

논문 2012-50-3-24

SAR에 적용된 SVD-Pseudo Spectrum 기술

(SAR Image Processing Using SVD-Pseudo Spectrum Technique)

김 빈 희*, 공 승 현**

(Binhee Kim and Seung-Hyun Kong)

요 약

본 논문에서는 SAR (Synthetic Aperture Radar) 영상에 SVD (Singular Value Decomposition) - Pseudo Spectrum 알고리즘을 적용하고 그 성능을 기존 알고리즘과 비교한다. 이 논문의 목적은 SAR 영상의 해상도 및 목표물 분해능을 높이고자 하는 것이다. 본 논문에서는 신호 성분으로 이루어진 Hankel Matrix와 SVD (Singular Value Decomposition) 방법을 사용하여 잡음에 강인하고 sidelobe이 적으며 스펙트럼 추정에서 해상도를 높인 SVD-Pseudo Spectrum 방법을 제안하였다. 또한 분해될 목표물을 모델링하여 알고리즘의 성능을 분석하고 SVD-Pseudo Spectrum 방법이 기존의 푸리에 변환 기반 방법과 고해상도 기술 기반의 MUSIC 방법보다 더 좋은 성능을 가짐을 보인다.

Abstract

This paper presents an SVD(Singular Value Decomposition)-Pseudo Spectrum method for SAR (Synthetic Aperture Radar) imaging. The purpose of this work is to improve resolution and target separability of SAR images. This paper proposes SVD-Pseudo Spectrum method whose advantages are noise robustness, reduction of sidelobes and high resolution of spectral estimation. SVD-Pseudo Spectrum method uses Hankel Matrix of signal components and SVD (Singular Value Decomposition) method. In this paper, it is demonstrated that the SVD-Pseudo Spectrum method shows better performance than the matched filtering method and the conventional super-resolution based multiple signal classification (MUSIC) method in SAR image processing. The targets to be separated are modeled, and this modeled data is used to demonstrate the performance of algorithms.

Keywords: SAR Imaging, Super Resolution Technique, Singular Value Decomposition, Pseudo Spectrum

I. 서 론

합성 개구면 레이더 (이하 SAR, Synthetic Aperture Radar) 는 목표물을 탐지하고 구별하는 것에서부터 넓은 지형을 지도화하는 것까지 많은 범위에서 응용되고 있다^[1~2]. SAR는 경로를 따라 가면서 일정 주기로 펄스를 전송하고 그것이 지면에 반사되어 되돌아오는 신호를 수신한다. 수신한 신호를 가공하여 지면의

고해상도 2차원 영상 또는 3차원 영상을 얻을 수 있다. SAR 영상의 해상도는 거리 방향 해상도와 방위각 해상도로 이루어지는 분해 셀 (resolution cell) 의 크기로 결정된다^[3].

SAR 영상은 기본적으로 푸리에 변환 및 보간법으로 얻어진다. 그러나 분해 셀 내에서 목표물을 구분하기 위해서는 푸리에 변환 이외에 고해상도 기술이 적용되어야 한다^[4~6]. 본 논문에서는 분해 셀 내에서 목표물 분해능이 뛰어난 SVD (Singular Value Decomposition) - Pseudo Spectrum 방법을 SAR에 적용한다. 기존 연구 중, 부분공간 기반 고해상도 기술 중 하나인 annihilating filter method (AFM) 와 Cadzow denoising 알고리즘이 목표물 분해 문제에 적용되어 좋은 성능을 보인 연구 결과가 있다. 그러나 AFM 방식은 다항식의 근을 구할 때 주파수 탐색 범위를 한정할 수

* 학생회원, ** 정회원, KAIST 조천식녹색교통대학원 (KAIST, CCS Graduate School for Green Transportation)

※ 본 연구는 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발의 연구비지원 (06교통핵심A03)에 의해 수행되었습니다.

접수일자:2012년6월21일, 수정완료일:2013년2월16일

없는 반면 SVD-pseudo spectrum 방식은 탐색하는 주파수 범위를 한정할 수 있다. 그렇게 때문에 탐색 주파수 범위를 알고 있는 SAR 영상처리의 경우, SVD-Pseudo Spectrum 방식이 AFM 방식보다 SAR 영상처리에 더 적합하다^[7].

