

고유치 기반 필터를 이용한 위성 SAR 영상 간섭신호 제거 기법

이보윤*, 김범승**, 송정환**, 이우경**

Analysis of SAR Interference Suppression Techniques using Eigen-subspace based Filter

Bo-Yun Lee*, Bum-Seung Kim**, Jung-Hwan Song**, Woo-Kyung Lee**

요 약

영상 레이더(Synthetic Aperture Radar)는 전자파를 이용하여 영상을 생성함에 따라 주·야간 상황과 무관하게 안정적인 광역 관측 자료를 확보할 수 있으며 기상 제약 환경과 무관하게 전략적·상업적 목적으로의 감시 및 관찰 기능을 요구하는 임무에 광범위하게 활용될 수 있다. 그러나 SAR 위성 시스템의 경우 넓은 대역의 주파수를 사용하기 때문에 인접대역을 사용하는 레이더 시스템 및 통신기기로부터 간섭 영향에 의해 영상품질을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 SAR 영상의 품질향상을 위해 간섭 제거 기법인 고유치 기반 필터(Eigen-subspace based Filter) 기법을 제안하였으며, SAR 위성의 간섭제거 알고리즘인 고유치 기반 필터 기법의 정량적인 성능 분석을 위해 일반적인 노치 필터(Notch Filter) 기법을 적용한 결과를 토대로 비교 검증하였다.

Key Words : SAR, Eigen-subspace based Filter, Interference

ABSTRACT

SAR(Synthetic Aperture Radar) uses electromagnetic signals to acquire ground information and has been used for wide coverage reconnaissance missions regardless of weather conditions. However SAR is known to be vulnerable to interference signals by other communication devices or radar instruments and may suffer from undesirable performance degradations and image quality. In this paper, a modified Eigen-subspace based filter is proposed that can be easily applied to SAR images affected by interference signals. The method of constructing Eigen-subspace based filter is briefly described and various simulations are performed to show the performance of the interference mitigation process. The suppression filter is applied to a ALOS PALSAR raw data affected by interfering signals in order to verify its superiority over the Notch filter.

I. 서 론

영상 레이더(Synthetic Aperture Radar)는 가시광선 영역이나 적외선 영역의 광학 센서와 달리 안개나 구름, 강우 등과 같은 기상조건에 영상 수집이 가능하다[1]. 오늘날 위성시장의 확대와 탑재체 기술 발전과 함께 위성을 이용한 원격탐사 활동이 급격히 증가하였으며 과거 광학영상에 주로 의존하던 것에서 점차 레이더 SAR 영상을 함께 활용하는 방안으로 급성장하고 있다. 또한 지리정보의 활용에 따른 부가가치의 중요성이 점차 높아지고 있으며 국방감시, 농지측량, 자연재해 관측, 도시 개발 및 환경감시 등 국가지리 정보를 계측하고 관리하는 기능에 대한 사회적 요구는 지속적으로 발생할 것으로 예상된다. 하지만 SAR 위성의 경우, 넓은 대역의

주파수를 사용하기 때문에 인접대역을 사용하는 레이더 시스템 및 통신기기와의 간섭에 노출될 위험이 크다. 따라서 SAR 위성의 올바른 임무수행을 위해 위성 SAR에 대한 간섭 제거 기법 연구는 반드시 필요한 분야이다. 본 논문에서는 SAR 위성에서 수신될 수 있는 간섭 시나리오를 설정하고 간섭 신호에 의한 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 간섭 신호가 포함된 SAR 원시 신호를 기반으로 SAR에 적용 가능한 고유치 기반 필터를 제안하고 SAR 점표적 간섭 영상에 적용하여 노치 필터를 적용한 결과와 함께 성능을 비교 검증하였다.

