

SAR 위성에 대한 재밍 효과 분석

A Study on Evaluation of Jamming Performance on SAR Satellite

이영중* 김인선* 박주래* 곽현규* 신욱현*
 YoungJoong Lee InSeon Kim JooRae Park HyunKyu Kwak WookHyun Shin

Abstract

SAR has pulse compression gain through the process including range and azimuth. Efficient jammers against the SAR with simulated elements are evaluated in the view of power and SAR image. In this paper, J/S is analysed for SAR with RF propagation equation firstly. Several jamming signals on SAR signal are made into SAR image through pulse compression process. Objective jamming performance is evaluated using euclidean distance.

Keywords : SAR Satellite Jamming, Pulse Compression, Jammer Performance, Euclidean Distance

1. 서론

1950년대 Carl Wiley가 처음으로 SAR 원리에 해당하는 Doppler Beam Sharpening 이론을 발표한 이후 SAR (Synthetic Aperture Radar)는 저피탐확률(Low Probability of Intercept)과 거리와 방위 해상도 증가라는 펄스압축의 장점으로 인해 지속적으로 발전해왔다. 위성탑재 형태인 SAR 위성은 주야 및 기상 조건에 무관하게 특정 지역에 대한 영상을 획득할 수 있어 이에 대한 재머 개발이 필수적이다^{1~4)}.

SAR는 거리와 방위 해상도를 높이기 위해 LFM (Linear Frequency Modulation) 또는 Discrete Coded 파형을 사용하여 펄스 압축을 수행한다. 이러한 펄스 압축을 통해 형성된 단위 픽셀들을 모아 SAR 영상(Image)를 생성한다^{5~7)}.

본 논문은 SAR 위성에 대한 재밍 효과분석에 관한 논문으로서 공개된 LFM 파형을 사용하는 SAR 위성의 제원을 사용하고 SAR 위성의 펄스 압축 및 영상 생성 과정을 간략히 모델링하였고 재밍 기법별로 J/S를 계산한 후 각 재밍이 가해질 경우의 SAR 영상과 재밍이 없을 경우의 SAR 영상을 구성하였다. 객관적인 재밍 성능을 분석하기 위해 재밍 영상들의 각 픽셀들과 재밍 없는 영상들의 각 픽셀들의 차이를 평균하는 Euclidean Distance를 계산하여 SAR 위성에 효과적인 재밍 방법을 객관적으로 제시하였다.

2. SAR

가. SAR 위성

SAR 위성은 SAR 영상을 얻기 위한 대상 지역을 통과할 수 있고, 거리에 따른 공간손실을 줄이기 위해 주로 저궤도에서 운용되며 SAR 위성과 관련된 용어는 Fig. 1과 같다

† 2010년 1월 4일 접수~2010년 3월 19일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 이영중(youngcenter@add.re.kr)

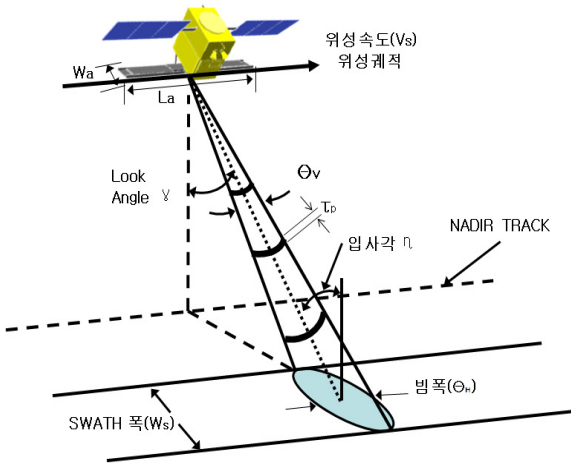


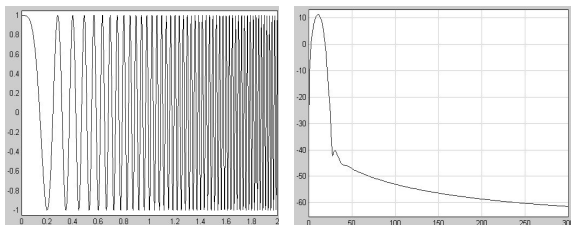
Fig. 1. SAR 위성

나. SAR 펄스압축

SAR에 사용되는 펄스압축 방식은 대표적으로 LFM과 Discrete coded 파형이 있다. 본 논문에서는 LFM 파형에 대해 설명하고자 한다. LFM 파형의 간단한 형태는 식 (1)과 같고 파형은 Fig. 2와 같으며 저주파에서 고주파 성분까지 포함하고 있고 시간에 따라 선형적으로 변해 새들의 지저귀 소리처럼 들린다하여 Chirp 형태라고도 한다^[8-10].

