

# 시뮬레이션에 의한 바이스테틱 클러터 구조 분석

## Analysis of Bistatic Clutter Structure through Simulation

전현무 · 정용식 · 정원주\* · 김종만\*\* · 양훈기

Hyeon-mu Jeon · Yong-Seek Chung · Won-zoo Chung\* · Jong-mann Kim\*\* · Hoon-Gee Yang

### 요 약

일반적으로 바이스테틱 클러터는 송신단과 수신단의 독립적인 이동에 의해 모노스테틱 클러터와는 달리 Angle-Doppler 평면에서 비선형적인 클러터 구조를 갖게 된다. 본 논문에서는 시뮬레이션 기법에 의해 Angle-Doppler 평면에서의 바이스테틱 클러터 구조를 이용해서 송신단과 수신단의 이동에 의한 클러터 구조 변화에 대해 분석한다. 또한, 시뮬레이션 결과를 통해 바이스테틱 레이더에서 클러터 공분산 행렬의 Rank가 가장 적게 되기 위한 송·수신단의 운용 조건을 보인다.

### Abstract

Generally, bistatic clutter, contrary to the monostatic clutter, has nonlinear structure in Angle-Doppler domain due to the noncooperative motion of the transmitter and the receiver. In this paper, we first simulate the bistatic clutter structure resulting from the relative motion of the transmitter and the receiver and then analyze their relations through the bistatic clutter structure in Angle-Doppler domain. Also, we show the operation condition of the transmitter and the receiver leading to low rank of a covariance matrix of the bistatic clutter.

Key words: Bistatic Radar, Clutter, Heterogenous, STAP, Clutter Rank

### I. 서 론

표적을 탐지하기 위해 클러터 성분들을 제거하는 것은 레이더의 가장 우선적으로 처리되어야 하는 기술이다. 클러터 성분들을 억제하기 위해서는 클러터 공분산 행렬의 추정이 필수적이지만, 실제 발생하는 heterogeneous 클러터는 레이더의 움직임뿐만 아니라, 인공 구조물, 클러터 RCS 변동, 다양한 종류의 클러터 성분들, 그리고 Target-like 신호 등 여러 가지 요인들에 의해 발생되므로 공

분산 행렬을 추정하는데 어려움이 있다<sup>[1],[2]</sup>. 최근 heterogeneous 클러터 문제를 해결하기 위해 knowledge-based 레이더 기술이 주목 받고 있다. Knowledge-based 레이더는 레이더를 제외한 다른 센서에서 얻은 정보나 간섭 신호들의 통계적 특성 등 다양한 사전정보를 이용함으로써 클러터를 억제 또는 표적의 탐지 성능을 향상시키는 기술이다<sup>[3],[4]</sup>. 바이스테틱 레이더 환경에서 발생하는 바이스테틱 클러터의 구조가 사전정보로 이용된다면 클러터 성분의 통계적 특성을 예측하는데 더욱 유리한 이점을

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

광운대학교 전자공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

\*고려대학교 전자통신공학과(Department of Radio Communications Engineering, Korea University)

\*\*국방과학연구소(Agency of Defence Development)

· Manuscript received October 23, 2015 ; Revised November 17, 2015 ; Accepted December 1, 2015. (ID No. 20151023-34S)

· Corresponding Author: Hyeon-mu Jeon (e-mail: yaho7090@kw.ac.kr)

주고, rank-reduced STAP과 같은 기법을 적용해서 클러터를 효율적으로 억제하기 위한 바이스테틱 레이더의 운용 방안을 제시할 수 있다<sup>5)</sup>. 따라서 본 논문에서는 knowledge-based 레이더에 제공되는 사전 정보의 하나로서, 송신단과 수신단의 운용 시나리오에 따른 바이스테틱 클러터 구조를 분석하고자 한다. 바이스테틱 클러터는 상당히 많은 입력 변수에 영향을 받으므로 이론적인 분석자료는 아직 발표된 예가 없다. 그러므로 본 논문에서는 시뮬레이션 기법을 통해서 Angle-Doppler 평면에서 바이스테틱 클러터 구조를 조사하였다.

본 논문의 구성은 Section II에서 바이스테틱 레이더 환경의 클러터 신호 모델링 과정을 설명하며, Section III에서 시뮬레이션을 통해 송신단과 수신단의 이동에 의한 클러터 구조 및 특성의 변화를 분석하였다.

## II. 신호 모델링

그림 1은 바이스테틱 레이더 환경의 Iso-range 클러터 cell들을 나타낸 것이다.