본 논문에서는 SVD-pseudo spectrum 방식을 SAR 영상 처리에 적용하여 분해 셀 내에서의 목표물 분해능을 개선하였다. SVD-pseudo spectrum 방식의 성능은 2D 영상 모델을 통해 검증되었으며 푸리에 변환 기반의 방식들 및 기존 고해상도 기술보다 더 나은 성능을 보였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II절에서는 SAR 영상처리에 대해 설명하며, III절에서는 SVD-pseudo spectrum 알고리즘에 대해 설명한다. 시뮬레이션을 통한 성능 검증 결과가 IV절에서 다루어지며, V절에서는 논문의 결론을 다룬다.

II. SAR 영상 처리

그림 1에 SAR 시스템의 기하학적 모델이 나타나고 있다. SAR 시스템을 탑재한 플랫폼은 y 방향으로 이동하고 합성 개구면의 시간은 T_{ob} 이다. SAR 플랫폼의 높이는 h 이며, 분해 셀은 거리 방향 해상도와 방위각 방향 해상도에 의해 결정된다.

거리 방향 해상도는 송신하는 펄스 특성에 의해 결정되고 방위각 방향 해상도는 안테나 크기 및 레이더의 파장에 의해 결정되며 합성 개구면에 의해 그 해상도가 향상될 수 있다.

SAR 영상 처리는 거리 방향 처리, Range Cell Migration Correction (RCMC), 방위각 방향 처리 순서로 이루어진다^[8-10]. SAR 영상 처리에는 여러가지 방법이 있는데, 푸리에 변환 기반 SAR 영상 처리가 있고 푸리에 변환 기반 처리의 성능 개선을 위해 개발되고 있는 고해상도 기반 처리가 있다.

그림 2에서 나타난 것과 같이 푸리에 변환 기반 SAR 영상 처리에는 Matched Filtering 방법이 있고, Deramping 방법이 있다. Matched Filtering 방법은 각 방향의 처리에서 푸리에 변환 후 Matched Filter를 거친 후에 역 푸리에 변환을 한다. Deramping 방법은 각 방향의 처리에서 deramping 한 후 푸리에 변환을 한다.

고해상도 기반 SAR 영상 처리에는 여러 가지 방법이 있지만^[11] 본 논문에서는 Multiple Signal Classification (MUSIC) 방법^[12-13]과 SVD-pseudo

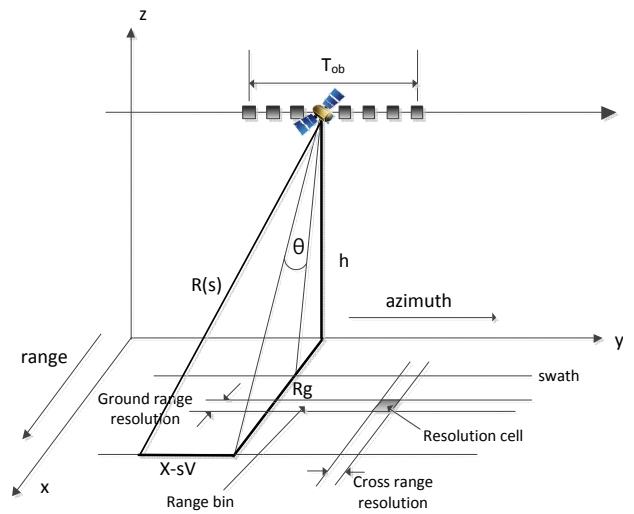


그림 1. SAR 시스템의 기하학적 모델
Fig. 1. A geometric model of the SAR system.