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{\tau_p}} \text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right) \sin(\pi k t^2) \quad (1)$$

여기서, τ_p 는 송신 펄스폭을 k 는 B_R/τ_p 이고, B_R 는 FM 변조대역폭이다.



(a) 시간 파형 (b) 주파수 파형
Fig. 2. LFM 파형

이러한 LFM 신호를 사용하는 SAR의 펄스압축은 Fig. 3과 같이 Matched Filter에 의해 구현된다. 송신 펄스폭이 τ_p 이고 FM 변조대역폭이 B_R 인 LFM 신호를

사용할 경우 펄스압축 후의 펄스폭은 식 (2)와 같이 표현되며 송신 펄스폭에 비해 해상도가 향상됨을 알 수 있다. 이러한 과정을 통해 SAR는 송신 펄스폭 이내의 거리에 인접한 두 표적의 거리를 분리해낼 수 있다. SAR 위성의 LFM 신호의 최대 도플러 주파수 편이는 식 (3)과 같다^[11-14].

$$\tau_{pc} = \frac{1}{B_R} \quad (2)$$

$$(f_D)_{\max} = \frac{V_{st}}{L_a} \quad (3)$$

단, V_{st} 는 SAR 위성 속도, L_a 는 SAR 위성 안테나 길이이다.

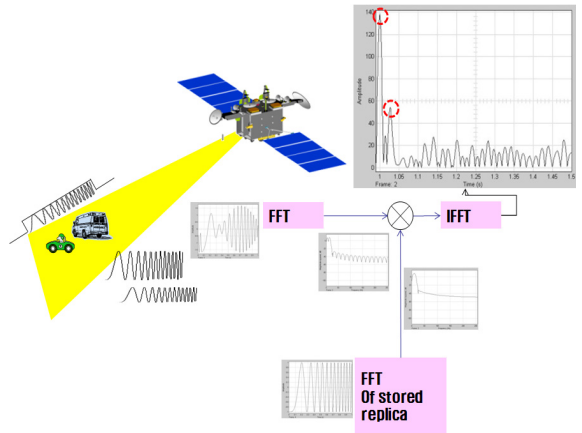


Fig. 3. SAR Matched Filter

다. SAR 위성 수신신호 레벨

SAR 위성의 LFM 송신신호가 은폐가 필요한 인공적인 구조물에 반사하여 SAR 위성에서 수신되어 펄스압축 후의 신호 레벨은 양방향 전파 전파 방정식에 기초하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S = \frac{P_S G_S^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} (\tau_p B_R)^2 n^2 \quad (4)$$

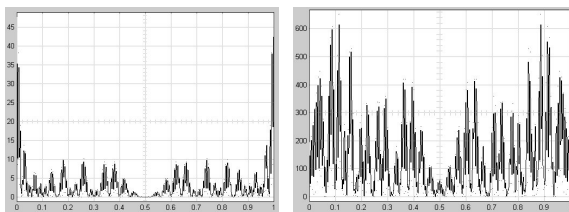
여기서, P_S 는 위성 출력, G_S 는 위성 안테나 이득, σ 는 인공구조물 RCS, λ 는 파장, R 은 위성과 인공구조물간의 거리, $(\tau_p B_R)^2$ 은 거리에 대한 펄스압축 이

득, n 은 방위(azimuth)에 대한 펄스압축을 위한 수집 개수를 의미한다^[15~17].

