

## Fractional 푸리에 변환을 이용한 능동소나 표적탐지

백종대<sup>1</sup> · 석종원<sup>2</sup> · 배건성<sup>3\*</sup>

### Active Sonar Target Detection Using Fractional Fourier Transform

Jongdae Baek<sup>1</sup> · Jongwon Seok<sup>2</sup> · Keunsung Bae<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>LG Electronics

<sup>2</sup>Department of Information and Communication, Changwon National University, Changwon, 51140, Korea

<sup>3\*</sup>School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

#### 요 약

수중환경 하에서 표적을 탐지하고 식별하는 문제는 군사적인 목적은 물론 비군사적 목적으로도 많은 연구가 수행되어 왔다. 수중환경에서의 수중음향 신호가 시간-공간적으로 특성이 변화하며 천해 다중경로 환경을 반영하는 복잡한 특성을 보이는 점으로 인해 능동 표적인식 기술은 매우 어려운 기술로 여겨져 왔다. 본 논문에서는 Fractional 푸리에 변환의 기본 개념과 최적 변환 차수에 대해 설명하고, 이를 이용하여 LFM 신호의 시간-주파수 특성과 스펙트럼 사이의 관계를 분석한다. 그리고 이러한 분석결과를 바탕으로 능동소나 표적 탐지 기법을 제안한다. 제안된 방법의 성능을 검증하기 위해, 기존의 FFT를 이용한 정합필터와 성능을 비교하였다. AUC(Area Under the ROC Curve)의 측면에서 볼 때 제안된 방식이 기존의 방법보다 성능이 우수한 실험결과를 보였다.

#### ABSTRACT

Many studies in detection and classification of the targets in the underwater environments have been conducted for military purposes, as well as for non-military purpose. Due to the complicated characteristics of underwater acoustic signal reflecting multipath environments and spatio-temporal varying characteristics, active sonar target detection technique has been considered as a difficult technique. In this paper, we describe the basic concept of Fractional Fourier transform and optimal transform order. Then we analyze the relationship between time-frequency characteristics of an LFM signal and its spectrum using Fractional Fourier transform. Based on the analysis results, we present active sonar target detection method. To verify the performance of proposed methods, we compared the results with conventional FFT-based matched filter. The experimental results demonstrate the superiority of the proposed method compared to the conventional method in the aspect of AUC(Area Under the ROC Curve).

**키워드** : 능동소나, Fractional 푸리에 변환, 수중표적, 검출, 시간-주파수 특성

**Key word** : Active Sonar, Fractional Fourier Transform, Underwater Target, Detection, Time-frequency Characteristics

접수일자 : 2015. 09. 30 심사완료일자 : 2015. 10. 19 게재확정일자 : 2015. 11. 02

\* **Corresponding Author** Keunsung Bae(E-mail:ksbae@ee.knu.ac.kr, Tel:+82-53-950-5527)

School of Electronics Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.1.22>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

선박, 잠수함, 기뢰, 어뢰 등의 수중 표적을 탐지하고 인식하는 능력은 민수 및 군수부분 모두에 있어서 핵심 기술에 해당한다. 특히 표적의 정확한 탐지는 군사적 작전 수행에서 성패를 결정짓는 아주 중요한 요소가 된다. 수중 음향신호 처리는 표적으로부터 방사되는 음향 신호를 수신하여 다양한 협대역 신호처리 분석을 통해 표적을 탐지하고 인식하는 수동소나 신호처리 기술과, 능동 펄스를 쏘아서 표적에서 반사되는 반향음을 수신하여 이를 분석하는 능동소나 신호처리 기술로 나눌 수 있다. 일반적으로 능동소나는 수동소나에 비해 높은 탐지 성능을 보이며 파라미터 추정 측면에서도 우수하다고 알려져 있다.

능동 소나에서는 목적에 따라 다양한 형태의 능동 펄스의 사용이 가능하며, 가장 널리 사용되는 펄스로는 주파수변조 계열의 펄스가 있다. LFM(Linear Frequency Modulation) 신호는 능동소나에서 표적의 탐지를 위한 송신펄스로 많이 사용되는 신호로서, 표적에 의해 반향된 신호를 수신하여 신호처리 함으로써 표적 정보를 추출한다. 이때 표적신호의 탐지를 위해 송신펄스와 수신 신호의 신호상관(correlation)의 최댓값을 구하는 정합필터(matched filter)가 많이 사용되는데[1, 2], 특히 수신된 신호에서 움직이는 표적에 의한 신호 성분과 주변 잔향음(reverberation)과의 구분을 위해 도플러 변이(Doppler shift)를 고려한 정합필터를 이용한다[2].