II. 고유치 기반 필터

*LIG넥스원 우주영상연구소 (boyun.lee@lignex1.com)

**한국항공대학교 항공전자공학과 (wklee@kau.ac.kr)

접수일자 : 2017년 9월 11일, 최종 게재확정일자 : 2017년 9월 15일

효과적으로 RFI(Radio Frequency Interference)를 억제하기 위해서는 간섭 신호를 검출하고 추정하는 것이 중요하다. 고유치 기반 필터(Eigen-subspace based Filter) 기법은 주파수 영역에서 RFI 신호를 추정하며, 시간 영역에서 RFI 신호를 억제한다. 그림 1은 RFI 신호를 제거하기 위한 고유치 기반 필터 기법의 블록도를 나타낸다.

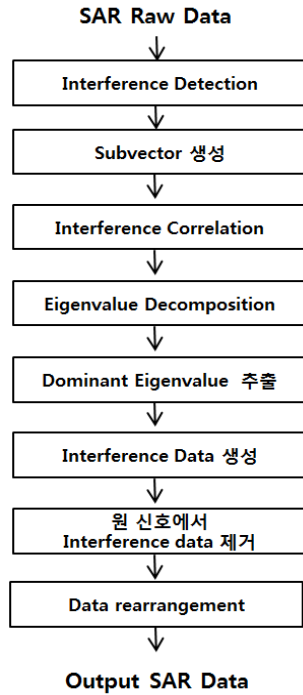


그림 1. 고유치 기반 필터 기법 블록도

주파수 영역에서 RFI 신호를 검출하며 거리 방향 데이터의 Subvector를 재배열하여 Matrix를 생성한다. 생성된 Matrix를 이용하여 Interference Correlation Matrix를 추정하며 Eigenvalue Decomposition을 수행한다. 추출된 Eigenvalue와 Eigenvector를 이용하여 간섭 부 공간을 구분하며 RFI 신호가 제거된 원 데이터 신호를 재배열한다.

간섭 신호가 포함된 SAR 수신신호 X 는 식(1)으로 나타낸다.

$$X = S + I + N \quad (1)$$

S 는 SAR의 원 신호이며 I 는 간섭신호 그리고 N 은 잡음 신호이다. 본 논문에서는 SAR 펄스 신호가 송신하는데 $1 \times M$ 개의 거리방향 샘플 $m = (1, 2, \dots, M)$ 과 수신된 데이터 벡터 $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ 가 있다고 가정하였다. 여기서 거리방향 데이터 X 를 m 개의 Subvector로 나누고 Subvector의 길이를 L 로 설정하였고 총 k 개의 Subvector는 식 (2)와 같다.

$$x = [x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+L-1}]^T \quad (2)$$

따라서 식(1)로부터 $L \times K$ 데이터인 X 를 생성할 수 있는데 이는 식(3)과 같다.

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_k], k = 1, 2, \dots, K \quad (3)$$

식(4)는 Interference Correlation Matrix를 나타내고 있으며 Eigenvalue Decomposition을 수행을 통해 Eigenvalue $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_L$ 와 Eigenvector u_1, u_2, \dots, u_L 을 배열할 수 있으며 r 범위의 큰 값을 가지는 Dominant Eigenvalue를 얻을 수 있다.

$$\hat{R} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^K x_k x_k^T \quad (4)$$

Dominant Eigenvalue에 대응하는 Eigenvector에 Span을 취하여 Interference subspace로 나타낼 수 있으며 식(5)와 같다.

$$F = span(u_1, u_2, \dots, u_r), 1 \leq r < L \quad (5)$$

Interference Data를 Interference subspace, F 에서 x_k 를 추출하면 Interference Data를 얻을 수 있는데 이는 식(6)과 같다.

$$f_k = \sum_{i=1}^r u_i^T x_k u_i \quad (6)$$

x_k 는 Original Data Vector를 나타내는데 Interference Data Vector인 f_k 를 빼면 간섭이 제거된 데이터를 획득할 수 있다. 이는 식(7)과 같이 표현된다.

