

Gabor Wavelet Transform을 이용한 움직이는 표적에 대한 움직임 보상 개선

The Improvement of Motion Compensation for a Moving Target Using the Gabor Wavelet Transform

신 승 용 · 명 로 훈

Seung-Yong Shin · Noh-Hoon Myung

요 약

본 논문에서는 움직이는 표적에 대한 ISAR(Inverse SAR) 영상의 움직임 보상 기법에 대해서 기술하였다. 움직이는 표적에 대해서 단순히 푸리에 변환만을 이용하여 ISAR 영상을 얻으면 일반적으로 영상에 퍼짐 현상이 나타난다. 이러한 영상의 퍼짐 현상에 대한 문제는 시간-주파수 변환 기법으로 해결할 수 있다. 본 논문에서는 ISAR 영상의 움직임 보상 기법 중에서도 짧은 시간 푸리에 변환과 Gabor 웨이브릿 변환의 방법에 대해서 기술하고 있다. 이러한 각 알고리즘에 대한 성능을 나타내기 위해서 우리는 이상적인 점 산란체와 simulated MIG-25에 대한 산란파를 이용하여 움직임 보상이 된 ISAR 영상을 획득하였다. 또한 짧은 시간 푸리에 변환과 Gabor 웨이브릿 변환을 이용하여 구한 ISAR 영상의 해상도를 나타내고 있다.

Abstract

This paper presents a technique for motion compensation of ISAR(Inverse SAR) images for a moving target. If a simple fourier transform is employed to obtain ISAR image for a moving target, the image is usually blurred. These images blurring problem can be solved with the time-frequency transform. In this paper, motion compensation algorithms of ISAR image such as STFT(Short Time Fourier Transform), GWT(Gabor Wavelet Transform) are described. In order to show the performances of each algorithm, we use scattering wave of the ideal point scatterers and simulated MIG-25 to obtain motion compensated ISAR image, and display the resolution of STFT and GWT ISAR image.

Key words : Motion Compensation, ISAR Image, Time-Frequency Transform, STFT, GWT

I. 서 론

표적인식기법은 레이다에 탐지된 미지의 표적에 의해서 산란된 신호를 분석하여 표적의 종류를 알아내는 방법으로서 표적의 위치, 속도뿐만 아니라 표적이 무엇인지 판단을 할 수 있도록 한다. 미지의 표적을 인식하고 판별하는 방법으로는 일반적으로 산란점 추출을 이용하는 방법과 ISAR 영상을 이용하

는 방법이 있다. ISAR 영상은 표적을 이루는 산란점의 위치와 크기의 정보를 제공하기 때문에 오래전부터 표적인식 단계에 널리 이용되고 있다. 여기서 표적이 정지해 있다면 ISAR 영상을 얻을 때 깨끗한 영상을 획득하여 표적인식에 적용이 가능하지만 표적이 움직인다면 ISAR 영상을 얻을 때 표적의 움직임 때문에 영상의 왜곡이 심하게 발생하여 표적인식에 적용하기가 어렵게 된다. 따라서 이러한 표적의

「이 연구는 KAIST의 RDRC 연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 연구되었음.」

한국과학기술원 전자전산학과(Department of Electrical Engineering & Computer Science, KAIST)

· 논문 번호 : 20060515-051

· 수정완료일자 : 2006년 8월 24일

움직임을 보상하는 단계가 필요하다. 움직임 보상 기법은 움직이는 표적에 대한 푸리에 처리 절차를 수행하거나 다른 기법을 이용하여 깨끗한 영상을 얻는데 있어서 매우 중요한 요소이다.

