

Fractional Fourier 변환을 이용한 능동소나 표적 인식

석종원¹ · 김태환² · 배건성^{2*}

Active Sonar Target Recognition Using Fractional Fourier Transform

Jongwon Seok¹ · Taehwan Kim² · Keunsung Bae^{2*}

¹ Department of Information and Communication, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

² School of Electronics, Kyungpook National University, Daegu 702-701, 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. 또한 실제 데이터 수집의 어려움이 따르게 된다. 본 논문에서는 3차원 하이라이트 분포를 가지는 모델을 이용하여, 능동소나 표적신호를 음선 추적기법을 기반으로 하여 합성하였다. 합성된 표적신호를 대상으로 Fractional Fourier 변환을 적용하여 특징벡터를 추출하였고, 신경회로망 인식기를 이용하여 인식 실험을 수행하였다.

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 classification technique has been considered as a difficult technique. And it has difficulties in collecting actual underwater data. In this paper, we synthesized active target echoes based on ray tracing algorithm using target model having 3-dimensional highlight distribution. Then, Fractional Fourier transform was applied to synthesized target echoes to extract feature vector. Recognition experiment was performed using neural network classifier.

키워드 : 능동소나, Fractional 푸리에 변환, 수중표적, 표적식별, 하이라이트

Key word : Active Sonar, Fractional Fourier Transform, Underwater Target, Target Recognition, Highlight Model

접수일자 : 2013. 07. 03 심사완료일자 : 2013. 08. 02 게재확정일자 : 2013. 08. 15

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

School of Electronics, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2013.17.11.2505>

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

능동소나를 이용한 표적인식을 위해서는 기반 기술로서 반향음으로 부터 어떤 특징인자를 추출할 수 있는가와 어떤 형태의 패턴인식 기법을 적용할 것인가에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해서는 시간 및 주파수 영역에서의 신호 해석 방법에 기반을 둔 특징추출 기법과 더불어 강인한 특징인자 추출을 위해서 다양한 신호처리 기법과 패턴인식 기법에 대한 연구가 수행되어왔다. 또한 최근 연구되고 있는 능동소나 표적신호 인식 기술의 대부분은 단일 수신 신호를 이용한 인식 보다는 다수의 센서를 이용하여 여러 방향에서 수신된 신호를 바탕으로 다중각도(multi-aspect)에 기반한 인식 기법이 주를 이루고 있다[1-3].

최근 들어 Fractional 푸리에 변환(Fractional Fourier Transform : FRFT)을 소나 및 레이더 신호처리에 이용한 다양한 연구결과들이 발표되어 있으며, 기존의 푸리에 변환을 이용한 방법보다 우수한 결과를 보이고 있다 [4,5]. 푸리에 변환은 신호처리 및 분석분야에서 의심할 여지없이 지금까지 가장 많이 사용되어지는 방법이다. 이러한 푸리에 변환의 일반화된 해석방법인 FRFT는 [6]에 의해 소개된 이후 광학, 영상처리 및 다양한 신호처리 분야에 응용되었다[7-10].

본 논문에서는 수중환경이라는 특성으로 인하여 관련 연구를 위한 실제 해상 데이터를 이용한 표본 수집이 어렵기 때문에 3차원 하이라이트 분포를 가지는 모델을 이용하여, 능동소나 표적신호를 음선 추적기법 [11]을 기반으로 하여 합성하였다. 합성된 표적신호를 대상으로 FRFT를 적용하여 특징벡터를 추출하는 방법을 제안하였고, 성능검증을 위해 신경회로망 인식기를 이용하여 인식 실험을 수행하였다.

II. 능동소나 표적신호 합성

능동소나 표적신호 인식 연구의 가장 큰 문제점은 능동소나 표적신호의 분석 및 개발된 인식 기법의 검증을 위한 데이터 수집이 어렵다는 점이다. 짧은 시간의 반향음만을 이용하는 능동 표적인식의 경우 신호 분석 및 인식에 적합한 특징파라미터 추출을 위해 다양한 조건에서의 많은 데이터가 필수적이므로 다양한 표적 및 환

경을 고려한 합성기법이 필요하다.

