

LMS 적응 필터를 이용한 레이다 영상 간섭신호 제거

이슬기 · 강서리 · 이우경

한국항공대학교
항공전자공학과

I. 서 론

합성 개구 레이다(Synthetic Aperture Radar)는 전자파를 사용하여 영상을 생성하기 때문에, 기존의 광학 영상과는 달리 주/야간 상황 및 기상 환경에 영향을 받지 않고 넓은 지역의 영상 정보를 얻을 수 있다.

이러한 장점으로 SAR는 1970년대부터 정찰기에 탑재되어 군사용으로 사용되기 시작했으며, 오늘날 해양 및 재해 감시, 농업, 삼림 분야 등의 민수 분야까지 활용 분야가 확대되었다.

그러나 SAR는 인접 대역을 사용하는 다 통신기기 및 레이다와 각종 전자 기기에 의한 영향에 취약한 단점이 있다. 따라서 이러한 인접 대역의 간섭신호에 의한 영상 왜곡이 발생할 가능성이 높다^{[1][2]}. 따라서 SAR 영상에서 나타나는 간섭현상에 대한 연구의 중요성이 대두되고 있으며, 이와 관련하여 간섭신호를 제거하는 방안에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다^[3]. SAR에서 수신되는 간섭신호를 제거하는 방안으로는 그 기반을 무엇이 두느냐에 따라, 신호적인 기법, 빔 형성 기법 그리고 디컨볼루션 기법과 같은 기술로 구분된다. 신호적인 기법을 이용한 간섭신호 제거 방안의 경우, 가장 다양하게 응용이 가능하며, 이 기술은 하드웨어적인 요소는 필요치 않다. 신호적인 기법을 이용한 간섭 제거는 주파수 분할, 랜덤 초기 위상 신호, 인접 펄스에 대한 지터 첨 비 등의 요소를 이용한다. 다음 <표 1>은 신호 처리 기반의 SAR 간섭신호 제거 기술에 대한 분류표이다.

<표 1> 신호처리 기반 간섭신호 제거 기술

1	LMS(Least Mean Square) 필터 기술
2	Notch 필터 기술
3	DRFM 반복 재머 영향 제거 기술
4	다중 톤 위상 변조 (Multi-Tone Phase-Modulation)
5	기울기 변화 신호법 (Slant Varying LFM Chirp Signaling)
6	재머(Jammer)-Penalized 기술
7	Dual-Aperture Antenna Cross-Track 간섭법

신호 처리 기반의 간섭신호 제거 기술 중 가장 간단하게 구현할 수 있는 기법은 노치 필터 기술이다. 그러나 노치 필터 기술은 광대역 잡음이 인가되었을 때, 수신 신호 손실을 야기할 수 있다. 이러한 단점을 보완하고자 개발된 기술이 적응 필터이다^{[4]~[6]}. 적응 필터는 일반적으로 신호의 통계적인 특성이 바뀌거나 잘 알지 못할 때 사용하며, 수신 신호에 발생하는 왜곡이 적다. 이러한 적응 필터 중에서 가장 많이 사용하는 방식이 LMS 필터 알고리즘이다^{[7][8]}. 본 논문에서는 SAR에 적용 가능한 LMS 적응 필터를 제안하고, 간섭 신호가 포함된 SAR 수신 신호에 적용하여 간섭 신호가 제거된 결과를 보인다.

II. Adaptive LMS Filter

이 연구는 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

LMS 적응 필터는 원하는 수신 신호와 나머지 원하지 않는 수신 신호들 사이의 상대적인 오차를 검출하고, 그것을 자승 평면 공간 내에서 최소화함으로써 수신된 신호에서 간섭 신호를 제거한다. 간섭 신호가 포함된 SAR 수신 신호 $x(n)$ 은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$x(n) = s(n) + \nu(n) + \rho(n) \quad (1)$$

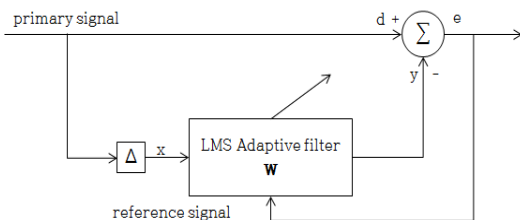
여기서, $s(n)$ 은 원하는 수신 신호이고, $\nu(n)$ 는 열잡음이고, $\rho(n)$ 은 SAR에 수신된 RFI 신호이다. 간섭 신호가 인가된 SAR 수신 신호는 LMS 필터를 통해 제거할 수 있다. LMS 적응 필터의 구조는 [그림 1]과 같다.