전통적인 움직임 보상 기법은 표적에 대한 거리를 추적하여 거리 보상을 수행한 후 표적 전체에 대한 range tracking과 doppler tracking을 수행하여 위상을 보정하여 영상을 얻음으로서 움직임을 보상한다. 표적의 움직임이 smooth할 때에는 전통적인 움직임 보상 기법을 이용하여도 표적에 대한 영상이 깨끗하게 나온다. 그러나 목표물이 pitching, yawing, rolling, 그리고 maneuvering과 같은 복잡한 움직임을 보일 때, 전통적인 움직임 보상 기법으로 이러한 움직임을 보상하여 영상에 대한 해상도를 높이기에는 충분하지 않다. 이러한 경우에는 각 산란체에 대해서 polar reforming이나 sub-aperture 접근 방법과 같은 복잡한 움직임 보상 절차가 필요하다.

Victor C. Chen은 움직이는 표적에 대한 움직임 보상 기법으로 푸리에 변환을 사용하는 대신에 시간-주파수 처리 기법을 이용하여 움직이는 표적에 대해서 움직임을 보상하여 깨끗한 영상을 얻었다^{[3],[4]}. 시간-주파수 처리 기법은 polar reforming이나 sub-aperture 접근 방법과 같은 복잡한 절차 없이 교차거리 해상도에서 발생하는 선명하지 않은 현상을 감쇄시켜 고해상도의 영상을 얻는 방법이다. 시간-주파수 처리 기법은 그림 1에서 보는 것과 같이 레이더 산란파에 대한 도플러 처리에 시간-주파수 변환을 적용하여 각 시간 단위에 대한 영상을 생성시켜서 3차원의 시간-거리-도플러의 영상 프레임을 얻을 수 있도록 한다. 시간-주파수 처리 기법으로 획득한 영상은 시간과 거리의 차원으로 나타나는 고해상도 영상 프레임이므로 시간에 대해 샘플링하면 시간 변화에 대한 표적의 영상을 얻을 수 있다.

시간-주파수 처리 기법으로는 STFT(Short Time Fourier Transform), WVD(Wigner-Ville Distribution), CWT(Continuous Wavelet Transform), AWT(Adaptive Wavelet Transform), GWT(Gabor Wavelet Transform) 등이 있으며 본 논문에서는 GWT에 대해서 중점적으로 기술할 것이며, STFT를 구현하여 이와 비교 및 분석을 통해서 GWT의 성능을 검증할 것이다.

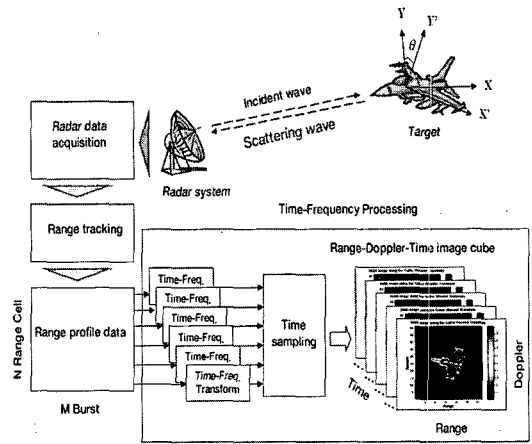


그림 1. 움직이는 표적에 대한 시간-주파수 기법을 이용한 ISAR 영상에 대한 블록도
Fig. 1. Block diagram of ISAR image using time-frequency processing for a moving target.

II. 본 론

2-1 움직이는 표적의 레이더 산란점 모델

표적인식을 하는데 있어서 레이더의 운용 주파수가 표적에 비해 충분히 크다면 표적에 대한 레이더의 산란파는 GTD(Geometrical Theory of Diffraction) 해석 모델을 근거로 하여 표적 상에 위치한 각 산란점에서의 산란파의 합으로 나타낼 수 있다^[1]. 따라서 움직이는 표적에 대한 2차원 레이더 산란파는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^L A_k \exp \left(-j \frac{4\pi f}{c} (R(t) + x_k \cos \theta(t) + y_k \sin \theta(t)) \right) \quad (1)$$

여기서 L 은 표적 상에 위치한 산란점의 개수를 나타내며, A_k 는 k 번째 산란점에서의 산란 강도를 나타낸다. f 는 레이더 운용 주파수이고, c 는 전파의 속도를 나타내며, (x_k, y_k) 는 산란점의 위치를 나타낸다. $\theta(t)$ 는 회전 중심을 기준으로 표적이 회전하는 각도를 나타내며, R 은 레이더와 표적간의 거리를 나타낸다.

