

범용 전자기파 시뮬레이터를 이용한 사실적 표적 모델에 대한 역합성 개구면 레이더 영상 합성

Generation of ISAR Image for Realistic Target Model Using General Purpose EM Simulators

김 석 · 니키티 콘스탄틴 · 가 민 호

Seok Kim · Konstantin Nikitin · Min-ho Ka

요 약

전자기파 시뮬레이션을 통해 SAR 영상을 생성하는 방법은 그동안 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히, SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 생성 전용 분석 S/W가 있긴 하지만, 대부분 국방 및 보안 특성상 일반인들에게 공개되지 않고 있다. 본 논문에서는 범용 EM(Electro Magnetic) simulator를 이용하여 다양한 방법으로 사실적 표적 모델을 분석하는 방법에 대해 설명한다. 특히, 역합성 개구면 레이더(inverse synthetic aperture radar) 영상을 생성하고, 처리하는 방법을 설명한다. 이 방법을 잘 활용하면, 막대한 비용이 들어가는 수많은 실제 표적들에 대한 표적 인식(target recognition) 데이터베이스 구축을 상대적으로 저렴하고 시간효율적으로 수행할 수 있게 된다.

Abstract

There are many research works on the SAR image generation using EM(Electro Magnetic) simulation. Particularly, there are several dedicated S/Ws for SAR image generation and analysis. But, most of them are not available to the public due to the reason for defense and security. In this paper, we describe the generation of ISAR images for a realistic target model using the general purpose EM simulator like FEKO. This method can benefit us many advantages like building the database of many targets for target recognition with cost-and-time effective way.

Key words: SAR, CAD, FEKO

I. 서 론

인간은 인간의 감각을 확장시키는 장치를 만드는 것에 오랫동안 관심을 가져왔다. 망원경은 오래전에 만들어진, 그러한 장치의 대표적인 예이다. 그 이후로, 인간은 인간의 정상적인 감각 범위를 넘어서는 영역에서 동작하는

시스템들을 개발하기 위해서 끊임없이 노력해왔다. 예를 들어, 의료 영상 분야에서 X-레이를 사용하는 것이나, 지구 내부의 지질구조 분석을 위해 지진파(seismic waves)를 이용하는 것 등이 있다.

레이더 또한, 이러한 시스템들 중의 하나로, 전자기파를 이용하여 원거리에 있는 표적을 탐지, 추적, 또는 식별

「본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0201-14-1001).」

연세대학교 글로벌융합공학과(School of Integrated Technology, Yonsei University), 글로벌융합기술원

· Manuscript received October 8, 2014 ; Revised January 28, 2015 ; Accepted February 5, 2015. (ID No. 20141008-079)

· Corresponding Author: Min-ho Ka (e-mail: kaminho@yonsei.ac.kr)

하는 시스템이다. 특히, SAR 혹은 ISAR 레이다는 고분해능으로 표적을 영상화할 수 있는 첨단 시스템이다.

CAD(Computer Aided Design) 모델링된 표적들에 대한 역합성 개구면 레이다(Inverse Synthetic Aperture Radar) 영상을 전용 EM simulation 도구를 이용하여 분석하는 방법에 대해 많은 연구가 있어 왔다. 대표적으로 Xpatch^[3], Epsilon^[2] 등의 레이다 표적 특성 분석을 할 수 있는 S/W들이 있지만, 이러한 S/W들은 보안 등의 이유로 일반인들에게 공개되지 않고, 제한적으로 관련자들에게만 이용되고 있다. 최근의 컴퓨터 연산 성능의 비약적인 발전과 전자기파 수치해석 기법의 발전의 도움으로 범용 EM simulator들을 통해 전자기파와 관련된 여러 가지 문제에 대해 다양한 분석이 가능해졌다.