최근 들어 Fractional 푸리에 변환(Fractional Fourier Transform : FrFT)를 소나 및 레이더 신호처리에 이용한 다양한 연구결과들이 발표되어 있으며, 기존의 푸리에 변환을 이용한 방법보다 우수한 결과를 보이고 있다[3-7]. 푸리에 변환은 신호처리 및 분석분야에서 의심할 여지없이 지금까지 가장 많이 사용되어지는 방법이다. 이러한 푸리에 변환의 일반화된 해석방법인 FrFT는 [3]에 의해 소개된 이후 광학, 영상처리 및 다양한 신호처리 분야에 응용되었다[8-12].

본 논문에서는 능동소나에서 송신펄스로 사용되는 LFM 신호를 FrFT 기법을 이용하여 탐지하는 방법에 대해 설명한다. 먼저 순시주파수 (instantaneous frequency)가 선형적으로 변하는 LFM 신호가 시간-주파수 영역과 fractional 영역 사이에서 어떤 연관성을 갖는지를 해석하였고, 합성한 LFM 신호에 대한 FrFT 영

역에서의 스펙트럼을 분석하였다. FrFT 영역에서 LFM 신호를 분석한 결과를 능동소나 표적탐지 시뮬레이션에 적용하여 LFM 신호탐지기를 구현하였고, 이를 FFT (Fast Fourier Transform)를 이용한 정합필터와 비교하였다. 그리고 ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선을 통해 LFM 신호탐지 성능을 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 FrFT의 기본적인 개념과 시간-주파수 영역과 FrFT 영역 사이의 관계를 분석하였다. 3장에서는 2장에서 얻어진 분석결과를 바탕으로 표적신호 검출방법에 대해 소개한다. 4장에서는 제안된 방법에 대한 실험결과를 제시하고 5장에서 결론을 맺는다.

## II. FrFT를 이용한 LFM 신호 분석

### 2.1. Fractional 푸리에 변환

FrFT는 기존 푸리에 변환의 일반화된 형태로, 시간 영역의 신호를 시간-주파수의 중간영역으로 변환할 수 있도록 한 것이다. 즉, 시간영역을 x-축, 주파수영역을 y-축으로 표시할 때, 기존의 푸리에 변환은 시간 축에서 반시계방향으로 주파수 축으로  $\pi/2$  만큼 회전시킨 결과를 의미하는데 반해, FrFT는 시간 축과의 각도에 따른 분석결과를 얻을 수 있다.

신호  $f(x)$ 의 FrFT는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$X_{\alpha}(y) = F^{\alpha}[f(x)] = \frac{\exp[-j(\frac{1}{4}\pi\hat{\phi} - \frac{1}{2}\phi)]}{(2\pi|\sin\phi|)^{1/2}} \exp(\frac{1}{2}jy^2\cot\phi) \times \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\frac{jxy}{\sin\phi} + \frac{1}{2}jx^2\cot\phi)f(x)dx \quad (1)$$

식 (1)에서  $\alpha=0$ 일 경우에는 변환된 결과가 입력과 동일해지는 identity transform이 되고,  $\alpha=1$ 일 경우에는 기존의 푸리에 변환과 동일하게 된다. 식 (1)에서  $\phi=\alpha(\pi/2)$ 의 관계가 있다.

### 2.2. 최적 차수 변환

Chirp 신호는 시간에 따라 주파수가 변화하는 신호를 일컫으며, 주파수 증가 방향에 따라 up-chirp과 down-chirp으로 나눌 수 있으며, chirp rate에 따라 linear chirp, exponential chirp으로 나뉜다. 이 중에서

linear chirp은 chirp rate가 일정한 신호를 말하며 LFM 신호라고 한다. LFM 신호는 일반적으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$f(t) = e^{j2\pi(at^2 + f_0t + c)} \quad (2)$$

이때  $2\pi(at^2 + f_0t + c)$ 는 신호 전체의 위상을 나타내며, 이를 미분하면  $f(t)$ 의 순시주파수  $2at + f_0$  [Hz]를 구할 수 있다. 그리고 선형적으로 변하는 주파수 변화의 기울기에 해당하는 chirp rate는  $2a$ 가 되고,  $f_0$ 는 LFM 신호의 시작 주파수가 된다. 이러한 LFM 신호는 순시주파수가 시간에 따라 선형적으로 변화하는 특징을 가지고 있으며, 레이더 및 능동소나 시스템에서 표적의 탐지를 위한 송신펄스로 많이 사용되고 있다.