카테시안(cartesian) 좌표계에서 송신단과  $N$ 개의 배열 안테나로 구성된 수신단은 초기 위치 벡터  $P_{Tx} = (x_{P,T}, y_{P,T})$ 와  $P_{Rx} = (x_{P,R}, y_{P,R})$ 에 각각 위치하고, 송신단은 속도 벡터  $V_{Tx} = (x_{v,T}, y_{v,T})$  그리고 수신단은 속도 벡터  $V_{Rx} = (x_{v,R}, y_{v,R})$ 로 이동한다. 바이스테틱 레이더 환경에서 Iso-range의 클러터는 송신단과 수신단을 초점으로 한 타원 형태가 되고,  $K$ 개의 cell로 이루어져 있다.  $i$ 번째 클러터 cell과 송신단과 수신단의 초기 위치와 이루고 있는 단위 벡터를 각각  $u_{T,i}$ ,  $u_{R,i}$ 라 하자.

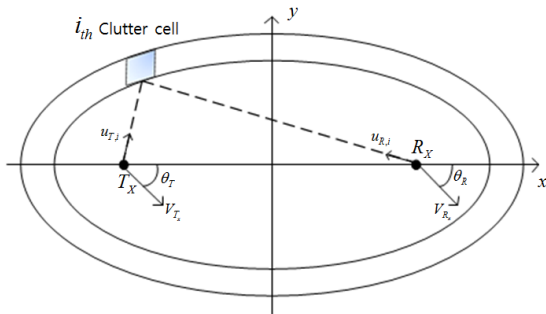


그림 1. 바이스테틱 레이더 환경  
Fig. 1. Bistatic radar geometry.

$i$ 번째 클러터 cell과 송신단과 수신단에 의해 발생하는 도플러 주파수  $f_{d,i}$ 는 다음과 같다.

$$f_{d,i} = (\langle V_{Tx} \cdot u_{T,i} \rangle + \langle V_{Rx} \cdot u_{R,i} \rangle) / \lambda \quad (1)$$

여기서  $\cdot$ 는 내적연산이고,  $\lambda$ 는 파장을 의미한다.  $i$ 번째 클러터 cell과  $M$ 개의 펄스에 의해 발생하는 도플러 steering 벡터  $S_{d,i}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{d,i} = [1 \exp(j2\pi f_{d,i} T / \lambda) \dots \exp(j2\pi f_{d,i} (M-1) T / \lambda)] \quad (2)$$

여기서  $T$ 는 pulse repetition interval이다. 송신 신호는 협대역 밴드 가정에 의해  $N$ 개의 배열안테나로 구성된 수신단에 수신되고, 각각의 배열 요소들에 수신되는 신호들은 위상 지연을 겪게 된다. 수신단에 입사되는 클러터 방향이  $\theta_i$ 이고, 파장이  $\lambda$ 인 경우 발생하는 위상 지연을 각 조향벡터(Angle steering vector)  $a(\theta_i)$ 라고 하고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a^H(\theta_i) = [1 \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_i} \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} 2d \sin\theta_i} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (N-1)d \sin\theta_i}] \quad (3)$$

여기서  $d$ 는 배열 안테나 간 간격으로 캐리어 주파수의 반파장 이하의 값을 가진다. 식 (2)와 (3)를 이용하여 Space-Time steering vector  $c_i$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c_i = S_{d,i} \otimes a(\theta_i) \quad (4)$$

여기서  $\otimes$ 는 Kronecker Product이다. 이에 따라 클러터에 의해 수신되는 신호  $C$ 는  $K$ 개 클러터 cell들에 의해 식 (5)와 같이 결정된다.

$$C = \sum_{i=1}^K c_i \quad (5)$$

그리고 클러터 신호의 공분산 행렬  $R$ 은 다음과 같다.

$$R = E[CC^H] \quad (6)$$

위의 수식을 Space-Time Filtering(2D-FFT)함으로써 수신된 바이스테틱 클러터의 특성을 확인할 수 있다. 클러터 공분산 행렬  $R$ 의 rank는 클러터의 특성에 의해 결정되고, 클러터가 nonstationary한 경우 클러터의 rank는 더욱

증가한다<sup>[5][6]</sup>. 이것은 클러터 제거 알고리즘의 연산량의 증가로 이어지므로 rank-reduced 기법이나 클러터가 stationary한 특성을 갖도록 변환하는 추가적인 기법들이 요구된다.

### III. 시뮬레이션

본 절에서 바이스테틱 클러터를 생성하기 위해 사용한 파라미터는 표 1과 같다.

