

## Sigma-Delta STAP의 시뮬레이션과 시험 결과 비교

### Comparison Between Simulation and Test Result of Sigma-Delta STAP

권 보 준

Bojun Kwon

요 약

이 논문에서는 실제 레이더를 이용하여 획득한 신호와 시뮬레이션으로 획득한 신호에  $\Sigma\Delta$ -STAP 알고리즘을 적용하여 비교하였다. 시험은 무반향 챔버에서 모의신호 발생장치를 이용한 표적 신호와 신호발생기를 이용한 클러터 신호를 레이더로 수신하여 수행하였다. 시뮬레이션은 시험과 동일한 레이더 파라미터에 이상적인 기저대역 신호 모델링을 통하여 수행하였다. 비교 결과,  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵은 표적 신호의 형태나 잡음 수준이 시뮬레이션과 시험 결과가 거의 유사하였다. SINR 손실의 경우, 두 결과가 비슷한 양상을 보이나, 시뮬레이션 결과가 1~2 dB 가량 높은 값을 보였다. 이를 통하여 일반적인 레이더 신호 시뮬레이션을 수행하여도 실제 시험 결과와 유사한  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

#### Abstract

This paper compares the results of  $\Sigma\Delta$ -STAP applied to actual radar test data and simulation data. The radar received a target signal from a virtual target generator and the clutter signal from a signal generator in an anechoic chamber. The simulation data were generated from ideal baseband radar signal modeling using the same parameter as that for the test radar. The  $\Sigma\Delta$ -STAP results of the test and simulation data are similar in terms of the target signal shape and noise level. The SINR(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) loss also had similar aspects, but the simulation result shows 1~2 dB higher SINR loss than the test result. This result verified that the simulation data can be a reasonable alternative test data when the  $\Sigma\Delta$ -STAP is applied.

Key words: Sigma-Delta STAP, Simulation, Test Result, Airborne Radar

#### I. 서 론

항공기 레이더와 같은 감시정찰 센서 시스템에서 하방 표적을 탐지할 때는 항상 지면 클러터 신호와 표적 신호가 혼재되어 있는 상황에서 탐지를 수행하게 된다. 지상 또는 저고도 표적이면서 상대속도가 느릴 경우에는 표적 신호가 항상 주엽 클러터 성분에 가려진다. 특히 MPRF(Me-

dium Pulse Repetition Frequency) 모드의 경우에는 거리와 속도의 모호성 때문에 언제든지 주엽 혹은 부엽 클러터 신호가 표적 신호와 비슷한 위치에 발생할 수 있다. 클러터 신호의 크기는 주로 표적 신호보다 크기 때문에 표적과 클러터 신호가 중첩되는 상황에서 표적을 탐지하는 문제는 상당히 어려운 문제로 알려져 있다. 여기에 재밍 신호까지 혼재된 복잡한 환경에서 CFAR(Constant False Alarm

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 13, 2018 ; Revised April 26, 2018 ; Accepted May 8, 2018. (ID No. 20180313-034)

· Corresponding Author: Bojun Kwon (e-mail: baukwon@add.re.kr)

Rate)와 같은 일반적인 탐지 방법으로 표적을 탐지하기는 불가능에 가깝다.

STAP(Space-Time Adaptive Processing)은 이러한 환경을 극복하고자 제안된 방법이다. 이름과 같이 배열 안테나를 이용한 공간 축과 반복되는 펄스를 통한 시간 축 데이터를 참조하여, 각도-도플러 주파수의 2차원 공간에서 간섭 신호를 제거한다. 이를 통하여 주엽 클러스터 속 지속 표적이나 부엽 클러스터에 가려질 수 있는 작은 표적, 재밍 상황에서의 표적 탐지를 가능하게 하고, 시스템의 오차에 강인하게 동작할 수 있도록 도와준다<sup>[1]</sup>.