$$\hat{x}_k = x_k - f_k = x_k - \sum_{i=1}^r u_i^T x_k u_i \quad (7)$$

간섭이 제거된 데이터를 새로운 데이터로 배열하면 식(8)과 같으며 이를 Data Matrix $\hat{X}(L \times K)$ 로 재배열하면 간섭이 억제된 새로운 거리방향 Data Vector를 얻을 수 있다 [2,3,4].

$$\hat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_k] \quad (8)$$

III. 점표적 영상 성능 평가

SAR 영상을 통해 간섭 영향을 분석하기 위해서는 영상의 시각적인 품질 저하를 정량적으로 환산하는 변수의 도입이

필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 IRW(Impulse Response Width), PSLR(Peak Sidelobe Ratio), ISLR(Integrated Sidelobe Ratio)을 이용하여 간섭 제거 전과 후 SAR 영상의 표적탐지 기법을 적용하여 SAR 점표적 영상을 분석하였다[5].

그림 2는 간섭제거 기법 모의실험 블록도를 나타낸다. SAR 위성이 신호를 수신할 때 RFI 신호가 인가되는 시나리오를 구성하였으며, RFI 신호는 BLRN(Band Limited Random Noise)신호를 적용하였다. 협대역 간섭신호(NBI, Narrow Band Interference)의 경우 복잡한 RFI환경을 모델링하기 위해 다중 협대역 신호를 사용하였으며, RFI 밴드폭에 따른 노치필터(Notch Filter) 및 고유치 기반 필터의 성능을 점표적 영상을 통해 비교 검증하였다.

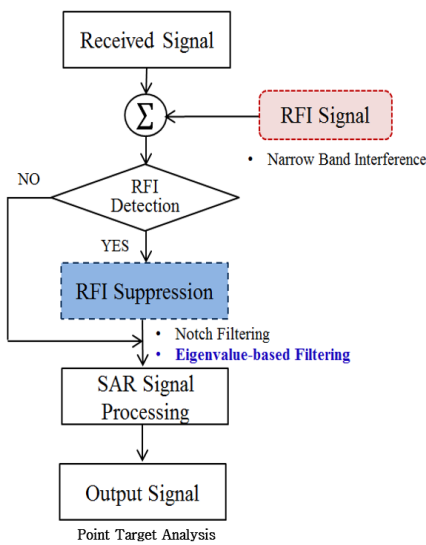


그림 2. 간섭 제거 기법 모의실험 블록도

점표적 영상은 C-대역 SAR 시스템 파라미터를 사용하였으며 빔 모드는 Strip 모드로 생성하였으며, SAR 점표적 신호처리 알고리즘은 RDA(Range Doppler Algorithm)를 사용하였다[5]. 그림 3(a)는 간섭신호가 인가되지 않은 경우의 점표적 모의실험 결과이며 그림4(a)는 다중 협대역 간섭이 인가된 SAR 점표적 영상을 나타낸다. RFI 신호 레벨은 3dB로 설정하였고 20개의 다중 협대역 간섭신호를 인가해서 생성하였다. 이에 따라 거리방향으로 백색 띠와 같은 간섭 현상이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 시간적으로 판단하였을 시에도 간섭 영향에 따라 점표적 영상의 왜곡이 발생하는 것을 판별할 수 있다. 또한 복잡한 RFI 간섭환경과 유사함에 따라 표적 탐지 성능이 저하되는 것을 알 수 있다.

그림 5(a)는 RFI 간섭이 인가된 영상에서 노치필터를 적용하여 생성한 SAR 점표적 영상을 나타낸다. 간섭이 제거되었지만 대역폭 제거에 따라 영상의 해상도가 저하된 것을 볼 수 있으며 부엽의 증가를 확인할 수 있다. 그림 6(a)는 고유치 기반 필터를 적용한 SAR 점표적 영상을 보여준다. 약간의 부엽 증가가 나타나지만 원 신호와 유사한 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다.

