 信号匹配滤波器的冲激响应就是调频方向相反,其他参数相同的 Chirp 信号。以 Chirp 上扫频为例,与公式(1)相对应的匹配滤波器的单位冲激响应为:

$$h(t) = \cos(2\pi f_0 t - \pi k t^2) \quad -T/2 \leq t \leq T/2 \quad (3)$$

Chirp 信号经过匹配滤波器输出为:

$$g(t) = h(t) \times c(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(\tau) h(t - \tau) d\tau = \sqrt{BT} \cos(2\pi f_0 t) \frac{\sin[\pi B t (1 - \frac{|t|}{T})]}{\pi B T} \quad (4)$$

从式(4)看出, $g(t)$ 的峰值在 $t=0$ 时刻取得, $t = \pm 1/B$ 为其第一零点处。信号主瓣宽度为 $2/B$, 主瓣的高度为 \sqrt{BT} 。经过匹配滤波后,其对应的匹配输出具有和 sinc 函数类似的特性,低峰值功率信号变成了一个能量集中于很短的时间内,具有高峰值功率的信号,这样的特性非常利于检测和捕获 Chirp 信号^[12]。

利用 Chirp 信号的匹配脉冲特性,可以在噪声信道下很好的检测 Chirp 信号。根据公式(4)可得,接收 Chirp 信号在时间上的延迟相关和能量衰减,表现在匹配滤波输出上为匹配峰值位置和匹配峰值的变化,在检测到 Chirp 信号后,当 Chirp 信号时间完全对齐,能量未衰减时,匹配相关输出在 $t=0$ 时刻出现 BT 的峰值,而对于不同时延不同衰减的 Chirp 信号,其匹配峰值会发生变化。

2.2 FRFT 变换

传统的傅立叶变换是将信号在一组正交完备

的正弦基上展开,所以正弦信号的傅立叶变换是一个 δ 函数。而分数阶傅立叶变换(FRFT)是将信号在一组正交的 Chirp 信号上展开,则一个 Chirp 信号的某一阶次的 FRFT 也是一个 δ 函数。在 t 域的函数 $x(t)$ 的 P 阶分数阶傅里叶变换是一个线性运算,具体理论见参考文献[13-15]。

现假设输入 Chirp 信号为复信号^[16]:

$$x(t) = \exp[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2)] \quad (5)$$

式中: f_0 为中心频率; k 为调频率。对其做 P 阶 FRFT 得:

$$X_p(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} K_p(u, t) x(t) dt = A_\alpha e^{j\pi u^2 \cot \alpha} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\pi(k + \cot \alpha)t^2} e^{-j2\pi t(u - f_0 \sin \alpha)} dt \quad (6)$$

当 Chirp 信号的调频率 $k = -\cot \alpha = -\cot(\frac{p\pi}{2})$ 时,

$$X_p(u) = A_\alpha e^{j\pi u^2 \cot \alpha} \delta(u - f_0 \sin \alpha) \quad (7)$$

即当 Chirp 信号的调频率与 FRFT 阶数相匹配时, Chirp 信号在 P 阶 FRFT 域呈现明显的冲击谱峰特性,能量聚集在 $u = f_0 \sin \alpha$ 点上。

从以上分析,接收 Chirp 信号在时间上的延迟相关和能量衰减,表现在变换域上能量峰值位置和峰值大小的变化。因此根据这一原理可以推测接收信号经过的信道。

2.3 去斜压缩

Chirp 信号的去斜脉冲基本思想是:在本地产生与发送 Chirp 相同参数的一个模板信号,利用本地 Chirp 信号与接收信号进行混频,然后经过低通滤波后获得一个基频信号^[17]。