표적의 비 규칙적인 움직임에 의해서 거리 R 과 회전각도 $\theta(t)$ 는 다음과 같이 Taylor series 형태로 표현할 수 있으면 식 (2)로 나타낼 수 있다^[2].

$$R(t) = R_0 + vt + \frac{1}{2!} v' t^2 + \frac{1}{3!} v'' t^3 + \dots$$

$$\theta(t) = \Omega t + \frac{1}{2!} \Omega' t^2 + \frac{1}{3!} \Omega'' t^3 + \dots \quad (2)$$

위의 식 (2)를 식 (1)에 적용하여 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f}{c} \left(R_0 + (v + y_k \Omega) t + \frac{1}{2} (v' + x_k \Omega' + y_k \Omega') t^2 + \dots \right) \right\} \quad (3)$$

여기서 R_0 는 레이다와 표적간의 초기 거리를 나타내며, v 는 초기 속도(translation velocity)를 나타낸다. 또한 Ω 는 표적의 초기 각속도(angular velocity)를 의미한다.

2-2 Short Time Fourier Transform(STFT)

일반적으로 2차원 영상을 얻는 방법으로는 Fourier transform을 주로 이용한다. 그러나 이는 주파수 성분에서 발생하는 어떠한 시간 정보도 제공하지 않는다는 단점이 있다. 이는 표적이 정지해 있는 상태라면 문제가 발생하지 않지만, 표적이 움직이는 상태라면 영상의 퍼짐(blurring) 현상이 나타난다. 이러한 시간 해상도의 정보를 제공하면서 영상의 퍼짐 현상을 해결하기 위해서 일반적으로 사용하는 기법이 STFT(Short Time Fourier Transform)이다. 시간 영역에서의 STFT의 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) w(\tau - t) \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (4)$$

여기서 $s(t)$ 는 신호를 나타내며, $w(t)$ 는 short-time window 함수를 나타낸다. STFT을 이용한 영상의 해상도는 위에서 언급한 window의 크기에 의해서 결정이 된다. STFT은 구현하기가 간단하고 cross-term이 존재하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그러나 STFT은 불확실성의 원리(uncertainty principle)에 의해서 시간-주파수의 해상도가 제한이 된다는 단점이 있다. 그리고 시간 영역의 해상도와 주파수 영역의 해상도 모두 좋아질 수가 없다. 즉, 시간 영역의 해상도와 주파수 영역의 해상도간의 trade-off가 존재한다.

2-3 Gabor Wavelet Transform(GWT)

앞에서 언급한 STFT의 시간-주파수의 해상도 문제를 개선하기 위해서 많은 방법들이 연구되어 왔다. 그 중에서도 본 논문에서 제시한 방법은 wavelet을 바탕으로 한 GWT(Gabor Wavelet Transform)으로서 이를 이용하여 움직이는 표적에 대한 움직임 보상을 개선하였다. GWT를 이용하여 신호 $s(t)$ 을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sum_{p=1}^{\infty} B_p G_p(t) \quad (5)$$

여기서 B_p 는 레이다 산란파에 대한 시간 영역으로 표현된 신호이며, $G_p(t)$ 는 GWT의 mother wavelet 함수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다^[6].

$$G_p(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha_p^2}} \exp\left\{-\frac{(t-\tau_p)^2}{2\alpha_p^2}\right\} \exp(j2\pi f_p(t-\tau_p)) \quad (6)$$

위의 함수도 시간 해상도와 주파수의 해상도면에서 trade-off의 관계를 가지고 있지만 각 해상도에서 STFT보다 훨씬 뛰어난 성능을 보이고 있다. 여기서 shifting factor τ_p 는 range migration이 1과 같도록 선택해야 하며 Gaussian window modulation parameter f_p 는 PRF보다 작거나 같아야 한다^[6].

