진화 프로그래밍 기반의 시간-주파수 영역 해석법을 이용한 ISAR 영상 이동보상기법

ISAR Motion Compensation using Evolutionary Programming-Based Time-Frequency Analysis

최 인 식 · 김 효 태*

In-Sik Choi · Hyo-Tae Kim*

요 약

많은 시간-주파수 영역 해석법들이 레이다 영상의 이동보상기법에 적용되어져 오고 있다. 이 논문에서는 새로운 시간-주파수 영역 해석법으로서 진화 프로그래밍을 이용한 적응 웨이브릿 변환과 적응 시간-주파수 영역 해석법을 제안하고 이들을 움직이는 표적물에 대한 2차원 레이다 영상의 이동보상기법에 적용해 본다. 제안하는 알고리즘의 타당성을 증명하기 위해서, 우리는 MIG-25와 B-727 데이터를 이용하였다. 진화 프로그래밍을 이용한 적응 웨이브릿 변환과 적응 시간-주파수 영역 해석법을 이용한 레이다 영상은 다른 시간-주파수 영역 해석법과 마찬가지로 퍼짐 현상이 제거된 깨끗한 영상을 얻을 수 있음을 보여 준다.

Abstract

Many time-frequency analysis techniques have been used for motion compensated ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) imaging. In this work, a novel time-frequency(T-F) analysis called evolutionary adaptive wavelet transform (EAWT) and evolutionary adaptive joint time-frequency(EAJTF) procedure are used for the motion compensated ISAR image. To show the validity of our algorithm, we use simulated MIG-25 and Boeing 727(B-727) ISAR data. From the constructed ISAR image using EAWT and EAJTF, we show that our algorithm can obtain a clear motion compensated ISAR image such as other time-frequency analysis techniques.

Key words : Motion Compensation, Evolutionary Programming, Time-Frequency Analysis

Ⅰ. 서 론

고해상도의 ISAR 영상은 산란점에 대한 2차원 거리 정보와 크기 정보를 제공하므로, 표적인식에 효과적으로 이용될 수 있다. 왜냐하면, 2차원 ISAR 영상은 1차원 Range Profile에 비해 표적물에 대한 더욱 많은 정보를 지니고 있기 때문이다. 표적물이 일정한 회전 움직임만을 가지고 있다면 우리는 2차원 퓨리에 변환을 이용하여 쉽게 ISAR 영상을 얻을 수 있다. 하지만, 실제 환경에서 움직이는 표적물은 가속도 운동을 하거나 임의의 방향으로 선회하는 운동을 가지게 된다. 따라서, 이동보상기법(Motion compensation)을 적용하지 않으면 우리는 복잡한 운동을 하는 표적물에 대해서 깨끗한 영상을 얻을 수가 없다. Victor C. Chen은 이러한 이동보상기법을 수행하기 위해 시간-주파수 영역 해석법(time-frequency analysis)를 이용하였다[1],[2]. 퓨리에 변환을 시간-주파수 영역 해석법으로 대체함으로써, 2차원의 range-Do-

LG 전자기술원 Mobile Multimedia 연구소(Mobile Multimedia Lab., LG Electronics Institute of Technology)
*포항공과대학교 전자전기공학과(Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Pohang Univ. of Science and Technology)
· 논 문 번 호 : 20030710-100
· 수정완료일자 : 2003년 8월 27일