초기 STAP 기법은 획득된 모든 시공간 데이터로부터 가중치를 추출하는 Fully adaptive STAP이었다. 이 방법은 안테나의 수×펄스의 수에 해당하는 차원의 데이터에 대하여 클러스터 분포를 추정하여야 한다. 따라서 요구되는 참조 데이터와 계산량이 너무 많아 현실적이지 못하므로 다양한 알고리즘이 제안되었다<sup>[1]</sup>. 한 가지 방법으로는 시간적 자유도를 줄이는 기법들이 제안되었다. 여기에는 CPI 내 모든 펄스를 사용하지 않고 일부의 연속적인 펄스만 이용하거나, DDL(Doppler Domain Localization)<sup>[2]</sup> 방식과 같이 도플러 처리를 통해 연속된 도플러 공간에서 획득한 데이터를 이용하여 가중치를 구하는 방법 등이 있다. 다른 방법으로는 공간적 자유도를 줄이는 Beamspace STAP<sup>[1]</sup> 기법이 있다. 이 경우에는 모든 안테나 소자에서 받은 데이터를 직접 이용하는 대신, STAP 처리 전에 아날로그 혹은 디지털 빔 형성 기능을 적용하여 더 적은 채널의 데이터만 사용해 가중치를 구하게 된다. 본 논문에서는 두 가지 방법을 동시에 이용하는 JDL(Joint Domain Localization)<sup>[3]</sup> 방식을 아날로그 모노펄스 빔형성 회로를 거쳐 획득한 합과 차 채널 데이터에 적용하는  $\Sigma\Delta$ -STAP<sup>[4],[5]</sup> 기법을 사용하였다.

레이다 신호 모델링은 참고문헌 [6]을 비롯한 많은 문헌에 소개되어 있다. 먼저 레이다 파형을 발생시키고, 산란점에 반사되어 크기와 위상이 달라진 전파를 거리에 해당하는 시간 지연을 주고, IQ 샘플링을 통해 복소 신호로 획득한다. 하지만 STAP 알고리즘 성능 비교를 위한 시뮬레이션에는 신호를 모두 획득하는 대신 공분산 행렬을 직접 생성하는 경우가 많다<sup>[1]</sup>. 이 경우에는 레이다 파라미터, 플랫폼 비행 조건, 클러스터나 재밍 파라미터를 입

력하면 가정에 따라 공분산 행렬을 구할 수 있다. 이 논문에서는 실제 레이다를 통해 무반향 챔버에서 얻은 시험 결과와 같은 조건의 시뮬레이션으로 획득한 데이터에  $\Sigma\Delta$ -STAP을 적용하고 비교하기 위하여 일반적인 레이다 신호 모델링을 통해 시뮬레이션을 수행하였다.

II 장에서는  $\Sigma\Delta$ -STAP 알고리즘을 간략히 되짚어보고, III 장에서는 실제 하드웨어를 이용한 시험 환경과 시뮬레이션 방법 및 그 결과를 기술하며, IV 장에서는 실제 시험 결과와 시뮬레이션을 비교하고, V 장에서 결론을 맺는다.

## II. $\Sigma\Delta$ -STAP 기법

$\Sigma\Delta$ -STAP의 전체 흐름도는 그림 1과 같다. 먼저 안테나로부터 수신된 신호를 매직 T와 같은 아날로그 빔 형성 회로를 거쳐 합( $\Sigma$ ) 채널과 차( $\Delta$ ) 채널로 만든다. 합 채널은 좁은 빔 폭과 보어사이트(boresight)에서 큰 이득을 가지므로 정면의 표적 신호를 받고 부엽 신호를 배제한다. 반면, 차 채널은 보어사이트에서 날카로운 영점(null)을 가지므로 정면의 표적 신호가 수신되지 않는다. 다음으로 일반적인 레이다와 마찬가지로 수신기, ADC(Analog to Digital Convertor), 펄스압축 등을 거친다. 그리고 도플러 처리를 통하여 채널별 거리-도플러 맵을 형성한다. 최종적으로 채널×거리×도플러의 3차원 데이터에서 STAP 처리를 통해 간섭 신호를 제거하고 표적을 탐지한다.