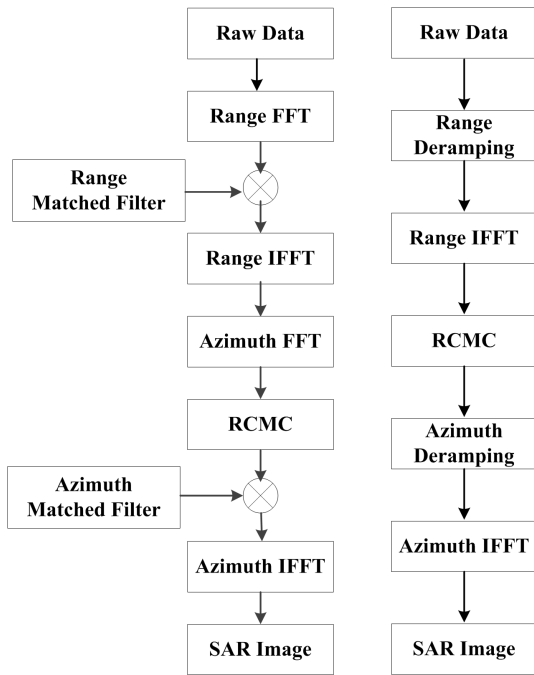
spectrum 방법이 비교되었고, 각 고해상도 기반 처리 방식이 SAR 영상에 적용되는 방법이 제안되었다. 그 방식이 그림 3에 나타내어져 있다. MUSIC이나 SVD-pseudo spectrum 방법은 처리 후에 위상 정보를 잃어버린다. 그렇기 때문에 일반적인 SAR 영상 처리에 이용될 때 거리 방향 처리를 하고 나면 위상 정보를 잃어버리기 때문에 다음 처리를 할 수가 없다. 그리하여 본 논문에서는 그림 3에서 보이는 것처럼 거리 방향 처리를 할 때, 위상 정보를 가지고 있는 deramping 결과를 고해상도 기반 처리 결과를 가지고 필터링한다. 다시 말해, 2D 데이터에서 같은 위치의 데이터에 대해 고해상도 기반 처리 결과가 어떠한 역치 이상을 넘으면 deramping 결과의 그 값을 취하고 역치 이상을 넘지 않으면 0으로 넣는다. 그리하면 sidelobe이 줄어들어 mainlobe이 더 명확해진다. MUSIC과 SVD-Pseudo Spectrum, 두 방식이 SAR 영상 처리에 동일한 방식으로 적용될 수 있다.

III. SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘

SVD-pseudo spectrum 알고리즘은 거리 방향 처리와 방위각 방향 처리에 각각 적용된다. 본 절에서는 SVD-pseudo spectrum 알고리즘에 대해 설명하고 MUSIC 알고리즘과의 차이점에 대해 설명한다.

1. SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘

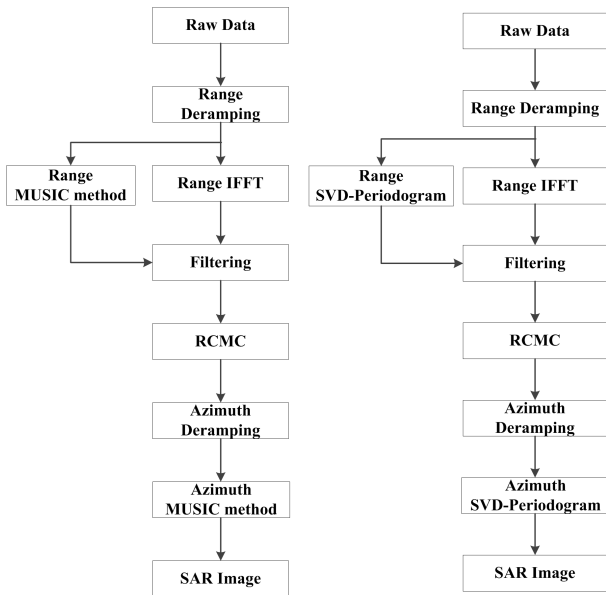
SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘은 복소 주기함수로 이루어진 측정값들로부터 그 파라미터의 스펙트럼을 추



(a) Matched Filtering Method (b) Deramping Method

그림 2. 푸리에 기반의 SAR 영상 처리

Fig. 2. Fourier-based SAR image processing.



(a) MUSIC method (b) SVD-pseudo spectrum method

그림 3. 고해상도 기반의 SAR 영상 처리

Fig. 3. Super-resolution based SAR image processing.

정하는 데에 사용된다. 그러므로 이 알고리즘이 SAR 영상 처리에 적용될 때에는 수신된 chirp 신호를 deramping하여 파라미터의 스펙트럼을 추정하는 문제로 변환한 후에 적용되어야 한다.