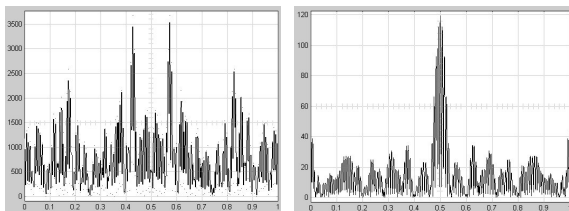
3. SAR 재밍

가. 재밍 기법

SAR의 정합필터에 의한 펄스압축은 송신신호에 대한 자기상관(Autocorrelation)에 의해 이루어지고 이 과정에서 펄스압축 이득이 발생하므로 비동기 광대역 잡음 재밍은 SAR 신호와의 자기상관이 없으므로 큰 효과가 없을 것으로 예상되며 동기 기만 재밍 기법이 효과적일 것으로 예상된다. SAR의 LFM 주파수 변조 수신 신호에 지형 정보에 해당하는 주파수 변이 성분이 포함되어 있고 SAR는 이 성분을 영상으로 생성하므로 주파수 변이 재밍 기법과 자기상관이 유지되면서 SAR의 도플러 필터 대역폭에 해당하는 동기 협대역 도플러 잡음 재밍 기법 또한 효과적인 것으로 예상된다. SAR 펄스폭을 전후로 시간적으로 덮는 Cover Pulse 또한 효과적인 것으로 예상된다. 이들 동기 재밍 기법은 DRFM(Digital Radio Frequency Memory)을 이용하여 SAR 신호를 저장한 후 적절한 재밍 기법을 적용하여 재송신할 경우 구현할 수 있다. Table 1은 본 논문에서 고려할 4개 재밍 기법이며 이들 중 동기 재밍 기법의 SAR Matched Filter에 의한 시간축에서의 파형은 Fig. 4와 같다^[18~23].



(a) 재밍 없을 경우 (b) B 재밍 기법



(c) C 재밍 기법 (d) D 재밍 기법

Fig. 4. 동기 재밍 기법의 SAR Matched Filtering 결과

Table 1. SAR 재밍 기법

| 기법 종류 | 비고 |
|----------------|--------|
| 비동기 잡음(A) | 비동기 잡음 |
| 주파수 변이(B) | 동기 기만 |
| 협대역 도플러 잡음(C) | 동기 기만 |
| Cover Pulse(D) | 동기 기만 |

나. 재밍 대 신호 비(J/S)

SAR 위성에서 수신되는 재머의 송신 신호는 단방향 전파 전파 방정식에 기초하여 동기 기만 기법은 식 (5), 비동기 잡음 기법은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$J_{\text{동기}} = \frac{ERP_J G_s \lambda^2}{(4\pi R)^2} \frac{1}{B_J} (\tau_p B_R)^2 n^2 \quad (5)$$

$$J_{\text{비동기}} = \frac{ERP_J G_s \lambda^2}{(4\pi R)^2} \frac{1}{B_J} (\tau_p B_R) n \quad (6)$$

여기서, ERP_J 는 $P_J G_J$ 이며 P_J 는 재머 출력, G_J 는 재머 안테나 이득, B_J 는 재머의 대역폭이다.

식 (4), (5) 및 (6)을 이용하여 J/S를 구하면 식 (7), (8)과 같다.

$$(J/S)_{\text{동기}} = \frac{4\pi R^2 ERP_J}{P_R G_R \sigma} \left(\frac{1}{B_J} \right) \quad (7)$$

$$(J/S)_{\text{비동기}} = \frac{4\pi R^2 ERP_J}{P_R G_R \sigma} \left(\frac{1}{B_J} \right) \frac{1}{(\tau_p B_R) n} \quad (8)$$

4. 재밍 효과 분석

가. SAR 재밍 모델링

수신 레벨이 거리에 따라 식 (4), (5), (6)과 같이 계산된 SAR 레이더 신호와 주파수와 시간축상에서 재밍 기법이 적용된 재밍 신호를 합산하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 하고 송신 SAR LFM 신호와 주파수 곱을 한 후 IFFT(Inverse FFT)하여 단위 azimuth의 SAR 영상을 생성한다. 위 과정을 시뮬레이션할 azimuth 영역까지 반복 수행한다. 시뮬레이션을 위한 모델링과 순서

는 Fig. 5, 6과 같다. 시뮬레이션 결과 생성되는 영상의 차이는 주관적이므로 보다 객관적인 영상의 차이를 계산하기 위해 식 (9)와 같이 Euclidean Distance를 계산한다. Euclidean Distance가 클수록 재밍 효과도가 높다.