2.1. 표적신호 합성을 고려한 채널환경

능동소나 표적신호를 합성하기 위해서 그림 1과 같은 간단한 수중환경을 고려하였다. 소나는 단상태 또는 다중상태 소나 환경 모두를 고려 할 수 있으며 수신 신호는 다중 경로 및 추후 잔향 환경을 고려하도록 하였다.

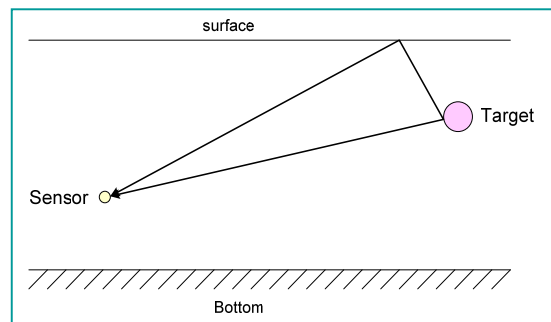


그림 1. 표적신호 합성을 위한 채널환경
Fig. 1 Channel environment for target signal synthesis

2.1.1. 표적신호 합성

하이라이트 모델을 이용하여 다중각도 상태 소나 신호 합성 환경을 가정하였다. 수심은 대략 300m로 가정하고 해수면 반사 및 해저면 반사 경로만 고려되어 있다. 각 표적은 4개의 3차원의 서로 다른 구조를 갖는 하이라이트 모델을 이용하여 생성하였다. 각각의 점은 하이라이트 위치를 나타낸다. 송신된 신호는 각 하이라이트에서 전방향으로 반사하므로 인접 하이라이트와의 상관성은 고려하지 않았다.

모든 모델은 앞서 설명한 바와 같이 공통적으로 동일한 길이 및 형태의 등 간격 하이라이트가 분포하고 있으며 Type 2는 이에 좌-우, 180°에 대칭적인 형태의 분포를 추가 하였으며 Type 3은 180°에 대칭적인 분포를 추가한 모델이다. Type 4는 가장 복잡한 분포 형태를 이루고 있으며 원통의 양 끝 단에 약간의 비대칭적 분포를 포함하고 있다. 본 연구에서는 대칭적인 모델을 기본으로 가정하여 인식 연구를 수행하지만 실제 비대칭성이 존재하는 표적의 반사 신호를 인식할 경우의 결과를 분석하기 위함이다. 전체적으로 볼 때 4가지 모델은 대체적으로 180° 기준으로 회전 했을 때 거의 대칭

적인 형태를 이루고 있음을 확인할 수 있다. 등 간격 하이라이트 사이의 거리는 일반적으로 송신신호의 펄스 길이를 고려하여 합성된 반사 신호가 불연속적이지 않도록 설정 하는데 여기서는 10 m 간격으로 설정하였다. 신호 합성에는 음선 추적 기법을 이용하였다. 그림 2는 사용된 4가지 형태의 하이라이트 모델을 보여주고 있다.

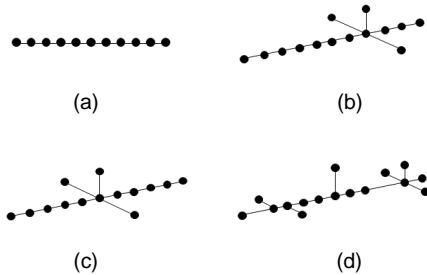


그림 2. 하이라이트 모델 (a) Type 1 (b) Type 2 (c) Type 3 (d) Type 4
 Fig. 2 Highlight Model (a) Type 1 (b) Type 2 (c) Type 3 (d) Type 4

표적 반사신호의 합성은 신호표적에서 일정거리를 두고 소스에서 생성된 LFM(Linear Frequency Modulation)펄스를 수신기가 수신하도록 구성하였다. 표적이 회전함에 따라 표적-소스간의 다양한 각도에서의 신호를 얻을 수 있게 된다. 표적을 중심으로 일정한 거리를 두고 원을 그리며 360° 회전하면서 각각 원하는 각도에 따라 산개된 신호를 수집하였다. 그림 3은 표적 물체가 회전하면서 소스에 의해 산개되어지는 신호를 수신기가 수신하는 다중각도 능동소나 신호합성 과정을 보여주고 있다.