샘플된 신호 $X[n]$ 이 K 개의 복소 주기함수로 이루어져 있다고 하면,

$$X[n] = \sum_{i=0}^{K-1} c_i e^{j\omega_i T_i n} \quad (1)$$

가 되며, c_i 는 신호의 크기를, $e^{j\omega_i T_i n}$ 는 복소 주기함수를, n 은 샘플의 순서 번호를 나타낸다.

SVD-Pseudo Spectrum 방법은 아래와 같이 수행된다. 우선 수신된 신호로 M by N Hankel 행렬을 아래와 같이 구성한다.

$$A = \begin{bmatrix} X[0] & X[1] & \dots & X[N-1] \\ X[1] & X[2] & \dots & X[N] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X[M-1] & X[M] & \dots & X[M+N-2] \end{bmatrix} \quad (2)$$

추정 신호 $X[n]$ 의 개수는 K 보다 훨씬 커야 한다. 다음으로, 행렬 A 의 특이값 분해 (singular value decomposition, SVD)를 수행한다.

$$A = USV^T \quad (3)$$

부분 공간 기반 알고리즘의 원리에 따르면, 위 식 (3)에서 V 는 두 부분공간으로 구분될 수 있다. 하나는 신호 부분공간 D , 그리고 다른 하나는 잡음 부분공간 N 이다. 잡음 부분공간 N 의 기저 벡터를 구성하고 아래 식을 수행하면 신호 성분의 주파수에서 peak 값을 가진다.

$$\hat{R}(\omega) = \frac{1}{a^*(\omega)N^*Na(\omega)} \quad (4)$$

식 (4)에서

$$a(\omega) = [e^{j\omega_i T_i 0}, \dots, e^{j\omega_i T_i (N-1)}] \quad (5)$$

을 의미하며 N 은 V 의 두 부분공간 중 잡음 부분공간의 의미하는 행렬이다.

2. MUSIC 알고리즘과의 비교

SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘은 MUSIC 알고리즘과 상당히 유사하지만 성능에 큰 차이가 있다. 성능에 차이가 나는 이유는 그림 4로부터 설명 가능하다. Pseudo-Spectrum 알고리즘을 수행할 때, 신호 성분 주파수에서 peak를 가지려면 분모가 0에 더 가까워야 한다. 그러기 위해서는 식 (4)에서의 $a(\omega)$ 벡터는 잡음 부분공간의 벡터들과 직교해야 한다. 세 가지 주파

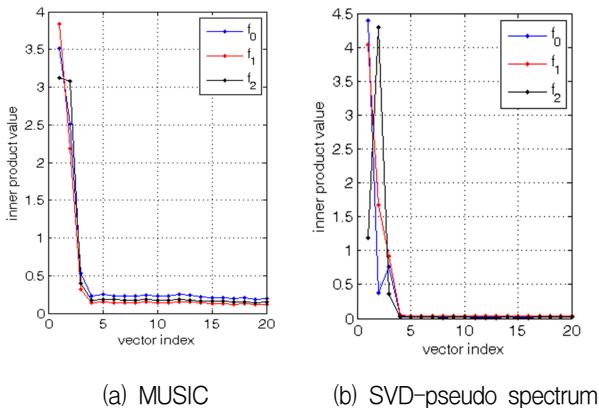


그림 4. 신호 벡터와 A 행렬의 기저벡터 내적 그래프
Fig. 4. Graph of inner product between signal vector and base vector of A matrix.

수 성분을 가지고 있는 신호에 대하여 MUSIC의 방법과 SVD-Pseudo Spectrum 방법으로 A 행렬을 구성하여 잡음 벡터 성분과 $a(\omega)$ 와의 내적 값을 그림 4에 나타내어 보았다. MUSIC에서는 covariance 행렬로 A 행렬을 구성하고, SVD-Pseudo Spectrum 방법에서는 Hankel 행렬로 A 행렬을 구성한다. 그림 4에서 보이는 것과 같이 vector index가 3까지는 신호성분을 포함하고 있기 때문에 내적 값이 높다. vector index 4부터 잡음 벡터 성분이라 볼 수 있는데, MUSIC 방법에서의 내적 값이 SVD-Pseudo Spectrum 방법에서의 내적 값보다 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 이유로 SVD-Pseudo Spectrum 방법이 MUSIC 방법보다 좋은 성능을 가진다.