假设接收信号为:

$$r(t) = \text{rect}(t/T) \exp[j(2\pi f_0 t + \pi M t^2)] \quad (8)$$

本地模板信号为:

$$L(t) = \text{rect}(t/T) \exp[j(2\pi f_0 t + \pi M t^2 + \varphi)] \quad (9)$$

式中: φ 为随机相位,服从 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分布。

接收信号经去斜脉冲压缩和低通滤波后,信号变为:

$$f_r(t) = [r(t)L^*(t)]_{LFF} = \text{rect}(t/T) \exp(-j\varphi) \quad (10)$$

频域表达式为:

$$F_r(f) = T \sin c(\pi T f) \cdot \exp(-j\phi) \quad (11)$$

由式(11)看出, Chirp 信号被压缩成单边带宽为 $1/T$ 的差频信号, 其频谱显示在基频处出现脉冲信号的频谱峰值, 处理增益为 BT 。

由于 Chirp 去斜脉冲压缩在频域上具有 BT 的处理增益, 所以可以很容易完成对 Chirp 的检测^[18]。当接收 Chirp 信号与本地 Chirp 信号完全同步且没有经过衰减时, 低通滤波后去除高频部分, 剩下低频信号在基频处会有 BT 值的脉冲峰值, 如果接收 Chirp 信号与本地信号存在时延且衰减, 则去斜压缩后, 时延值在频谱上表现为频率偏移量, 衰减表现为峰值减小。因此可以根据频谱上的脉冲峰值的频率来估计 Chirp 同步信号的时延误差和信道衰减情况。

2.4 理论捕获概率及运算复杂度比较

3 种算法在不同信噪比下的捕获概率图如图 5 所示, 其都能够用于时延估计和信道劣化程度比较。图 3 的仿真图是加性高斯白噪声, 信噪比在 $-20 \sim 10$ dB 之间, 试验次数为 1 000 次, 3 种方案的捕获概率。正如前面分析, Chirp 信号可以在高斯白噪声信道下获得非常好的匹配特性。而 FRFT 和去斜压缩两种解调方法由于都需要将信号转换到频域上做处理, 故捕获概率下降。当信噪比达到一定值时, 3 种方案的捕获概率均达到 100%。

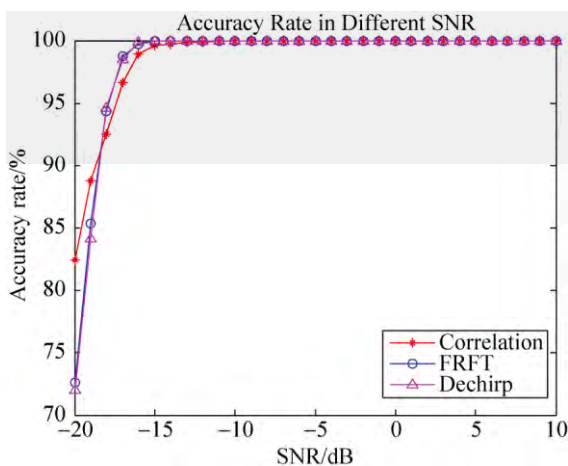


图 3 不同信噪比下, 3 种方案捕获概率图
Fig. 3 Capture probability charts of 3 algorithms in different SNR

3 种算法的运算复杂度分析:

(1) 匹配相关法中需要在存储本地信号, 且如果只是简单线性相关, 则运算量大, 故本文采用分段 FFT 快速相关。其复杂度为: 对长度为 M 和 N 的两个序列进行分段 FFT 的快速相关, 假设 $M \ll N$, 将 N 分成 m 段, 每段长度为 N/m , 将前 $m-1$ 段延续至 $L = N/m + M - 1 = 2^r$ (其中 r 为正整数), 最后一段和长度为 M 的短序列补零至长度为 L , 将补零后的短序列与 m 段中的每一段进行 FFT 相关运算, 最后利用重叠相加法就可以得到相关值, 这样短序列的 FFT 只需要运算一次。所以复乘次数为: $\frac{L \log_2 L}{2} + m(\frac{2L \log_2 L}{2} + L)$, 所以实乘次数为: $2L \log_2 L + 4m(\frac{2L \log_2 L}{2} + L)$ 。当两个相关序列长度相差较大时, 快速傅里叶变换的相关运算比线性相关运算量大, 而分段 FFT 的运算量比简单直接相关的运算量小, 而且随着两个序列长度差距的增大, 这种运算量的优势将更明显。

(2) FRFT 和去斜压缩两种解调方法由于都需要将信号转换到频域上做处理, 受频谱分辨率的影响, 无法精确到每个时间点, 因此存在一定的误差。同时, 去斜压缩需要乘法器, 在一定程度上增加了复杂性。