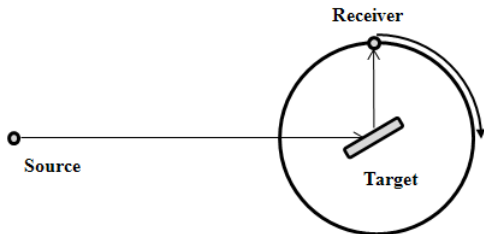


그림 3. 다중각도 능동소나신호 합성과정
 Fig. 3 Synthesis process for multi-aspect active sonar

III. Fractional Fourier 변환을 이용한 특징벡터 추출

3.1. Fractional Fourier Transform 개요

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.

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

여기서 α 는 0에서 4 사이의 값을 가지며 FRFT의 차수(order)를 의미하고, $\phi = \frac{\pi}{2}\alpha$, $\hat{\phi} = \text{sgn}\phi$ 로 각각 정의된다. 식 (1)에서 $\alpha = 0$ 일 경우에는 변환된 결과가 입력과 동일해지고, $\alpha = 1$ 일 경우에는 기존의 푸리에 변환과 동일하게 된다. 이와 같이 FRFT의 출력은 시간영역이나 주파수영역 어느 곳에도 해당하지 않는, ϕ 값에 따른 Fractional 영역에 속하는 성질을 가지게 된다. 그림 4는 FRFT를 구하는 과정을 보여주고 있다.

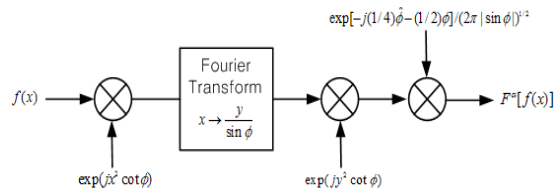


그림 4. FRFT 구현과정
 Fig. 4 FRFT Implementation Procedure

3.2. 최적 변환차수

순시주파수(instantaneous frequency)가 시간에 따라 선형적으로 변화하는 LFM 신호는 소나 및 레이더, 지진파 신호처리 등의 분야에 많이 활용되어져 왔다. 일

반적인 LFM 신호는 식 (2)와 같이 정의된다.

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

이때 $2\pi(at^2 + f_0t + c)$ 는 신호 전체의 위상을 나타내며, 이를 미분하면 $s(t)$ 의 순시주파수 $2at + f_0$ [Hz]를 구할 수 있다. 그리고 선형적으로 변하는 주파수 변화의 기울기에 해당하는 chirp rate는 $2a$ 가 된다. 그림 5는 FRFT 영역에서 LFM 신호의 chirp rate와 FRFT 차수와와의 관계를 보여주고 있다. 시간-주파수 영역에서 기울기 $2a$ 를 갖는 LFM 신호가 주파수 영역에서 최대 크기를 가지도록 하기 위해서는 그림 5에서 반시계방향으로 ϕ 만큼 회전시키면 되며, 이때의 최적 FRFT 차수 α_{opt} 는 식 (3)과 같이 정의된다.

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

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.

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

즉, 최적 FRFT 차수 α_{opt} 를 알 수 있다면, LFM 신호는 FRFT 영역에서 최대값을 가지게 된다. 이는 chirp rate에 따라 기울어진 형태를 보이는 LFM 신호의 모양을 바로 세워서 최대 피크를 가지도록 하여 기존의 푸리에 변환 방법보다 안정적으로 신호를 검출할 수 있는 환경을 제공하게 된다.