IV. 실험 및 결과

SVD-Pseudo Spectrum의 성능을 1D 시뮬레이션과 2D 시뮬레이션을 통하여 검증하였고, 그 성능을 푸리에 변환 방식 및 고해상도 기술 중 하나인 MUSIC과 비교하였다.

1. 1D 시뮬레이션

그림 5 및 그림 6에서 1D 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 샘플링 주파수가 200Hz이고, 총 데이터 수집 시간은 0.1초이며 20Hz, 35Hz, 그리고 37Hz 주파수 성분이 포함되어 있는 신호를 가정하였다. 데이터 수집 시간이 0.1초일 경우, FFT의 주파수 해상도는 10Hz가 된다. 10Hz 이상의 간격으로 떨어져 있는 주파수 성분과 10Hz 미만의 간격으로 떨어져 있는 주파수 성분에

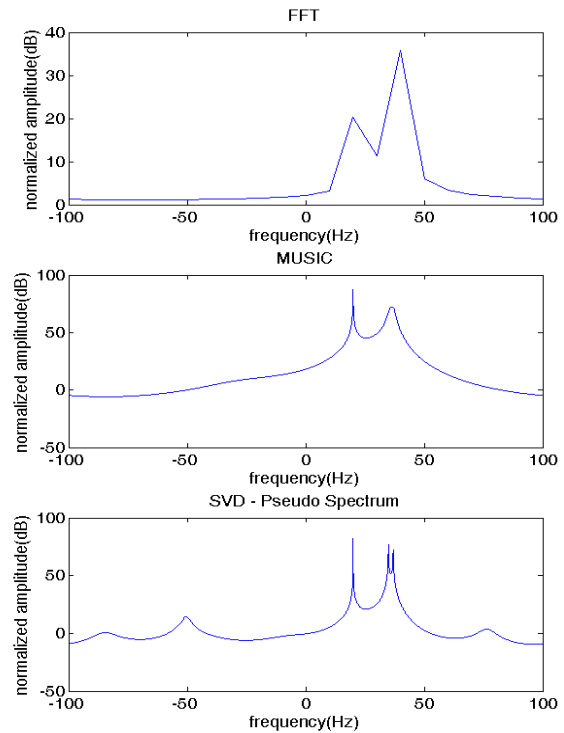


그림 5. 1D 주파수 추정
Fig. 5. Result of 1D frequency estimation.

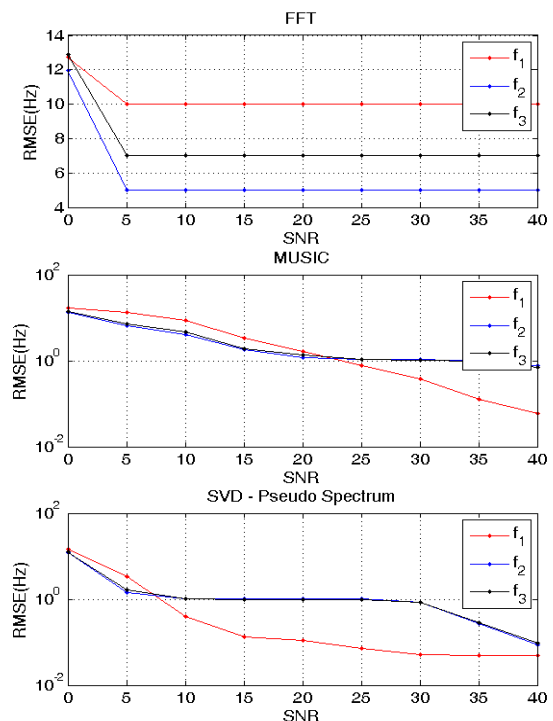


그림 6. 1D 주파수 추정의 RMSE
($f_1 = 20\text{Hz}$, $f_2 = 35\text{Hz}$, $f_3 = 37\text{Hz}$)
Fig. 6. RMSE (Root Mean Square Error) of 1D frequency estimation.
($f_1 = 20\text{Hz}$, $f_2 = 35\text{Hz}$, $f_3 = 37\text{Hz}$)

