

# PML 경계 설정이 플랫폼 내 탑재된 센서 간 상호간섭 해석에 미치는 영향성 분석

## Effect of PML Boundary Parameters on Mutual Interference Analysis for Co-Sited Sensors

김준희<sup>1</sup> · 김진우<sup>2\*</sup> · 이종선<sup>3\*</sup> · 배기웅<sup>4\*\*</sup> · 황금철<sup>5</sup>

Jun Hee Kim<sup>1</sup> · Jin Woo Kim<sup>2\*</sup> · Jong Seon Lee<sup>3\*</sup> · Ki-Woong Bae<sup>4\*\*</sup> · Keum Cheol Hwang<sup>5</sup>

### 요약

본 논문에서는 FDTD 기반 시간 영역 해석을 통해 PML 경계 설정이 플랫폼 내 탑재된 센서 간 상호간섭 해석 시 미치는 영향성에 대해 분석하였다. 시간 게이팅을 활용하여 관심 대상인 표면전류로 인한 간섭과 PML 경계에서의 잔류 반사를 분리하여 잔류반사가 상대적으로 더욱 큰 간섭을 일으킬 수 있음을 확인하였으며 시간지연 계산, 전기장 분포 분석을 통하여 잔류반사가 상호간섭 해석에 영향을 미칠 수 있음을 실증하였다. 또한, PML 경계의 반사계수  $R_0$ 를 조정함으로써 잔류반사로 인한 간섭을 제거할 수 있음을 보였다. 이를 바탕으로 상호간섭 분석 시 초기에 해석 대상에 대한 최소한의 PML 성능 기준을 명시·충족할 수 있는 검증 절차 도입의 필요성을 보였다.

### Abstract

The effects of PML boundary settings on the mutual interference analysis among the platform-mounted sensors were examined using an FDTD-based approach. Using time gating, the surface current interference was separated from the PML-induced residual reflection, which dominated the received interference. From the time delay estimation and E-field distribution, it was shown that the residual reflection-affected the overall mutual interference results. These results motivate the adoption of a verification procedure that specifies the minimum PML performance criteria at the beginning of interference studies.

Key words: PML Boundary, Mutual Interference, Co-Sited Sensors, FDTD Time-Gating, High-Impedance Surface (HIS)

### I. 서론

최근 통신·센싱 모듈과 같은 다수의 RF 센서가 단일 플

랫폼 위에 근접 배치되는 집적 설계가 빠르게 확산되면서 공통 접지, 인접 주파수 운용 및 동시 송수신 운용 등의 이유로 센서 간 상호간섭은 시스템 신뢰성을 좌우하는 중요한

「이 논문은 2025년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. UC200001DD).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

\*한화시스템(Hanwha Systems)

\*\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1: 석·박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-8771-6615>), 2: 전문연구원(<http://orcid.org/0009-0004-5114-8934>) 3: 연구원(<http://orcid.org/0000-0002-1505-260X>),

4: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-9461-0605>), 5: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-8074-1137>)

· Manuscript received October 1, 2025 ; Revised October 22, 2025 ; Accepted March 4, 2026. (ID No. 20251001-115)

· Corresponding Author: Keum Cheol Hwang (e-mail: [khwang@skku.edu](mailto:khwang@skku.edu))