3.3. 특징벡터 추출

합성된 능동소나 표적반사 신호는 LFM신호의 선형 조합으로 가정할 수 있다. 즉 각 하이라이트 모델에서 반사된 LFM 신호들이 일정 차이의 지연을 두고 합해진 결과로 표현된다. 하이라이트 모델의 모양과 수에 따라 각기 다른 합성신호가 만들어 지게 된다. 이러한 표적

반사 신호에 FRFT를 작용하게 되면, 수신된 각도 및 표적의 모양에 따라 FRFT 영역에서 각 하이라이트 모델의 특징을 반영하는 특징벡터를 추출할 수 있게 된다.

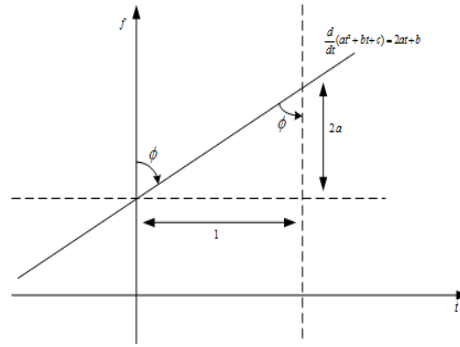


그림 5. chirp rate와 FRFT 차수와의 관계
Fig. 5 Relationship between chirp rate and FRFT order

본 논문에서는 FRFT영역을 100개의 균일 필터뱅크를 사용하여 100개의 각 필터뱅크의 에너지를 특징벡터로 사용하였다. 그림 6은 FRFT영역에서 특징벡터 추출과정을 보여주고 있다.

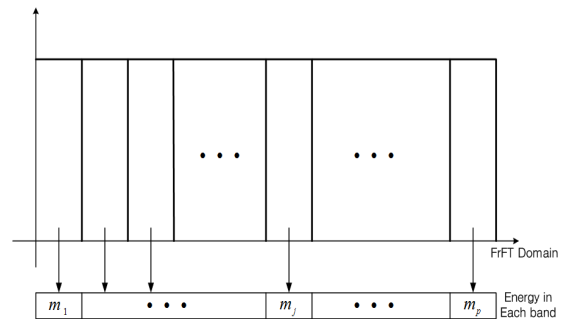


그림 6. FRFT영역에서 특징벡터 추출과정
Fig. 6 Feature extraction process in FRFT domain

IV. 실험결과

실험에 사용된 능동소나 표적 신호를 합성하기 위해서 표본화 주파수는 31.25 kHz, 펄스 폭은 50ms, 중심 주파수는 7 kHz, 그리고 대역폭은 400 Hz의 LFM 신호를 사용하였다. 합성된 신호는 신장 효과 및 다중 경로 반사 효과로 인하여 송신 신호의 길이 보다 길어

졌으며 표적 모델에 따라서 서로 다른 길이 및 형태를 갖는다. 그림 7은 하이라이트 모델을 이용하여 수신기의 각도별로 수신된 표적 반사 신호의 예를 보여주고 있다.

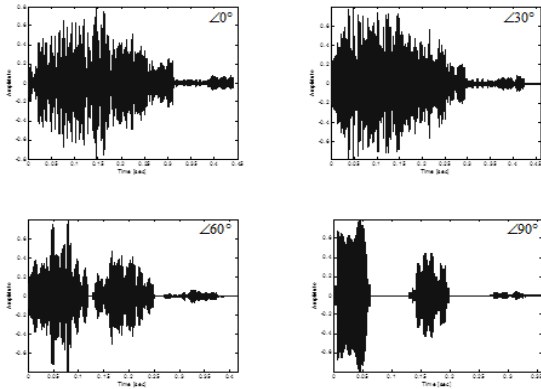


그림 7. 하이라이트 모델을 이용한 표적 반사신호의 예
Fig. 7 Examples of target echo signals using highlight model