3 抛泥检测仿真

本节主要介绍在抛泥实验场景下, 3 种算法的性能比较。其中噪声采集于厦门五缘湾, 采样频率 100 kHz。实验场景由两部分组成: (1) 当水域中不存在抛泥行为时, 发送端发送 Chirp 信号, 此时接收端接收信号影响的主要因素为噪声、多径及纯海水吸收损失; (2) 当水域中存在抛泥行为时, 发送端发送 Chirp 信号, 此时影响接收端接收信号除了噪声、多径及纯海水吸收损失, 还会被粘滞吸收衰减所影响。对于两种实验场景所接收到的信号进行 3 种算法处理, 比较 3 种算法在检测有无抛泥行为上的准确性。

3.1 海洋信道模型

通常情况下,声信号在海水中传播存在扩散损失、吸收损失和散射损失。通常假设声信号为平面,故不考虑扩散损失。而吸收损失又包括纯净海水声吸收、微粒物引起的粘滞吸收、散射吸收和热吸收。而在中低频段,热传导吸收的影响微乎其微,故可将吸收损失表示为:

$$\alpha = \alpha_w + \alpha_v + \alpha_s \quad (12)$$

式中: α_w 表示纯净海水的声吸收系数; α_v 表示粘滞性衰减系数; α_s 表示散射衰减系数。

而纯净海水的声吸收系数 α_w 可以根据 Schulkin 和 Marsh 总结的纯净海水声吸收系数半经验公式^[19]:

$$\alpha_w = \left[A \frac{sf_T f^2}{f_T^2 + f^2} + B \frac{f^2}{f_T} \right] (1 - 6.67 \times 10^{-5} d) \text{ (Nepers/m)} \quad (13)$$

粘滞性衰减系数 α_v 选用中国科学院研究员唐应吾的浓悬浮液粘滞吸收模型计算^[20]:

$$\alpha_v = \frac{\varepsilon(1-\varepsilon)k_c(\sigma-1)^2}{2} \times \frac{\varphi\xi^\varepsilon}{(\varphi\xi)^2 + (\sigma + \varphi\tau)^2} \text{ (Nepers/m)} \quad (14)$$

散射衰减系数选用 J.Sheng 和 A.E.Hay 基于“高通”模型的构造思想^[21],得到其计算公式如下:

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon K_\alpha (k_c a)^4}{a[1 + \xi(k_c a)^2 + \frac{4}{3} K_a (k_c a)^4]} \text{ (Nepers/m)} \quad (15)$$

式(13)和(15)中各参数可见参考文献[19]。而传播模型可以表示为:

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (16)$$

式中: $I(x)$ 表示传播距离 x 后的声强; I_0 为常数,决定于声强; α 为声吸收系数。由此可以根据是否违规抛泥,确定声吸收系数 α ,从而确定信号经过传播距离 x 后的声强。

3.2 噪声及信道参数设定

3.2.1 噪声

通过五缘湾海测试验,搜集到的五缘湾噪声的

时域图、单边幅度谱图和功率谱图如图 4 所示。

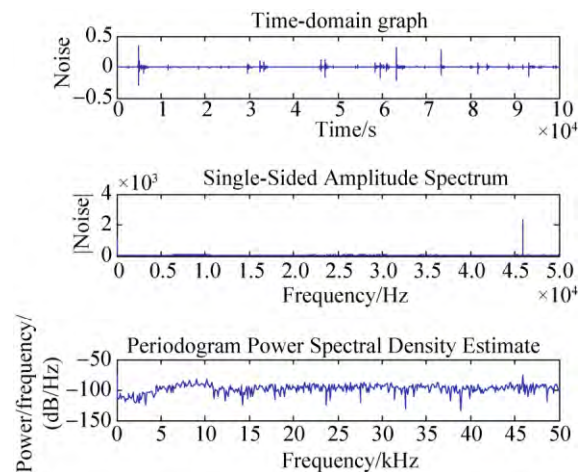


图 4 五缘湾噪声特征图

Fig.4 The noise feature map of Wuyuan Bay.