참고문헌 [10]에서는 미사일 표적의 CAD 모델에 대해 PO와 UTD 방법을 이용하여 HRRP를 생성하는 방법을 설명하였고, 참고문헌 [11]에서는 bistatic 경우의 SAR 영상을 합성하는 방법에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 범용 전자기파 시뮬레이터 중 하나인 FEKO^[1]를 이용하여 실제적 표적 모델에 대해, RCS(Radar Cross Section), HRRP(High Range Resolution Profile), ISAR 영상 등 다양한 전자기적 표적 특성을 분석하는 방법을 살펴본다.

II. EM Simulation

전자기파에 의한 표적의 산란 특성(scattering characteristics)을 분석하기 위해서는, 미분 방정식 혹은 적분 방정식 형태로 표현되는 Maxwell 방정식을 통해 일반해석적 해(analytical solution) 혹은 수치해석적 해(numerical solution)를 구해야 한다. 이러한 수치해석적 해를 구하는 방법에는 MoM(Method of Moment)^[7], FDTD(Finite Difference Time Domain)^[8], FEM(Finite Element Method), FMM(Fast Multipole Method) 등이 있고, EM 해석하려는 표적의 크기가 전자기적으로 큰 경우에는 연산량과 메모리량이 엄청나게 많이 필요하기 때문에 이를 줄이기 위해 PO(Physical Optics)^[9], GO(Geometric Optics), UTD(Uniform Theory of Diffraction) 등의 다양한 근사방법을 사용할 수 있다.

FEKO에서는 MoM을 기반으로 해서, FEM, MLFMM(Multi-Level Fast Multipole Method), PO/GO, UTD 등 다양한 수치해석 방법을 지원하고 있다. FEKO 외에도 CST Microwave Studio(MWS) EM simulator나 VIRAF를 통해서도 EM 해석 결과를 통해 ISAR 영상을 형성할 수 있다. 그러나, CST MWS의 경우, 여러 주파수 및 각도별 데이터를 저장하는 것이 FEKO에 비해서 복잡하다. 항공기의 RCS 특성을 분석하는데 사용하는 VIRAF(VIRtual Aircraft Framework) 소프트웨어도 SBR(Shooting and Bouncing Rays) 방식 등 다양한 수치해석 방법을 통해, 시간에 따라 변화하는 RCS 데이터를 얻을 수 있고, ISAR 영상을 형성할 수 있다.

III. Target Response Analysis

표적에 대한 전자기적 특성으로는, 얻어지는 데이터의 차원(dimension)에 따라 크게 4가지 종류로 나뉘서, 표적 RCS(0D), HRRP(1D), ISAR 영상(2D/3D) 등이 있고, EM simulator를 통해서 실제 표적에 대한 CAD model을 이용하여 이러한 특성들을 분석하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 3D 영상의 경우는 제외한다.

3-1 RCS

RCS는 Radar Cross Section의 약자로, 레이다 유효단면적 또는 표적 유효단면적을 의미하고, 표적에 대한 가장 기본적인 전자기적 특성을 나타낸다^[12]. EM simulation을 통해 구해진 E-field 값으로부터, 주어진 주파수 f 에 대해 주어진 방향 (θ, ϕ) 에서의 RCS σ 는 다음과 같이 구해진다^[6].

$$\sigma(f, \theta, \phi) = 4\pi R^2 \frac{|E^s(f, \theta, \phi)|^2}{|E^i(f, \theta, \phi)|^2} \quad (1)$$

여기서, E^s 은 scattered electric field이고, E^i 은 incident electric field이며, R 은 표적으로부터의 거리이다. 이 때, E^s 의 방향이 E^i 의 방향과 같을 때의 RCS를 monostatic RCS라고 하고, 다를 때의 RCS를 bistatic RCS라고 한다. 본 논문에서는 monostatic 경우를 고려한다.