수신된 표적 반사 신호를 대상으로 FRFT를 적용하여 특징벡터를 추출하였다. 3장에서 설명된 바와 같이, FRFT 영역을 100개의 균일 필터뱅크를 사용하여 필터뱅크의 에너지 100개를 특징벡터로 사용하였다. 비교를 위해 기존의 푸리에 변환(Fourier Transform : FT) 영

역에서 동일한 방법으로 100개의 특징벡터를 추출하였다. 그림 8과 9는 0도에서 90도까지 10도 간격으로 Type 1 하이라이트 모델에서 반사되어 수신된 신호를 각각 FT와 FRFT를 적용하여 구해진 특징벡터의 모양을 보여주고 있다.

그림 8에서 FT 영역에서의 특징벡터는 수신각도에 따라 비슷한 형태를 나타내고 있다. 이는 FT영역에서 LFM신호들이 같은 대역폭을 공유하기 때문에 뚜렷한 차이를 나타내지 못하고 있다. 하지만 FRFT영역에서는 수신각도에 따라 특징벡터 각기 다른 형태를 보여주고 있다. 구해진 특징벡터의 성능을 검증하기 위해 역전파 신경망(Back Propagation Neural Network : BPNN)을 이용하여 인식실험을 수행하였다. 표적 인식을 위해 4 종류의 표적 신호에 대하여 0도에서 360까지 1도 단위로 수신하여, 총 1440개의 데이터로 데이터베이스를 구축하였다. 1440개의 데이터베이스에서 360개의 데이터를 이용하여 BPNN 인식기의 훈련에 사용하였다. 사용된 BPNN인식기는 100개의 입력노드, 24개의 노드를 가지는 은닉층, 그리고 4개의 출력노드를 가지도록 구성되었다. 훈련에서 최대 반복횟수 (Iteration)는 10000번으로 제한하였고, 오류률(error rate)은 0.001로 설정하였다. 실제 실험결과 최대 반복 횟수에 도달하기 전에 설정된 오류률에 도달하여 훈련을 끝낼 수 있었다.

표 1은 실제 인식결과를 보여주고 있다. 표 1에서 확

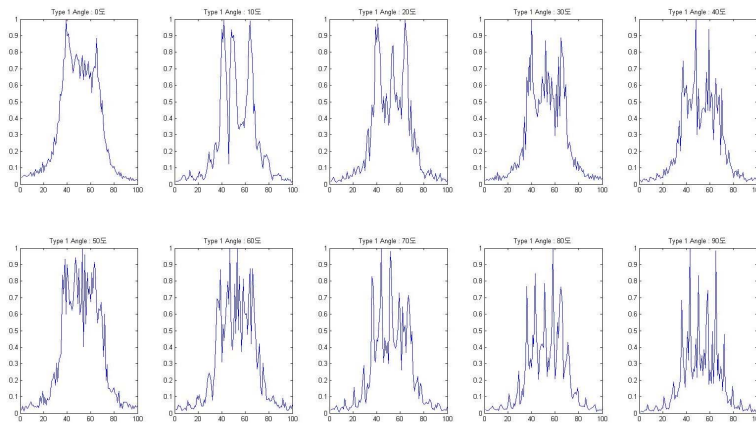


그림 8. FT 영역에서의 추출된 수신각도에 따른 특징벡터 (Type 1 model)
Fig. 8 Feature vector in FT domain depending on receiver angle (Type 1 model)

