

주변 구조물 포함 Full-Wave 해석을 이용한 복소 수신전류기반 레이다 배열 안테나 성능 평가

Performance Evaluation of Radar Array Antennas Based on Complex Received Currents Using Full-Wave Simulations with Surrounding Platforms

유태호 · 이행수* · 박준현* · 김상현* · 변강일

Taeho Yu · Hangsoo Lee* · Junehyune Park* · Sanghyun Kim* · Gangil Byun

요 약

본 논문에서는 탐지 및 추적 레이다의 배열 안테나 소자에 인가되는 복소 수신전류에 기반한 체계화된 레이다 성능평가 프로세스를 제안한다. 제안된 프로세스는 배열 안테나 및 탑재 구조체의 정확한 전자기적 특성을 반영한 간소화 모델링을 포함하며, full-wave 전자기 해석 시뮬레이션을 이용하여 각 배열 안테나 소자에 인가되는 전류의 진폭과 위상을 복소 조향 벡터(complex steering vector)의 형태로 저장한다. 저장된 복소 조향 벡터를 이용한 정량적 평가가 가능하도록 새로운 수신 성능 왜곡 지표를 제안하며, 기존에 제안되어 사용 중인 패턴 왜곡 지표와의 교차검토를 통해 배열 안테나의 구조체 배치 적합도를 평가한다. 제안된 프로세스의 적합성 및 효용성을 평가하기 위해 상용 포신 구조체에 탑재된 탐지 및 추적 레이다의 성능평가를 진행하였으며, 그 결과 탐지 및 추적 레이다의 배열 안테나가 구조체로부터 각각 0.6 m, 1.1 m 이상 높이에 탑재될 경우, 1 mA 이하의 진폭 왜곡과 3° 이내의 위상 왜곡을 확보할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this study, we propose a systematic performance evaluation process based on complex received currents for searching and tracking radars. This process incorporates an approach to simplified geometries of array antennas and cannon platforms that accurately represent the electromagnetic properties of the original geometries. The simplified geometries are used in full-wave electromagnetic simulations to compute the current magnitudes and phases induced in array antenna ports, and the values are saved as complex steering vectors. In addition, we propose a novel metric for evaluating the received performance distortions using the saved complex steering vectors, which were cross-checked with a conventional pattern distortion metric. To verify the feasibility of the proposed process, the optimal placement of array antennas for a commercial searching and tracking radar system was determined. The results demonstrate that average magnitudes and phases distortions of less than 1 mA and 3°, respectively, can be obtained when the array antennas are placed at 0.6- and 1.1-m heights above the platform.

Key words: Tracking Radar, Searching Radar, Array Antenna, Array Manifold, Steering Vector, Platform Effect

「본 연구는 LIG 넥스원의 지원(LIGNEX1-2020-0757(00))을 받아 수행되었습니다.」

울산과학기술원 전기전자공학부(Electrical Engineering, UNIST)

*LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received December 31, 2020 ; Revised January 14, 2021 ; Accepted February 2, 2021. (ID No. 20201231-113)

· Corresponding Author: Gangil Byun (e-mail: byun@unist.ac.kr)

I. 서 론

근접방어시스템(CIWS, close-in weapon system)은 구축함 및 호위함에 탑재되어 해군 함정에 위협이 되는 적 항공기, 대함 유도탄 및 소형/고속 수상함정 위협에 대응하기 위한 근접방어무기체계이다^[1]. 이러한 CIWS는 함정계층방어의 최종 방어수단이기 때문에, 높은 정확도를 갖는 레이더를 이용하여 목표물을 탐지하고, 해당 목표물의 정확한 거리 및 각도를 계산하는 것이 매우 중요하다^[2]. 하지만 포신, 레이돔, 철제 지지대 등 탑재 구조체에 의해 발생하는 물리적·전기적인 전자파 차폐 혹은 다중경로 현상은 탐지 및 추적 레이더의 각도 예측 정확도를 열화시킨다^{[3][4]}. 이러한 성능 열화를 사전에 예측하고, 설계에 반영하기 위해서는 탑재 구조체와 안테나의 전자기적 특성이 반영된 full-wave 시뮬레이션 기반의 성능평가가 필수적이다. 일반적으로 사용되는 레이더 성능평가 프로세스는 배열 안테나의 빔조향 패턴을 생성하고, 패턴의 진폭 왜곡 정도를 판단하는 방식이다. 하지만, 기존의 프로세스는 개별 소자의 빔패턴 진폭 변화로 왜곡을 판단하므로 정확한 위상 정보가 요구되는 레이더 배열 안테나 시스템 평가에 한계가 있다^{[5][6]}. 이러한 위상 왜곡 분석의 한계를 극복하기 위해 목표물 탐지 오차를 최소화하기 위한 다양한 알고리즘적 접근법이 제시되어 있으나, 연산 복잡도를 증가시키고, 특정 위상 왜곡 임계치를 넘어서면 성능 개선이 미비하므로 효율성이 낮다는 단점이 있다^[7-9]. 또한, 수백 개 이상의 안테나 소자가 사용되는 레이더 시스템에서는 이러한 분석 효율이 더욱 저하되므로, 연산 복잡도가 낮고 레이더의 진폭과 위상 왜곡을 정량적으로 평가할 수 있는 더욱 효율적인 배치 적합도 판단 프로세스가 요구된다.