간섭의 영향은 거리방향으로 인가되므로 SAR 점표적 영상이 거리방향 프로파일을 비교 분석하였다. 그림 3(b) 영상의 경우 간섭신호의 영향이 없는 점표적 영상의 거리방향 프로파일을 보여주며 그림 4(b)영상의 경우 다중 협대역 간섭신호의 점표적 영상의 거리방향 프로파일을 보여준다. 다중 협대역 간섭에 의해 영상의 품질이 전체적으로 왜곡되며 부엽의 증가를 볼 수 있다. 그림 5(b)의 경우 노치필터를 적용한 점표적 영상의 거리방향 프로파일을 보여준다. 간섭이 인가된 영상과 비교할 때 전체적인 부엽은 저하되었지만 약간의 신호 왜곡이 있는 것을 판별할 수 있다. 또한 그림 6(b)영

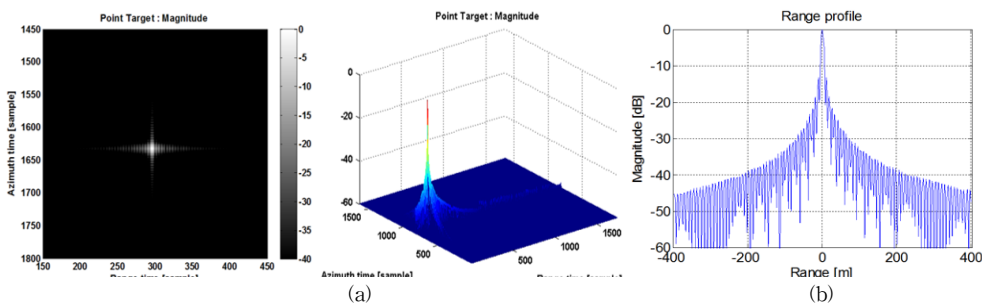


그림 3. SAR 점표적 영상 (a) 간섭이 인가되지 않은 SAR 점표적 (b) 거리방향 프로파일

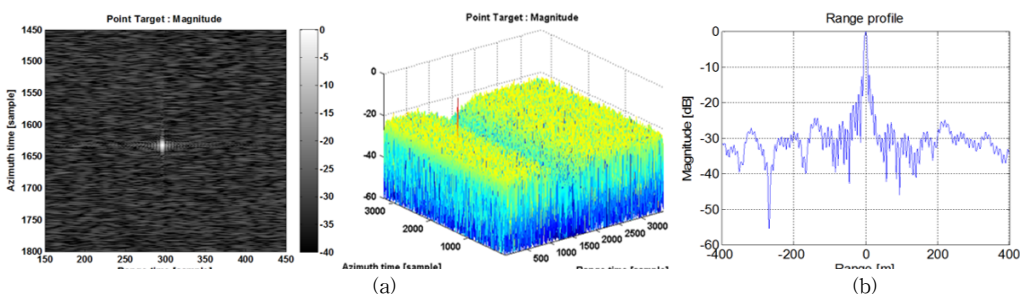


그림 4. SAR 점표적 영상 (a) 간섭이 인가된 SAR 점표적 (b) 거리방향 프로파일

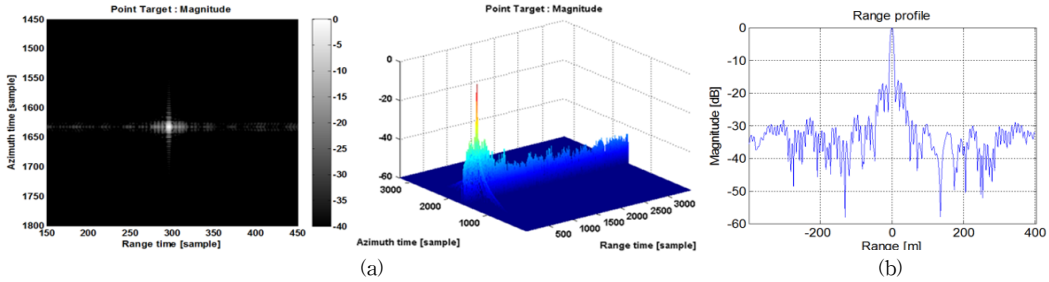


그림 5. 간섭제거기법 적용 결과 (a) 노치필터 (b) 거리방향 프로파일

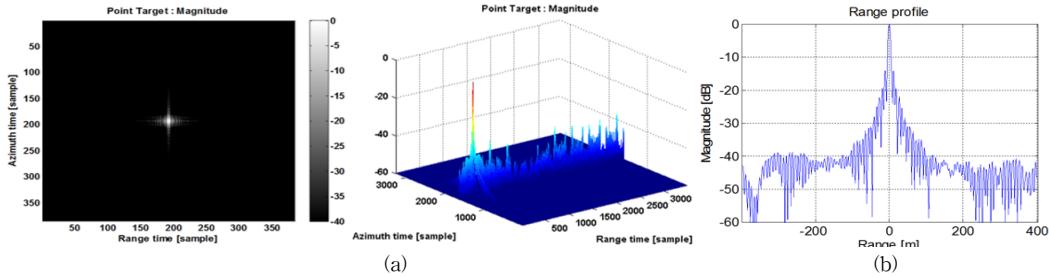