요소가 되었다<sup>[1]</sup>. 이러한 상호간섭은 수신 감도 열화, LNA·mixer 등의 능동 소자 포화, 오탐지율 증가 등 다양한 형태의 성능 저하를 초래할 수 있기에 사전에 EM(electromagnetic) 해석을 통한 간섭 경로의 모델링·예측·저감 설계를 필요로 한다. FDTD(finite-difference time-domain) 기법의 경우 시간영역에서 맥스웰 방정식을 해석하는 방법으로 광대역 해석 및 시간 게이팅을 통한 시간 축에서의 도착 시간 분해를 통해 다양한 간섭 경로를 분리·정량화할 수 있다. 해당 기법의 경우 무한 영역 근사를 위해 PML(perfectly matched layer) 경계를 주로 활용하며 이는 이상적으로는 경계에서 무반사이지만, 유한 두께·이산화·경사각 입사 등의 요인에 의해 잔류 반사가 존재할 수 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 잔류 반사는 수신기에 유입되어 간섭 경로 예측 결과에 왜곡을 일으킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 시간 영역 분석을 통해 경계 잔류반사가 상호간섭에 미치는 영향성을 실증하고, PML 두께 조정에 따른 반사계수  $R_0$  개선으로 해당 간섭이 실질적으로 저감 됨을 보임으로써 상호간섭 해석에서 PML 경계설계의 중요성을 제시한다.

## II. Perfectly Matched Layer

PML 경계에 대한 관점은 관심 영역과 PML 경계 간 임피던스 정합과 PML 경계 내 전파 흡수 두 가지로 분류하여 해석할 수 있다. 임피던스 정합의 경우 식 (1)의 조건을 만족하도록 PML 경계의 물성을 설정함으로써 접선 임피던스를 경계에서 일치시켜 각도·편파·주파수에 무관하게 정합이 이루어진다. PML 경계 내 전파 흡수의 경우 좌표축 복소 신장을 통해 이루어지며 경계면 내 완전 정합을 위해 경계에 수직한 법선 방향의 좌표축으로만 복소 신장이 이루어지며 법선 방향으로 복소 신장이 이루어질 경우 접선 임피던스의 변화로 인해 경계면에서 반사가 생기게 된다. 따라서 X축에 수직한 PML 경계의 경우  $(\sigma_x, \sigma_x^*, 0, 0)$ , Z축에 수직한 PML 경계의 경우  $(0, 0, \sigma_z, \sigma_z^*)$ 과 같이 설정하여야 한다. 그림 1은 플랫폼 내 탑재된 센서 간 간섭분석을 위한 PML 경계를 나타내며, 센서 간 상호간섭 저감을 위해 HIS(high impedance surface)구조가 탑재되어 있다. XZ-plane에 입사각  $\theta_i$ 를 갖고 입사하는 TE 모드 전파의 경우 식 (2)와 같이 나타낼

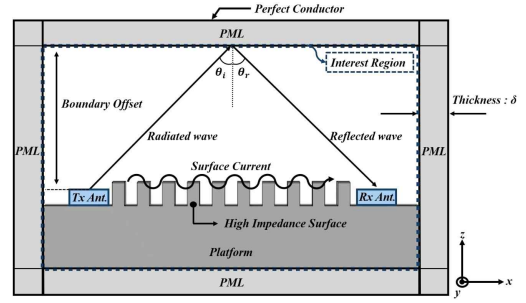


그림 1. 센서 간 간섭분석을 위한 PML 경계  
Fig. 1. PML boundary to analysis interference between sensor.

수 있으며 PML 경계의 경우 법선 방향인 Z축으로 좌표축 복소 신장이 이루어진다. 이때, 식 (1)의 완전 정합 조건을 만족할 경우 식 (3)의  $G=1$ 의 값을 갖게 되고 입사된 TE 모드 전파의 크기는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 일반적으로 PML 경계 내 종단은 완전 도체의 형태로 구현되며 종단에서 반사된 전파는 PML 경계를 한 번 더 진행하게 된다. 따라서 두께가  $\delta$ 인 PML 경계에서의 총 반사계수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[2]</sup>. PML 경계의 흡수율은 두께  $\delta$ , 전도도  $\sigma$  및 입사각  $\theta_i$ 에 의해 결정되며, 입사각이 near-grazing angle에 가까울수록 흡수율이 낮아지기에 해석 구조체와 PML 경계 사이의 충분한 거리를 이격시켜 입사각을 최소화시켜야 한다.