LMS 알고리즘은 최소의 오차를 갖도록 하는 적응 필터를 찾는 것으로, 이는 필터의 적절한 가중치 설정으로 이루어진다. 가중치 값은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(n)x(n) \quad (2)$$

여기서 $w(n)$ 은 시간함수로 표현된 적응 필터의 가중치 벡터이며, μ 는 스텝 값이다. $e(n)$ 은 오류 값, $x(n)$ 은 입력 신호이다. 스텝 값을 결정하는 요소는 오류 신호 $e(n)$ 이고, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$e(n) = d(n) - w^T(n)x(n) \quad (3)$$



[그림 1] LMS 적응 필터 구조

식 (3)에서 $d(n)$ 은 이상적인 신호 출력이고, $w^T(n)x(n)$ 은 실제 필터를 통과한 출력 값 $y(n)$ 이다.

$$y(k) = \sum_{i=0}^N w_i(k)x_i(k) = w^T(k)x(k) \quad (4)$$

이 때, 스텝 크기(μ)는 상수 값을 가지며, 실험에 의해 결정하는 것이 일반적이나, 고유치를 이용하여 선택하기도 한다.

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &\leq \text{tr}[A] = \sum [\text{diagonal elements of } A] \\ &= \sum [\text{diagonal elements of } R] \\ &= \text{tr}[R] \end{aligned}$$

따라서 스텝 크기는 다음과 같이 표현된다.

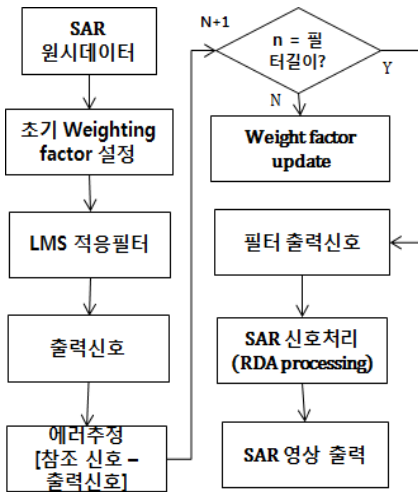
$$0 < \mu < \frac{1}{\text{tr}[R]} \quad (6)$$

$$R = E[X_k^* X_k^T]$$

본 논문에서는 잡음 신호가 혼합되어진 SAR 신호에서 점표적 영상을 생성하고, LMS 적응 필터 알고리즘을 적용하는 모의실험을 수행한다. 또한 스텝 크기가 수렴하는 구간에 대한 분석을 수행하여 스텝 크기에 따른 영향을 분석한다. LMS 적응 필터 알고리즘의 성능은 점표적 성능 평가 지표를 통해 평가한다.

III. SAR 모의실험 적용

본 논문에서는 SAR 점표적 신호를 기반으로 모의실험을 수행한다. SAR 점표적 신호에 간섭 신호를 인가하고, LMS 필터에 적용하여 결과를 분석한다. [그림 2]는 SAR 데이터에 LMS 필터를 적용하여 간섭 신호를 제거하는 모의실험 수행 과정이다. 간섭



[그림 2] LMS 적응 필터 기반의 SAR 간섭 신호 제거 알고리즘 흐름도

신호가 포함된 수신 신호를 입력 신호로 받고, 초기 필터 가중치를 설정한다. 초기 필터 가중치는 0으로 설정한다. 수신 신호를 오차 값이 최소가 되는 필터 가중치를 추정하면서, LMS 적응 필터를 통과시킨다. LMS 적응 필터를 통과한 출력 신호는 간섭 신호를 제거한 신호이다. 출력 신호를 이용하여 SAR 영상처리를 수행하고, 그 결과를 확인한다. 간섭 환경에서의 SAR 점표적 영상을 생성하는 과정 및 시스템 변수는 L-대역의 위성 SAR를 가정하여 수행하였다⁹⁾.