그림 1은 chirp rate와 FrFT 차수와의 관계를 보인 것이다. 그림 1에서 chirp rate가  $2a$ 인 LFM 신호가  $r$ 축 위의 점  $r_0$ 에서 최댓값을 가지기 위해선 chirp rate에 수직하는  $r$ 축의  $\alpha$ 값을 찾아주어야 하며, 이때의  $\alpha$ 를 최적 변환차수  $\alpha_{opt}$ 라고 한다. Chirp rate가  $2a$ 인 LFM 신호의 최적 변환차수  $\alpha_{opt}$ 은 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$\alpha_{opt} = \frac{2\phi}{\pi} = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{1}{2a}\right) \quad (3)$$

입력신호의 표본화주파수가  $f_s = 1/T_s$ 이고 전체 길이가  $N$  샘플이라면, 대략적인 대역폭은  $\Delta f = f_s/N$ 로 주어지며, 단위시간과 단위 대역폭의 비가  $\Delta f/\Delta t = (f_s/N)/T_s = f_s^2/N$ 인 관계를 이용하면 식 (3)은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\alpha_{opt} = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{f_s^2/N}{2a}\right) \quad (4)$$

식 (4)를 통해 구한  $\alpha_{opt}$ -차수의 FrFT 스펙트럼 특성은  $r_0$ 에서 피크 스펙트럼 즉, 최댓값을 가지며, 양의 주파수 대역의 LFM 성분에 의해서  $r_1$ 부터  $r_2$ 까지 대역폭을 가지는 스펙트럼이 나타나게 된다. 여기서  $r_0$ 에서 최댓값을 가지는 특징으로 인하여 잡음이 존재하는 환경에서 능동소나의 표적신호를 탐지하는데 기존의 푸리에 변환 방법보다 상당한 장점이 될 수 있다.

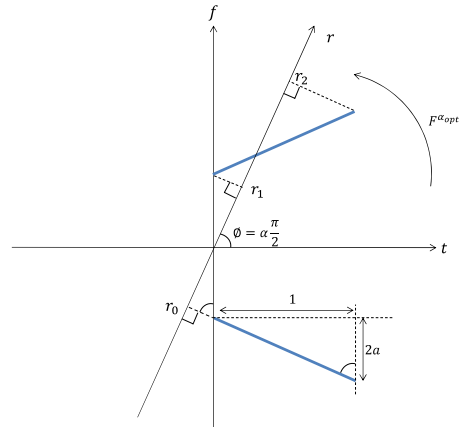


Fig. 1 Relation between chirp rate and order of FrFT

### 2.3. FrFT 스펙트럼과 시간-주파수 영역과의 관계

그림 2는 동일한 chirp rate를 가지는 두 개의 LFM 신호에 대해 FrFT 영역과 시간-주파수 영역과의 관계를 나타낸 그림이다. 그림에서처럼  $t=0$ 에서 시작하는 LFM 신호와  $\tau$ 만큼 시간 지연된 LFM 신호가 있다고 가정하자. 이 경우 두 개의 LFM 신호는 동일한 chirp rate를 가지므로 같은  $\alpha_{opt}$ 에서 최댓값을 가지게 되지만,  $\tau$ 만큼의 시간 지연으로 인해 FrFT 영역의 서로 다른 위치에서 최댓값을 가지게 되고, 시간 축  $\tau$ 에서의 순시주파수 또한  $f_\tau$ 만큼 차이가 나게 된다.

FrFT 영역에서 각 LFM 신호 성분에 의해 피크 스펙트럼이 나타난 위치가 각각  $0, r_\tau$ 라 할 때, 피크 스펙트럼이 나타난 위치간의 거리는  $r_\tau$ 가 된다.