3-2 HRRP

HRRP는 거리 방향으로의 표적 신호의 크기에 대한 profile을 1D로 나타낸 것으로, 표적의 길이 방향으로의 형상적 특징을 포함하고 있는 가장 기본적인 데이터이다^[4]. EM simulation을 통해서 1차적으로 얻어지는 데이터는 주파수 영역에서의 E-field 값들이다. 디지털 신호처리 이론에 따라, 시간 영역과 주파수 영역은 등가적이므로, 이렇게 얻어진 주파수 영역에서의 E-field 데이터의 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform)를 구하면, 시간 영역에서의 표적 신호를 얻을 수 있게 된다^[6]. 이 때, 보통, 시간 영역에서의 부엽 레벨을 낮추기 위해서, Hamming, Kaiser-Bessel 등의 윈도우를 적용한 후에 IDFT를 취하게 된다^[13].

$$HRRP(x) = \int_{-\infty}^{\infty} E^s(f) W(f) e^{j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x} d\left(\frac{2f}{c}\right) \quad (2)$$

여기서, $E^s(f)$ 은 주파수 영역에서의 E-field 값들이고, $W(f)$ 은 주파수 영역 윈도우 함수이며, c 는 전파상수를 의미하고, 시간 영역 변수 t 는 거리 변수 x 와 $x = \frac{c}{2}t$ 의 관계를 갖는다.

이렇게 얻어진 시간 영역에서의 신호를 그 표적의 HRRP(High Range Resolution Profile) 혹은 HRRS(High Range Resolution Signature)라고 한다^[4]. 이것은 그 표적의 형상 및 재질 등에 따른 고유한 특성을 가지고 있기 때문에, 표적 식별(Target Identification 혹은 Target Recognition) 등에 사용될 수 있다.

3-3 ISAR 영상

ISAR 영상(2D)은 역합성 개구면 레이더를 통해 얻어진 표적에 대한 2차원 데이터로, 표적에 대한 길이 방향(range) 및 방위각 방향(cross-range) 형상에 대한 데이터를 포함하고 있다. 역합성 개구면 레이더(ISAR) 기법은 range-Doppler domain 혹은 range/cross-range domain에서 이동 표적을 영상화하는 강력한 신호처리 기법이다^[6]. 레이더 송신기와 수신기 위치가 같은 경우를 monostatic ISAR라고 하고, 다른 경우를 bistatic ISAR라고 한다. 송신대역폭과 look angle 각도범위에 따라 신호처리방법(즉, 영상 형

성 방법)이 달라지게 된다.

송신 대역폭과 look angle(혹은 target aspect angle) 각도 범위가 작은 경우, ISAR 영상을 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다^[6].

$$ISAR(x, y) \approx \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E^s(k, \phi) W(k, \phi) \times e^{j2\pi\left(\frac{2f}{c}\right)x} e^{j2\pi\left(\frac{k_c\phi}{\pi}\right)y} d\left(\frac{2f}{c}\right) d\left(\frac{k_c\phi}{\pi}\right) \quad (3)$$

여기서, $E^s(k, \phi)$ 은 scattered electric field를 의미하고, $W(k, \phi)$ 은 공간 영역(spatial domain)에서의 부엽 레벨을 낮추기 위한 2D 윈도우 함수를 의미하며, k 는 공간주파수 변수($k = \frac{2\pi f}{c}$)이고, k_c 는 중심주파수 f_c 에서의 wave number이다.

송신 대역폭과 look angle 각도 범위가 큰 경우에는 위와 같은 근사화를 위한 조건이 성립하지 않기 때문에, ISAR 영상을 다음과 같은 적분식으로 나타낼 수 있다^[6].

$$ISAR(x, y) = \frac{1}{BW_k \Omega} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{k_1}^{k_2} E^s(k, \phi) e^{j2(k\cos\phi x + k\sin\phi y)} dk d\phi \quad (4)$$

여기서, BW_k 는 공간주파수 k 의 대역폭이고, Ω 은 look angle 폭을 의미한다. 적분 구간 $[k_1, k_2]$ 는 송신주파수 대역에 해당되는 wave number 범위이고, 적분 구간 $[\phi_1, \phi_2]$ 은 표적에 대한 look angle 범위에 해당되는 각도 범위이다.