3.2.2 基本信道参数设定

基本多径信道参数如表 2。表 2 中的信道模型是一个三径信道,其中第一径是从信源直达信宿的一条路径,其增益为 0 dB;第二径相对于第一径的时延为 0.8 ms,增益为-3.979 dB;第三径相对于第一径的时延为 2.2 ms,其增益为-16.021 dB。本文假设不存在多普勒频移。根据第 1.1 节信道模型的介绍,及以厦门港为应用背景,参考实际环境数据及抛泥模型^[22]的理论结果作参数设定如表 3。

3.3 实验场景

3.3.1 水域无抛泥行为

在没有抛泥的情况下,信号的衰落主要是由纯净海水的声吸收系数 α_w 导致的。纯净海水的声吸收系数 α_w 随着频率的增加而增加,且纯海水的声吸收系数 α_w 很小,通过式(16),可以得到传输 x 米后的信号强度。

由于纯净海水的声吸收系数 α_w 导致信号衰减与频率有关。经过多径衰落信道,得到信号的时域图、时频图、单边幅度谱图和功率谱图如图 5。

表 2 基本多径信道参数表

Tab.2 The Parameter Table Of Basic Mmultipath Channel

采样频率	多径数	各径时延矩阵	各径增益矩阵/dB
100 K	3	[0 0.8 ms 2.2 ms]	[0 -3.979 -16.021]

表 3 海洋信道参数设置
Tab. 3 The Parameter Table Of Ocean Channel

参数	符号	取值	单位
海水温度	T	21.5	
海水密度	ρ_0	1025	kg/m ³
颗粒物密度	ρ_s	2650	kg/m ³
颗粒物平均半径	a	2.5×10^{-6}	m
换能器放置深度	d	10	m
海水盐度	S	23	‰
液体声速	C	1 511.78	m/s
海水氯度	Cl	12.73	‰
传输距离	x	1 000	m
颗粒物浓度	PC	10	kg/m ³

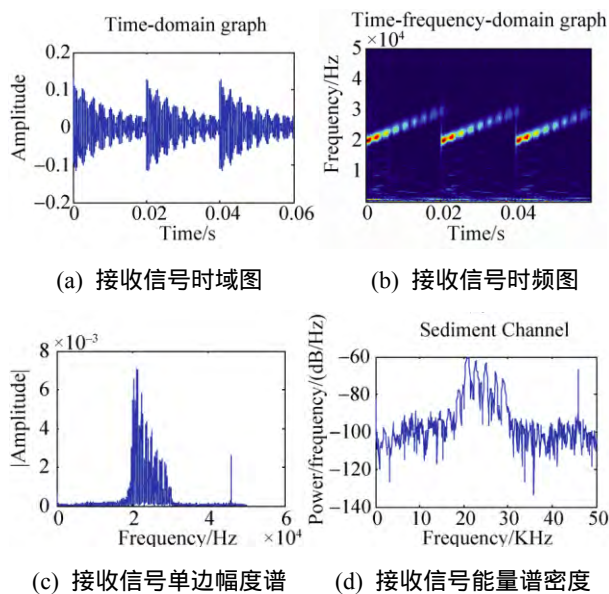


图 5 信号经过未抛泥信道时, 接收到的信号特征
Fig. 5 The received signal feature map without the behavior of throwing sand

从接收信道的时域图(a)中可以看出, 频率越高, 信号衰减越严重, 这与之前讨论的理论相符, 且信号特征依旧清晰可见。图(a)为接收信号与本地 Chirp 信号模板进行分段 FFT 快速相关运算后得到的结果。图(b)为对接收信号进行 FRFT 变换后得到的结果。图(c)为对接收信号去斜脉冲压缩后的结果。对 3 种结果对比如图 6 所示。可知: 相关运算结果能量聚集效果最佳, 峰值最明显; FRFT 抗多径效果最好, 但能量聚集效果不如相关运算; 去斜算法能量聚集效果较好, 但抗噪能力较弱, 受噪声影响较大。