ppler 영상 대신에 time-range-Doppler에 대한 3차원 데이터를 얻을 수가 있다. 시간에 따라 주파수가 임의로 변화하는 non-stationary 신호를 해석하기 위해서 많은 시간-주파수 영역 해석법이 개발되어졌다. 잘 알려진 시간-주파수 영역 해석법에는 Short-time Fourier Transform(STFT), Wigner-Ville Distribution(WVD), continuous wavelet transform(CWT), adaptive wavelet transform(AWT) 등이 있다. STFT는 가장 기본적인 시간-주파수 영역 해석법이지만 해상도 문제를 가지고 있으며, WVD는 STFT의 해상도 문제를 해결했지만, ghost 또는 cross-term 문제를 가지고 있다. CWT는 다중 해상도(multiresolution) 성질을 가지고 있지만, 여전히 시간-주파수 격자가 유연하지 못하다는 단점을 가지고 있다. AWT는 CWT보다 유연한 시간-주파수 격자를 가질 뿐 아니라, cross-term 문제나 해상도 문제가 존재하지 않으므로 지금까지 개발된 시간-주파수 영역 해석법 중 가장 우수한 방법이라고 할 수 있다. AJTF(Adaptive Joint Time-Frequency) 방법[3]은 AWT와 거의 유사하나 기저함수를 Gaussian wavelet 함수 대신 chirplet 함수를 이용한다. 이 논문에서는 AWT와 AJTF 방법을 발전시킨 Evolutionary AWT(EAWT)와 Evolutionary AJTF(EAJTF) 방법을 소개하고 이를 ISAR 영상의 이동보상기법에 적용한다.

Ⅱ. 이론 및 실험결과

2-1 Evolutionary Adaptive Wavelet Transform(EAWT)을 이용한 이동보상기법

EAWT는 기존의 AWT 알고리즘에서 사용하는 Fast Fourier Transform(FFT)과 양분 탐색법(bisection search) 대신에 진화 프로그래밍(Evolutionary Programming)[4],[5]을 이용하여 시간-주파수 파라미터와 그 크기를 추출한다. 기존의 AWT 알고리즘에서 시간 영역의 측정 신호 $s(t)$는 다음과 같이 표현된다[6].

$$s(t)=\sum_{m=1}^{\infty}B_m h_m(t) \tag{1}$$

여기서,

$$h_m(t)=(\pi\sigma_m^2)^{-1/4}\cdot\exp-\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_m^2}\exp(j2\pi f_m t)$$

이다. 기존의 AWT 방법에서는 표준편차 σ_m과 시간-주파수 성분의 위치(t_m, f_m)와 크기 B_m은 다음의 식 (2)와 같이 $h_m(t)$가 $s_{m-1}(t)$와의 닮음 정도가 최대가 되도록 결정된다.

$$|B_m|^2=\max_{t_m,f_m,\sigma_m}\left|\int s_{m-1}(t)h_m^*(t)dt\right|^2 \tag{2}$$

여기서, $s_0(t)=s(t)$이며, 만약 m이 1보다 크면 $s_m(t)$는 $s_{m-1}(t)$를 $h_m(t)$에 대해 직교 투영시킨 후의 나머지가 된다. 기존의 AWT 알고리즘에서는 위의 식 (2)의 근을 고속 퓨리에 변환(FFT)과 양분 탐색법(bisection search)을 이용하여 구하였다. 하지만, 제안하는 EAWT 방법은 진화 프로그래밍을 이용한 최적화 방법을 이용하여 근을 구한다. EAWT의 구체적인 알고리즘은 아래와 같다.

Step 1. 먼저 반복 횟수를 나타내는 인수인 m을 1이라 두고 시간 영역에서의 측정 데이터를 $s_{m-1}(t_k), k=1,2,\cdots,K$로 정의한다. 여기서 K는 시간 샘플링의 갯수이다.

Step 2. m번째 반복 횟수에서의 비용함수(cost function)를 아래 식 (3)과 같이 정의하고 그 비용함수를 최소로 만드는 상수 $(t_m, f_m, \sigma_m, B_m)$를 구한다.

$$J_m=\sum_{k=1}^{K}|s_{m-1}(t_k)-B_m h_m(t_k)|^2 \tag{3}$$

진화 프로그래밍의 서브루틴에서 개체 벡터는 4개의 구성요소로 이루어진다. 우리는 J_m의 최소값을 모르기 때문에 미리 정해진 실행 시간이 초과하면 자동적으로 진화 프로그래밍의 서브루틴을 종료시킨다.