LMS 기법을 SAR에 적용하고자 할 때는 스텝의 크기에 따라 연산 속도와 정확도가 결정되기 때문에, 적절한 값을 결정하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 SAR 원시 신호의 스텝 크기를 결정하는 실험을 반복적으로 수행하여 적절한 스텝 값을 결정하였다. 모의실험에서 사용한 위성 영상의 고유치에 의해 계산된 스텝 크기의 값은 $1.1e-14$ 이고, 고유치를 중심으로 스텝 크기를 변수로 설정하여 필터의 가중치를 추정하였다.

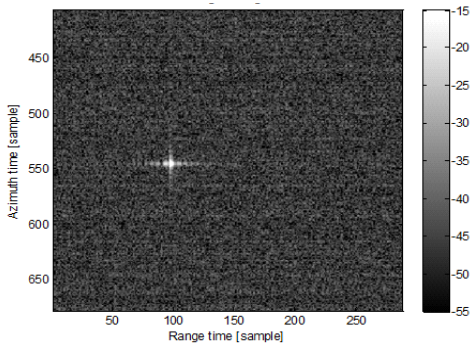
IV. 모의실험

[그림 3]은 협대역 간섭 신호를 SAR 점표적 신호에 인가하고, 간섭이 포함된 SAR 점표적 간섭 영상을 LMS 적응 필터를 통해 복원한 결과이다. 간섭 시나리오는 간섭 신호 레벨이 30 dB, 협대역 간섭 성분은 25로 설정하였다. [그림 3]의 (a)와 같이 간섭 신호가 포함된 영상에서는 잡음 형태의 배경이 나타난 것을 알 수 있다. [그림 3]의 (b)는 동일한 원시 신호를 LMS 적응 필터에 통과시킨 후를 보여주는데, 간섭이 제거된 것을 확인할 수 있다. [그림 3]의 (c)와 (d)는 간섭 신호 제거 전과 후의 주파수 스펙트럼을 보여준다. [그림 3]의 (c)에서는 다수의 협대역 간섭 신호가 존재하지만, LMS 적응 필터를 통과한 후에는 이러한 간섭 성분이 효율적으로 제거되었음을 [그림 3]의 (d)에서 확인할 수 있다.

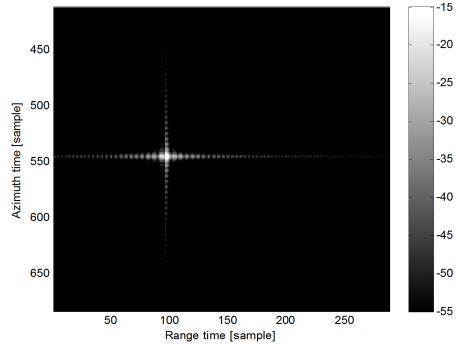
제시된 LMS 필터 값이 이상적인 결과를 보여주는 것인지 여부를 확인하기 위해서는 정량적인 분석이 필요하므로, SAR 점표적 원시 신호를 기반으로 스텝 크기에 따른 LMS 적응 필터의 성능을 분석하였다. <표 2>는 고유치에 의해 설정한 스텝 크기를 중심으로 스텝 크기에 따른 모의실험을 수행한 결과이다. 또한 [그림 4]는 <표 2>의 품질 분석표를 기반으로 스텝 크기에 따른 SAR 점표적 영상 품질을 IRW, PSLR, ISLR로 각각 도식화한 결과이다.

<표 2>를 살펴보면, 스텝의 크기가 $1.2e-14$ 이상 구간을 넘어서면 영상의 품질이 더 이상 향상되지 않고, 일정하게 수렴함을 확인할 수 있다. 따라서 이 구간의 스텝 값을 사용하는 것은 적절함을 확인할 수 있다.

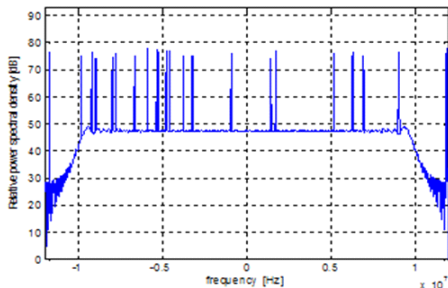
다음으로는 협대역이 아닌 비교적 넓은 광대역의 간섭 신호가 인가된 경우에 대해서 모의실험을 수행하였다. [그림 5]는 광대역의 잡음 신호가 인가된 레이다 수신 신호와 이에 대해 LMS 적응 필터를 적용한 신호에 대한 전력 스펙트럼을 보여준다. LMS 적응 필터는 [그림 5]의 가중치 그래프와 동일한 스텝 크기를 적용하여 모의실험을 수행하였다. [그림 5]