그림 2는 송신단과 수신단이 각각  $\theta_T = -55^\circ$ ,  $\theta_R = 45^\circ$  방향(그림 1 참조)으로 일정한 속도로 이동하는 경우, 얻어지는 바이스테틱 클러터를 Angle-Doppler 평면에 나타낸 것이다.

Angle-Doppler 평면에서 기울기를 갖는 선형의 ridge 형태의 클러터 구조를 갖는 모노스테틱 구조와는 달리 송·수신단의 위치 정보 및 운용에 따라 클러터의 특성이 불규칙적으로 달라지는 것을 확인할 수 있다<sup>[5]</sup>. 바이스테틱 클러터 구조를 알아보기 위해 레이더 시스템의 운용적인 측면에서 가장 간단한 송신단 또는 수신단 중 하나만 이동하는 경우와 송신단과 수신단이 같은 방향과

표 1. 바이스테틱 레이더 파라미터  
Table 1. Parameters of bistatic radar.

Carrier frequency	5.3 GHz	PRF	1.4 kHz
Pulse 개수	64	송신단 초기 위치	(-3,000, 0)[m]
Array 개수	64	수신단 초기 위치	(3,000, 0)[m]

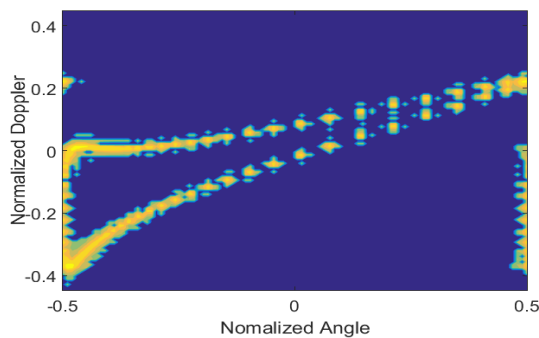


그림 2. 바이스테틱 클러터 구조  
Fig. 2. Structure of bistatic clutter.

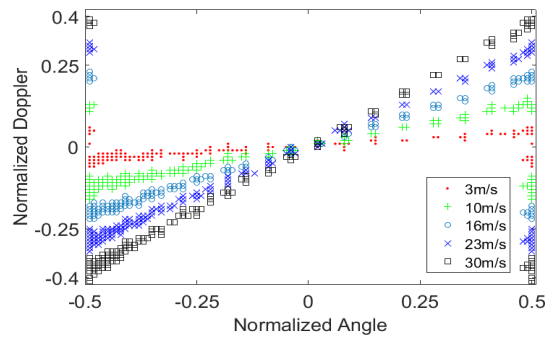


그림 3. 수신단의 속도 변화에 따른 바이스테틱 클러터  
Fig. 3. Bistatic clutter vs. velocity of receiver.

같은 속도로 이동하는 경우로 한정하여 바이스테틱 클러터 구조를 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

#### 3-1 송신단 또는 수신단 중 하나만 이동하는 경우

송신단은 고정되고, 수신단이 이동하는 경우와 반대의 경우는 서로 상대적인 속도가  $180^\circ$ 도 차이를 가지므로 한 가지의 경우만 고려하였다. 그림 3은 송신단은 고정되어 있고, 수신단이  $\theta_R = 0^\circ$ 의 방향으로 이동하는 경우에 대해 속도 변화에 따른 바이스테틱 클러터 구조를 나타낸 것이다.

· 는 송신단의 속도가 3 m/s로 이동하는 상황이고, □ 은 30 m/s로 이동함에 따라 생기는 클러터 구조이다. 송신단의 도플러 변화만 있으므로 모노스테틱 클러터와 동일한 구조를 갖고, 송신단의 속도가 0인 경우 각도에 따른 도플러의 변화가 없어 1-D 프로세싱이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 식 (1)로부터 속도가 증가할수록 각도에 대한 도플러 주파수가 증가함에 따라 Angle축 대비 Doppler 축의 기울기가 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

그림 4는 송신단은 고정되어 있고, 수신단의 일정한 속도에 대해 이동 방향이  $\theta_R = 5^\circ \sim 85^\circ$ 로 변화함에 따른 Space-Time 클러터 구조를 나타내었다.  $\theta_R$ 이 증가할수록 타원의 장축이 시계방향으로 회전하고, 단축이 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 바이스테틱 클러터의 공분산 행렬  $\mathbf{R}$ 을 이루는 기저(basis)벡터들은 그림 4에서 각각의 점들에 해당된다. 즉, 바이스테틱 레이더의 이동 때문에 생