Step 3. Step 2에서 추출된 신호의 성분들을 $s_{m-1}(t)$로부터 빼준 후, $s_m(t)$을 다음과 같이 구한다.

$$s_m(t)=s_{m-1}(t_k)-B_m h_m(t_k), k=1,\cdots,K \tag{4}$$

Step 4. $m=m+1$, 만약 임계치 γ값이 충분히 커지지 않았다면, Step 2로 되돌아가고, 아니면 종료한다. 이때

$$\gamma=\sum_{m=1}^{M}|B_m|^2/\sum_{k=1}^{K}|s(t_k)|^2 \tag{5}$$

이며, 여기서 M은 최대 반복 횟수이다.

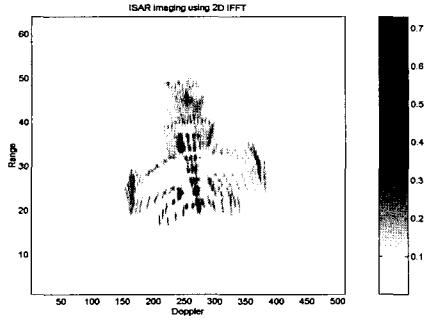

그림 1. 퓨리에 변환을 이용한 MIG-25에 대한 ISAR 영상

Fig. 1. ISAR image of MIG-25 data using Fourier transfrom.

위와 같은 과정으로 원하는 개수의 파라미터값을 모두 추출하면 아래 식을 이용하여 시간-주파수 영역 상에서의 2차원 영상 Adaptive spectrogram(ADS)은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$ADS(t,f) = \sum_{m=1}^{M} |B_m|^2 \exp\left[-\frac{(t-t_m)^2}{\sigma_m^2} - (2\pi\sigma_m)^2 (f-f_m)^2 \right] \quad (6)$$

제안한 방법에 의한 이동보상기법을 증명하기 위해서 우리는 참고문헌 [6]에서 사용한 MIG-25 ISAR 데이터를 사용한다. 이 데이터의 주파수 샘플링 수는 64이며 시간 샘플링 수는 512이다. 또한 이 비행기의 운동은 10 도/초의 회전성분만을 가지고 있다고 가정한다. 이러한 데이터를 이동보상기법을 적용하지 않고 단순히 퓨리에 변환만을 이용하면 아래 그림 1과 같이 영상에 퍼짐(blurring) 현상이 나타남을 알 수 있다.

이와 같은 퍼짐 현상은 시간-주파수 영역 해석법을 이용하면 없앨 수가 있다. 이 논문에서는, 많은 시간-주파수 영역 해석법 중 기존의 AWT와 제안하는 EAWT를 이용하며, $\gamma = 0.8$로 선택한다.

그림 2와 3은 총 9개의 프레임 중에서 1번째와 5번째 프레임을 AWT를 이용하여 이동보상기법을 수행한 결과이다.

그림 4와 5는 같은 프레임에 대하여 EAWT를 이용하여 이동보상기법을 수행한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 AWT를 이용하여 얻은 영상보다 EAWT를 이용한 영상이 더욱 깨끗하다는 것을 알 수 있다.

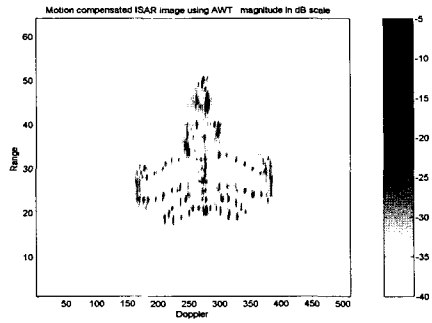

그림 2. AWT를 이용한 MIG-25 ISAR 영상, 첫 번째 프레임

Fig. 2. ISAR image of MIG-25 data using AWT, the first temporal frame.

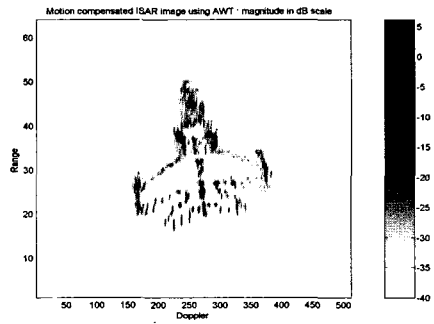

그림 3. AWT를 이용한 MIG-25 ISAR 영상, 다섯 번째 프레임

Fig. 3. ISAR image of MIG-25 data using AWT, the fifth temporal frame.