그림 6. 간섭제거기법 적용 결과 (a) 고유치 기반 필터 (b) 거리방향 프로파일

상의 경우 고유치 기반 필터를 적용한 거리방향 프로파일을 나타내며 왜곡되었던 신호가 원 신호와 유사하게 복원된 것을 알 수 있다.

통신 장비 및 GPS, 항공 교통 통제 시스템 등에 의한 간섭으로 볼 수 있다.

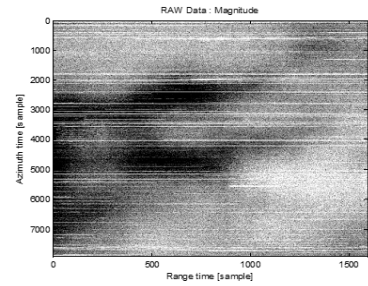
표 1. SAR 점표적에 대한 정량적 평가 결과

	Range Profile		
	IRW[m]	PSLR[dB]	ISLR[dB]
Original Signal	7.41	-15.00	-11.03
Signal with RFI	7.43	-16.61	-7.33
Signal after Notch Filtering	8.55	-16.39	-9.11
Signal after Eigen-based Filtering	7.72	-15.06	-9.78

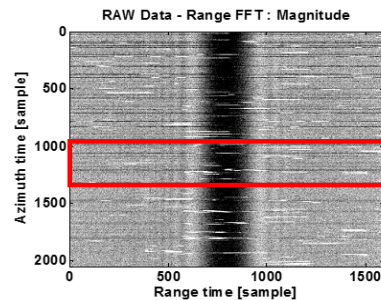
표 1은 점표적 영상의 품질을 평가하기 위해 정량적인 거리방향 프로파일의 분석 결과를 나타낸다. 영상의 해상도를 판별할 수 있는 IRW의 경우 노치필터의 IRW보다 고유치 기반 필터의 IRW가 원 신호와 유사한 것을 보이며 PSLR, ISLR의 경우도 성능이 비교적 우수한 양상을 보이는 것을 알 수 있다.