이 적분을 계산하기 위해서는 Simpson rule^[14]과 같은 수치적분 방법을 이용할 수 있는데, 이 경우 연산량이 매우 많아지게 된다. 또 다른 방법으로, Polar Reforming 알고리즘^[6]을 이용해서 적분식의 ISAR 영상을 계산할 수 있다. 이 경우, 주어진 데이터를 IDFT에 적합한 데이터로 재구성한 후 IDFT를 수행하게 된다. 이 재구성 과정에서 여러 가지 다양한 내삽법(interpolation)이 이용될 수 있다.

ISAR 영상의 거리방향 최대길이 X_{max} 는 다음과 같이 정해진다.

$$X_{max} = \frac{c}{2\Delta f} = N_x \frac{c}{2B} \quad (5)$$

여기서, Δf 는 송신 대역폭에서 주파수 샘플 간의 간격 (frequency step)이고, c 는 전파속도, N_x 는 거리방향으로의 샘플개수, B 는 송신대역폭을 의미한다.

그리고, ISAR 영상의 각도 방향 최대 길이 Y_{max} 는 다음과 같이 계산된다.

$$Y_{max} = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} = N_y \frac{\lambda}{2\theta} \quad (6)$$

여기서, λ 는 송신파장, $\Delta\theta$ 는 look angle 간의 간격(angle step), N_y 는 각도 방향(cross-range direction)으로의 샘플 개수, θ 는 look angle interval의 각도 폭을 의미한다. 또한, 거리분해능 δx 은 다음과 같이 계산된다.

$$\delta x = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

이고, 각도 방향 거리분해능(cross-range resolution) δy 은 다음과 같이 계산된다.

$$\delta y = \frac{\lambda}{2\theta} \quad (8)$$

IV. Simulation Results

4-1 Setup

시뮬레이션 환경은 다음과 같이, FEKO EM simulator v6.3, Microsoft Windows™ 7 Professional(64 bit), Intel™ Xeon™ CPU E5-2667 2.9 GHz, 64 GB RAM으로 구성하였다.

4-2 Target Model

시뮬레이션에 사용된 표적 모델은 길이 6.5 m, 폭 6 m로 그림 3과 같다(원통 부분의 반경은 0.5 m). 동체 길이 방향이 Z 축이고, range 방향을 의미하며, 날개 방향이 Y 축이고, cross-range 방향을 의미한다. 아래 방향이 X이고, Z축으로부터의 각도와 X축으로부터의 각도가 각각 θ 와 ϕ 이다.

송신주파수 10 GHz(9.5~10.5 GHz), 송신대역폭 1 GHz, 선형 편파(linear polarization), look angle 각도 범위 10~16도에 대해 주파수 간격 3.92 MHz, 각도 간격 0.0235 도로 FEKO에서 PO 방법("Large PO" 설정)으로 EM simula-

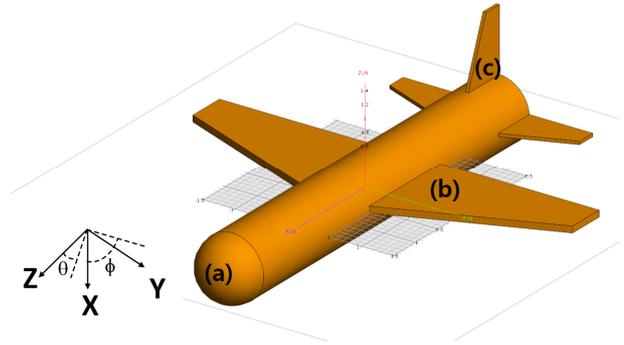


그림 1. 시뮬레이션에 사용된 표적 모델
Fig. 1. Target model.