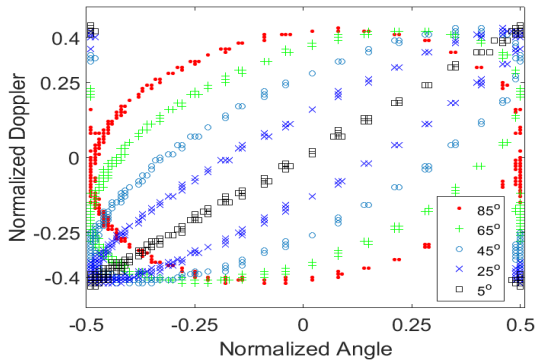


그림 4. 수신단의 이동 방향 변화에 따른 바이스테틱 클러터

Fig. 4. Bistatic clutter vs. change of direction of receiver.

기는 클러터에 의해 rank가 증가되는 것을 확인할 수 있다.

### 2-2 송신단과 수신단이 동일한 속도를 갖는 경우

그림 5는 송신단과 수신단이 같은 속도로 이동하면서  $\theta_T = \theta_R = 5^\circ$ 로부터  $\theta_T = \theta_R = 85^\circ$ 까지 방향이 바뀌는 경우의 클러터 구조이다.

앞선 시뮬레이션 결과들과는 달리  $\theta_T = \theta_R = 5^\circ$ 인 방향으로 이동시 약간 굽은 직선의 형태로 클러터가 형성되고, 공통된 부분을 나타내는 점들이 많은 것을 확인할 수 있다.  $\theta_T = \theta_R > 5^\circ$ 인 경우, 타원의 형태가 일그러지지만 타원의 단축은 증가하여 서로 다른 지점에서 점들이 생성되고, 이것은 클러터의 공분산 행렬  $R$ 을 이루는

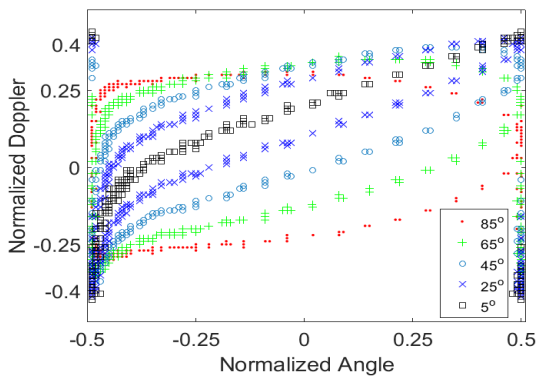


그림 5. 송·수신단의 이동방향에 따른 바이스테틱 클러터  
Fig. 5. Bistatic clutter vs. change of direction of receiver and transmitter.

기저성분들이 증가하는 것을 의미한다.

이것으로부터, 앞의 경우와 마찬가지로 송·수신단의 이동 경로가 송신단과 수신단이 이루는 직선상에 있을 때( $\theta_T = \theta_R \approx 0^\circ$ ) 클러터의 rank가 가장 적은 것을 확인할 수 있다.

## IV. 결 론

본 논문은 바이스테틱 레이더 환경에서 발생하는 클러터 구조에 대하여 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 가장 간단한 세 가지 경우의 송신단과 수신단의 운용 시나리오로부터 바이스테틱 레이더의 독립적인 이동에 의해 Angle-Doppler 평면에서 비선형적인 클러터 구조를 갖고 rank가 증가되는 것을 확인하였다. 이것을 방지하기 위해 송신단과 수신단이 이루는 직선 방향 내에서 이동하도록 운용되어야 함을 보였다. 또한, 송신단과 수신단의 운용에 따른 클러터 구조를 유추하여 heterogenous 클러터를 추정하기 위한 사전 정보로 활용이 가능할 것이다.

## References

- [1] William L. Melvin, "Space-time adaptive radar performance in heterogeneous clutter", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 621-633, Apr. 2000.
- [2] Michael C. Wicks, Muralidhar Rangaswamy, Raviraj Adve, and Todd B. Hale, "Space-time adaptive processing a knowledge-based perspective for airborne radar", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 23, pp. 51-65, Jan. 2006
- [3] William L. Melvin, Joseph R. Guerci, "Knowledge-aided signal processing: A new paradigm for radar and other advanced sensors", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 3, pp. 983-996, Jul. 2006
- [4] Simon Haykin, "Cognitive radar a way of the future", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 23, pp. 30-40, Jan. 2006.
- [5] J. R. Guerci, *Space-Time Adaptive Processing for Radar*, Artech House, pp. 115-170, 2014.
- [6] Sergios Theodoridis, *Academic Press Library in Signal Processing*, vol. 2, Elsevier, pp. 595-659, 2014.