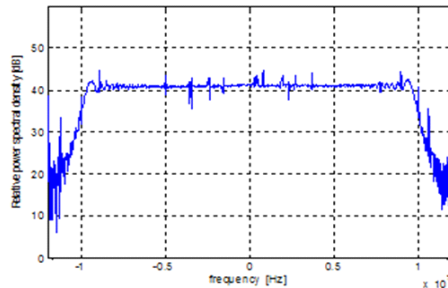
(a) 간섭신호가 포함된 SAR 점 표적 영상



(b) LMS 적응 필터링 후 SAR 점 표적 영상



(c) 간섭 신호가 포함된 SAR 신호의 전력 스펙트럼

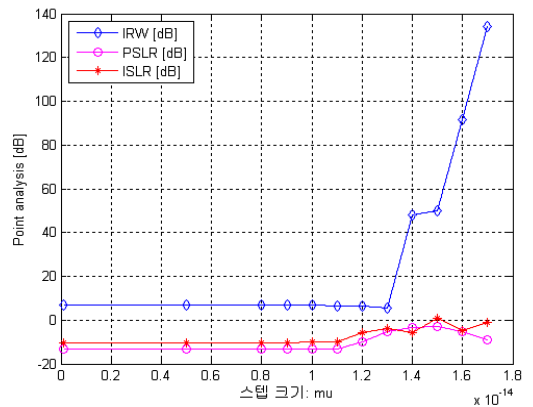


(d) LMS 적응 필터링 후 SAR 신호의 전력 스펙트럼

[그림 3] LMS 적응 필터링 결과. 간섭 신호가 포함된 결과(좌), LMS 적응 필터링 후 결과(우)

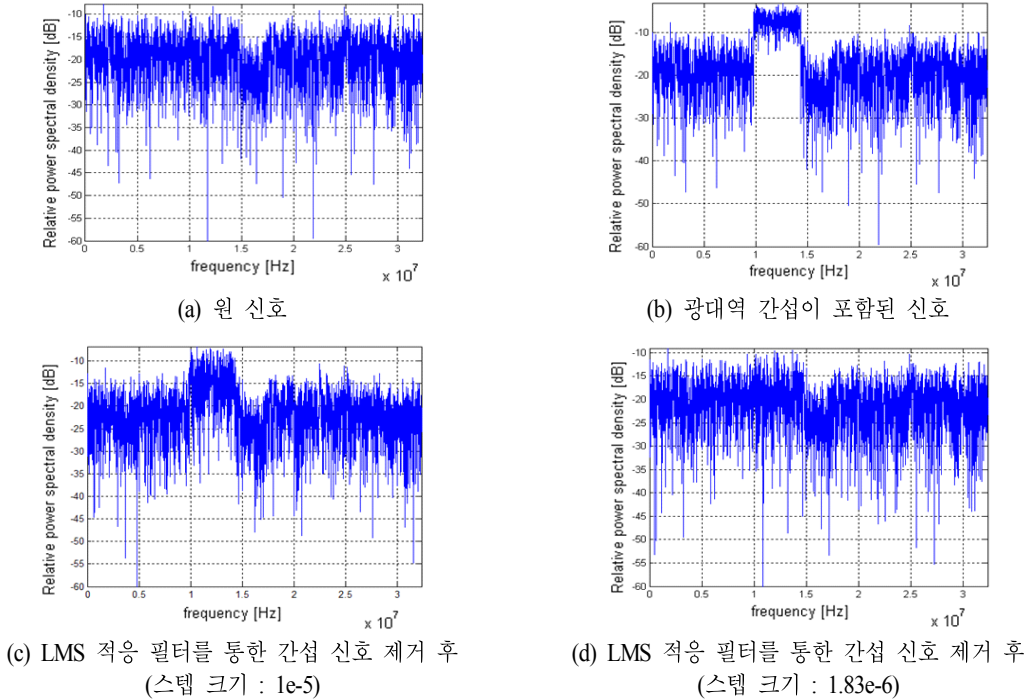
의 (a)는 간섭이 포함되지 않은 SAR 원시 신호의 전력 스펙트럼이고, (b)는 간섭이 수신된 경우의 전력 스펙트럼이다.