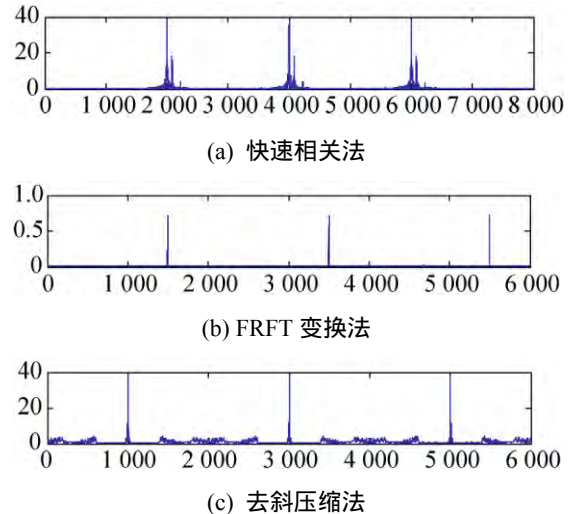


图 6 无抛泥时, 3 种检测结果图
Fig. 6 The detection results of 3 methods without the behavior of throwing sand

3.3.2 水域中存在抛泥行为

现假设有抛泥行为, 且仿真信道仍为多径衰落信道, 则抛泥行为所造成的粘滞性衰减为信号衰减的主要因素。由于纯净海水的声吸收系数 α_w 与粘滞性衰减系数 α_v 导致信号衰减与频率有关。经过抛沙信道, 得到信号的时域图、时频图、单边幅度谱图和功率谱图如图 7 所示。从图中可以看出, 与无抛沙时接收到的信号相比, 衰落更加严重, 信号的幅值也非常微小。由于其衰减是指数型衰减, 且粘滞性衰减系数 α_v 比纯净海水的声吸收系数 α_w 大得多, 故信号衰减大, 从单边幅度谱和功率谱也可以看出信号衰减严重。比较 3 种方案结果(如图 8)同样可以得出结论: 虽然受多径的影响, 但相关运算的结果最好, 峰值较大, 易检测; FRFT 抗多径效果最佳; 去斜受噪声和多径影响最严重。与图 8 的结果进行比较可以发现: 由于抛泥时, 信号衰减较大, 故能量减小, 各方案中的峰值减小, 所以可以通过设置门限的方法进行判决。其中相关运算和 FRFT 变换的结果较好, 去斜压缩受信道环境影响较大。

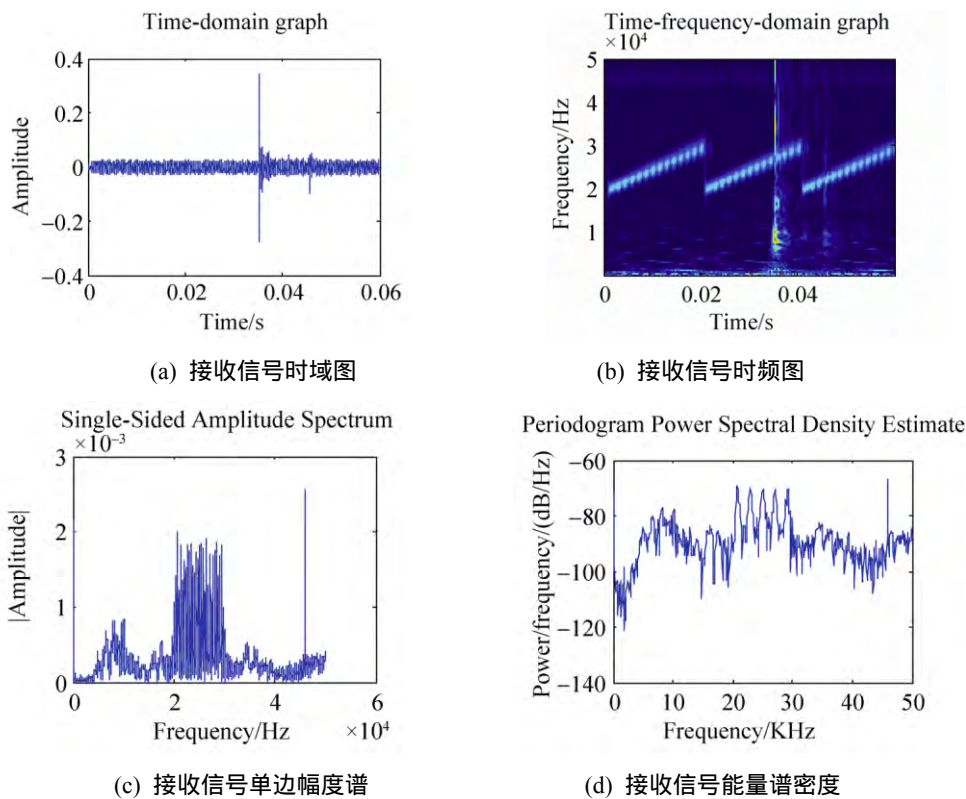


图 7 信号经过抛泥信道时，接收到的信号特征图
Fig. 7 The received signal feature map with the behavior of throwing sand