$$\frac{\sigma_j}{\epsilon_0} = \frac{\sigma_j^*}{\mu_0} \quad (j = x, y, z) \quad (1)$$

$$\psi = \psi_0 e^{-jw \left( \frac{x \sin \theta_i + z \cos \theta_i}{cG} \right)} e^{-(\sigma_x \sin \theta_i / \epsilon_0 c G)x} e^{-(\sigma_z \cos \theta_i / \epsilon_0 c G)z} \quad (2)$$

$$G = \sqrt{\frac{1 - j(\sigma_x / \epsilon_0 \omega)}{1 - j(\sigma_x^* / \mu_0 \omega)} \sin^2 \theta_i + \frac{1 - j(\sigma_z / \epsilon_0 \omega)}{1 - j(\sigma_z^* / \mu_0 \omega)} \cos^2 \theta_i} \quad (3)$$

$$|\psi(z, \theta)| = \psi_0 e^{-(\sigma \cos \theta_i / \epsilon_0 c)z} \quad (4)$$

$$|R(\theta)| = e^{-2(\sigma \cos \theta_i / \epsilon_0 c)\delta} \quad (5)$$

## III. PML 경계 설정에 따른 시간 영역 결과 분석

그림 2는 HIS 구조의 간섭 저감 성능 확인을 위한 시뮬레이션 결과로 해석 구조체와 PML 경계 사이를 각 2, 4,

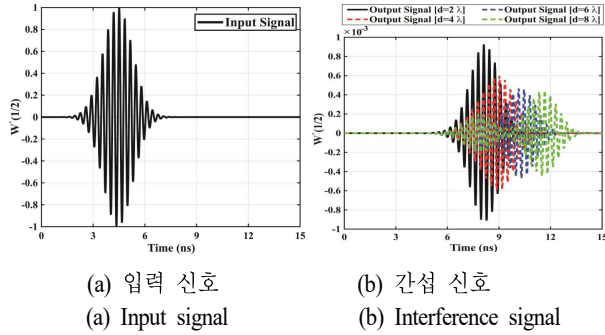


그림 2. PML 경계 이격 거리에 따른 시간 영역 간섭 신호  
Fig. 2. Time-domain interference signal versus offset distance.

6, 8 λ만큼 이격 시에 따른 간섭 결과를 시간 영역에서 확인하였다. 시뮬레이션 Tool의 경우 Dassault system 社의 CST Microwave Studio를 활용하였으며 해석 주파수 대역은 S-대역이다. 해석에 활용된 PML 경계의 경우 수직 입사( $\theta_i=0^\circ$ ) 시  $1e-2$  수준의 반사계수  $R_0$ 를 갖는다. 입력 신호는 Gaussian signal을 인가하였으며, 4.5 ns에서  $1V_{peak}$  값을 가지며 예상되는 간섭 경로의 경우 두 가지로 안테나 방사 시 플랫폼에 야기되는 표면전류에 의한 간섭과 PML 경계로부터의 잔류 반사가 존재하며, 특히 안테나의 Boresight 방향인 Z축 PML 경계에서의 잔류 반사가 존재한다. 표면전류에 의한 간섭의 경우 송·수신 간 직선 거리는 약  $7\lambda$  정도이며 HIS 구조의 slow-wave 특성 및 각 송·수신 안테나의 급전부까지의 길이 고려 시 표면전류에 의한 간섭 신호의 예상 시간 지연은 약 2.9 ns 수준이다. 또한, Z축 PML 경계로부터의 잔류 반사 경로에 대한 예상 시간 지연을 시뮬레이션 결과 내 peak 값의 시간 지연과 함께 표 1에 나타내었다. 이격 거리가 커짐에 따라 시간 지연 또한 증가하였으며 잔류 반사 경로에 대한 예상 시간 지연과 유사함을 확인할 수 있다.