IV. SAR 영상 적용 모의실험

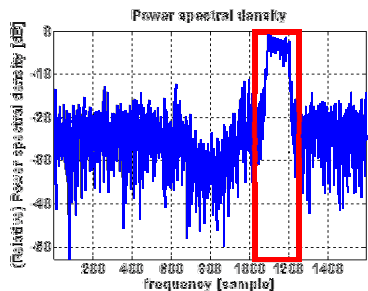
본 절에서는 실제 SAR 운용 환경에 적합한지 여부를 최종적으로 검증하기 위해 실제 위성 SAR 원시 데이터를 이용한 간섭 제거기법을 적용하였다. SAR 위성영상은 2009년 4월 18일에 획득한 PALSAR CEOS Level 1의 위성 영상으로 해안 부근에서 간섭이 발생한 바 있다[6]. 이는 미약한 지상 신호에 의해 PALSAR의 L-대역 영상이 심한 간섭에 쉽게 노출된 것으로 분석된다. 지역 특성상 해안 주변의 선박 레이다 장비에 의해 간섭이 발생한 것으로 주요 간섭원은 선박



(a)



(b)



(c)

그림 7. PALSAR 원시 영상, (a) 원시 영상, (b) 거리방향 FFT, (c) 전력 스펙트럼 밀도

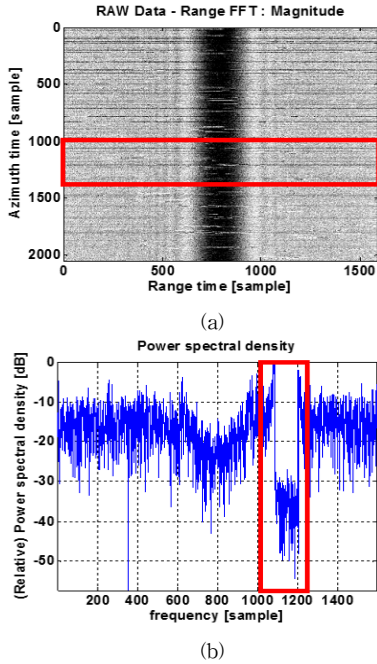


그림 8. 노치필터 적용, (a) 거리방향 FFT, (b) 전력 스펙트럼 밀도

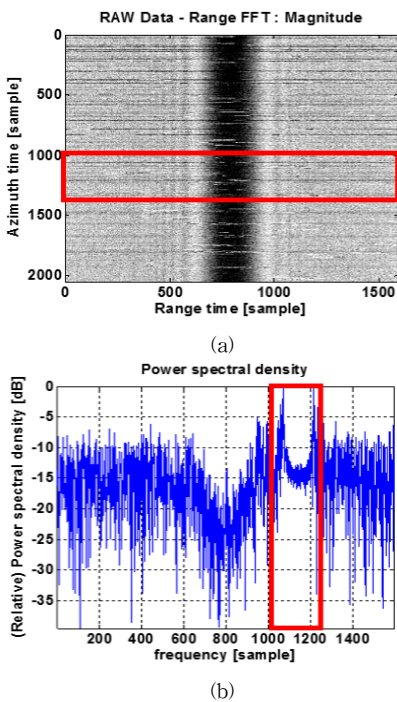


그림 9. 고유치기반 필터 적용, (a) 거리방향 FFT, (b) 전력 스펙트럼 밀도

그림 7은 PALSAR 원시 영상 및 거리 방향 FFT의 수행 결과를 보여준다. 거리방향으로 백색 띠와 같은 형태의 간섭 신호를 확인할 수 있다. 또한 원시영상의 전력 스펙트럼 밀도를 보았을 때, 간섭이 포함된 신호는 원 신호보다 높은 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

그림 8,9는 간섭신호가 포함된 원시영상에 노치 및 고유치 기반 필터를 적용한 결과를 보여준다. 전력 스펙트럼 밀도 분석 결과, 그림 9와 같이 노치 필터는 RFI 간섭이 존재하였던 일부 대역이 제거된 것을 볼 수 있다. 특히 본 논문에서 제안한 고유치 기반 필터는 그림 9와 같이 RFI 간섭이 존재하였던 일부 대역이 원 신호에 영향을 크게 받지 않고 간섭만 제거된 것을 볼 수 있다. 이에 따라 노치필터의 경우 시각적으로 약간의 해상도 저하를 확인할 수 있으며, 시각적인 영상의 품질 저하를 정량적으로 분석이 요구된다.