본 논문에서는 탐지 및 추적 레이더의 배열 안테나 소자에 인가되는 복소 수신전류에 기반한 체계화된 레이더 성능평가 프로세스를 제안한다. 제안된 프로세스는 분석 효율을 극대화하기 위해 배열 안테나 및 탑재 구조체의 정확한 전자기적 특성을 반영한 간소화 모델링을 포함하며^[10], full-wave 전자기 해석 시뮬레이션을 통해 각 배열 안테나 소자에 인가되는 전류의 진폭과 위상을 예측한다. 탐지 및 추적 레이더 개별소자는 방사특성 및 운용 커버

리지를 고려하여 가장 보편적인 다이폴 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나를 이용하여 각각 모델링하며, 각 단위 각도마다 수신되는 전류의 진폭과 위상 정보를 복소 조향 벡터(complex steering vector)의 형태로 저장한다. 구조체 유무에 따른 성능 왜곡을 평가하기 위해 저장된 복소 조향 벡터를 이용한 정량적 수신능력 평가지표를 제안하며, 기존에 제안되어 사용 중인 패턴 왜곡 지표와의 교차검토를 통해 배열 안테나의 구조체 배치 적합도를 평가한다. 제안된 프로세스의 적합성과 효율성을 검증하기 위해 상용 포신 구조체를 이용하여 탐지 및 추적 레이더의 성능평가를 진행하였으며, 그 결과 해석 시간 및 연산 복잡도가 개선된 배치 적합도 분석이 가능함을 확인하였다.

II. 제안된 성능평가 프로세스

그림 1은 제안된 탐지 및 추적 레이더 성능평가 프로세스를 보여준다. 먼저 해석 시간과 메모리를 최소화하기 위해 해석에 포함되는 탑재 구조체 및 배열 안테나 간소화 모델링을 진행하며, 촘촘한 매쉬 조건에서의 해석 결과와 비교하여 전파산란, 차폐, 커플링 현상이 유지되는

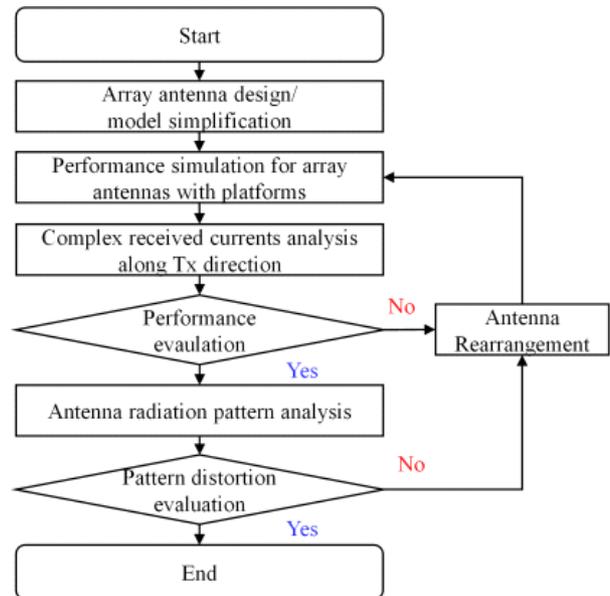


그림 1. 제안된 레이더 성능평가 프로세스
Fig. 1. Proposed radar evaluation process.

최적 메쉬 조건을 도출한다. 전방위각 커버리지를 갖는 탐지 레이더 개별 소자의 경우, 무지향성 방사패턴을 가지는 다이폴 안테나로 설계하고, 등간격 원형배치를 갖도록 모델링한다. 이때, 각 배열 소자는 전방위각을 소자 수 (N)로 나눈 커버리지($360^\circ/N$)를 탐지하도록 가정하여 복소 조향 벡터의 연산 복잡도를 최소화한다. 전방 커버리지를 갖는 추적 레이더의 경우, 포신 방향을 지향하므로 지향성을 갖는 마이크로스트립 패치 안테나로 설계하고, 등간격 평면 배치를 갖도록 모델링한다. 간소화 모델링된 구조체에 탑재된 배열 안테나의 각 포트를 50 Ω 임피던스로 단락한 뒤, 각 레이더의 커버리지에 위치한 평면파의 입사각을 조절하여 각 포트에 유기되는 전류의 진폭과 위상을 복소 조향 벡터의 형태로 저장한다. 저장된 복소 조향 벡터를 이용하여 전류의 진폭과 위상 관점에서의 성능 왜곡을 분석하고, 전류 왜곡 기준을 만족하지 못하는 경우, 배열 안테나를 재배치 후 상기 프로세스를 반복한다. 만약 전류 왜곡 기준을 만족하는 경우, 각 소자의 커버리지 내에서의 구조체 유무에 따른 능동 소자 패턴 (AEP, active-element pattern) 진폭 변화를 이용하여 패턴 왜곡을 평가한다. 패턴 왜곡 기준을 만족하지 않는 경우, 상기 프로세스를 다시 반복하므로, 최종적으로 패턴 왜곡과 전류 왜곡 기준을 모두 만족하는 최적 배열 안테나 배치 도출이 가능하다.

그림 2는 탑재 구조체의 전자파 차폐 및 다중경로에 의한 수신전류 왜곡 모식도를 보여준다. 안테나 포트에 유기된 전류는 입사 평면파에 의한 직접 유기전류와 산란 및 산란에 의한 간접 유기전류의 중첩으로 나타나므로 탑재 구조체 형상과 배열 안테나 위치에 따라 수신전류의 진폭과 위상 왜곡 정도가 크게 다르다. 실 운용 환경과 유사한 전류의 진폭 및 위상이 유기될 수 있도록 안테나 포트에 50 Ω 임피던스를 단락시키고, 원거리장에서 입사하는 신호원의 주파수를 반영하기 위해 평면파를 인가한다. 이 때, 각 레이더의 커버리지를 고려하여 평면파의 고각(θ_{inc})과 방위각(ϕ_{inc})을 조절한다.