본 논문에서 제시한 GWT는 기존의 시간-주파수 변환 기법에서 움직이는 표적에 대한 움직임 보상을 하기 위해서 변환 함수에서 나타난 α_p , τ_p , f_p 의 파라미터 값을 $G_p(t)$ 와 $s_{p-1}(t)$ 가 닮은 정도를 최대화하여 최적화된 값으로 찾아주는 방법인 양분 탐색법(bisection search) 등의 번거로운 절차가 없어도 가능하게 되도록 하였다. 따라서 움직임 보상을 하기 위한 계산 시간을 줄일 수 있었으며 최적화된 파라미터를 이용하여 움직임을 보상하기 때문에 시간-주파수 변환 기법의 다른 알고리즘보다는 해상도 면에서 매우 뛰어난을 볼 수 있다.

III. 시험 결과

움직임 보상 기법을 적용하기 위해서는 우선 움직이는 표적에 대한 레이다 산란파가 필요하다. 따라서 움직이는 표적에 대한 산란파를 얻기 위해서 식 (1)을 바탕으로 하여 이상적인 점 산란체의 표적에 대한 레이다 산란파를 획득하였다. 그림 2는 각

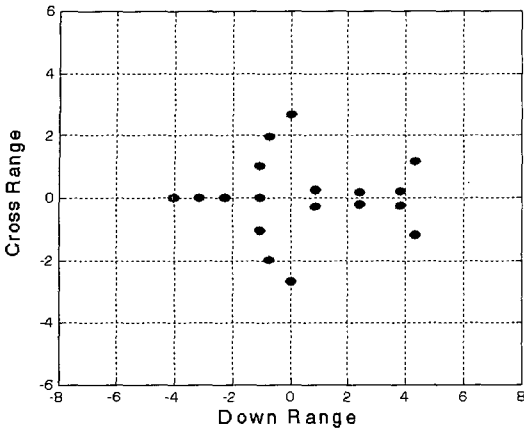


그림 2. ISAR 영상의 움직임 보상을 하기 위한 점 산란체의 위치
Fig. 2. Location of point scatterers for motion compensated ISAR image.

산란점의 위치를 나타내고 있으며 그림에서 보여주듯이 산란점의 개수를 18개로 하였다. 산란파를 얻기 위한 레이더의 운용 주파수는 9.0~9.512 GHz로 대역폭은 512 MHz로 하였다. 주어진 대역폭에서 주파수의 샘플링 개수를 64개로 하였으며 시간에 대한 샘플링 개수는 512개로 하였다.

레이더 산란파의 데이터를 얻기 위해서 표적을 (0, 0)을 기준으로 20.0°/sec의 각속도로 회전을 하도록 하였으며, 표적의 이동속도는 0.2 m/sec로 하였다. 또한 레이더에서 전자파를 송출할 때 1초당 송출되는 펄스의 개수를 의미하는 PRF(Pulse Repetition Frequency)를 15 kHz로 하여 펄스간의 간격을 나타내는 PRI(Pulse Repetition Interval)가 6.67×10^{-5} 초로 하였다. 레이더와 표적간의 거리는 10 km로 하여 표적에 대한 산란파를 획득하였다.

앞에서 제시한 파라미터를 바탕으로 하여 생성한 산란파의 데이터를 이용하여 단순히 푸리에 변환만을 이용하여 ISAR 영상을 얻으면 그림 3과 같이 나타나며 그림에서 확인할 수 있듯이 영상의 퍼짐(blurring) 현상이 나타난다. 또한 표적을 이루는 산란점이 어떻게 구성되어 있는지를 알 수가 없다.