그림 10은 본 논문에서 적용한 노치 및 고유치 기반 필터에 의해 간섭이 제거된 L-대역의 PALSAR 영상을 나타낸다. 일반적인 노치필터 기법의 경우 광대역 간섭에 적용할 경우 대역폭 손실이 크며 주파수 영역과 시간영역에 중첩되어 간섭을 제거하는데 어려움이 많다. 또한 낮은 신호 대 잡음비와 부엽의 증가로 인해 SAR 영상에서 인공적인 간섭이 발생하며, 표적의 움직임에 의한 도플러 변수 추정에 어려움을 주는 단점이 있다. 하지만 고유치 기반 간섭 제거 기법의 경우 노치필터로부터 발생하는 단점을 보완할 수 있는 기술로 주파수 영역에서의 Eigenvalue Decomposition을 통한 간섭 탐지를 수행하며, 원시 데이터에서 설계된 간섭 데이터를 추출하여 간섭을 제거한다. 이러한 기법은 주파수 영역의 데이터와 연관성을 유지하여 높은 도플러 변수 추정 성능과 사이드 로브가 저하되는 성능 향상을 나타낸다.

V. 결론

본 논문에서는 LFM 신호와 SAR 점표적 영상을 이용하여 노치필터와 제안된 고유치 기반 간섭 제거 기법의 구현 및 비교검증을 수행하였다. 또한 국내에서 획득된 L-대역 ALOS PALSAR 영상 간섭 사례를 분석하여 레이더 및 통신 간섭으로 인한 품질 저하의 가능성이 매우 높다는 것을 확인

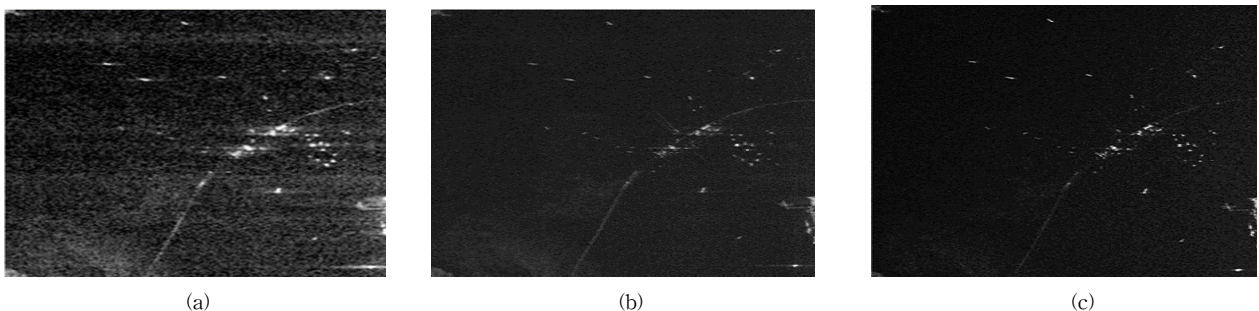


그림 10. 필터 검증 시뮬레이션 영상, (a) 간섭이 포함된 영상, (b) 노치필터 적용 영상, (c) 고유치 기반 필터 적용 영상

하였다. 간섭 제거 기법의 성능 분석을 위해 전력 스펙트럼 밀도 상에서 일부 대역에 유입된 간섭신호를 확인하였으며 이를 노치 및 고유치 기반 필터 적용함에 따라 간섭신호를 제거하였다. 노치필터의 경우 일부 대역의 신호를 인위적으로 억제하는 것을 볼 수 있었고, 고유치 기반 필터의 경우 원 신호에 영향을 받지 않고 간섭신호만 제거된 것을 알 수 있다. 이는 기존의 SAR 시스템과 호환성이 좋으며 스마트한 간섭에 적용 가능한 장점이 있다.