본 논문에서 실제로 적용한 알고리즘은 참고문헌 [7]의 방법과 유사하다. 전처리를 거쳐 3차원 데이터를 형성하

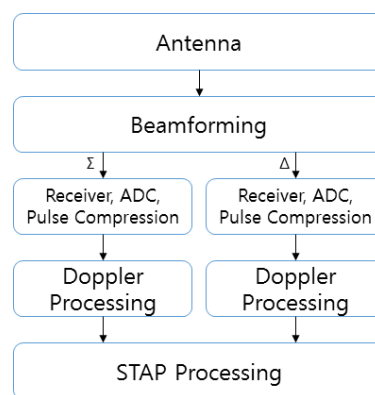


그림 1.  $\Sigma\Delta$ -STAP 흐름도

Fig. 1. Block diagram of  $\Sigma\Delta$ -STAP.

면, 그림 2와 같이 테스트 데이터와 참조 데이터를 설정한다. 여기서 다양한 파라미터를 변경할 수 있다. 획득한 합 채널 외에 몇 개의 차 채널을 사용할지를 프로세서의 공간적 자유도(DOF, Degree of Freedom)인  $N_{ps}$ 라 하고, 선택한 도플러 채널 주변 몇 개의 도플러 셀을 함께 처리할지를 프로세서의 시간적 자유도인  $N_{pt}$ 라고 한다. 또한 테스트 데이터 주변 몇 개의 거리 셀을 제외하고 참조 데이터를 설정할지를 가드 셀의 수  $N_{gd}$ 로, 사용할 참조 데이터의 거리 셀 수를  $K$ 라 할 수 있다. 그림 2에서 붉은색으로 표시된 셀은 테스트 데이터를 의미하고, 녹색으로 표시된 셀은 참조 데이터를 의미하며,  $N_{ps} = 2$ ,  $N_{pt} = 2$ ,  $N_{gd} = 3$ ,  $K = 18$ 인 경우를 보여주고 있다. 각각의 파라미터는 레이다 파라미터, 채널의 수, 예상 표적이 거리-도플러 맵 상에 얼마나 넓게 분포할지, 간섭 신호를 추정하는데 얼마나 많은 참조 데이터가 필요할지, 간섭 신호가 얼마나 넓은 영역에서 일정하게 분포할지, 실시간 처리를 위한 연산량 등을 종합적으로 고려하여 결정하여야 한다.

거리, 도플러 인덱스가 각각  $(i, j)$ 인 테스트 셀에 대하여  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리를 하는 경우를 가정하자. 테스트 데이터  $\mathbf{x}(i, j)$ 는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $x_{\Sigma}(i, j)$ 는 합 채널의  $(i, j)$ 번째 데이터를,  $x_{\Delta m}(i, j)$ 는  $m$ 번째 차 채널의  $(i, j)$ 번째 데이터를 의미한다. 따라서  $\mathbf{x}(i, j)$ 는 같은 거리에서  $(N_{pt} + 1)$ 개의 도플러 셀을 합, 차 채널의 수만큼 연결시킨  $(N_{pt} + 1)(N_{ps} + 1)$  차원 벡터가 된다.

간섭 신호를 학습할 참조 데이터는  $(i, j)$  셀에서 가드 셀을 제외한 거리상 인접 셀들로 구성된다. 즉,  $\mathbf{x}(i - K/2 - N_{gd}, j) \sim \mathbf{x}(i + K/2 + N_{gd}, j)$ 에서 가드 셀을 제외한 데이터들이  $K$ 개의 참조 데이터를 형성하게 된다. 간섭 신호의 분포를 추정하기 위해 식 (2)와 같이 참조 데이터로

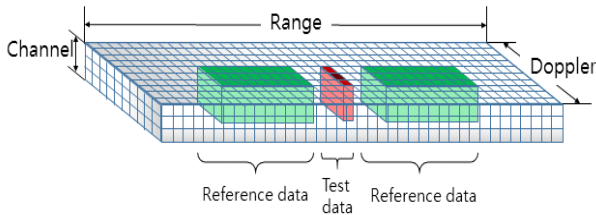


그림 2.  $\Sigma\Delta$ -STAP 데이터 구조

Fig. 2. Data structure of  $\Sigma\Delta$ -STAP.