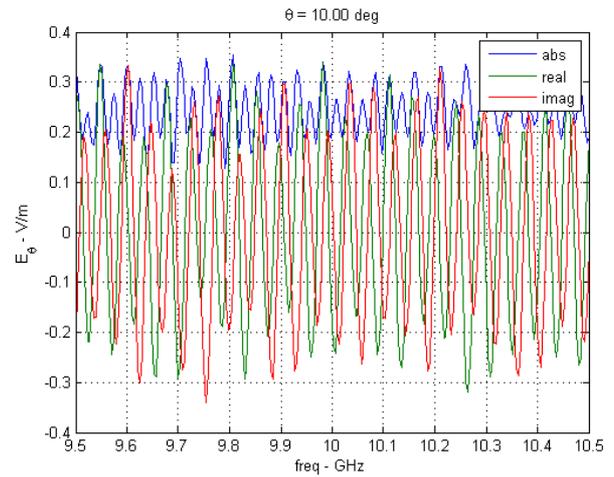


그림 2. 주어진 표적 모델에 대한 electric field(E_θ) 결과 ($\theta=10$ 도이고, $\phi=110$ 도)
Fig. 2. Electric field of the target model.

tion을 수행하면, 총 256×256개의 데이터를 얻게 된다(표적의 재질은 완전 도체(PEC, Perfectly Electric Conductor)로 가정함). 주어진 시뮬레이션 환경에서 데이터를 얻는데에 약 9시간 소요되었다(mesh 개수 : 4,1430개). PO 방법을 선택한 이유는, 시뮬레이션에 사용된 표적 모델이 파장에 비해 매우 크기 때문에 FDTD나 MoM과 같은 수치해석 방법을 사용하는 경우, 연산량과 메모리량이 엄청나게 늘어나기 때문이다. FEKO에서 EM 해석 결과, 데이터는 ffe 파일로 저장된다. ffe 파일로부터, 주파수 f 에서의 E-field 데이터 $E_\theta(f)$ 를 읽어서 주파수 별로 나타낸 것이 그림 2이다.

4-3 RCS

E-field $E = (E_\theta, E_\phi)$ 의 크기(magnitude)는 다음과 같이 구해진다.

$$|E| = \sqrt{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2} \quad (9)$$

그러면, RCS는 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma(\theta, \phi) = 4\pi R^2 \frac{|E^s(\theta, \phi)|^2}{|E^i(\theta, \phi)|^2} \bigg|_{\substack{R=1m, \\ |E^i(\theta, \phi)|=1 V/m}} \quad (10)$$

여기서, $\theta=10\sim 16$ 도이고, $\phi=110$ 도이다. 주어진 표적에 대해 $\theta=10$ 도이고, $\phi=110$ 도에서의 주파수별 RCS는 그림 3과 같다.

4-4 HRRP

그림 3과 같은 주파수 영역의 $E_\theta(f)$ 을 IDFT를 취하면, 그림 4와 같이, look angle별로 주어진 표적에 대한 HRRP를 얻을 수 있다. 여기서는 부엽을 낮추기 위해서 Kaiser-Bessel 윈도우를 적용하였다. 그림에서 맨 왼쪽에 있는 peak(a)가 표적의 머리 부분에 해당되고, 중간 지점의 peak(b)가 표적의 주날개 부분에 해당되며 맨 오른쪽에 있는 peak(c)가 표적의 꼬리 날개 부분에 해당된다(그림

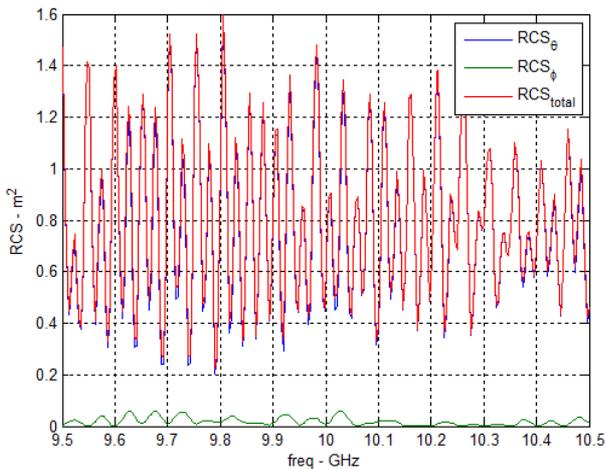


그림 3. 주어진 표적 모델에 대한 RCS 분석 결과($\theta=10$ 도 이고, $\phi=110$ 도)
Fig. 3. RCS of the target model.