최소한의 해석 시간과 더욱 정확한 수신전류 예측을 위해 그림 3과 같이 포신의 간소화 모델링을 진행한다. 포신의 크기는 안테나에 비해 매우 크므로 요구되는 full-wave 시뮬레이션 해석 시간과 메모리의 부담이 크기 때

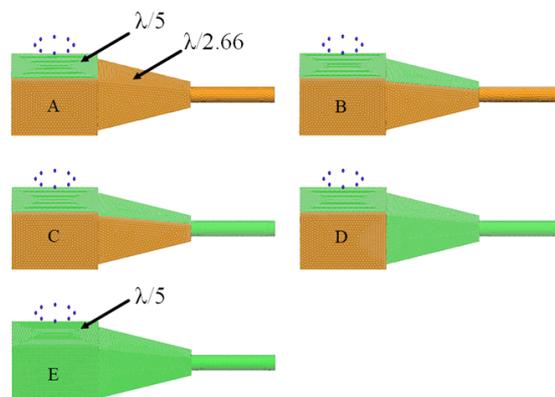


그림 2. 안테나 수신전류 분석 시나리오
Fig. 2. Analysis of received antenna currents.

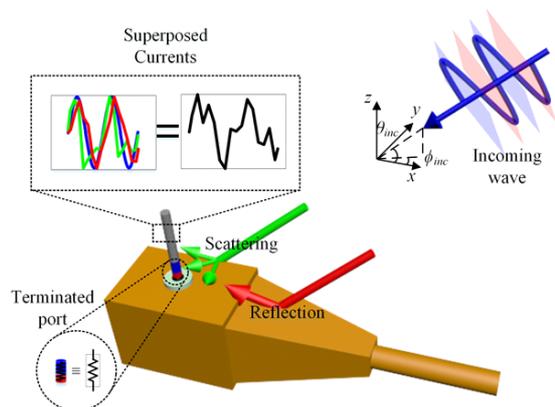
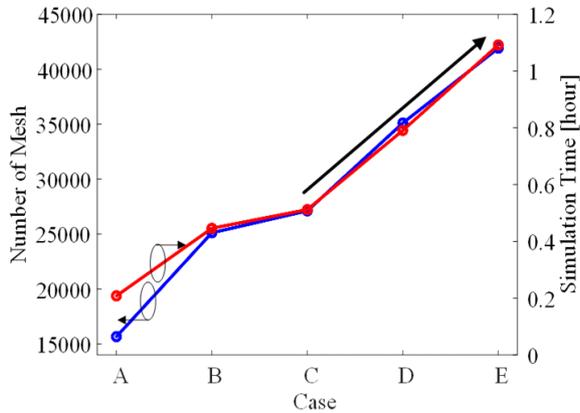


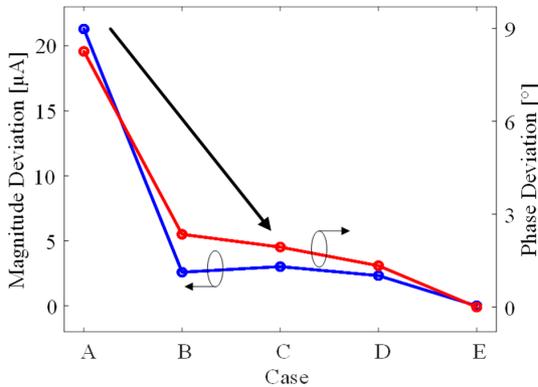
그림 3. 포신 간소화 모델링 및 메쉬 형상
Fig. 3. Simplified cannon models and their mesh triangles.

문에 이를 해결하기 위해 구조체 각 면마다 서로 다른 크기의 메쉬($\lambda/5$ 또는 $\lambda/2.66$)를 적용하여 총 메쉬 수가 서로 다른 4개의 간소화 모델(모델 A~D)을 정의하였다. 각 모델의 메쉬 수는 15,662개, 25,116개, 27,112개, 35,108개이며, 가장 많은 41,916개의 메쉬를 갖는 구조(모델 E)를 기준으로 하여 성능분석 유사도를 판별하였다.

그림 4(a)와 그림 4(b)는 각 모델의 메쉬 수, 해석 시간, 수신전류의 진폭 및 위상 예측 오차 변화를 나타낸다. 모델 A의 경우, 모델 E 대비 해석 시간은 19 %로 단축되나, 수신전류 진폭 및 위상의 예측 오차가 다른 모델에 비해 각각 7배, 3.5배 이상 크다. 모델 B의 해석 시간은 41 %로 단축되며, 예측 정확도는 모델 C 및 모델 D와 유사한 진



(a) 모델 별 해석 메쉬 개수 및 시뮬레이션 시간
(a) Solved mesh number and simulation time

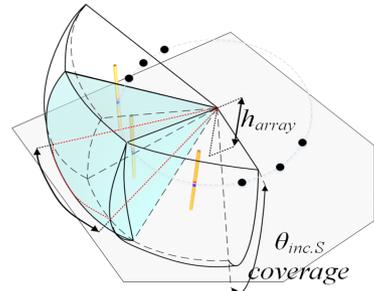


(b) 모델 별 수신전류 진폭 및 위상 정확도
(b) Received current magnitudes and phases accuracy

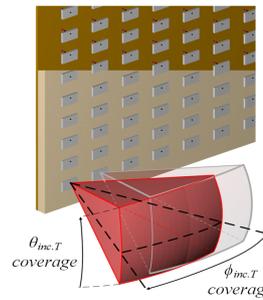
그림 4. 포신 모델링에 따른 정확도 변화
Fig. 4. Accuracy variations of different cannon models.

폭 및 위상 오차인 $2.6 \mu A$, 2.4° 이내로 수렴한 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 모델 B를 이용하여 추가 분석을 진행하였다.