$$\mathbf{x}_{\Sigma}(i, j) = \begin{bmatrix} x_{\Sigma}(i, j - N_{pt}/2) \\ \vdots \\ x_{\Sigma}(i, j) \\ \vdots \\ x_{\Sigma}(i, j + N_{pt}/2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_{\Delta m}(i, j) = \begin{bmatrix} x_{\Delta m}(i, j - N_{pt}/2) \\ \vdots \\ x_{\Delta m}(i, j) \\ \vdots \\ x_{\Delta m}(i, j + N_{pt}/2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}(i, j) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{\Sigma} \\ \mathbf{x}_{\Delta 1} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{\Delta N_{ps}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

공분산  $\hat{\mathbf{R}}$ 을 계산한다. 여기서  $\mathbf{x}(i, j)^H$ 는  $\mathbf{x}(i, j)$ 의 허미션 전치 행렬(Hermitian transpose)을 의미한다.

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \left( \sum_{k=i-N_{gd}-K/2}^{i-N_{gd}-1} \mathbf{x}(k, j) \mathbf{x}(k, j)^H + \sum_{k=i+N_{gd}+K/2}^{i+N_{gd}+K/2} \mathbf{x}(k, j) \mathbf{x}(k, j)^H \right) \quad (2)$$

그리고 공분산 행렬에 대하여 추가적인 diagonal loading<sup>[8]</sup> 기법( $\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{R}} + \lambda \mathbf{I}$ )을 적용한다.  $\lambda$ 는 파라미터이고,  $\mathbf{I}$ 는  $\hat{\mathbf{R}}$ 과 같은 크기의 단위행렬이다. 이를 통하여 잡음 레벨을 평탄화해서 필터 가중치를 강건하게 생성할 수 있다. 많은 연구에 의하여 다양한 가중치가 연구되었는데, 본 논문에서는 식 (3)의 MSMI(Modified Sample Matrix Inversion) 방법을 사용했다. 여기서  $\mathbf{w}$ 는 필터 가중치이고,  $\mathbf{s}$ 는 steering vector이다. Steering vector의 경우, 일반 STAP에서는 시공간적인 정합 필터를 적용한다. 반면  $\Sigma\Delta$ -STAP에서는 표적이 안테나 정면에 위치한다고 가정하고, 테스트 셀의 합 채널에 해당하는 위치만 1이고, 나머지는 0인 벡터를 사용한다. 만약  $N_{pt}$ ,  $N_{ps}$ 가 모두 2인 경우에는  $\mathbf{s} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 가 된다.

$$\mathbf{w} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{s}, \quad \eta_{MSMI} = \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2}{\mathbf{s}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{s}} \quad (3)$$

거리-도플러 맵 상의 모든 탐색 영역에 대하여  $\eta_{MSMI}$ 를 구하면  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리가 완료된다. 이후에 CFAR 등

의 탐지 알고리즘을 적용하여 표적 탐지를 수행한다.

본 논문에서는 합, 방위각 차 2채널( $N_{ps} = 1$ )을 이용해  $\Sigma\Delta$ -STAP을 수행하였다. 또한 이후의 모든 결과에서  $N_{gd}=2$ ,  $K=8$ ,  $N_{pt}=2$ ,  $\lambda$ 는 잡음 전력의 2배를 사용하였고, 도플러 처리에는 체비셰프(Chebyshev) 윈도우를 적용하였다.

### III. 시험 환경 및 시뮬레이션 구성

이 장에서는 시험 환경과 시뮬레이션 구성에 대해서 기술한다. 본 논문의 목적인 시뮬레이션 결과와 시험 결과의 비교를 위하여 통제된 상황이 필요하였고, 무반향 챔버 시험 환경을 그 기준으로 삼았다. 시뮬레이션 모델도 시험 환경과 동일하게 표적과 단순한 형태의 클러터 신호만을 기저대역 신호로 모델링하는 방식을 적용하였다.