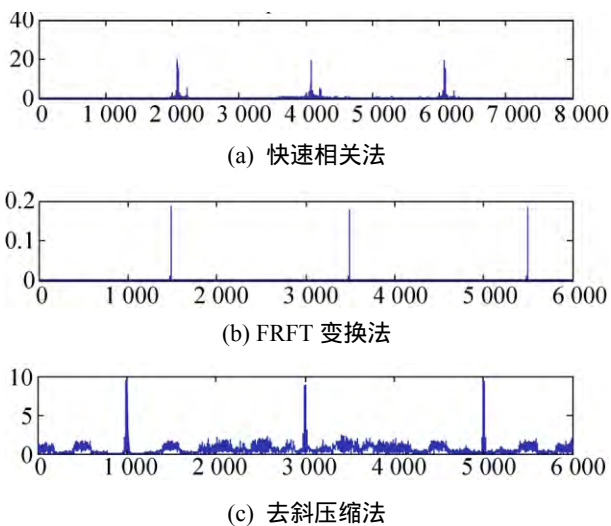


图 8 有抛泥时，3 种检测结果图
Fig. 8 The detection results of 3 methods with the behavior of throwing sand.

4 结论

本文为有效便捷地判断疏浚驳船是否违规倾倒泥沙，提出一套检测方案。同时结合五缘湾实验，

验证了方案的可行性。从仿真结果中可以发现：(1) 相关运算的结果较好，受多径影响较小，且能量聚集性能最佳，峰值最大。同时由于利用了分段 Chirp 快速相关算法，故运算量大幅减小，实时性较好；(2) FRFT 变换是 Chirp 信号常用的方法，其抗多径和抗噪性能最好。在两种信道环境下，峰值区分度高，门限设置较易。在多径较严重的情况下，建议使用 FRFT 变换对 Chirp 信号进行检测；(3) 去斜算法抗噪抗多径能力较差，与前两个方案相比，效果较差。对于后续的研究中，将针对相关运算和 FRFT 变换这两种方案的门限值选取进行研究，提出自动门限跟踪，从而提高准确率，降低“虚警率”、“漏警率”。

参考文献：

[1] 许建峰. 疏浚驳船载运状态智能检测模型研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2010. (XU Jian-feng. Research on the Intelligent Monitoring Model of Dredging Barge's Loading Conditions [D]. Xiamen, China: Jimei University, 2010.)

