

# Inverse Synthetic Aperture Radar와 CLEAN을 이용한 고밀도 채프운의 산란점 추출

## Scattering Center Extraction of Dense Chaff Clouds Using Inverse Synthetic Aperture Radar and CLEAN

김 준 선 · 박 수 홍 · 서 동 욱

Jun-Seon Kim · Su Hong Park · Dong-Wook Seo

### 요 약

채프운의 산란 특성을 모의 시 채프 각각을 산란점으로 취급할 수 있다. 저밀도 채프운의 synthetic aperture radar 영상에서는 채프 각각이 산란점으로 보이나, 고밀도 채프운의 특성도 알아볼 필요가 있다. 본 논문에서는 고밀도 채프운에서 inverse synthetic aperture radar 및 CLEAN 알고리즘을 이용하여 산란점을 추출하여 그 결과를 분석한다. 시뮬레이션 대상은 최대 1,000개의 채프로 구성되며 위치와 방향 모두 구에서 균등할 수 있도록 설정한 채프운이다. 채프운의 전기장은 모멘트법을 이용하여 계산하며, 채프운의 밀도를 고정하고 채프의 개수를 증가시켜 일정한 밀도에서 시뮬레이션을 수행한다. 또한 CLEAN 알고리즘을 이용해 우리가 정한 기준점까지 추출한 산란점의 개수와 잡음의 관계를 분석한다. 결론적으로 고밀도 채프운에서 추출된 산란점은 경향성이 보이며 이를 이용해 산란점을 이용한 모델링이 가능할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

This study analyzed the scattering centers of high-density chaff clouds using inverse synthetic aperture radar and the CLEAN algorithm. Up to 1,000 chaffs with uniformly random positions and orientations were simulated at a constant density, and the electric field was computed using the method of moments. We examined the relationship between the noise level and the number of extracted scattering centers. In conclusion, the extracted scattering centers from high-density chaff clouds exhibited identifiable trends, suggesting the potential for modeling chaff using scattering center representations.

Key words: Chaff Cloud, High-Density, Inverse Synthetic Aperture Radar, Noise, Scattering Center

### I. 서 론

전자기파 및 광파를 이용하여 타깃을 탐지하기 위한

센서는 각각 레이더와 라이다로 군용에서부터 시작하여  
민수용으로 다양하게 확장 발전하고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

센서를 통한 타깃 탐지기법의 향상과 더불어 이를 방

「이 연구는 광역방어 특화연구센터 프로그램의 일환으로 국방과학연구소와 방위사업청의 지원으로 수행되었음(UD240002SD).」

국립한국해양대학교 전파공학과/해양인공지능융합전공(Department of Radio Communications Engineering/Interdisciplinary Major of Maritime AI Convergence, National Korea Maritime & Ocean University)

· Manuscript received July 4, 2025 ; Revised July 25, 2025 ; Accepted August 1, 2025. (ID No. 20250704-021S)

· Corresponding Author: Dong-Wook Seo (e-mail: dwseo@kmou.ac.kr)

해하고 기만하는 기술도 발전하고 있다. 채프는 레이더 대항책으로, 수동 채밍 방식으로 레이더의 탐지와 추적을 기만하기 위한 도구이다. 채프는 값이 싸고 사용이 쉬운 특징이 있어 각종 전투기나 함정과 같은 운송 수단에 널리 사용되고 있다<sup>[3]</sup>.

Liu 등<sup>[4]</sup>은 공기 중에 퍼진 1만 개 채프로 이루어진 저밀도의 채프운을 polarimetric synthetic aperture radar를 이용하여 영상화 하였다. 이를 통해 저밀도의 채프운에서는 채프 하나하나가 산란점으로 보일 수 있다는 판단이 가능하나, 고밀도 채프운의 산란점 추출 사례는 찾을 수 없어 채프운의 산란점 모델링의 가능성 판단이 불가하였다. 따라서 본 연구에서는 밀도가 일정한 고밀도 채프운의 산란점의 특성을 분석하여 채프운의 산란점 표현의 가능성을 판단하고자 한다.

## II. ISAR와 CLEAN 알고리즘

ISAR는 움직이는 목표물을 거리-도플러 영역에서 영상화하는 강력한 신호 처리 기법이다<sup>[5]</sup>. 일반적으로 관측 각도에 의한 위치 보정이 필요하나, 작은 대역폭과 작은 각도 범위에서는 간단히 푸리에 역변환을 취함으로써 ISAR 영상을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 앞서 언급한 작은 대역폭과 작은 각도 범위에서의 ISAR 영상을 획득하였고 그 계산은 모멘트법(MoM, method of moments)을 이용하였다. 표 1은 ISAR의 상세 설정값이다.

표 1. ISAR 시뮬레이션 설정값

Table 1. ISAR settings.