#### 3-1 시험 환경

전체적인 시험 환경 구성은 그림 3과 같다. 무반향 챔버 내에 레이더와 혼안테나가 설치되어 있고, 외부에 신호발생기와 모의신호 발생장치로부터 신호를 생성한다. 모의신호 발생장치는 레이더에서 송신하는 신호를 동일하게 모사하여 동기 신호를 기준으로 추가적인 거리 지연과 도플러 성분을 인가할 수 있는 장치로 표적 신호 생성에 사용한다. 신호발생기는 거리-도플러 맵 상에 특정 도플러 셀 주변으로 모든 거리에서 신호가 발생하는 주엽 클러터 신호를 모사하기 위하여 식 (4)와 같이 정현파에 위상 변조를 넣어 협대역(narrow-band) 신호를 생성하였다.

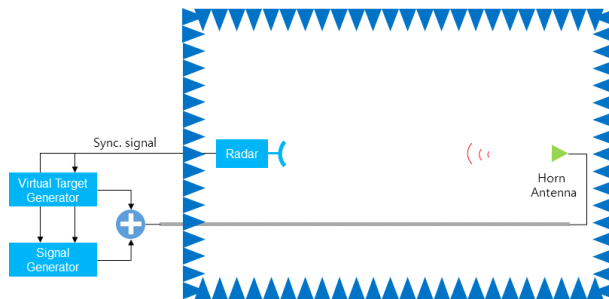


그림 3. 시험 구성도  
Fig. 3. Test configuration.

$$x(t) = P_t \cos(2\pi f_c t + A_m \sin(2\pi f_m t)) \quad (4)$$

여기서  $P_t$ 는 송신 전력에 의한 진폭,  $f_c$ 는 중심 주파수,  $A_m$ 은 메시지의 진폭,  $f_m$ 은 메시지의 주파수이다. 위상 부분인  $2\pi f_c t + A_m \sin(2\pi f_m t)$ 를 미분하면  $2\pi f_c + 2\pi A_m f_m \cos(2\pi f_m t)$ 로 최대  $A_m f_m$ 의 대역폭을 갖게 된다. 따라서 엄밀히 말하면 클러터 신호라기보다는 협대역 채밍 신호이다. 레이더와 신호발생기의 동기화를 위해 역시 동기 신호를 입력하였다. 최종적으로 두 신호를 합하여 도파관을 통해 챔버 내의 혼안테나로 보내주고, 레이더는 정면에서 오는 신호를 수신하여 신호처리를 수행한다.

챔버 내에서 시험을 수행하므로 절대적인 거리, 속도 값이 큰 의미가 없고, 표적과 클러터 전력도 조절이 가능하다. 표적 신호는 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 약 30 dB, 클러터 신호는 CNR(Clutter-to-Noise Ratio) 약 40 dB 수준에서 대역폭은 약 2 도플러 셀 수준으로 시험을 수행하였다. 시험 결과의 예는 그림 4의 왼쪽 그림과 같다. dB 스케일의 거리-도플러 맵 상에서 도플러 셀 53~57에 거리 방향으로 길게 클러터 신호가 보인다. 옆에 (거리, 도플러)로 (31, 59) 셀 위치에 클러터보다 조금 약하고 점표적 형태의 표적 신호가 보인다. 모든 신호는 펄스 압축과 도플러 윈도우 효과로 조금 퍼져 있다.

#### 3-2 시뮬레이션 구성

시뮬레이션 방법은 일반적인 레이더 시뮬레이션과 동일하게 이상적인 기저대역 신호 생성 기법을 적용하였다. 시나리오는 시험 환경과 같은 상황을 모사하기 위하여

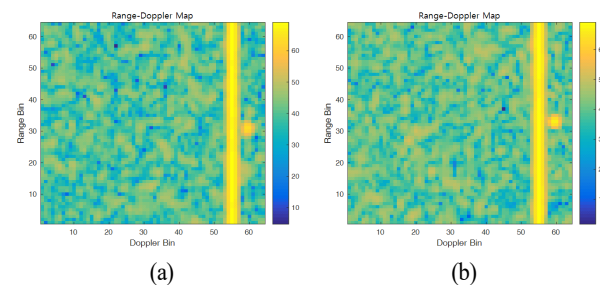


그림 4. 시험 결과(a)와 시뮬레이션 결과(b)의 예  
Fig. 4. An example of test result(a) and simulation result(b).

표적과 재머만 있는 것으로 모델링하였다.