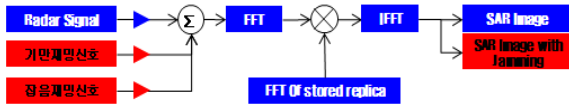


Fig. 5. SAR 재밍 모델링



Fig. 6. 시뮬레이션 순서

$$E \cdot D = \sqrt{\sum_{i=0}^k (m_i - n_i)^2} \quad (9)$$

여기서, $m = (m_1, m_2, \dots, m_k)$ 은 재밍이 없을 때의 SAR 영상이고 $n = (n_1, n_2, \dots, n_k)$ 은 재밍이 가해졌을 때의 SAR 영상이다.

나. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 SAR 위성과 재머의 제원은 Table 2와 같으며 이들 제원은 시뮬레이션을 위해 임의 설정된 일반 시험용 데이터들이다. 시뮬레이션 수행 후 생성된 SAR 영상은 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 재머가 없는 정상 SAR 영상이고 (b), (c), (d), (e)는 각각 Table 1의 A, B, C, D 재밍 기법이 적용되었을 경우에 생성된 SAR 영상이며 Table 3은 각 재밍 기법에 대한 Euclidean Distance 값이다. 앞서 기술했던 것처럼 SAR LFM 신호와 상관관계가 없는 비동기 광대역 잡음

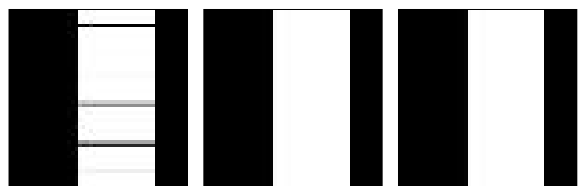
은 재밍 기법의 경우 재밍 효과가 없으며 동기 기반 재밍이 재밍 효과가 크고 그 중에서도 주파수 변이와 CoverPulse 재밍 기법이 우수함을 알 수 있다.

Table 2. 시뮬레이션 제원

| 제원 | 데이터 |
|---|----------------------------|
| SAR 위성 안테나 이득(G_s) | 35dBi |
| SAR 위성 출력 레벨(P_s) | 1kW(60dBm) |
| Look angle(γ)/(incident angle) | 20.5°/(23.2°) |
| 중심 주파수(f_c)(파장) | 임의 생략 |
| SAR 위성 고도(SAR-재머 거리) | 800km(862km) |
| 펄스폭(τ_p) | 1s |
| 압축 펄스폭(τ_{pc}) | 1us |
| 거리방향 대역폭(B_R) | 1MHz |
| 방위방향 샘플 수(n) | 4112 |
| SAR 위성 속도(V_{st}) | 6600m/s |
| SAR 위성 J/S 마진 | 10dB |
| RCS(σ) | 100m ² (20dBsm) |
| 재머 출력(P_j) | 임의 생략 |
| 재머 안테나 이득(G_j) | 임의 생략 |
| B_j (광대역 잡음 대역폭) | 임의 생략 |
| B_j (도플러 잡음 대역폭) | 임의 생략 |



(a) 정상 SAR 영상 (b) A 재밍기법



(c) B 재밍기법 (d) C 재밍기법 (e) D 재밍기법

Fig. 7. 재밍 기법별 SAR 영상

Table 3. 재밍 기법에 따른 Euclidean Distance

| 기법 종류 | Euclidean Distance |
|-------|--------------------|
| A | 0.1382 |
| B | 7448.292 |
| C | 7756.466 |
| D | 7756.466 |

5. 결론

본 논문은 SAR 위성에 대한 재밍 기법의 효과 분석에 대한 것이다. 이러한 분석을 하기 위해 우선 SAR 위성과 재머의 J/S를 계산하였고, 펄스 압축을 통해 펄스 압축 이득을 얻고 해상도를 향상시키는 SAR 위성에 대한 영상 생성을 간략히 모델링하였고 이에 재머 신호를 추가할 수 있도록 하였다. 재밍 기법으로는 1개의 비동기 광대역 잡음 재밍 기법, 3개의 동기 기반 재밍 기법(주파수 변이, 도플러 협대역 잡음 및 Cover Pulse)에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 재머가 없을 경우의 정상 SAR 영상과 재머가 있을 경우의 SAR 영상간의 객관적인 효과 분석을 위해 정상 SAR 영상과 재머에 의한 SAR 영상간의 픽셀별 차이를 나타내는 Euclidean Distance를 계산하였다. 비동기 잡음 재밍 기법 신호는 양방향 전파 전파하는 SAR 위성 신호와 비교할 때 단방향 전파 전파하므로 공간 손실에서는 신호세기가 크나 SAR LFM 신호와의 상관관계가 적어 펄스 압축 과정에서 SAR 위성 신호보다 세기가 약해져서 재머의 영향이 거의 없음을 확인하였다. 동기 기반 재밍 기법은 SAR LFM 신호와 상관관계가 높기 때문에 SAR와 동일한 펄스 압축 이득을 갖고 단방향 전파 전파에 의해 손실이 적으므로 효과적이다. 이중에서 주파수 변이 기법과 Cover Pulse 기법이 효과적임을 모델링과 시뮬레이션을 통해 SAR 영상과 Euclidean Distance를 통해 확인하였다. 이러한 동기 기반 재밍 기법은 DRFM을 통해 구현 가능할 것으로 예측된다.