Name	Value
Center frequency	Ku-band
Bandwidth	1.5864 GHz
Angle range	5.3467°
Frequency resolution	12.491 MHz
Angle resolution	0.0421°
Range resolution	9.45 cm
Cross-range resolution	9.45 cm
SNR	-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, ∞ dB
Type of noise	Gaussian

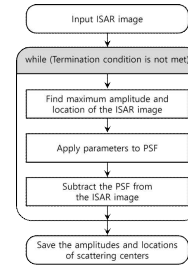


그림 1. CLEAN 알고리즘의 순서도

Fig. 1. Flowchart of the CLEAN algorithm.

CLEAN 알고리즘은 ISAR 기법에서의 산란점 접근을 이용한 산란점 추출 알고리즘이다. ISAR 영상은 특정 진폭과 위치를 갖는 PSF(point spread function)들의 합으로 표현할 수 있다. 특정 진폭 및 위치를 갖는 PSF는 식 (1)과 같다<sup>[5]</sup>.

$$\text{PSF}(x, y) = A \left( e^{j \frac{4\pi f_c}{c} (x + \phi_c y)} \frac{4f_c B \Omega}{c^2} \right) \text{sinc} \left( \frac{2B}{c} x \right) \text{sinc} \left( \frac{2f_c \Omega}{c} y \right) \quad (1)$$

여기서  $f_c$ 와  $\phi_c$ 는 각각 주파수와 관측 각도의 중심이고  $c$ 는 빛의 속도,  $B$ 는 대역폭,  $\Omega$ 는 관측 각도 범위이다. CLEAN 알고리즘의 과정은 그림 1에 나타낸 것과 같다.

## III. 채프운 시뮬레이션 조건

ISAR 기법을 이용한 산란점 추출 대상은 구형 채프운이다. 채프운의 부피와 반지름은 ISAR 영상에서 잘 보일 수 있도록 채프 사이의 평균 거리를 기준으로 식 (2)와 같이 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$V_{cc} = N_c d_{mean}^3 = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (2)$$

여기서  $d_{mean}$ 은 각 채프 사이의 평균 거리이며  $V_{cc}$ 는 채프운의 부피,  $N_c$ 는 채프 개수, 그리고  $r$ 은 채프운의 반지름이다. 구에서 균등한 분포를 갖는 채프의 위치와 방향은 식 (3) 및 식 (4)와 같이 방위각  $\phi$ 와 천정각  $\theta$ 를 생성함으로써 얻을 수 있다.

$$f_\phi(\phi_i) = \frac{1}{2\pi} \quad (3)$$

표 2. MoM에서 사용된 채프의 세부사항  
Table 2. Details of chaff used in MoM.

Name	Value
Chaff length	0.5 λ
Chaff count	100, 200, ..., 1,000
Average inter-chaff distance	5 λ
Density of chaff cloud	1458.73 chaff/m <sup>3</sup>
Location distribution	Uniform in sphere
Orientation distribution	Uniform on sphere

$$f_{\theta}(\theta_i) = \frac{\sin(\theta_i)}{2} \quad (4)$$

여기서  $f_{\phi}$ 와  $f_{\theta}$ 는 각각 방위각과 천정각의 확률 밀도 함수이고,  $i = 1, 2, \dots, N_c$ 이다. 표 2는 MoM 계산에 사용된 채프운의 세부사항이다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

채프운의 ISAR 영상을 고해상도로 보여주기 위해 4배의 zero-padding을 적용하였다. 그림 2는 채프 1,000 개의 ISAR 영상으로, SNR(signal to noise ratio)이 -10 dB일 때와 ∞일 때를 시뮬레이션한 것이다. 채프운이 존재하는 부분의 산란이 강하며, 시뮬레이션된 채프운의 크기와 비교하였을 때 그 크기가 거의 일치함을 고려하면, 채프운 전체적으로 산란함을 알 수 있다.

그림 3은 CLEAN 알고리즘으로 추출한 산란점을 표시한 ISAR 영상을 확대한 것이다. 흰색 원은 산란점이며, 그 크기는 해당 ISAR 영상에서 추출된 산란점의 최대 강

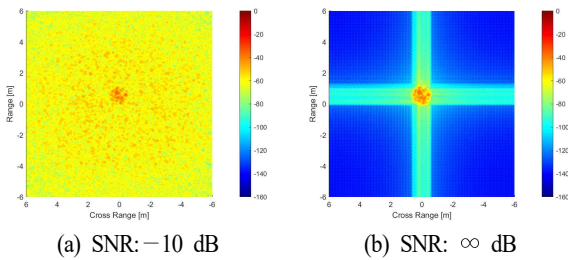


그림 2. SNR이 반영된 1,000개 채프의 ISAR 영상  
Fig. 2. ISAR image of 1,000 chaff with SNR applied.