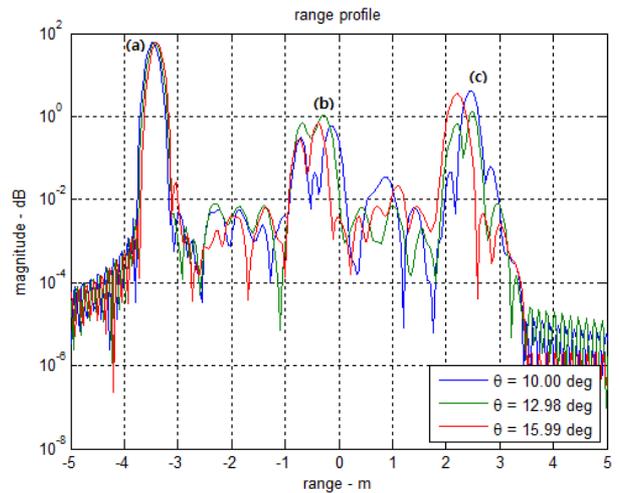


그림 4. 주어진 표적 모델에 대한 HRRP(look angle별)
Fig. 4. HRRP of the target model.

3 표적 모델 참고). 그림에서 관찰할 수 있듯이, 표적의 HRRP는 target aspect angle의 변화에 크게 영향을 받지 않는다. 또한, 주요 산란점(scattering point)들을 1차원(1D)으로 추출하여 표적 식별에 사용할 수 있다. 또한, 그림 4의 (a) 부분으로부터, 윈도우 적용을 통해 부엽 레벨이 -40 dB 내외임을 알 수 있다.

4-5 ISAR 영상

송신 대역폭과 look angle 각도 범위가 작은 경우에 대해,

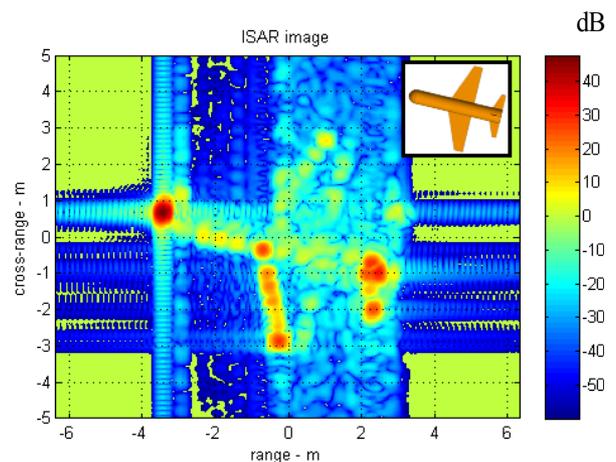


그림 5. 주어진 표적 모델에 대한 ISAR 영상
Fig. 5. ISAR image of the target model.

얻어진 ISAR 영상은 그림 5와 같다. 여기에서는 부엽을 낮추기 위해 거리 방향과 각도 방향에 대해 Kaiser-Bessel 윈도우를 적용하였다. 그림 4와 같은 look angle 별 HRRP 들을 look angle 10~16도에 대한 결과들을 모은 후, look angle 방향으로 1D IDFT를 수행하면 그림 5의 결과를 얻을 수 있다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼, 얻어진 ISAR 영상이 표적의 실제 형상과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 얻어진 ISAR 영상으로부터, 주요 산란점(scattering point)들을 2차원(2D)으로 추출하여 표적 식별에 사용할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 범용 EM simulator 중 하나인 FEKO를 이용하여, 주어진 표적의 실제적 CAD model을 통해 전자기파에 대한 표적 응답을 수치해석적으로 구한 후, 그 데이터를 이용하여 표적의 다양한 전자기적 특성을 분석하는 방법과 그 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 구체적으로, 주어진 표적 모델에 대해 RCS (0-D), HRRP (1-D), ISAR 영상 (2-D)을 계산 및 생성하였다. 이러한 데이터들은 주어진 표적의 고유한 특성들로 표적 식별 혹은 표적 인식 처리에 사용될 수 있다. 다만, 비행기와 같은 표적일 경우, 동체와 날개에 의한 반사가 주된 산란 현상이며, 특히 날개에 의한 회절 현상을 무시할 수 없기 때문에, 회절파를 계산하지 않는 PO 방식은 이 경우 표적 식별에 필요한 데이터베이스 구축에 한계가 있을 수 있다. 표적 인식에 필요한 데이터베이스 구축을 위해, 실제 표적을 통해 이러한 표적 특성들을 측정하려면 비용과 시간이 막대하게 소요될 수 있고, 측정하는 것 또한 쉽지 않다. 따라서, 본 논문에서 설명한 것과 같이, 범용 EM simulation S/W를 이용하여 원하는 조건에서의 표적 특성(target signature)을 얻어낸다면, 실제 측정에서 요구되는 막대한 비용과 시간을 절감할 수 있게 된다. 향후에는 PO 방식 외에 다양한 수치해석적 기법을 통해 얻어진 경우와 비교를 통해 ISAR 영상의 특징을 분석할 예정이다.