[그림 5]의 (c)와 (d)는 LMS 적응 필터를 통해 간섭 신호를 제거한 결과이다. (c)의 경우는 LMS 적응 필터의 스텝 크기를 $1e-5$ 로 설정하였고, (d)의 경우는 $1.83e-6$ 로 설정하였다. (c)의 결과를 보면 LMS 적응 필터를 통과했음에도 간섭 신호가 남아있는 것을 볼 수 있다. 반면, (d)의 경우는 간섭 신호가 제거되고, (a)의 원시 신호와 유사한 결과를 보인다. 따라서 LMS 적응 필터의 성능은 선택되는 스텝 변수의 크기에 의해 결정됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 스텝의 크기가 작을수록 정확도는 증가하지만, 연산 시간이 증가하는 문제가 있으므로 결과 값이 수렴하는 범위에서 적절한 스텝 값을 선정하는 것이 바람



[그림 4] 스텝 크기에 따른 SAR 점표적 품질 변화

직하다[그림 6]은 SAR 영상에 모의 간섭을 인가한 후, LMS 적응 필터를 이용하여 간섭 신호를 제거하는 과정을 보여준다. SAR 위성에 수신되는 간섭 신



[그림 5] 광대역 잡음 신호에 따른 수신 전력 스펙트럼의 변화.

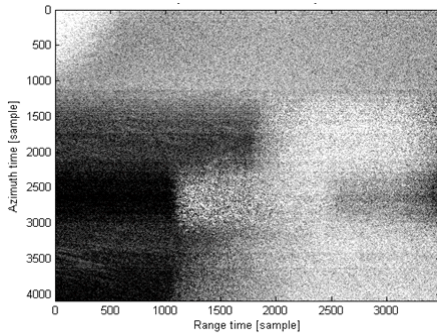
<표 2> 스텝 크기에 따른 SAR 점표적 품질 분석

스텝 크기	IRW	PSLR	ISLR
2.0e-14	-(발산)	-	-
1.9e-14	-	-	-
1.8e-14	-	-	-
1.7e-14	134.17	-8.88	-1.18
1.6e-14	91.37	-5.32	-4.84
1.5e-14	49.76	-3.13	0.70
1.4e-14	47.96	-3.35	-5.95
1.3e-14	5.59	-5.23	-3.94
1.2e-14	6.65	-9.75	-5.88
1.1e-14	6.54	-12.99	-9.92
1.0e-14	6.75	-13.22	-10.16
0.9e-14	6.76	-13.29	-10.23
0.8e-14	6.76	-13.33	-10.22
0.5e-14	6.76	-13.31	-10.21
0.1e-15	6.76	-13.31	-10.21

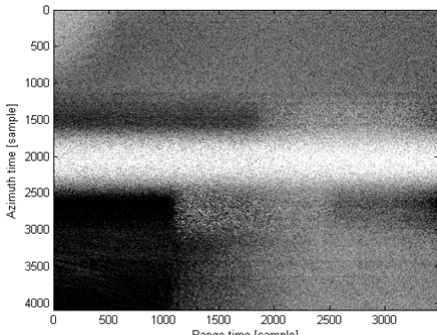
의 대역폭은 9 MHz로 설정하였고, 이에 따른 SAR 영상에서의 간섭 영향과 LMS 적용 결과를 보여준다. [그림 6]의 (a)는 원본 영상이며, [그림 6]의 (b)는 간섭이 포함된 영상이다. SAR 원시 신호를 RDA (Range Doppler Algorithm) 신호 처리 과정을 통해 생성한 영상은 [그림 6]의 (c)이다. 그 결과, LMS 적응 필터에 의해 복원된 영상은 간섭이 수신되지 않은 경우의 원래의 영상과 유사하게 복구가 됨을 확인할 수 있다.