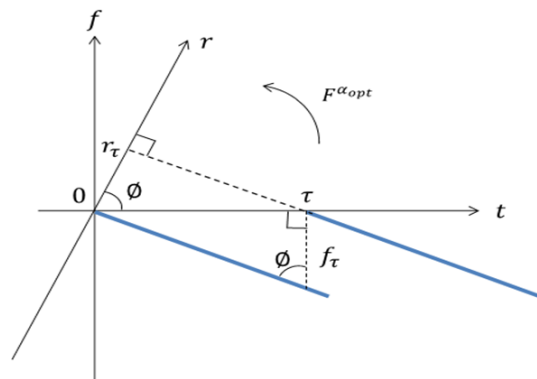


Fig. 2 Relation between time-frequency domain and FrFT domain (negative frequency domain)

따라서 FrFT 영역에서 두 피크 스펙트럼과의 거리인  $r_\tau$ 는 시간지연  $\tau$ , 순시주파수 차이  $f_\tau$ 와 각각 식 (5), 식 (6)과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\tau = r_\tau / \cos\phi \quad (5)$$

$$f_\tau = r_\tau / \sin\phi \quad (6)$$

식 (5) 및 식 (6)을 이용할 경우 FrFT 영역에서 각 피크 스펙트럼간의 거리를 통해 주파수 축과 시간 축에서의 차이를 알 수 있으며, 이는 중첩된 LFM 신호 성분의 시간지연과 순시주파수 차이를 FrFT 영역에서 해석함으로써 쉽게 구할 수 있다.

### III. FrFT를 이용한 표적신호 탐지

소나 송신기에서 수중으로 방사된 음향신호는 어떤 표적에 의해 반향 되어 수신기로 들어오며, 이때 수신된 신호로부터 반향된 표적 신호성분을 탐지하는 것이 일차적인 목표가 된다. 수신된 신호는 시간블럭 단위로 처리하는데 단위 시간블럭의 크기는 일반적으로 송신 펄스의 길이이며, 적절한 중첩을 통해 시간블럭을 이동시킨다. 그림 3은 수신된 신호를 시간블럭 단위로 나누는 과정을 보인 것이다.

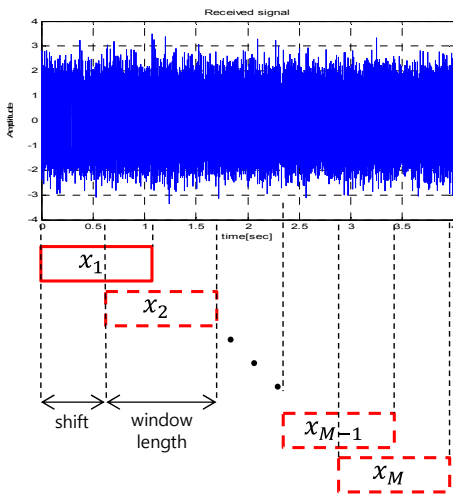


Fig. 3 Time block of the received signal

#### 3.1. FFT를 이용한 정합필터

표적신호 탐지를 위해 식 (7)로 정의되는 정합필터를 사용한다. 이때 정합필터의 임펄스 응답  $h[n] = s[T-n]$  이고, 송신 펄스의 길이를  $T$ , 송신 펄스를  $s[n]$ , 수신 신호의  $m$  번째 시간블럭을  $x_m[n]$ , 정합필터 출력은  $y_m[n]$ 이고,  $1 \leq m \leq M$  이다.  $M$ 은 총 시간블럭의 수에 해당한다.

$$y_m[n] = h[n] * x_m[n] = \sum_{k=0}^{T-1} s[n-T+k]x_m[k] \quad (7)$$

여기서 수신된 신호가 송신 펄스와 같다면  $n = T$ 에서 즉,  $y_m[T]$ 에서 최댓값을 가지므로 신호를 탐지할 수 있게 된다.  $y_m[T]$ 는  $m$  번째 시간블럭을 정합 필터링하여 구한  $y_m[n]$ 의 최댓값을 찾음으로 쉽게 구할 수 있다. 하지만 식 (7)과 같은 정합필터는 시간영역에서 컨볼루션 형태로 주어져 과도한 연산량이 요구된다. 따라서 효율적인 연산을 위해 그림 4와 같이 FFT를 이용하여 주파수 영역에서  $y_m[n]$ 을 구한다. FFT를 이용한 경우도  $y_m[n]$ 의 최댓값이 문턱전압을 넘는 시간블럭  $x_m[n]$ 을 반향된 신호 성분이 존재하는 시간블럭으로 결정한다.