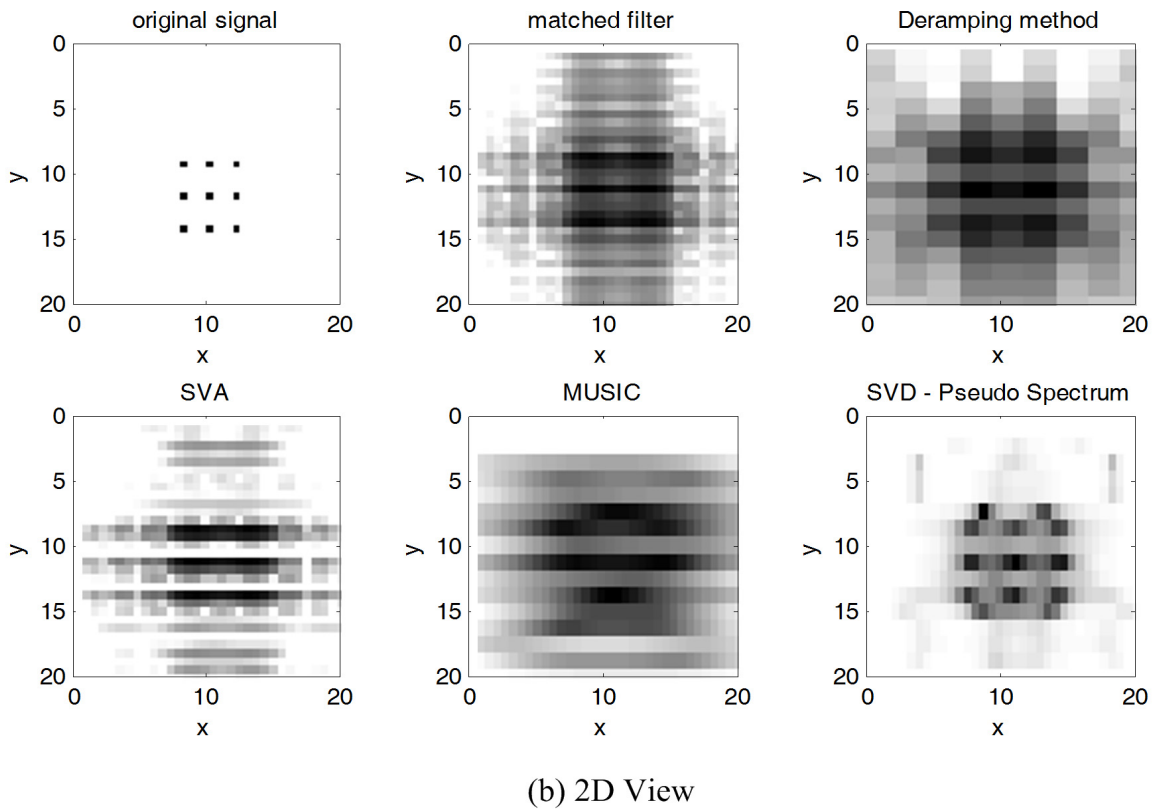
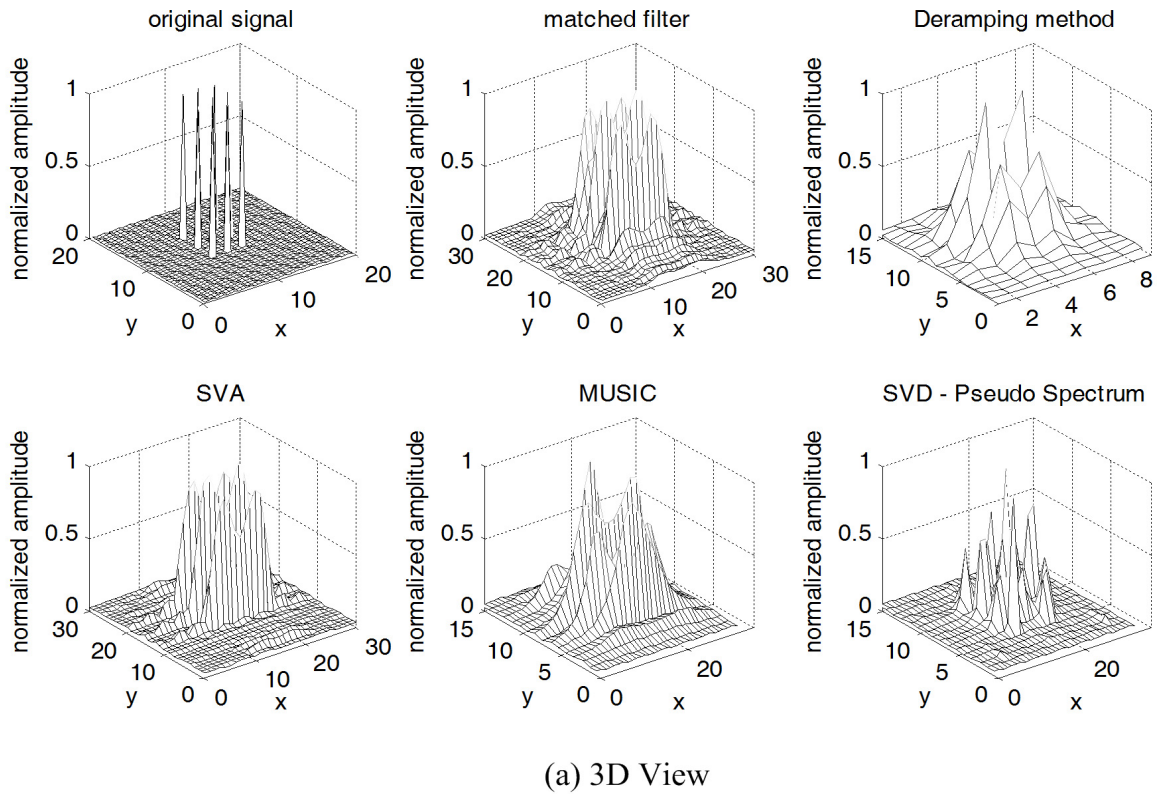