- [2] 刘宝林, 董德明, 花修艺, 等. 第二松花江流域水体表层沉积物多环芳烃的污染特征与暴露风险评价 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2014, 52(1): 151-156. (LIU Bao-lin, DONG De-ming, HUA Xiu-yi, et al. Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Surface Sediments of Second Songhua River Basin [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2014, 52(1): 151-156.)
- [3] 周波. 浅谈利用 GPS 给疏浚船舶进行施工定位 [J]. 水运工程, 2002(6): 67-69. (ZHOU Bo. On Construction Positioning for Dredging Vessels by Utilizing GPS [J]. Port & Waterway Engineering, 2002(6): 67-69.)
- [4] 张少强. 疏浚船舶 GPS 监管系统的开发与应用 [J]. 港口科技, 2014 (1): 7-8. (ZHANG Shao-qiang. Development and Application of GPS Supervision System for Dredge Vessel [J]. Science & Technology of Ports, 2014 (1): 7-8.)
- [5] 路锦正, 王建勤, 杨绍国, 等. 超声测距仪的设计 [J]. 传感器技术, 2001: 21(8): 29-34. (LU Jin-zheng, WANG Jian-qin, YANG Shao-guo, et al. Design of system for ultrasonic distance measurement instrument [J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 21(8): 29-34.)
- [6] C Goody, M Ericksen, S Smith. Physical Oceanographic Monitoring of Dredging Activities at Kilo Wharf [C]// OCEANS 2011. USA: IEEE, 2011: 1-9.
- [7] Michael Z Li, D Russell Parrott, Zongyan Yang. Sediment Stability and Dispersion at the Black Point Offshore Disposal Site, Saint John Harbour, New Brunswick, Canada [J]. Journal of Coastal Research (S0749-0208), 2009, 25(4): 1025-1040.
- [8] Andrew Morang, Michael C Mohr, Craig M Forgette. Longshore Sediment Movement and Supply along the U.S. Shoreline of Lake Erie [J]. Journal of Coastal Research (S0749-0908), 2011, 27(4): 619-635.
- [9] 陈阳, 张艺朦, 赵安邦, 等. 两种 OFDM 多普勒估计算法在水声信道中的比较 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2012, 30(4): 341-346. (CHEN Yang, ZHANG Yi-meng, ZHAO An-bang, et al. Comparison Two Doppler Estimation Algorithms of OFDM in Underwater Acoustic Channels [J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2012, 30(4): 341-346.)
- [10] 李富贵. 超短基线宽带信号定位算法的 DSP 软件设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. (LI Fu-gui. DSP software design based on USBL broadband signal positioning algorithm [D]. Harbin, China: Harbin Engineering University; 2009.)
- [11] Sophocles J Orfanidis. Introduction to Signal Processing [M]. Beijing, China: Tsinghua Publish House, 1999.
- [12] 孟繁宇. 低速无线个域网中的 CHIRP 扩频通信技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. (MENG Fan-yu. Research on Chirp Spread Spectrum Techniques in Low-rate Wireless Personal Area Network [D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [13] Narayanan V A, K M M Prabhu. The fractional Fourier transform: Theory, implementation and error analysis [J]. Microprocessors and Microsystems (S0141-9331), 2003, 27(10): 511-521.
- [14] Sejdic E, I Djurovic, J Jiang. Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances [J]. Digital Signal Processing (S1051-2004), 2009, 19(1): 153-183.
- [15] 陶然, 邓兵, 王越. 分数阶傅里叶变换及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. (TAO Ran, DENG Bin, WANG Yue. The Fractional Fourier Transform and Its Application [M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2009.)
- [16] 杨巍, 石要武. 基于分数阶傅里叶变换的宽带 Chirp 信号的波达方向角估计 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(3): 818-821. (YANG Wei, SHI Yao-wu. Broadband Direction-arrival Estimation of Chirp Signal Using Fractional Fourier Transform [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(3): 818-821.)
- [17] 尹志平, 陈卫东. 基于二维 FRFT 压缩的上升段弹道目标成像 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(10): 2074-2079. (YIN Zhi-ping, CHEN Wei-dong. Imaging of Boost Phase Ballistic Target Using FRFT Both in Range and Azimuth Compression [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(10): 2074-2079.)
- [18] 万磊. Chirp 超宽带系统的同步技术研究及实现 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010. (WAN Lei. Research on Acquisition Technology and Implementation of Chirp-UWB System [D]. Zhengzhou, Chian: The PLA Information engineering University, 2010.)
- [19] Schulkin M, Marsh H W. Sound absorption in sea water [J]. J Acoust Soc Am (S1520-8524), 1962, 34(6): 864-865.
- [20] 唐应吾, 许云先. 声波在浓悬浮液中的传播 [J]. 声学学报, 1983, 8(4): 220-226. (TANG Ying-wu, XU Yun-xian. Acoustic wave propagates in concentrated suspension liquid [J]. ACTA ACUSTICA, 1983, 8(4): 220-226.)
- [21] Sheng Jinyu, Hay A E. An examination of the spherical scatter approximation in aqueous suspensions of sand [J]. J Acoust Soc Am (S1520-8524), 1988, 83(2): 598-610.
- [22] Urick R J, Ament W S. The propagation of sound wave in concentrated suspensions [J]. J Acoust Soc Am (S1520-8524), 1949, 21(2): 115-119.