그러므로 이러한 영상의 퍼짐 현상을 보정하기 위해서 시간-주파수 변환 기법을 이용하여 영상을 획득해야지만 깨끗한 영상을 얻을 수 있다. 그림 4는 이상적인 점 산란체에 대한 움직임 보상을 나타

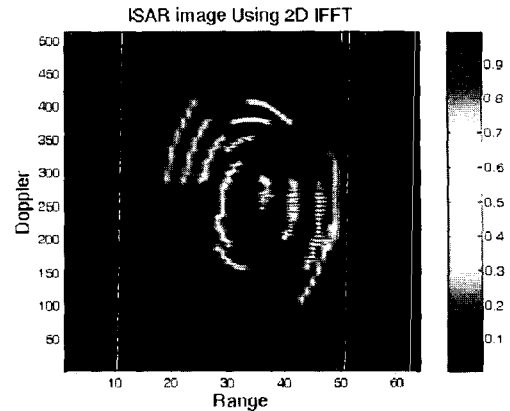


그림 3. 움직임 보정 전의 푸리에 변환을 이용한 점 산란체에 대한 ISAR 영상
Fig. 3. ISAR image of point scatterers using Fourier transform before motion compensation.

내고 있으며, 영상의 첫 번째 프레임을 나타낸 그림이다. 여기서 그림 4(a)은 STFT를 이용한 결과이고 (b)는 GWT를 이용한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시간-주파수 변환 기법을 이용하면 영상의 퍼짐 현상이 보정되는 것을 확인할 수가 있다. 또한 영상의 해상도면에서 GWT를 이용한 결과가 STFT를 이용한 결과보다 더 뛰어난 것을 볼 수 있다. 그림 5 또한 이상적인 점 산란체의 움직임 보상을 나타내고 있으며, 영상의 200번째 프레임을 나타내고 있다. 여기서 그림 5(a)은 STFT를 이용한 결과이고, (b)는 GWT를 이용한 결과이다. 여기서도 확인할 수 있듯이 시간-주파수 변환 기법을 이용하면 영상의 퍼짐이 해결되는 것을 볼 수가 있으며 영상의 해상도 면에서 GWT를 이용한 방법이 STFT를 이용한 방법보다 더 선명하게 나타나는 것을 확인할 수가 있다.

본 논문에서 제시한 GWT의 성능을 보여주기 위해서 다음으로 사용한 표적은 현재 움직임 보정 기법을 검증하는데 있어서 널리 사용되는 simulated MIG-25이다. 이는 앞에서 사용한 이상적인 점 산란체의 산란점 개수보다 훨씬 많은 120개 정도의 산란점으로 구성되어 있다. 그리고 레이더의 운용 주파수는 9.0~9.512 GHz로 대역폭은 512 MHz이다. 주어진 대역폭에서 주파수의 샘플링 개수를 64개로 하였으며, 시간에 대한 샘플링 개수는 512개로 하였다. 레이더 산란파의 데이터를 얻기 위한 표적의 각속도