그림 5는 제안된 프로세스에 적용된 탐지 및 추적 레이더의 배열 안테나 개별 소자 형상을 보여준다. 배열 안테나의 구조체 탑재 위치는 높이 h_{array} 로 정의하였으며, 탐지 레이더의 각 소자는 방위각 방향에서 $360^\circ/N$ 커버리지를 갖도록 하여 연산 복잡도를 낮추었다. 예를 들어, 8개의 배열 소자를 이용하여 1° 간격으로 탐지할 경우, 획득되는 복소 조향 벡터 크기는 360×8 의 크기를 가진다. 하지만, 각 배열 소자의 커버리지를 45° 로 할당하면 전 방위각 데이터를 확보하면서도 복소 조향 벡터의 크기를 8



(a) 다이폴 배열 안테나 및 커버리지
(a) Dipole array antenna and coverage



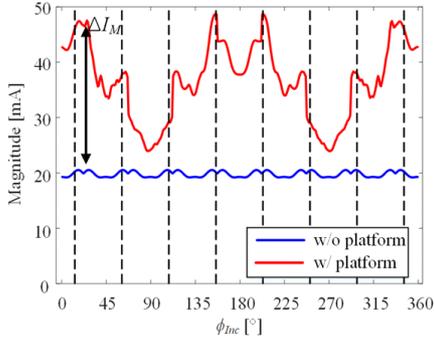
(b) 마이크로스트립 패치 배열 안테나 및 커버리지
(b) Microstrip patch array antenna and coverage

그림 5. 탐지 및 추적 레이더 분석을 위해 배열 안테나
Fig. 5. Array antennas for searching and tracking radars.

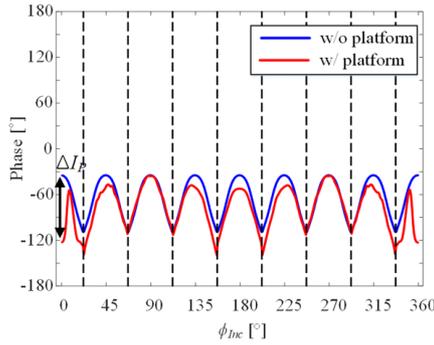
배 축소할 수 있다. 추적 레이더의 경우, 일반적으로 포신과 함께 회전하므로 포열의 중심 방향과 배열 안테나의 전면 방향이 항상 일치하여, 추적 레이더의 각 소자 위치에서 포구를 바라본 상대적 각도는 상이하다. 따라서 추적 레이더의 경우에는 모든 배열 소자가 동일한 전방 커버리지를 갖도록 하여 복소 조향 벡터를 계산한다.

그림 6은 제안된 프로세스에서 사용된 레이더 수신 성능 평가지표를 설명하기 위한 평면과 입사각에 따른 전류 및 패턴 왜곡 예제를 나타낸다. 제안된 프로세스는 탑재 구조체가 포함되지 않을 때, 배열 안테나 각 소자의 수신전류 및 패턴을 기반으로 탑재 시 상대적 성능 왜곡을 분석한다. 수신전류의 경우, 각 방향에서 진폭 왜곡(ΔI_M)과 위상 왜곡(ΔI_P)을 계산하여 전류 왜곡 기준(성능평가 함수 1)을 도출한다.

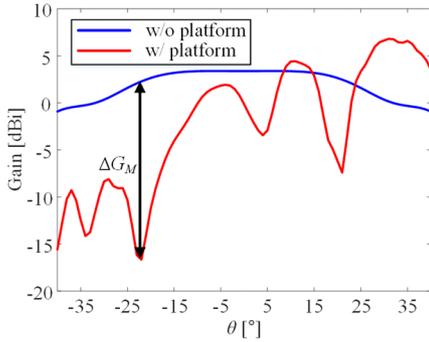
$$Metric1 = \frac{1}{N_\theta} \frac{1}{N_\phi} \sum_{i=1}^{N_\theta} \sum_{j=1}^{N_\phi} \Delta I_{M,P}(\theta_i, \phi_j) \quad (1)$$



(a) 탑재 구조체에 따른 수신전류의 진폭 왜곡
(a) Current magnitudes distortion by surrounding platforms



(b) 탑재 구조체에 따른 수신전류의 위상 왜곡
(b) Current phases distortion by surrounding platforms



(c) 탑재 구조체에 의한 안테나 패턴 변화
(c) Antenna pattern distortion by surrounding platforms

그림 6. 성능 왜곡 평가를 위한 분석 예제
Fig. 6. Simulation example for performance evaluations.

또한, 탑재 구조체 유무에 따른 능동 소자 패턴 왜곡 (ΔG_M)을 도출하여 패턴 왜곡 기준(성능평가함수 2)을 계산한다.

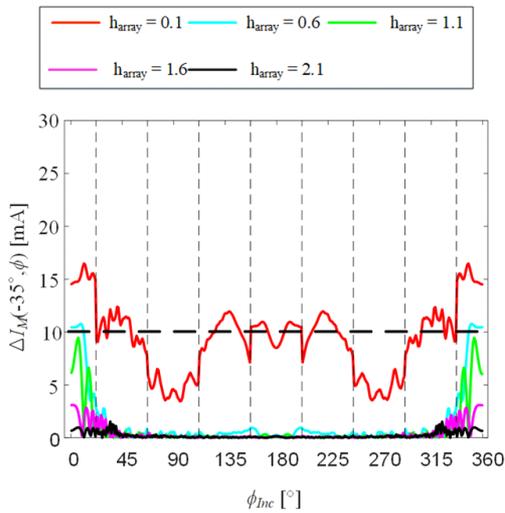
$$Metric2 = \sqrt{\frac{1}{N_\theta} \frac{1}{N_\phi} \sum_{i=1}^{N_\theta} \sum_{j=1}^{N_\phi} |G_{w/o}(\theta_i, \phi_j) - G_{w/}(\theta_i, \phi_j)|^2} \quad (2)$$

제안된 전류 및 패턴 왜곡 기준을 제시된 예제 그래프에 적용할 경우, 최대 27.07 mA의 진폭 왜곡($\varphi_{inc}=22.5^\circ$), 86° 의 위상 왜곡($\varphi_{inc}=0^\circ$), 18.95 dB의 패턴 왜곡(고각 $\theta=-23^\circ$)이 나타남을 알 수 있다.