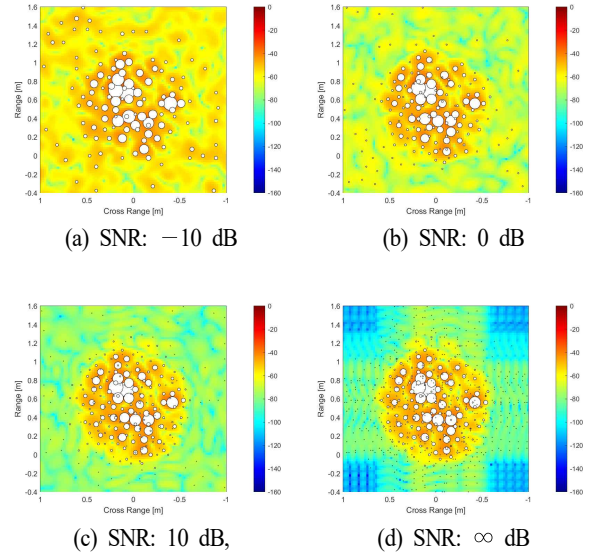


그림 3. CLEAN 알고리즘을 적용한 1,000개 채프의 SNR별 ISAR 영상  
Fig. 3. ISAR image according to SNR of 1,000 chaff with CLEAN applied.

도가 반영되어 결정되었다. 크기가 큰 산란점은 채프운이 위치하는 곳으로 몰려있으며 SNR의 변화에도 위치의 변화가 거의 없는 모습을 보인다.

Noise-free인 상황에서는 채프운의 영역 외에는 산란점이 거의 없다. 잡음이 추가된 경우 크기가 큰 산란점은 채프운의 안쪽으로 위치하지만, 잡음의 영향으로 인해 noise floor 수준의 산란점이 ISAR 영상 전체적으로 분포하고 있다. noise floor를 적절히 제외하기 위한 threshold는 다음의 방법으로 판별하였다. 산란점 진폭의 절댓값을 구하고, 다음 산란점과의 차이를 계산해 절댓값을 취한

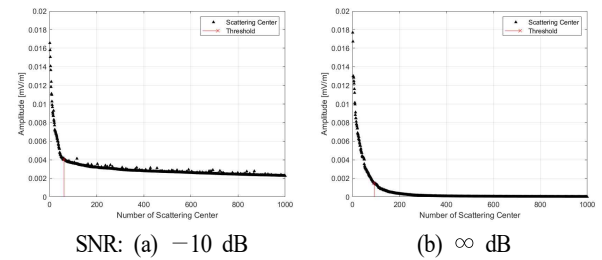


그림 4.  $N_{TH}$ 를 표시한 1,000개 채프의 CLEAN 결과  
Fig. 4. CLEAN results for 1,000 chaff with  $N_{TH}$ .

다. 이 차이의 10개 평균이, 원본 ISAR 영상의 최대 진폭의 절댓값을 채프의 개수로 나눈 값 미만이라면 해당 번호를 threshold number  $N_{TH}$ 로 판별한다.

그림 4는 위의 과정으로 1,000개 채프의 ISAR 영상에서 산란점을 추출해 진폭의 절댓값과  $N_{TH}$ 를 표시한 것이다. 산란점의 진폭은 SNR이 낮을수록 noise floor 레벨이 상승해, noise floor의 경계에서 진폭의 감소폭이 급격히 변화하는 것을 볼 수 있으며, SNR이 높으면 noise floor 레벨이 낮아져  $N_{TH}$ 로 판별하는 번호가 높아진다. 그림 4(b)는 추출된 산란점의 진폭의 감소가 적어지는 구간이 있어  $N_{TH}$ 로 일찍 판별되었으나, 전체적으로 SNR이 낮은 환경에서 추출한 산란점 전체의 강도가 SNR이 높을 때에 비해 낮을 수 있음을 나타낸다.

그림 5는 채프의 개수와 SNR별로  $N_{TH}$ 를 나타낸 것이다. 그림 5(a)는  $N_{TH}$ 를 그대로 나타내었고, 그림 5(b)는  $N_{TH}$ 까지의 진폭의 절댓값을 누적한 것과 전체의 비율을, 그림 5(c)는  $N_{TH}$ 를 채프 개수로 나눈 것이고, 그림 5(d)는 SNR별  $N_{TH}$ 를 평균 낸 것이다. 전체적으로 SNR이 높을수록  $N_{TH}$ 의 개수와 비율이 높았으며, 진폭의 절댓값 합의 비율의 경우 잡음으로 인한 전체적인 강도 증가를 보여