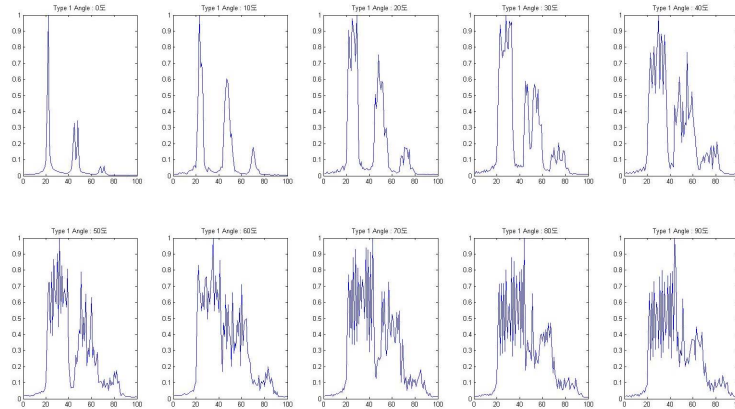


그림 9. FRFT 영역에서의 추출된 수신각도에 따른 특징벡터 (Type 1 model)
 Fig. 9 Feature vector in FRFT domain depending on receiver angle (Type 1 model)

인할 수 있듯이, FRFT 영역에서 추출된 특징벡터를 이용한 인식결과가 FT 영역에서 추출된 특징벡터를 이용한 인식결과 보다 약 20% 정도 향상된 결과를 보임을 확인 하였다.

일한 방법으로 특징벡터를 추출하여 인식성능을 비교 하였다. 실험결과 FRFT 영역에서 추출된 특징벡터를 이용하는 방법이 기존의 FT 영역에서의 특징추출 방법 보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

표 1. 인식실험결과

Table. 1 Result of recognition experiment

	FT	FRFT
Type 1	68.89 %	89.17 %
Type 2	67.50 %	86.67 %
Type 3	66.67 %	87.78 %
Type 4	67.78 %	86.67 %
Total	67.71 %	87.57 %

감사의 글

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음.(계약번호:UD130007DD)

V. 결 론

본 논문에서는 3차원 하이라이트 분포를 가지는 모델을 이용하여, 능동소나 표적신호를 음선 추적기법을 기반으로 하여 합성하였다. 합성된 표적신호를 대상으로 FRFT를 적용하여 특징벡터를 추출하였고, 신경회로망 인식기를 이용하여 인식 실험을 수행하였다. 추출된 특징벡터는 표적 및 수신 각도에 따른 표적 반사신호의 변화를 잘 반영함을 확인하였다.

인식성능을 비교하기 위해, 기존의 FT 영역에서 동

REFERENCES

[1] A. Pezeshki, M. R. Azimi-Sadjadi, and L. L. Scharf, "Undersea Target Classification Using Canonical Correlation Analysis," *IEEE Journals of Oceanic Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 948-955, Oct. 2007.

[2] Hongwei Liu and L. Carin, "Class-based target classification in shallow water channel based on hidden Markov model," *ICASSP02*, vol. 3, pp. 2889- 2892, May 2002.

[3] P. Runkle, P. Bharadwaj, L. Couchman, and L. Carin, "Hidden Markov Models for Multi-Aspect Target Identification," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 47, pp.

2,035-2,040, July 1999.

[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] 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.

[7] S. Pei and W. Hsue, "The multiple parameter discrete fractional Fourier transform," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 13, no. 6, pp. 329 - 332, 2006.

[8] J. Vargas-Rubio and B. Santhanam, "On the multi angle centered discrete fractional Fourier transform," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 12, no. 4, pp. 273 - 276, 2005.

[9] 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, no. 6, pp. 3253-3263, 2003.

[10] 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.

[11] J. Groen, E. Coiras, J. D. Vera, and B. Evans, "Model-based Sea Mine Classification with Synthetic Aperture Sonar," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 4, no. 1, pp. 62-73, 2010.



석종원(Jongwon Seok)

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



김태환(Taehwan Kim)

2008년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2013년 8월 경북대학원 전자공학과 (공학박사)
 2013년 11월 ~ 현재 경북대학교 전자공학과 박사후연구원
 ※ 관심분야 : 수중음향신호처리, 디지털신호처리, 음성신호처리, 패턴인식 등



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, 웨이블렛 변환, 패턴인식, 수중음향신호처리 등