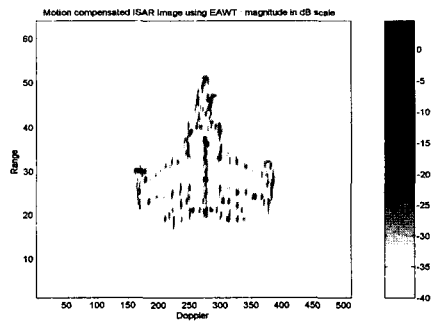

그림 4. EAWT를 이용한 MIG-25 ISAR 영상, 첫 번째 프레임

Fig. 4. ISAR image of MIG-25 data using EAWT, the first temporal frame.

2-2 Evolutionary Adaptive Joint Time-Frequency (EAJTF) 방법을 이용한 이동보상기법

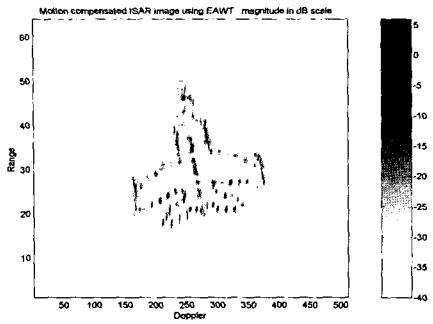

그림 5. EAWT를 이용한 MIG-25 ISAR 영상, 다섯 번째 프레임

Fig. 5. ISAR image of MIG-25 data using EAWT, the fifth temporal frame.

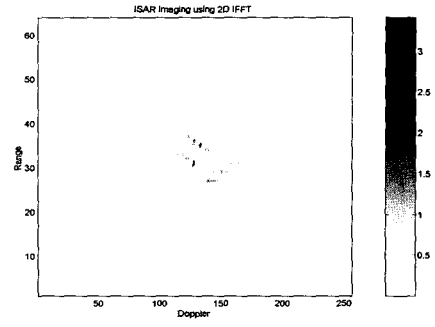

그림 6. 퓨리에 변환을 이용한 B-727에 대한 ISAR 영상

Fig. 6. ISAR image of B-727 data using Fourier transform.

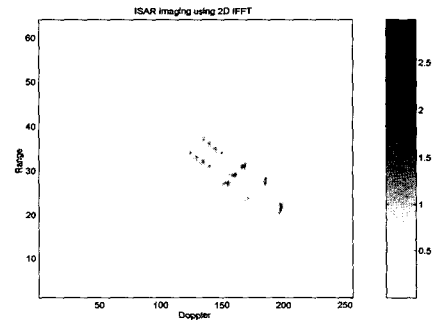

그림 7. EAJTF 방법을 이용하여 이동보상기법을 수행한 결과로 얻어진 B-727에 대한 ISAR 영상

Fig. 7. ISAR image of B-727 after motion compensation using EAJTF.

이번 장에서 사용되는 이동보상기법은 2-1장에서 제시한 EAWT 알고리즘과 거의 흡사하지만, 기저함수(basis function)로 아래와 같은 chirplet 함수를 사용한다[3].

$$h_p(t) = \exp\left[-j2\pi\left(f_{D_0}t + \frac{1}{2}f_{D_1}t^2 + \cdots\right)\right] \quad (7)$$

기존의 AJTF에서는 위의 기저함수에서 파리미터 $(f_{D_0}, f_{D_1}, \cdots)$을 다음과 같은 식을 만족하도록 exhaustive search 방법을 이용하여 구해낸다.

$$\langle f_{D_0}, f_{D_1}, \cdots \rangle = \max\left| \int s(t)\, h_p^*(t)\, dt \right| \quad (8)$$

하지만, 제안하는 EAJTF 알고리즘은 기존의 AJTF 방법에서 사용한 exhaustive search 방법 대신에 진화 프로그래밍을 이용한 최적화를 통하여 파라미터들 $(f_{D_0}, f_{D_1}, \cdots)$을 구해낸다.