$$\tilde{X}(f) = \frac{1}{A_w} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]w[n]e^{-j2\pi fn\Delta t} \quad (6)$$

표 1. 이격거리에 따른 간섭 신호 시간 지연  
Table 1. Distance-dependent time delay.

| Distance ( $\lambda$ )    | 2   | 4   | 6   | 8   |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Estimated time delay (ns) | 3.4 | 4.3 | 5.4 | 6.6 |
| Simulated time delay (ns) | 3.6 | 4.5 | 5.6 | 6.8 |

$$A_w = \sum_{n=0}^{N-1} w[n]\Delta t \quad (7)$$

8 λ만큼 이격 시 9.5 ns를 기준으로 전후에 두 가지 형태의 신호가 형성됨을 확인할 수 있고 이를 분석하고자 식 (6) 및 식 (7)을 활용하여 4.5~9.5 ns 및 9.5~14.5 ns만큼 각각 시간 게이팅을 이용한 FT(Fourier transform)를 활용하여 주파수 영역에서 비교하였으며 이를 그림 3에 도시하였다.  $A_w$ 의 경우 정규화 변수로 입력신호와와의 정규화를 위해 임의로 1로 설정하였으며,  $w[n]$ 는 시간 게이팅 영역의 샘플을 선택하는 변수이다. 간섭 신호 시간 지연 및 FT 결과를 통해 해석 대상인 표면 전류에 의한 간섭보다 PML 경계로부터의 잔류반사가 더욱 큰 값을 갖게 되어 HIS 구조의 간섭 저감 성능 해석에 왜곡을 초래하게 된다. 이는 유한두께를 갖는 PML 경계에 의한 것으로 PML 두께를 증가시킴으로써 잔류반사로 인한 간섭을 해소할 수 있으며 이를 그림 4(a)에 도시하였다.  $R_0$ 가 증가

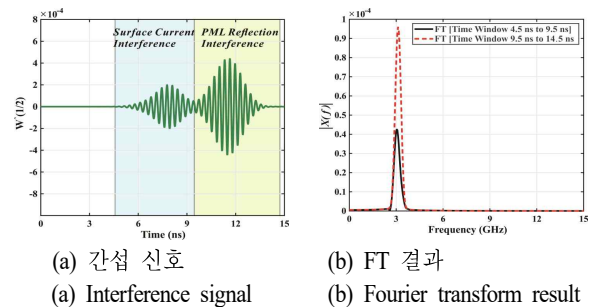


그림 3. Time-gated FT를 통한 간섭 경로 분리 결과  
Fig. 3. Separation of interference paths using time-gated FT.

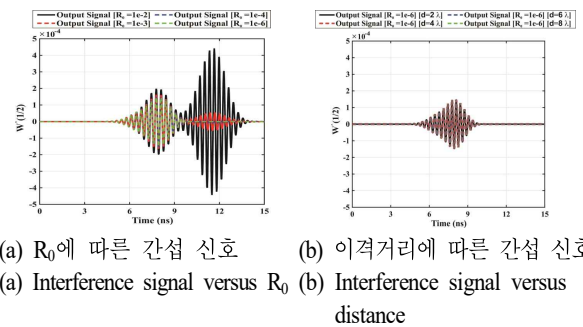


그림 4. PML 경계 설정에 따른 시간 영역 간섭 신호  
Fig. 4. Interference signal under different PML settings.