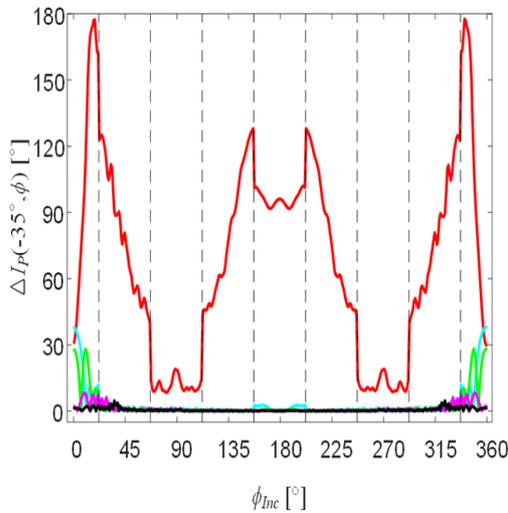
III. 성능분석 결과

제안된 프로세스의 적합성과 효율성을 검증하기 위해 상용 포신 구조체를 이용하여 탐지 및 추적 레이더의 성능평가를 진행하였다. 탐지 레이더의 평가를 위해 8소자 다이폴 배열 안테나를 모델링하였으며, 이 경우, 각 개별 소자는 방위각 방향에서 45° 의 커버리지를 가진다. 사용된 탐지 레이더는 $\theta_{inc}=\pm 35^\circ$ 의 고각 커버리지를 가지고, 전방위각($0^\circ \leq \varphi_{inc} < 360^\circ$)을 커버한다고 가정하여 해당 커버리지에 1° 간격으로 인가된 평면파로부터 수신되는 전류의 진폭과 위상을 분석하였다. 추적 레이더의 경우, 5소자 마이크로스트립 패치 배열 안테나를 이용하였고, 3번째 위치한 안테나를 기준으로 대칭인 등간격 배열 형상을 갖도록 하였다. 또한 $\theta_{inc}=\pm 11^\circ$ 의 고각 커버리지와 $\varphi_{inc}=\pm 30^\circ$ 의 전방 방위각 커버리지에 평면파를 인가하여 수신전류를 예측하였다.

그림 7과 그림 8은 탐지 레이더 수신전류의 진폭 및 위상 분석 결과이다. 배열 안테나는 포신 상단에 배치되며, 0.1 m부터 2.1 m까지 0.5 m 간격으로 탑재 높이(h_{array})를 조절하였다. 그림 7(a)와 그림 7(b)는 $\theta_{inc}=-35^\circ$ 일 때의 진폭 및 위상변화이며, 그림 8(a)와 그림 8(b)는 $\theta_{inc}=+35^\circ$ 에서의 결과이다. 평면파가 낮은 고각에서 입사하는 경우, 포신에 의한 물리적 차폐 현상으로 인해 $h_{array}=0.1$ m에서는 모든 방위각 방향에서 진폭과 위상 왜곡이 급격히 증가한다. 이러한 왜곡은 포구 방향인 $\varphi_{inc}=0^\circ$ 부근에서 더욱 두드러지며, 최대 16 mA, 177° 진폭 및 위상 왜곡을 보인다. 또한, 배열 안테나의 탑재 높이가 $h_{array}=0.6$ m 이상으로 증가함에 따라 최대 진폭 및 위상 왜곡은 10 mA, 38° 이내로 크게 개선됨을 알 수 있다. 평면파가 $\theta_{inc}=+35^\circ$ 에서 입사하는 경우, 유사한 왜곡 경향성을 보이



(a) 수신전류 진폭
(a) Received current magnitudes

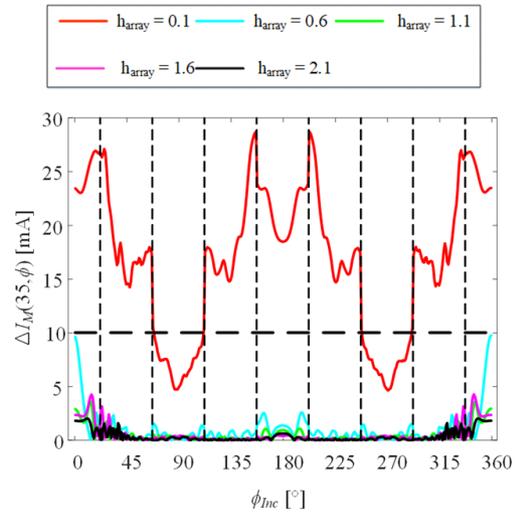


(b) 수신전류 위상
(b) Received current phases

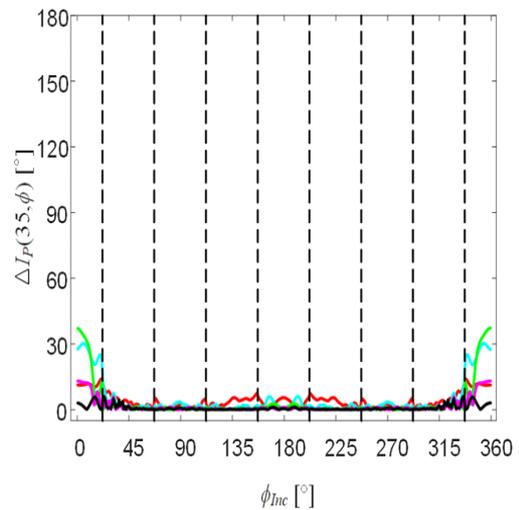
그림 7. 탐지 레이더 수신전류 ($\theta_{inc} = -35^\circ$)
Fig. 7. Magnitudes and phases of received currents.