그림 7. 2D 주파수 추정 결과
 Fig. 7. Result of 2D frequency estimation.

대한 결과를 각 기술에 대해 비교하기 위하여 20Hz, 35Hz, 그리고 37Hz 주파수 성분이 포함되어 있는 신호를 가정하였다. 그림 5는 SNR이 40dB일 때, 각 알고리즘이 신호를 추정된 결과를 보여주고 있다.

SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘의 신호 분해능이 가장 뛰어난 것을 볼 수 있다.

그림 6은 SNR에 따른 주파수 Root Mean Square Error (RMSE)를 보여주고 있다. 그림에서 보이는 것과 같이 FFT는 총 데이터 수집 시간에 따른 주파수 간격의 제한 때문에 어느 이상 RMSE가 줄어들 수 없다. III의 2절에서 언급한 것과 같이 MUSIC에 비해서 SVD-Pseudo Spectrum의 주파수 추적 성능이 뛰어난 것을 볼 수 있다.

2. 2D 시뮬레이션

그림 7은 2D 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션은 푸리에 변환 방식인 Matched Filter 방식, Deramping 방식, 그리고 Spatially Variant Apodization (SVA) 방식^[14~15]과 고해상도 기술인 MUSIC 방식 및 SVD-Pseudo Spectrum 방식이 비교되었다.

원신호 (original signal)는 본 시뮬레이션에서 사용된 목표물의 실제 위치를 모델링 한 것이다. 본 목표물에 대하여 SAR를 이용한 다양한 기술로 이미지 처리를 하였을 때 그림 7의 (a)는 같은 신호에 대한 3D view를, (b)는 같은 신호에 대해 2D view를 보여주고 있다. 푸리에 변환 기반 방식 (Matched Filter 방식, Deramping 방식, SVA 방식)은 앞에서 언급한 바와 같이 어느 일정 bin 이상 해상도를 가지지 못하며 MUSIC 또한 SVD-Pseudo Spectrum 방식에 비해 성능이 떨어진다. 원 신호와 비교하였을 때, SVD-Pseudo Spectrum 방식이 목표물을 가장 잘 분해하며 sidelobe이 적은 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 해상도 높은 주파수 추정이 가능한 SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘을 SAR 영상 처리에 적용하고 그 성능을 기존 알고리즘과 비교하였다. 푸리에 변환 기반 방식은 총 데이터 수집 길이에 따라 주파수 간격이 제한되기 때문에 일정 이상 분해할 수 없는 반면에 고해상도 기술은 더 높은 해상도로 분해 가능하다. 그리하여 SVD-Pseudo Spectrum 알고리즘은 SAR 영상 처리에 있어서 기존 푸리에 변환 기반 방식의

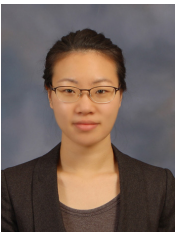
matched filter 방식, deramping 방식, 그리고 SVA 방식에 비해 좋은 성능을 보인다. 또한 기존 고해상도 기반의 MUSIC 방식에 비해서도 좋은 성능을 보인다.