전체적인 과정은 다음과 같다. 우선 파라미터와 시나리오를 설정한다. 그리고 CPI(Coherent Processing Interval) 내 모든 펄스마다 레이더, 표적, 재머의 위치를 업데이트한다. 그 후 거리/각도를 계산하여 안테나 이득과 레이더 방정식으로부터의 전력을 계산한다. 여기서 표적의 경우에는 해당 전력을 갖고, 선형 주파수 변조를 넣은 펄스를 거리 지연을 시켜 적절한 위치에 삽입한다. 재머의 경우는 도플러를 추가한 식 (4)의 위상 변조 신호를 모든 시간 영역에 더한다. CPI가 끝나면 레이더 일식(eclipse) 효과를 적용하고 잡음을 추가한다. 마지막으로 펄스 압축과 도플러 처리를 하면 거리-도플러 맵이 완성된다.

정확한 비교를 위하여 시험에 사용한 레이더의 파라미터를 그대로 이용했다. 안테나 패턴은 적용된 안테나 설계 결과의 시뮬레이션 패턴을 선형 보간하여 적용하였다. 따라서 주위 구조물과의 커플링 효과 등은 반영되지 않았다. 송수신기 측면에서도 이상적인 파형 생성과 잡음 지수에 의한 잡음, 시스템 손실만을 모델링함으로써 초고주파 회로의 특성을 단순화하였다. 신호처리 하드웨어 측면에서도 이상적인 ADC와 DDC(Digital Down Conversion) 기능을 가정했다.

그림 4의 오른쪽은 시뮬레이션 결과의 예를 나타낸다. 시험 결과와 비슷한 결과가 나오도록 시스템 파라미터를 제외한 표적 속도, 클러터 폭, 도플러, 전력을 조절하였다. 그림 4의 좌, 우를 비교하면 표적, 클러터 신호 형태 및 크기와 잡음 레벨이 거의 유사한 것을 볼 수 있다.

#### IV. $\Sigma\Delta$ -STAP 적용 결과 비교

이 장에서는 시험 결과와 시뮬레이션 결과에  $\Sigma\Delta$ -STAP을 적용하여 서로 비교한다. 비교는  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵과 SINR 손실(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio Loss)을 기준으로 한다. 처리된 거리-도플러 맵을 통해서 특정 클러터 상황의 어떤 시점에서 전반적인 신호 처리 결과를 비교할 수 있다. 이를 통하여 피크의 크기와 모양, 잡음 및 불요신호 수준과 형태, 표적 탐지 가능성 등을 살펴볼 수 있다. SINR 손실의 경우는 특정 클러터 상황에서 알고리즘의 성능을 정량적으로 비교할 수 있다.

#### 4.1 $\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵 비교

시험 결과와 시뮬레이션 결과로부터 얻은 원 데이터에 도플러 처리를 거쳐 거리-도플러 맵을 생성 후, 모든 셀에 대하여 II 장의  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리를 수행하여 처리된 거리-도플러 맵을 얻었다. 결과는 그림 5와 같다. 왼쪽 열은 시험 결과, 오른쪽 열은 시뮬레이션 결과를 처리한 그림이고, 위 행은 거리-도플러 맵, 아래 행은  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵을 나타낸다.

거리-도플러 맵 상에서 클러터 신호는 도플러 셀로 약 29~35셀에 분포하고 있고, 그 중심은 32번 셀이다. 표적 신호는 클러터 중심에서 1셀 떨어져 도플러 셀로 33번 셀에 있다. 거리 셀로는 시험 결과에선 31번 셀에, 시뮬레이션 결과에선 33번 셀에 존재한다. 거리-도플러 맵을 자세히 보면 거리로 32번, 도플러로 33번 셀 주위의 클러터 신호가 시험 결과에서는 약간 작아지고, 시뮬레이션 결과에서는 약간 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 어떤 CPI 결과를