#### 3.2. FrFT를 이용한 LFM 신호 탐지

FrFT를 이용한 LFM 신호 탐지기는 그림 5와 같이 구현한다. 송신 펄스의  $\alpha_{opt}$ 는 식 (4)를 통해 구한다. 그리고 시간블럭 또한 송신 펄스의  $\alpha_{opt}$ 를 이용해 FrFT를 구한 후 송신 펄스의 FrFT 결과와 곱하여 LFM 신호 탐지기 출력  $Z_m[n]$ 을 구하고,  $Z_m[n]$ 의 최댓값이 문턱전압을 넘는 시간블럭  $x_m[n]$ 을 반향신호 성분이 존재하는 시간블럭으로 결정한다.

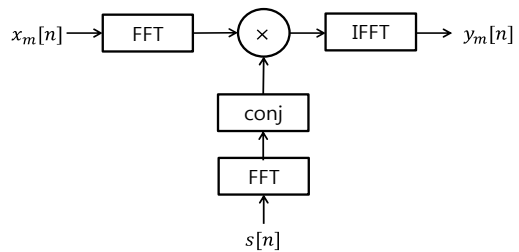


Fig. 4 Matched filtering using FFT

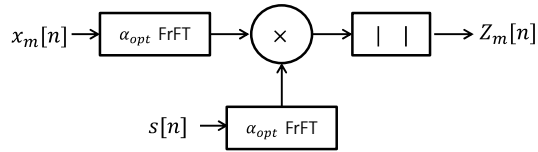


Fig. 5 LFM signal detection using FrFT

그림 5의 정합필터는 송신 펄스  $s[n]$ 과 시간블럭  $x_m[n]$ 의 FrFT의 곱을 통해 FrFT 스펙트럼 일치 정도를 나타내는 것으로 두 FrFT 스펙트럼에서 피크 스펙트럼이 일치하는 시간블럭을 찾는 것이다.

#### IV. 실험결과

FFT 정합필터와 LFM 신호탐지기의 탐지 성능을 비교하기 위해 LFM 신호를 합성하였다. 샘플링 주파수  $F_s$ 는 32.768kHz, LFM 신호의 펄스폭  $d_{LFM}$ 은 0.1sec, 중심 주파수  $F_c$ 와 대역폭  $B_{LFM}$ 는 각각 7kHz, 400Hz이다. 이동하는 표적의 속도가 10knots, 거리는 1750m이다. 즉, 능동 펄스가 송신된 후 2.33초 후에 표적 반향신호를 수신한다. 잡음환경을 고려하기 위해 합성된 LFM 신호에 백색잡음을 첨가하여, 각각 SNR이 -5dB, -20dB가 되도록 하였다.

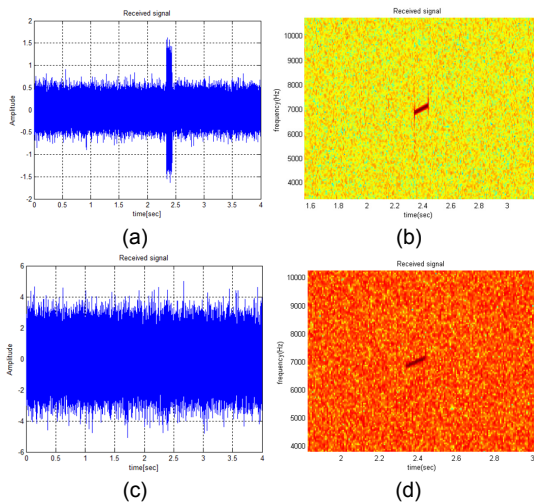


Fig. 6 Waveforms and spectrograms of received signal  $x_1, x_2$  (a) Waveform of  $x_1$  (b) Spectrogram of  $x_1$  (c) Waveform of  $x_2$  (d) Spectrogram of  $x_2$

그림 6은 SNR이 각각 -5dB, -20dB인 수신된 신호  $x_1, x_2$ 의 파형과 스펙트로그램을 각각 나타낸 것이다.

수신된 신호는 그림 4의 정합필터와 그림 5의 LFM 신호 탐지기를 통하여 신호를 탐지했다. 이때 시간블럭의 크기는 송신 펄스 길이와 같고, 75% 중첩하여 분석하였다. 그리고 FFT와 FrFT 정합필터의 성능 비교를 위해 정규화해 주었다.