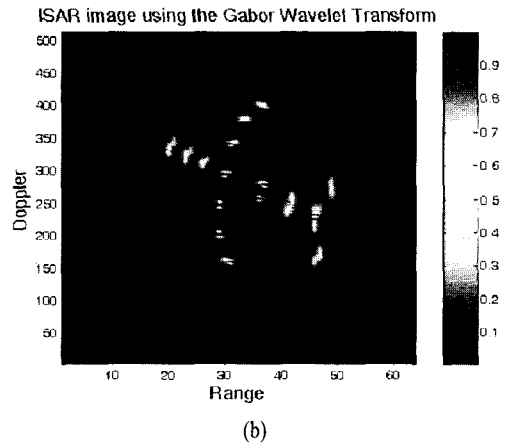
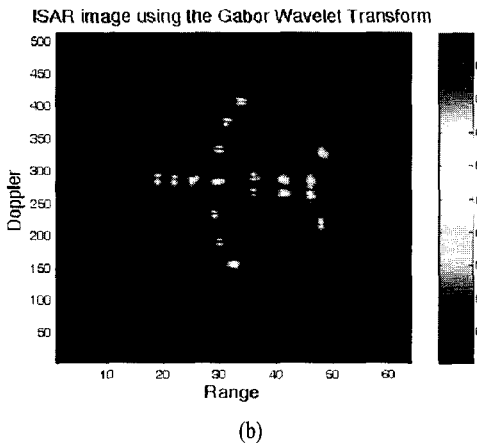
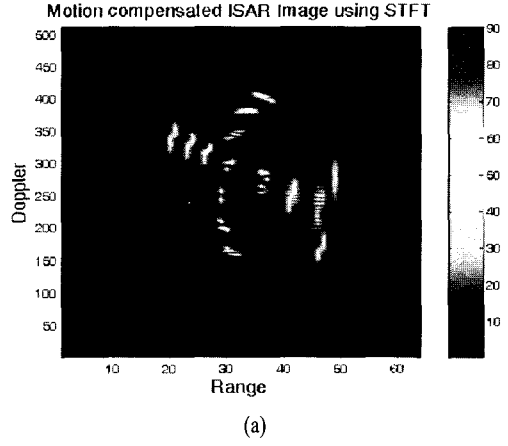
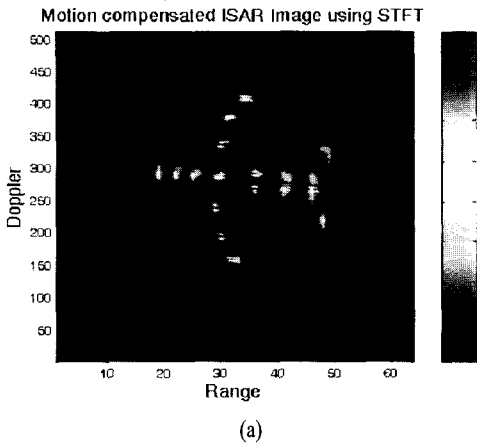


그림 4. (a) STFT, (b) GWT를 이용한 점 산란체에 대한 ISAR 영상, 첫 번째 프레임
Fig. 4. ISAR image of point scatterers using, (a) STFT (b) GWT, the first frame.

그림 5. (a) STFT, (b) GWT를 이용한 점 산란체에 대한 ISAR 영상, 200 번째 프레임
Fig. 5. ISAR image of point scatterers using, (a) STFT (b) GWT, the 200th frame.

는 $10.0^\circ/\text{sec}$ 로서 회전 성분만을 가지고 있다. 또한 PRF는 15 kHz로서 펄스간의 간격을 나타내는 PRI가 6.67×10^{-5} 초이다.

앞에서 제시한 파라미터를 바탕으로 하여 생성한 simulated MIG-25의 레이더 산란파를 이용하여 단순히 푸리에 변환만을 이용하여 영상을 얻으면 그림 6과 같이 나타나며 그림에서 볼 수 있듯이 영상의 퍼짐(blurring) 현상이 나타나며 표적의 종류가 무엇인지 판단할 수 없다.

레이더 산란파에 대해 단순히 푸리에 변환만을 이용하여 얻은 영상인 그림 6에서 나타난 영상의 퍼짐 현상을 해결하기 위해서 본 논문에서는 STFT와 GWT의 시간-주파수 변환 기법을 이용하여 영상을 획득하였으며 이는 이러한 퍼짐 현상이 보상되어 깨

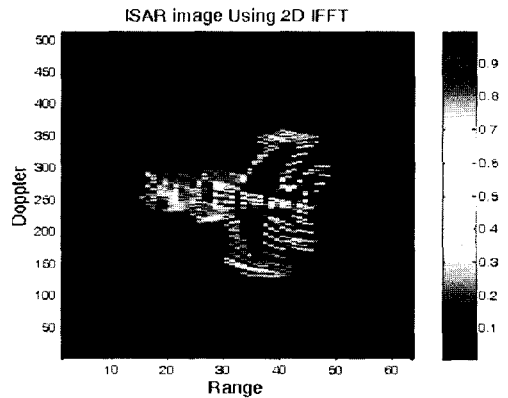


그림 6. 움직임 보상 전의 푸리에 변환을 이용한 MIG-25에 대한 ISAR 영상
Fig. 6. ISAR image of MIG-25 using Fourier transform before motion compensation.