참 고 문 헌

- [1] Ian G. Cumming, Frank H.Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data, algorithm and implementation", *Artech House*, 2005.
- [2] Mehrdad Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms", John Wiley&Sons,Inc 1999.
- [3] 광영길, "위성 탑재 영상 레이다 기술 동향", *대한 전자공학회, 전자공학회지*, 제 23권 제 11호 (통권 제 282호) 2007. 11, page(s): 61-74
- [4] Stuart R. Degraaf, "SAR Imaging via Modern 2-D Spectral Estimation Methods", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 7, No.5, May 1998.
- [5] E.Yadin, D.Olmar, O.Oren, and R.Nathansohn, "SAR Imaging using a Modern 2D Spectral Estimation Method", *Radar Conference 2008*.
- [6] Zhaoqiang Bi, Jian Li, and Zheng-she Liu, "Super Resolution SAR Imaging via Parametric Spectral Estimation Methods", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.35, No.1, Jan.1999.
- [7] B.Kim, A.Muchkaev, and S.Kong "SAR Image Processing Using Super Resolution Spectral Estimation with Annihilating Filter", 2011 *AP SAR*, Seoul, Korea, Sep.2011.
- [8] David C. Munson, Robert L. Visentin, "A Signal Processing View of Strip-Mapping Synthetic Aperture Radar", *IEEE Transactions on Acoustics*, vol. 37, No. 12, Dec. 1989.
- [9] Bin Liu, Kaizhi Wang, Xingzhao Liu, and Wenxian Yu, "Range Cell Migration Correction Using Texture Mapping on GPU", *ICSP2010 Proceedings*
- [10] Kaizhi Wang and Xingzhao Liu, "Adaptive SAR data Processing with automatic range cell migration correction in Doppler domain", *Radar Conference 2008*.
- [11] Petre Stoica, Randolph L.Moses, "Introduction to Spectral Analysis", Prentice Hall 1997.
- [12] J.W.Odendaal, E.Barnard, and C.W.I.Pistorius, "Two-Dimensional Superresolution Radar Imaging Using the MUSIC Algorithm", *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol.42, No.10, Oct. 1994.

- [13] Phillips Thomson, Matteo Nannini, and Rolf Scheiber, "Target Separation in SAR Image With the MUSIC Algorithm", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007.
- [14] H.C. Stankwitz, R.J. Dallaire, and J.R. Fienup, "Nonlinear Apodization for Sidelobe Control in SAR Imagery", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol.31, No.1, Jan. 1995.
- [15] Byuong-Gyun Lim, Jae-Choon Woo, and Young-Soo Kim, "Noniterative Super-Resolution Technique Combining SVA With Modified Geometric Mean Filter", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol.7, No.4, Oct. 2010.

 저 자 소 개



김 빈 희(학생회원)
 2008년 KAIST 전기 및 전자
 공학과 학사
 2010년 KAIST 전기 및 전자
 공학과 석사
 2012년 현재 KAIST 조천식녹색
 교통대학원 재학 중

<주관심분야 : SAR 영상 신호 및 GNSS 신호 처
 리>



공 승 현(정회원)
 1992년 서강대학교 전자공학과
 학사
 1994년 Polytechnic University
 (현 NYU) 전자공학과
 석사
 2005년 Stanford University
 항공우주공학과 박사

1997년~2000년 삼성전자(주) 통신연구소

2000년~2004년 (주)넥스파일럿

2006년 Polaris Wireless Inc.,

2007년~2009년 Qualcomm Inc., Corp.R&D
 (중앙연)

2010년~현재 KAIST조천식녹색교통대학원 교수

<주관심분야 : GNSS 신호 처리, 차세대 GNSS
 기술, 자율주행 및 자율항법 시스템>