나, 포신에 의한 차폐가 아닌 탐재 구조체에 의한 다중경로 현상으로 왜곡이 발생한다. 또한, $h_{array} = 0.1$ m의 탐재 높이에서 발생하는 최대 26.8 mA의 진폭 왜곡은 $h_{array} = 0.6$.

그림 9는 추적 레이더의 고각 커버리지($-11^\circ \leq \theta_{inc} \leq$



(a) 수신전류 진폭
(a) Received current magnitudes



(b) 수신전류 위상
(b) Received current phases

그림 8. 탐지 레이더 수신전류 ($\theta_{inc} = +35^\circ$)
Fig. 8. Magnitudes and phases of received currents.

$+11^\circ$)에 1° 간격으로 위치한 평면파($\phi_{inc} = 0^\circ$)로부터 수신되는 전류의 진폭 및 위상 분석 결과이다. 그림 9(a)와 그림 9(b)는 각각 최외곽 소자의 진폭 및 위상을 나타내며, 그림 9(c)와 그림 9(d)는 중앙 소자의 결과를 나타낸다. 또한, 탐지 레이더와 동일하게 배열 안테나의 높이(h_{array})를

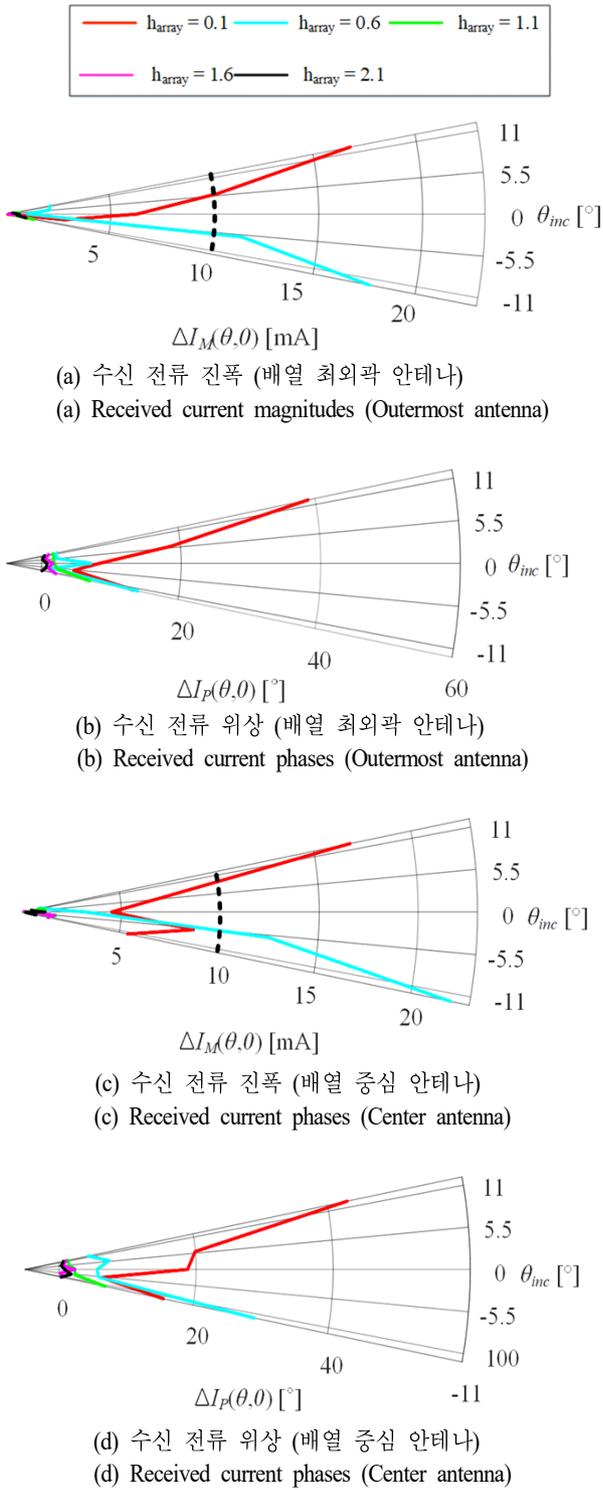


그림 9. 추적 레이더 수신 전류의 진폭 및 위상
 Fig. 9. Magnitudes and phases of received currents.

0.1 m에서 2.1 m까지 0.5 m 간격으로 조절하였다. 최외곽 소자의 경우, $h_{array}=0.1$ m에 배치될 때 $\theta_{inc}=11^\circ$ 에서 진폭과 위상 왜곡이 최대 17 mA, 39.59° 발생하며, $h_{array}=0.6$ m에서는 $\theta_{inc}=-11^\circ$ 의 평면파에 대해 최대 18 mA의 진폭 왜곡이 나타난다. 중앙 소자 또한 유사한 경향을 띄나, 포신의 구조와 정렬 되므로 진폭 및 위상 왜곡이 $h_{array}=0.6$ m에서 $\theta_{inc}=-11^\circ$ 의 평면파에 대해 최대 22 mA, $h_{array}=0.1$ m에서 $\theta_{inc}=11^\circ$ 의 평면파에 대해 최대 42.94° 로 크게 증가한다.