주는 결과이지만, 높은 SNR에서의 결과를 살펴보면 SNR이 높고 채프의 개수가 많을수록 채프운의 강도를 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5(d)는 채프의 개수가 증가할수록 추출되는 산란점의 개수가 증가하지만, 산란점 추출 개수가 증가하는 정도는 감소하는 결과를 보인다. 이는 채프의 개수가 증가할수록 채프운이 커지지만, 채프운의 산란 강도가 증가해 추출되는 산란점의 강도 또한 증가하기 때문이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 고밀도의 채프운에서 ISAR 및 CLEAN 알고리즘을 이용하여 산란점을 추출하였다. 채프운의 산란점은 채프운이 존재하는 영역에서 전체적으로 발생하였고, 산란점은 잡음의 영향으로 전체적으로 추출되거나 그 크기는 noise floor 수준이었다. noise floor를 제외한 산란점 개수는 채프의 개수가 증가할수록 같이 증가하였으나, 그 증가폭은 반대로 감소하였다. 고밀도의 채프운에서 추출되는 산란점의 개수는 채프의 개수와 SNR에 영향을 받았지만 그 위치는 거의 변화가 없었으며 진폭의 경우에서 작은 수준의 크기 변화를 보였다. 결론적으로 고밀도 채프운에서 추출되는 산란점은 경향성을 가지며 이를 이용해 산란점을 이용한 모델링이 가능함을 확인하였다.

## References

- [1] S. B. Jeong, H. I. Seo, G. D. Choi, and D. H. Seo, "A study on light weight of radar-based human activity recognition model using self-attention mechanism," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, vol. 47, no. 3, pp. 131-136, May 2023.
- [2] S. B. Jeong, Y. J. Shin, S. H. Lee, and J. H. Seong, "LiDAR-based background interpolation method for obstacles," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 84-90, Apr. 2023.
- [3] J. S. Kim, D. Y. Lee, T. H. Kim, and D. W. Seo, "Chaff cloud modeling and electromagnetic scattering properties estimation," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 58835-58849, Jun. 2023.
- [4] Y. Liu, S. Xing, G. Cui, Q. Liu, X. Wang, and Y. Liu,

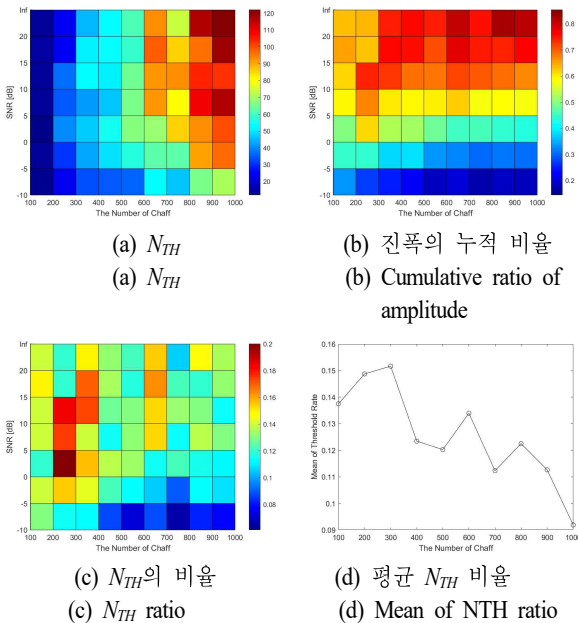


그림 5. 채프의 개수와 SNR별로 나타낸  $N_{TH}$   
Fig. 5.  $N_{TH}$  indicated by number of chaff and SNR.

"Simulation study on dynamics and PolSAR imaging of chaff clouds," *2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics(CISP-BMEI)*, Shanghai, Oct. 2017, pp. 1-6.

- [5] C. Özdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 271-297, 2012.
- [6] C. H. Lee, D. K. Kang, K. I. Kwon, K. T. Kim, and D. Y. Na, "Fast algorithm for full-Wave EM scattering analysis of large-scale chaff cloud with arbitrary orientation, spatial distribution, and length," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 3, pp. 631-635, Mar. 2025.

김 준 선 [국립한국해양대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2102-6264>



2022년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
2024년 2월: 국립한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)  
2024년 3월~현재: 국립한국해양대학교 전파공학과 박사과정  
[주 관심분야] RCS 해석, 전자파 수치해석

서 동 욱 [국립한국해양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9449-7772>



2003년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2005년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학석사)  
2011년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학박사)  
2011년 1월~2012년 9월: 국방기술품질원 선임연구원  
2012년 10월~2017년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원  
2017년 9월~현재: 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수  
[주 관심분야] 전자파 수치해석, RCS 해석, 레이더 시스템, 레이더 신호처리, 무선전력전송

박 수 흥 [국립한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-4448-0775>



2024년 2월: 국립한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
2024년 3월~현재: 국립한국해양대학교 전파공학과 석사과정  
[주 관심분야] RF, Radar, 레이더 신호 처리 등