함에 따라 잔류반사로 인한 간섭 경로로 예측되는 9.5~14.5 ns 영역에서의 간섭이 크게 감소하였다. 약  $R_0=1e-4$  이상 설정 시 잔류반사로 인한 간섭이 표면전류에 의한 상호간섭보다 상당히 작은 값으로 나타남에 따라 해석 결과에 잔류반사로 인한 간섭이 영향을 주지 않게 된다. 이를 기반으로  $R_0=1e-6$  설정 시 PML 경계 이격 거리에 따른 간섭 신호를 재분석 진행하였으며 이를 그림 4(b)에 도시하였다. 기존 PML 경계에 의한 잔류반사들이 제거됨으로써 목표 해석 대상인 표면전류에 의한 간섭만이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 5는  $t=10$  ns에서의 전기장 분포로 상대적으로 낮은 반사계수  $R_0$ 에서는 잔류반사로 인해 수신부에 유입되는 신호가 다수 존재하며 높은 반사계수  $R_0$ 에서는 잔류반사가 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 HIS 구조 간섭 저감 성능을 확인한 결과 그림 6과 같이 PML 경계의 잔류반사로 인해 특정 주파수 대역에서는 HIS 구조 존재 시 오히려 간섭이 증가하는 현상이 나타나는 모습을 보이지만 반사계수 조정을 통해 PML 경계에서의 잔류반사들을 제거하여 실제

표면전류에 의한 간섭만이 존재할 경우 HIS 구조가 대역 전반에 걸쳐 약 20 dB 수준의 저감 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 PML 경계 설정이 플랫폼 내 탑재된 센서 간 상호간섭 해석 시 미치는 영향성에 대해 분석하였다. 플랫폼 내 탑재된 센서 간 상호간섭은 주로 도체면 경계조건에 의해 야기된 표면전류에 의해 나타나며 HIS 구조와 같은 저감 구조가 존재할 경우 상대적으로 낮은 크기를 갖는 간섭 신호가 유입되기에 유한두께를 갖는 PML 경계에서의 잔류반사 신호와 유사한 크기를 가질 수 있으며 다중 경로에서의 신호들이 상쇄·보강간섭으로 인해 전체 해석 결과에 왜곡이 발생할 수 있다. 이를 확인하고자 시간 영역에서 간섭 경로를 분리하여 분석하였으며, PML 경계 두께를 조정함으로써 잔류반사가 해석 결과에 영향을 미침을 보였다. 이는 상호간섭 해석 시 초기에 최소한의 PML 성능 기준을 명시·충족할 수 있는 검증 절차 도입의 필요성을 제기한다.

#### References

- [1] A. Martone, M. Amin, "A view on radar and communication systems coexistence and dual functionality in the era of spectrum sensing," *Digital Signal Processing*, vol. 119, p. 103135, Dec. 2021.
- [2] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of Computational Physics*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, Oct. 1994.
- [3] W. C. Chew, W. H. Weedon, "A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 7, no. 13, pp. 599-604, Sep. 1994.

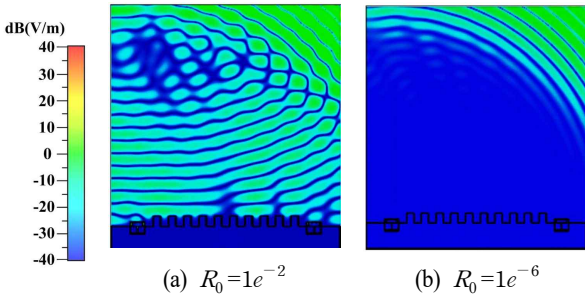


그림 5.  $t=10$  ns에서의 전기장 분포 결과  
Fig. 5. Electric field distribution at  $t=10$  ns.

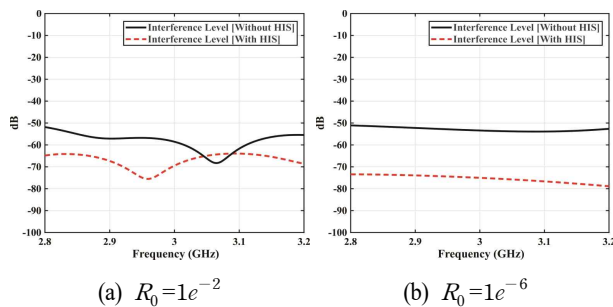


그림 6. HIS 구조 간섭 저감 성능 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulated interference-suppression performance of HIS.