EAJTF를 통한 이동보상기법에서는 먼저 첫 번째 산란점에 대한 파라미터를 추출한 후, 그 산란점에 의한 위상 정보를 예측하고 그 공액(conjugate)을 곱해준다. 다음으로 두 번째 산란점에 대한 파라미터를 추출한 후, 표적물이 움직이는데 걸리는 시간과 회전각과의 관계를 이용하여 회전각을 계산하고 2차항에 의한 위상 오차를 보상하기 위한 리포맷팅을 실행한다. 회전각과 시간의 관계는 다음과 같다[6].

$$\theta(t) = \Omega t + \frac{1}{2}\gamma t^2 \propto f_{D_{12}}t + \frac{1}{2}f_{D_{12}}t^2 \quad (9)$$

그림 6은 B-727 항공기에 대한 ISAR 영상이다. 이 데이터의 중심주파수는 9 GHz이며, 대역폭은 150 MHz이다. 이 영상은 항공기의 중심에서 멀어질수록 퍼짐 현상(blurring)이 매우 심함을 알 수 있다.

그림 7은 위에서 제시한 EAJTF 절차를 이용하여 이동보상기법을 수행한 결과로 얻어진 ISAR 영상이다. 그 결과 영상의 퍼짐 현상이 거의 사라졌다는 것을 알 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 EAWT와 EAJTF 방법을 이용한 레이다 영상의 이동보상기법에 대해 설명하였다. 제안하는 EAWT와 EAJTF 방법은 각각 양분 탐색 알고리즘과 exhaustive search 방법 대신에 진화 프로그래밍을 이용한 최적화를 통하여 원하는 파라미터값을 추출하는 알고리즘이다. 제안하는 알고리즘의 타당

성을 보여주기 위해서 우리는 MIG-25와 B-727에 대한 시뮬레이션 데이터를 이용하였다. 제안하는 알고리즘은 ISAR 영상의 이동보상기법 외에도 스텔스 디자인에 있어서의 Radar Cross Section(RCS) 감소, Compact Range내에서의 산란점 제거, 공진에 의한 ISAR 영상의 퍼짐 현상 해결[7] 등 여러 가지 다른 경우에 대해서도 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] V. C. Chen, S. Qian, "Joint time-frequency transform for radar range-doppler imaging", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 486-499, Apr. 1998.

[2] V. C. Chen, "Reconstruction of inverse synthetic aperture radar image using adaptive time-frequency wavelet transform", *SPIE Proceedings on Wavelet Applications*, vol. 2491, pp. 373-386, 1995.

[3] H. Ling, Y. Wang and V. C. Chen, "ISAR image for mation and feature extraction using adaptive joint time-frequency processing", *SPIE Proceedings on Wavelet Applications*, vol. 3078, pp. 424-432, 1997.

[4] In-Sik Choi, Hyo-Tae Kim, "Two-dimensional evolutionary programming-based CLEAN", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 369-373, Jan. 2003.

[5] In-Sik Choi, Hyo-Tae Kim, "One-dimensional evolutionary programming-based CLEAN", *IEE Electronics Letters*, vol. 37, no. 6, pp. 400-401, Mar. 2001.

[6] V. C. Chen, H. Ling, *Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis*, Artech House, Boston, MA, 2002.

[7] L. C. Trintinalia, Hao Ling, "Joint time-frequency ISAR using adaptive processing", *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. 45, no. 2, pp. 221-227, Feb. 1997.

최 인 식

1998년 2월: 경북대학교 전자전기공학과 (공학사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2003년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2003년 4월~현재: LG전자기술원 Mobile Multimedia 연구소, 선임연구원
[주 관심분야] 적응 신호처리, 멀티미디어 신호처리, 레이더 표적인식, 진화 알고리즘 응용

김 효 태

1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월: 미국 오하이오 주립대학 (공학박사)
1986년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
[주 관심분야] 전자파 산란해석, stealth 설계, RCS 예측 및 측정, 레이다 신호처리, EMI/EMC, 안테나 설계 및 해석