그림 7은  $94 \leq m \leq 96$ 에 대한 송신 펄스  $s[n]$ 과 수신 신호의 시간블럭  $x_m[n]$ 의 FrFT 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 그림 7에서  $m=95$ 일 때 송신 펄스의 FrFT 스펙트럼 피크와 일치한다. 즉, 95번째 시간블럭에서 신호를 탐지한 것이다. 또한 송신 펄스의 FrFT 스펙트럼 피크(실선)는 고정되어 있는 반면  $m$ 이 변함에 따라 시간블럭  $x_m[n]$ 의 FrFT 스펙트럼 피크(점선)는 위에서 좌로 7 샘플씩 이동한다. 이때 이동하는 간격은 중첩 정도에 따라 달라지며 식 (8)을 이용해 조절해 줄 수 있다.  $n_{shift}$ 는 시간블럭의 이동샘플 수를 말하며,  $r_{shift}$ 는 FrFT 스펙트럼 피크의 이동간격,  $\phi_{opt} = (\pi/2)\alpha_{opt}$ 를 의미한다.

$$n_{shift} = r_{shift} / \cos(\phi_{opt}) \quad (8)$$

그림 8과 9는 FFT 기반의 정합필터(실선), FrFT 기반의 LFM 신호탐지기(점선) 결과를 나타낸 것으로 각 시간블럭에서 정합필터의 최댓값과 LFM 신호탐지기의 최댓값을 시간축에 대해 나타낸 것이다.

그림 10은 SNR이 -20dB인 환경에서 1000번의 시물레이션 결과를 바탕으로 FFT 기반의 정합필터와 FrFT 기반의 LFM 신호탐지기의 ROC 곡선을 나타낸 것이다. AUC(Area Under the ROC Curve)의 측면에서 볼 때 FrFT 기반의 LFM 신호탐지기가 FFT기반의 정합필터보다 성능이 우수한 것을 확인하였다.

기존의 푸리에 변환을 이용한 정합필터는 백색잡음 환경에서 신호의 탐지에 최적화된 방법으로 알려져 있다. 하지만 본 모의실험에서는 시간블럭을 일정 샘플씩 이동시켜 표적 신호가 완전히 포함되지 않은 시간블럭을 이용한 차선(suboptimum)의 정합필터가 구현되었고, FrFT가 기존의 푸리에 변환보다 잡음에 강한 특성에 의해 신호탐지에 더 유용한 결과가 나타났다.