References

[1] Chris Oliver, Shaun Quegan, "Understanding Synthetic

Aperture Radar Image", Artech House, 1998.
 [2] A. Hein, "Processing of SAR Data", Springer, 2004.
 [3] J. Patrick Fitch, "Synthetic Aperture Radar", Springer-Verlag, 1988.
 [4] Mehrdad Soumekh, "Synthetic Aperture Radar Signal Processing", JOHN WILEY & SONS, 1999.
 [5] Shahida G Qadir, Dr. Jahangir K Kayani, Sajid Malik, "Digital Implementation of Pulse Compression Technique for X-band Radar", Proceedings of International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology Islamabad, Pakistan, 8th-11th January, 2007.
 [6] Walter W. Goj, "Synthetic Aperture Radar Electronic Warfare", Artech House, 1993.
 [7] Filippo Neri, "Introduction to Electronic Defense Systems", Artech House, 1991.
 [8] Luke Rosengerg, "Multichannel Synthetic Aperture Radar", Dotoral thesis, The University of Adelaide, Australia, 2007.
 [9] 박강민, "영상정보 위성체계 해외 개발현황 분석", 국방과학기술플러스, Vol. 60, 국방과학연구소, 2008. 6.
 [10] 곽영길 외 3인, "고해상도 영상 레이다 기술", 국방과학연구소, CESD-517-970175, 1996. 12.
 [11] 황용철 외 2인, "고해상 위성 SAR 개념 연구", 국방과학연구소, TEDC-515-041212, 2004. 12.
 [12] 곽영길 외 23인, "위성탐재 영상레이더(ROK-SAR) 체계 설계", 국방과학연구소, KTRC-517-991067, 1999. 12.
 [13] 고진우 외 2인, "TerraSAR-X 위성 기술현황 분석", 국방과학연구소, ADDR-122-081056, 2008. 9.
 [14] 방수남, "SAR 영상의 활용", 국방과학연구소 세미나 자료, ADDT-2009-0038, 2009.
 [15] 곽영길, "SAR 시스템 기술", 국방과학연구소 세미나 자료, 한국항공대, 2009.
 [16] 윤재철 외 4인, "차세대 위성탐재체 합성개구레이더", 항공우주산업기술동향, 제3권 제1호, pp. 65~71, 2005.
 [17] 이범석, "위성탐재 영상레이더(SAR)의 광역감시 모드에 대한 체계 성능 분석", 한국군사과학기술학회지, 제4권 제1호, 2001.
 [18] 이상렬, "ALQ-X 체계의 재밍기법", 국방과학연구소, IEDC-517-011141, 2001. 11.

- [19] 이영중, 이상렬, “DRFM을 이용한 재밍신호 발생”, 국방과학연구소, IEDC-517-011144, 2001. 11.
- [20] Xiaofang Wu et al., “Evaluation of SAR Jamming Performance”, IEEE 2007 International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications, pp. 1476~1480, 2007.
- [21] Hongrong Zhang et al., “SAR Deceptive Jamming Signal Simulation”, Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar(APSAR), pp. 61~64, 2007.
- [22] Yang Ying et al., “Chaotic FM Signal for SAR Jamming Imaging”, Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar(APSAR), pp. 87~89, 2007.
- [23] Mitchell Joseph Sparrow et al., “ECM Techniques to Counter Pulse Compression Radar”, US Patent No. US7,081,846 B1, Jul. 25, 2006.