V. 결 론

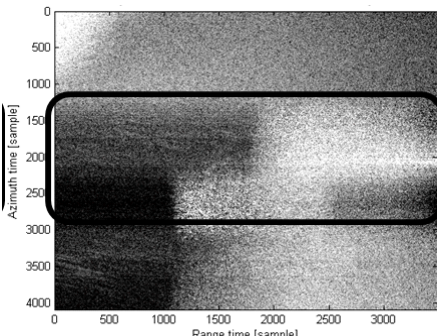
본 논문에서는 잡음 신호가 수신된 SAR 점표적 신호를 생성하고, LMS 적응 필터 알고리즘을 적용하여 모의실험을 수행하였다. LMS 적응 필터 알고리즘의 성능은 점표적 성능 평가 지표를 통해 평가하였



(a) 원본 영상



(b) 간섭이 포함된 영상



(c) LMS 적응 필터를 통한 간섭 신호 제거 후 영상

[그림 6] 간섭 신호와 LMS 적응 필터를 이용한 SAR 영상 모의실험 결과

다. 모의실험은 실제 L 대역 SAR 영상에서 간섭 현상이 발생한 수신단의 주파수 스펙트럼에서 다중 협대역 간섭 신호가 발생한 경우를 가정하여 수행하였다. 간섭 신호를 인가하여 SAR 점 표적 영상을 생성

한 결과, 밝은 선의 형태를 가지는 간섭이 나타난 결과를 보였다. 이러한 결과는 실제 SAR 위성에서 나타나는 간섭 영상과 일치한다. 또한, LMS 적응 필터를 이용한 간섭 신호 제거 전후의 전력 스펙트럼 분석을 수행하였다. 수치적인 모의실험을 통해 LMS 적응 필터의 스텝 크기는 필터의 성능을 결정하므로 적절한 필터의 크기를 결정하는 것이 중요하며, 그 값은 최소를 만족시켜야 함을 확인하였다. 또한 모의실험 결과를 바탕으로 SAR 수신된 간섭 신호를 제거할 수 있는 기술인 적응형 LMS 적응 필터 기술을 구현하였고, 이를 SAR 영상에 모의 적용하여 성능을 분석하였다. 협대역 간섭에 대해서도 레이더 영상은 그 성능을 분석한 결과, 간섭이 수신되지 않은 경우의 영상에 비해 PSLR과 ISLR에서 손실이 발생하지만, 간섭에 의한 영향은 대부분 제거됨을 확인하였다.

현재 이러한 간섭 신호에 대한 영향 분석 이외에도 간섭 신호를 제거하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 향후 본 논문에서 분석한 연구를 바탕으로 보다 효과적으로 SAR에 수신된 간섭 신호를 제거할 수 있는 간섭 신호 제거 기술에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] F. Zhou, M. Xing, X. Bai, G. Sun, and Z. Bao, "Narrow-band interference suppression for SAR based on complex empirical mode decomposition", *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2009.
- [3] C. TC Le, S. Hensley, and E. Chapin, "Adaptive filtering of RFI in wideband radars using the LMS

- algorithms", *IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems*.
- [4] J. Li, P. Stoica, "An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging", *Signal Processing, IEEE Transactions*, Vol 44, Iss. 6, IEEE, 1996.
- [5] T. Miller, L. Potter, and J. McCorkle, "RFI suppression for ultrawide-band radar", *IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems*, 1997.
- [6] 신정훈, "LFM 신호의 펄스 압축에 대한 부엽 억제 성능 향상 기법 연구", 한국군사과학기술학회지, 제9권 제3호, 2006.
- [7] X. Z. Yuan, H. M. Qi, Z. Y. Guo, and P. Zhang, "An adaptive filtering approach to distributed spaceborne SAR imaging", *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006*, IEEE, 2006.
- [8] L. K. Ting, C. F. N. Cowan, and R. F. Woods, "LMS coefficient filtering for time-varying chirped signals", *IEEE Trans.*, 2004.
- [9] 이슬기, 이우경, 이재욱, "L-대역 SAR 영상에서의 간섭 신호 영향 분석", 한국전자과학회논문지, 제 23(12), pp. 1388-1398, 2012년 2월.

≡ 필자소개

이 슬 기



2011년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2011년 2월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] SAR 신호처리 및 간섭, 위성전자 레이다 탐재체

강 서 리



2013년 8월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2013년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 위성전자 레이다 탐재체, SAR 신호처리 및 영상처리

이 우 경



1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2000년12월: 런던대학교(UCL) 전기전자공학과 (공학박사)
 1999년 9월: 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수
 2003년 1월: 삼성종합기술원 책임연구원
 2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 부교수
 [주 관심분야] 인공위성 시스템, 위성전자 레이다 탐재체