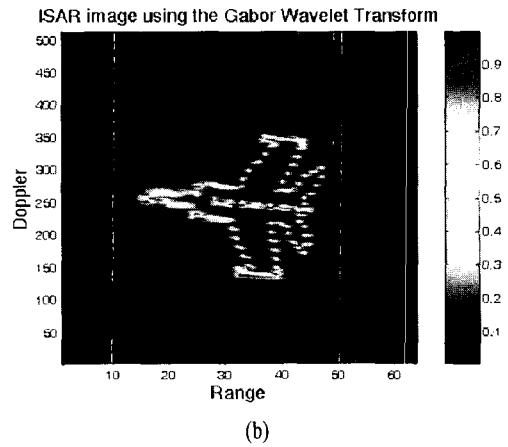
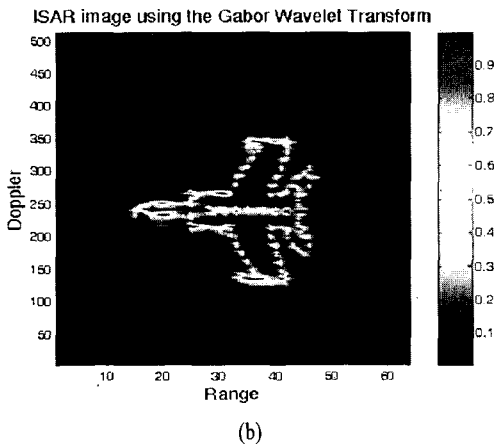
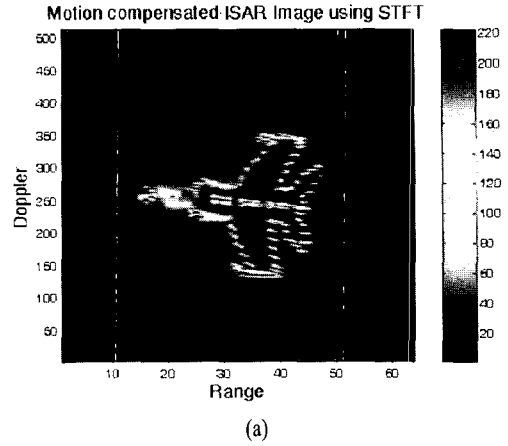
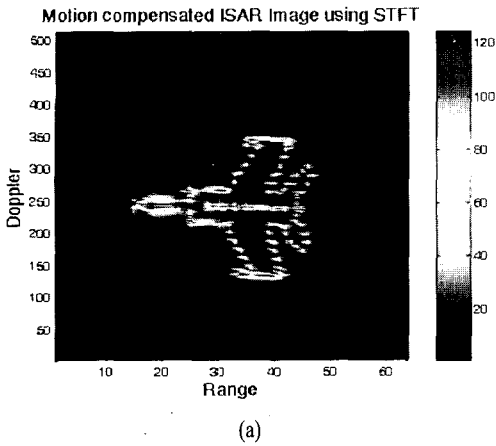


그림 7. (a) STFT, (b) GWT를 이용한 MIG-25의 ISAR 영상, 첫 번째 프레임
Fig. 7. ISAR image of MIG-25 using (a) STFT, (b) GWT, the first frame.

그림 8. (a) STFT, (b) GWT를 이용한 MIG-25의 ISAR 영상, 200 번째 프레임
Fig. 8. ISAR image of MIG-25 using (a) STFT, (b) GWT, the 200th frame.

곳한 영상을 얻을 수가 있었다. 그림 7과 그림 8은 simulated MIG-25에 대한 움직임 보상을 나타내고 있으며, 각각 영상의 첫 번째 프레임과 200 번째 프레임을 나타낸 결과이다. 여기서 (a) 그림은 STFT를 이용한 결과이고, (b) 그림은 GWT를 이용한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 영상의 퍼짐 현상이 보상되는 것을 확인할 수가 있으며 표적을 이루는 산란점이 어떻게 구성되어 있는지를 알 수 있다. 또한 영상의 해상도 면에서 본 논문에서 제시한 GWT를 이용한 결과가 STFT를 이용한 결과보다 더 뛰어난 것을 볼 수 있다.