현재 SAR 위성의 경우 해양 및 재해감시, 농업, 산림분야 등의 민수분야까지 활용 분야가 확대되고 있다. 이미 미국, 캐나다, 유럽 등의 경우, 상업용 위성시장을 통해 부가가치를 창출해 나가고 있으며 국내에서도 2기 이상의 고해상도 SAR 위성이 운용될 예정이다. 따라서 간섭이 포함된 영상을 활용할 수 있는 간섭제거 기법을 확보할 필요성이 높으며 SAR 위성의 안전과 올바른 임무수행을 위해서 위성 SAR에 대한 간섭제거 기법 연구는 반드시 필요한 분야이다. 이는 향후 본 논문에서 분석한 연구를 바탕으로 보다 효과적으로 SAR에 수신되는 간섭신호를 제거할 수 있는 간섭신호 제거 기술에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] 이우경, 광영길, "SAR 영상 처리 기술", 한국전자과학회논문지, 22(6), pp. 40-54, 1738-9712, 2011년.

[2] F. Zhou, R. Wu, M. Xing, and Z. Bao, "Eigensubspace-based Filtering with Application in Narrow-band Interference Suppression for SAR", Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, China, 2007.

[3] B.K. Poh, T.S. Quek, C.M.S. See, A.C. Kot, "Suppression of Strong Narrowband Interference using an Eigen-structure-based Algorithm", Military Communications Conference, 1995. MILCOM '95, Conference Record, IEEE

[4] Yu Chunrui, Zhang Yongsheng, Dong Zhen, Liang Diannong, "Eigen Decomposition Method for RFI Suppression Applied to SAR Data", Multimedia Technology(ICMT), 2010 International Conference

[5] Ian G. Cumming, Frank H. Wong, Digital Processing Synthetic Aperture Radar Data, Artech House.

[6] Paul A. Rosen, Scott Hensley, and Charles Le, "Observations and Mitigation of RFI in ALOS PALSAR Data: Implications for the Desdyni Mission", Radar Conference, 2008. RADAR '08. IEEE

[7] 이슬기, 강서리, 이우경, "LMS 적응 필터를 이용한 레이더 영상 간섭신호 제거", 한국전자과학회 전자과학기술논문지, 25(2), pp. 3-9, 2014년 3월.

[8] F. Zhou, M. Xing, X. Bai, G. Sun, and Z. Bao, "Narrow-band Interference Suppression for SAR based on Complex Empirical Mode Decomposition", IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 6, no. 3, pp. 423-427, Jul. 2009.

[9] 이슬기, 이우경, 이재욱, "L-대역 SAR 영상에서의 간섭 신호 영향 분석", 한국전자과학회논문지, 제 23(12), pp. 1388-1398,

2012년 2월.

[10] Hiroshi Kimura, Takashi Nakamura, Konstantions P. Papathenassiou, "Suppression of Ground Radar Interference in JERS-1 SAR Data", IEICE Trans. Commun., VOL., E87-B, NO.12 DECEMBER 2004.

저자

이 보 윤(Bo Yun Lee)



- 2010년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 학사졸업
- 2012년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 석사졸업
- 2014년 1월 ~ 현재 : LIG 넥스원

<관심분야> : 위성 SAR 시스템, SAR 신호처리 및 간섭

김 범 승(Bum-Seung Kim)



- 2014년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 학사졸업
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정

<관심분야> : 위성전자 레이더 탑재체, SAR 신호처리 및 간섭

송 정 환(Jung-Hwan Song)



- 2007년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 학사졸업
- 2010년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 석사졸업
- 2010년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정

<관심분야> : SAR 신호처리. 도플러 추정 알고리즘, SAR 원격탐사

이 우 경(Woo-Kyung Lee)



- 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사졸업
- 1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사졸업
- 2000년 12월 : 런던대학교(UCL) 전기 전자공학과 박사졸업

- 1999년 9월 : 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수
- 2003년 1월 : 삼성종합기술원 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수

<관심분야> : 인공위성 시스템, 위성전자 레이더 탑재체