감사의 글

민군기술협력사업(13-DU-EE-11), LTCC 기반의 소형

경량화된 SAR 송수신 모듈 개발의 연구결과로 수행되었습니다.

References

- [1] EM Software & Systems-S.A. (Pty) Ltd., *FEKO User's Manual*, 2014.
- [2] S. H. W. Simpson, P. Galloway, and M. Harman, "Application of epsilon a radar signature prediction and analysis tool", *International Radar Symposium IRS'98*, 1998.
- [3] D. Andersh, J. Moore, S. Kosanovich, D. Kapp, R. Bhalla, R. Kipp, T. Courtney, A. Nolan, F. German, J. Cook, and J. Huges, "Xpatch 4: The next generation in high frequency electromagnetic modeling, and simulation software", *IEEE Radar Conference*, pp. 844-849, 2000.
- [4] Donald R. Wehner, *High-Resolution Radar (2nd Ed.)*, Artech House, 1995.
- [5] D. Mensa, *High Resolution Radar Cross Section Imaging*, Artech House, 1991.
- [6] Caner Ozdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, Wiley, 2012.
- [7] Walton C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, Chapman and Hall/CRC, 2007.
- [8] A. Taflove, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method (3rd Ed.)*, Artech House, 2005.
- [9] W. B. Gordon, "Far-field approximations to the Kirchhoff-Helmholtz representations of scattered fields", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, pp. 590-592, 1975.
- [10] S. Kashyap, J. Stanier, G. Painchaud, A. Louie, "Radar response of missile-shaped targets", *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1995.
- [11] A. K. Mishra, B. Mulgrew, "Database generation of bistatic ground target signatures", *IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics*, 2005.
- [12] M. Skolnik, *Radar Handbook (3rd Ed.)*, McGraw Hill, 2008.

[13] V. K. Ingle, J. G. Proakis, *Digital Signal Processing using MATLAB*, Brooks/Cole, 2000.

[14] O. A. Yakimenko, *Engineering Computations and Modeling in MATLAB/SIMULINK*, AIAA, 2011.

김 석



1998년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2006년 11월~현재: 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
2013년 3월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 박사과정

[주 관심분야] SAR/ISAR, 전자기파 수치해석, 레이더 신호처리, 적응 신호처리, 능동 위상 배열 레이더 시스템, 레이더 시스템 설계

가 민 호



1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1991년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1997년: 모스크바에너지공대 전자전파공학과 (공학박사)
1997년~2000년: 국방과학연구소
2002년~2011년: 한국산업기술대학교 교수

2011년~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 교수
[주 관심분야] 레이더 설계, 영상레이더 등

Konstantin Nikitin



1998년: Moscow Institute of Physics and Technology, Applied Mathematics and Physics (Engineer-Physicist)
2002년: Moscow Institute of Physics and Technology, Radio Engineering Including Navigation, Radar, and Television Systems (Ph.D).

2013년~현재: 연세대학교 글로벌융합기술원 연구원
[주 관심분야] Radar Signal Processing, Radar Hardware Design