탐지 및 추적 레이더의 커버리지 내 모든 평면파에 대해 수신전류의 진폭 및 위상 왜곡을 도출하였으며, 배열 안테나 탑재 높이에 따른 평균 전류 왜곡(성능평가함수 1) 변화를 그림 10에 나타내었다. 본 논문에서는 평균 왜

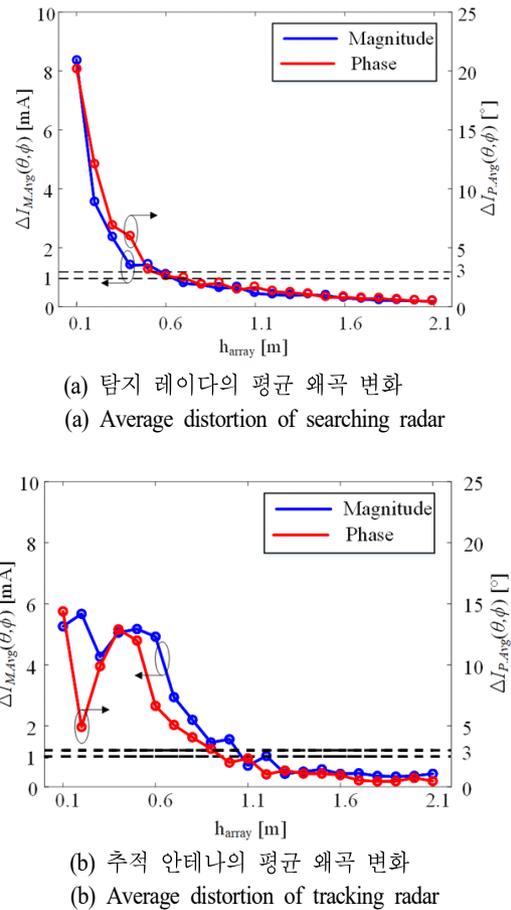


그림 10. 탑재 높이에 따른 평균 전류 왜곡 변화
 Fig. 10. Variations of average current distortions.

곡 값이 수렴하는 1 mA와 3°를 각각 진폭과 위상의 왜곡 판단 기준으로 설정하였으며, 이를 고려할 때, 탐지 레이다는 $h_{array}=0.6$ m 이상, 추적 레이다는 $h_{array}=1.1$ m 이상에서 왜곡 판단 기준을 만족한다.

그림 11은 배열 안테나 탑재 높이에 따른 탐지 및 추적 레이다의 평균 패턴 왜곡(성능평가함수 2) 변화를 나타낸다. 전류 왜곡 기준을 적용한 결과와 마찬가지로, 탐지 및 추적 레이다의 높이가 각각 $h_{array}=0.6$ m, $h_{array}=1.1$ m 이상일 때, 0.3 이하의 평균 패턴 왜곡이 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안된 전류 및 패턴 왜곡 평가 기준이 상호 검증에 활용될 수 있음을 내포한다. 이러한 상호 검증 프로세스의 필요성을 설명하기 위해, 동일한 탐지 레이다를 0.1 m 높이에 배치한 뒤 패턴 왜곡 및 수신전류의 진폭, 위상 왜곡을 추가로 분석하였다. 그 결과, 개별 안테나 커버리지 내($-22.5^\circ < \varphi_{inc} < +22.5^\circ$) 패턴 변화는 1.3 dB 이내, 수신전류의 진폭 변화는 0.5 mA 이하로 왜곡이 거의 없지만, $\theta_{inc}=24^\circ$, $\varphi_{inc}=13^\circ$ 에서 최대 63°의 수신 위상 왜곡이 발생한다. 따라서 제안된 프로세스는 기존의 패턴 왜곡 방식에서 검출하지 못하는 위상 왜곡을 사전에 예측하고 방지할 수 있다.

그림 12는 탐지 레이다의 탑재 위치에 따른 빔조향 패턴 비교를 보여준다. 해당 분석에는 32소자 다이폴 원형 배열 안테나를 사용하였으며, 배열 반경은 소자 간 간격이 반파장이 되도록 하였다. 빔조향 패턴이 $\theta=-35^\circ$, φ

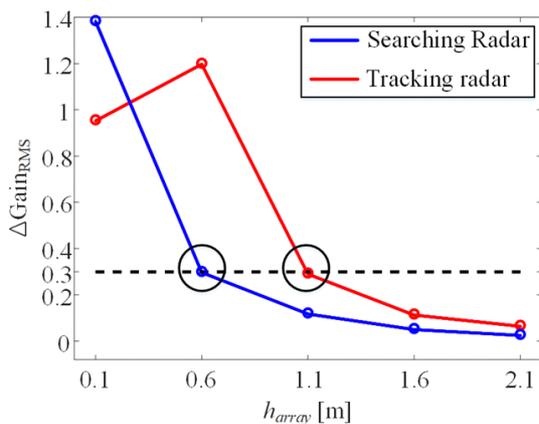


그림 11. 탐지 및 추적 레이다의 패턴 왜곡 변화
Fig. 11. Variations of average gain distortions.

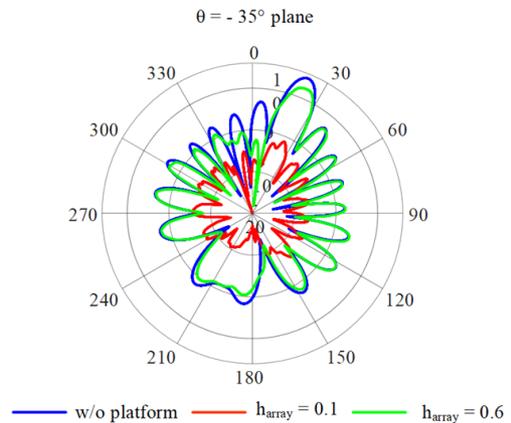


그림 12. 탐지 레이다 배열 안테나 빔조향 패턴
Fig. 12. Beamforming patterns of searching radar.