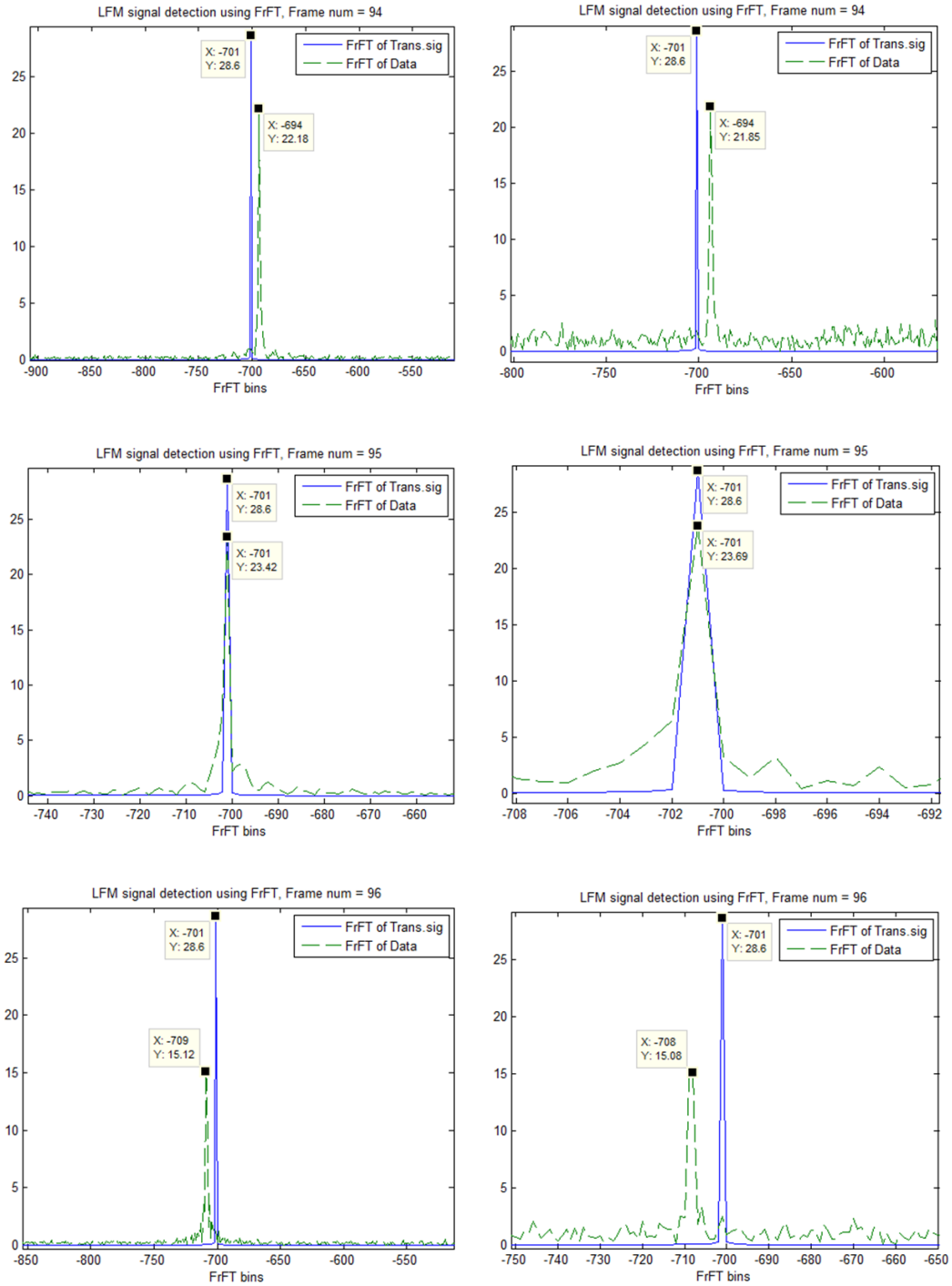


Fig. 7 FrFT spectrum of transmitted pulse and time block (a) Signal  $x_1$  (SNR=-5dB) (b) Signal  $x_2$  (SNR=-20dB)

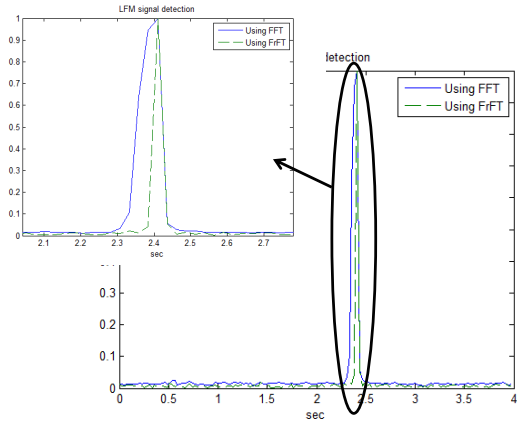


Fig. 8 Result of LFM signal detection(SNR=-5dB)

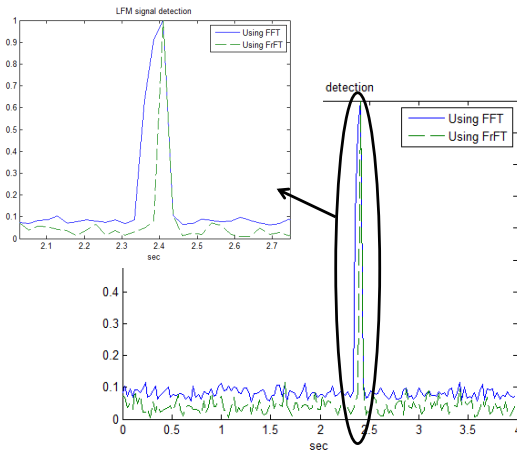


Fig. 9 Result of LFM signal detection(SNR=-20dB)

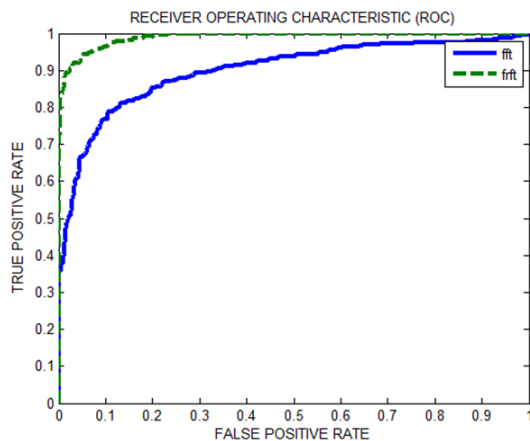


Fig. 10 ROC curve (SNR=-20dB)

## V. 결론

본 논문에서는 능동소나에서 송신펄스로 사용되는 LFM 신호를 FrFT 기법을 이용하여 탐지하는 방법에 소개하였다. 먼저 순시주파수가 선형적으로 변하는 LFM 신호가 시간-주파수 영역과 fractional 영역 사이에서 어떤 연관성을 갖는지를 해석하였고, 합성한 LFM 신호에 대한 FrFT 영역에서의 스펙트럼을 분석하였다. 이를 통해 FrFT 영역에서 LFM 신호를 분석한 결과를 능동소나 표적탐지 시뮬레이션에 적용하였다.