결과적으로 본 논문에서 제시한 GWT는 움직이는 표적에 대해 움직임 보상이 완전하게 되는 것을

확인할 수 있었다. 또한 움직임 보상 기법 중에서 가장 널리 사용되는 STFT보다 구현이 용이하며 움직임 보상 면에서 해상도가 더 우수하게 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 계산 시간 면에서도 GWT가 STFT보다 4배 정도 빠르다. 여기서 알고리즘의 계산 시간을 측정하기 위해서 사용한 프로그램은 Matlab 7.0.1 버전으로 GWT의 계산 시간이 0.071초이며, STFT의 계산 시간은 0.282초이다.

IV. 결 론

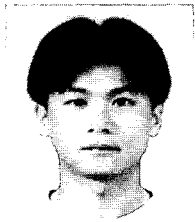
본 논문에서는 레이더 시스템에서 미지의 표적에 대한 ISAR 영상을 획득함에 있어서 표적이 움직일

경우, 표적의 움직임을 보상하는 방법에 대해서 나타내었다. 움직이는 표적에 대해 단순히 푸리에 변환만을 이용하여 표적에 대한 ISAR 영상을 얻으면 영상의 퍼짐(blurring) 현상이 나타나며, 표적을 이루는 산란점들이 어떻게 구성되어 있는지 알 수가 없다. 따라서 이러한 영상의 퍼짐에 대한 문제는 시간-주파수 변환을 이용하면 해결할 수 있다. 본 논문에서는 움직이는 표적에 대한 레이다 영상의 움직임 보상 기법들에 대해서 알아보았다. 그리고 움직이는 표적에 대한 레이다 산란 모델을 제시하였으며, 시간-주파수 변환 기법 중에서 STFT와 GWT를 구현하여 성능을 비교하였다. 본 논문에서 제시한 GWT 방법이 움직임 보상 기법에 널리 이용되는 STFT보다 해상도 면이나 계산 시간 면에서 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 이러한 성능을 보여주기 위해서 이상된 ISAR상적인 점 산란체에 대한 레이다 산란파를 생성하고 이에 대한 ISAR 영상을 획득하여 해상도 면이나 계산 시간 면에서 STFT와 GWT의 결과를 사용하였다. 또한 simulated MIG-25의 레이다 산란파에 대해서도 움직임이 보상된 ISAR 영상을 얻어서 GWT의 성능을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] L. C. Potter, D. M. Chiang, R. Carriere, and Michael J. Gerry, "GTD-based parametric model for radar scattering", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 10, Oct. 1995.
- [2] Liping Du, Guangchuan Su, "Adaptive inverse synthetic aperture radar imaging for nonuniformly moving targets", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 2, no. 3, Jul. 2005.
- [3] V. C. Chen, S. Qian, "Joint time-frequency transform for radar range-doppler imaging", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 486-499, 1998.
- [4] Victor C. Chen, "Applications of time-frequency processing to radar imaging", *Optical Engineering*, vol. 36, no. 4, Apr. 1997.
- [5] Shie Qian, *Joint Time-Frequency Analysis/Methods and Applications*, Prentice Hall PTR, 1996.
- [6] J. S. Son, Gabriel Thomas, and Benjamin C. Flores, *Range-doppler Radar Image and Motion Compensation*, Artech House, 2001.

신 승 용



2002년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: 포항공과대학교 정보통신학과 (공학석사)
 2005년 3월~현재: 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이다 신호 처리,

산란점 추출 알고리즘, 구분기

명 로 훈



1976년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 12월: 미국 Ohio State University 전자공학과 (공학석사)
 1986년 8월: 미국 Ohio State University 전자공학과 (공학박사)
 1986년 9월~현재: 한국과학기술원

전자전산학과 교수

[주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나, 이동 및 위성 통신, EMI/EMC/EMS 등