$=22.5^\circ$ 를 조향하도록 가중치를 인가하였으며, 구조체가 없는 경우, h_{array} 가 0.1 m인 경우, h_{array} 가 0.6 m인 경우를 비교하였다. 그 결과, 전류 및 패턴 왜곡이 발생하는 $h_{array}=0.1$ m에 배열 안테나가 탑재되는 경우, 조향 방향에서 16.4 dB의 주빔 이득 저감이 발생하며, $h_{array}=0.6$ m의 경우에는 2.5 dB만 저감되어 14 dB 개선됨을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 근접방어시스템에 탑재되는 탐지 및 추적 레이다의 성능평가 프로세스를 제안하였다. 제안된 프로세스에서는 레이다 커버리지 내에 위치한 평면파에 의해 유기되는 각 포트 전류의 진폭 및 위상을 복소 조향 벡터로 저장하고, 제안된 전류 왜곡 기준(성능평가함수 1)과 패턴 왜곡 기준(성능평가함수 2)을 이용하여 탑재 적합도를 상호 검증한다. 탐지 및 추적 레이다 특성에 맞게 각각 다이폴과 마이크로스트립 패치로 모델링하였으며, 부분 메쉬를 적용하여 총 해석 시간을 41% 단축하였다. 제안된 평가 프로세스의 효용성 검증을 위해 상용 포신 구조체에 탑재된 레이다의 성능을 평가하였으며, 분석 결과, 탐지 레이다는 레이다의 높이 $h_{array}=0.6$ m 이상, 추적 레이다는 $h_{array}=1.1$ m 이상에 탑재될 때, 진폭 1 mA 이하, 위상 3° 이내의 전류 왜곡이 확보됨을 확인하였다. 본 기술을 이용할 경우, 레이다, 방향탐지시스템, 빔조향시

스텝 등 다수의 안테나로 구성된 배열 안테나 시스템이 대형 구조체에 탑재될 때 발생 가능한 전파 산란, 차폐, 커플링에 의한 성능 열화를 사전에 예측할 수 있으므로 기존의 안테나 구조체 탑재성능 예측 프로세스 보다 효율적인 배치 적합도의 평가가 가능함을 확인하였다. 따라서 대형 구조체에 탑재되는 배열 안테나 시스템을 포함한 다양한 민수 및 군수 산업 분야로의 확장도 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] A. Apte, *Optimizing Phalanx Weapon System Life-Cycle Support*, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, NPS-LM-04-014, 2004.
- [2] J. Gallant, E. Vanderbeke, F. Alouahabi, and M. Schneider, "Design considerations for an electromagnetic railgun to be used against antiship missiles," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, no. 10, pp. 2800-2804, Oct. 2013.
- [3] B. Steinberg, E. Yadin, "Effect of multipath and scattering on array gain of a large adaptive beam forming phased array," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 33, no. 5, pp. 481-487, May 1985.
- [4] J. Go, G. Byun, K. Kim, J. Ju, and H. Choo, "Performance evaluation and analysis of a VHF-UHF blade antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 10, pp. 951-957, Oct. 2013.
- [5] Y. Lai, H. Zhou, Y. Zeng, and B. Wen, "Relationship between DOA estimation error and antenna pattern distortion in direction-finding high-frequency radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 8, pp. 1235-1239, Aug. 2019.
- [6] S. Yoo, H. Kim, G. Byun, and H. Choo, "Estimation of detection performance for vehicle FMCW radars using EM simulations," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 1, pp. 13-19, Jan. 2019.
- [7] H. Xiang, B. Chen, T. Yang, and D. Liu, "Improved de-multipath neural network models with self-paced feature-to-feature learning for DOA estimation in multipath environment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 5, pp. 5068-5078, May 2020.
- [8] L. Zhang, G. Wang, Z. Qiao, and H. Wang, "Azimuth motion compensation with improved subaperture algorithm for airborne SAR imaging," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, no. 1, pp. 184-193, Jan. 2017.
- [9] R. Wang, B. Wen, and W. Huang, "A support vector regression-based method for target direction of arrival estimation from HF radar data," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 5, pp. 674-678, May 2018.
- [10] G. Byun, K. Y. Hwang, H. G. Park, S. Kim, and H. Choo, "A modeling process of equivalent terrains for reduced simulation complexity in radar scene matching applications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 2, pp. 51-56, Apr. 2017.

유 태 호 [울산과학기술원/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1015-0112>



2020년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)
2020년 2월~현재: 울산과학기술원 전기 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Direction Finding Antennas 등

김 상 현 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2923-1788>



2017년 2월: 고려대학교 기술경영전문대학원 국방기술경영학과(석사)
2007년 3월~현재: LIG 넥스원(주) CIWS-II TFT 수석연구원
[주 관심분야] 근접방어무기체계, 구조해석 및 모델링 등

이 행 수 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6323-6294>



2006년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2006년 3월~현재: LIG 넥스원(주) CIWS-II TFT 수석연구원
[주 관심분야] 능동위상배열 레이더, 근접방어무기체계, 레이더 시스템 등

변 강 일 [울산과학기술원/조교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9388-9205>



2010년 2월: 홍익대학교 전자전기공학 (공학사)
2012년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2015년 8월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학박사)
2018년 2월~현재: 울산과학기술원 전기

전자공학과 조교수
[주 관심분야] Antenna, Array Antenna, Metasurface, Bio EM sensor 등

박 준 현 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2750-6688>



1996년 2월: 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 3월~현재: LIG 넥스원(주) 레이더연구소 수석연구원
[주 관심분야] 능동위상배열 레이더, 합성용 레이더, 레이더 신호처리 등