표적 탐지 성능을 비교하기 위해 제안된 방법을 기존의 FFT를 이용한 정합필터와 비교하였다. 그리고 ROC 곡선을 통해 LFM 신호탐지 성능을 비교하였다. 실험결과 AUC 측면에서 볼 때 제안된 FrFT 기반의 LFM 신호 탐지기가 기존의 FFT기반의 정합필터보다 안정적이고 성능이 우수한 것을 확인하였다.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Defence Acquisition Program Administration and Agency of Defence Development under the contract UD130007DD.

## REFERENCES

- [ 1 ] R. Jacob, *Development of Time-Frequency Techniques for Sonar Applications*, Ph. D. dissertation. Naval Physical and Oceanographic Laboratory, 2010.
- [ 2 ] G. B. Giannakis, "Signal detection and classification using matched filtering and higher order statistics," *IEEE Trans. ASSP*, vol. 38, pp. 1284-1296, 1990.
- [ 3 ] V. Namias, "The fractional order Fourier transform and its application to quantum mechanics," *IMA Journal of Applied Mathematics*, vol. 25, no. 3, pp. 241 - 265, 1980.
- [ 4 ] H. M. Ozaktas, Z. Zalevsky, and M. A. Kutay, *The Fractional Fourier Transform with Applications in Optics and Signal Processing*, John Wiley, Chichester, NewYork, USA, 2001.

- [ 5 ] C. Capus and K. Brown, "Fractional Fourier transform of the Gaussian and fractional domain signal support," *IEE Proceedings –Vision, Image, and Signal Processing*, vol. 150, no. 2, pp. 99-106, 2003.
- [ 6 ] A. W. Lohmann et al, "Some important fractional transformations for signal processing," *Opt. Commun.*, vol. 125, pp. 18 - 20, 1996.
- [ 7 ] V. Katkovnik, "A new form of the Fourier transform for time-varying frequency estimation," *Signal Processing*, vol. 47, no. 2, pp. 187-200, 1995.
- [ 8 ] H. M. Ozaktas, B. Barshan and D. Mendlovic, "Convolution and filtering in fractional Fourier domains," *Optical Review*, vol. 1, no. 1, pp. 15-16, 1994.
- [ 9 ] R. Jacob, T. Thomas and A. Unnikrishnan, "Applications of Fractional Fourier Transform in Sonar Signal Processing." *IETE Journal of Research*, vol. 55, pp. 16-27, 2014.
- [10] J. Vargas-Rubio and B. Santhanam, "On the multi angle centered discrete fractional Fourier transform," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, pp. 273 - 276, 2005.
- [11] A. Capus and K. Brown, "Short-time fractional Fourier methods for the time-frequency representation of chirp signals," *Journal of Acoustic Society of America*, vol. 113, pp. 3253-3263, 2003.
- [12] I. S. Yetik and A. Nehorai, "Beamforming using the fractional Fourier transform," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 51, pp. 1663-1668, 2003.



**백종대(Jongdae Baek)**

2012년 8월 경북대학교 전자공학부  
 2015년 2월 경북대학교 전자공학부 석사  
 2015년 2월 ~ 현재 LG전자 연구원  
 ※관심분야 : 디지털신호처리, 수중음향신호처리



**석종원(Jongwon Seok)**

1995년 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 경북대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2004년 ~ 현재 창원대학교 정보통신공학과 부교수  
 ※관심분야 : 디지털신호처리, 수중음향신호처리, 패턴인식, 디지털콘텐츠보호관리



**배건성(Keunsung Bae)**

1977년 2월 서울대학교 전자공학과  
 1979년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)  
 1989년 5월 University of Florida (공학박사)  
 1979년 ~ 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수  
 ※관심분야 : 음성신호처리, 디지털신호처리, 적응필터링, 웨이브렛 변환, 패턴인식, 수중음향신호처리 등