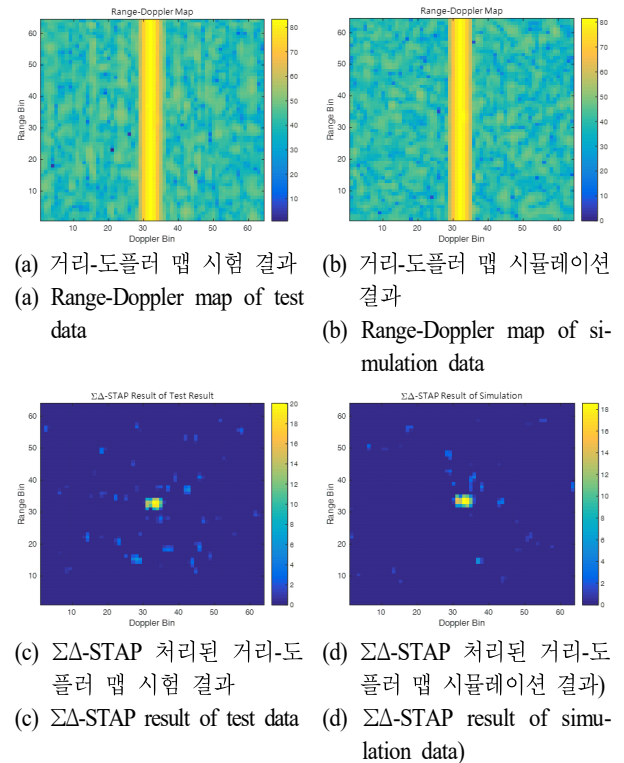


그림 5.  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵 비교  
Fig. 5. Comparison of  $\Sigma\Delta$ -STAP result.



보는가에 따라 조금씩 달라진다.

$\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵을 살펴보면 전반적인 결과가 유사한 것을 볼 수 있다. 표적 신호가 있어야 하는 위치에서 각각 20 dB, 18 dB의 피크가 발생하고 주변으로 조금 퍼져 있다. 표적 신호의 형태는 전반적으로 보존되었으나, 클러터 신호의 중심인 32번 도플러 셀에서는 조금 작아져 봉우리 옆이 살짝 파진 형태가 된 것도 두 결과가 동일하다. 표적 이외의 잡음 신호의 크기는 약 8 dB 수준으로 유사하다. 좌측의 시험 결과에서 잡음 신호가 비교적 많은 것으로 보이나, 역시 매 CPI마다 조금씩 달라진다.

#### 4.2 SINR 손실 비교

STAP 결과를 정량적으로 비교하는 데는 SINR 손실을 많이 이용한다. SINR 손실은 신호와 잡음만 있을 때 얻을 수 있는 SNR 대비하여 클러터나 다른 간섭 신호가 포함된 상황에서 신호 처리 후 얻을 수 있는 SINR의 비를 나타낸다. 식으로 나타내면 식 (5)와 같다. 만약 어떤 클러터 상황에서 SINR 손실이 12 dB라면, STAP 처리를 통해 잡음만 있을 때의 탐지거리의 절반 수준에 해당하는 거리의 표적을 해당 클러터 상황에서 탐지할 수 있음을 의미한다. 따라서 SINR 손실이 0 dB에 가까울수록 표적 신호에 영향을 주지 않고, 간섭 신호의 영향을 잘 제거한 것이라 해석할 수 있다.

$$L_{SINR} = \frac{SINR}{SINR_0} \quad (5)$$

시험은 클러터 신호의 위치를 고정하고, 표적 신호의 도플러 주파수를 변경하여 도플러 셀로 하나씩 움직여가면서 신호를 획득하는 방식으로 수행하였다. 하나의 상황당 약 30회의 시험을 반복하여 SINR 손실을 구한 뒤 평균을 취했다. 결과는 그림 6과 같다. 파란색이 시험 결과, 주황색이 시뮬레이션 결과로 구한 SINR 손실을 나타낸다. 전체적인 패턴은 두 결과가 유사하다. 클러터의 중심 셀인 32번 셀에서 가장 낮은 골짜기가 생기고, 주위로 3셀 동안 점차 상승하다가 다시 낮아져 나머지 셀에서는 거의 일정한 값을 유지하는 형태이다. 하지만 클러터가 있는 중심으로부터  $\pm 3$ 셀 정도 영역에서는 1 dB, 나머지 영역

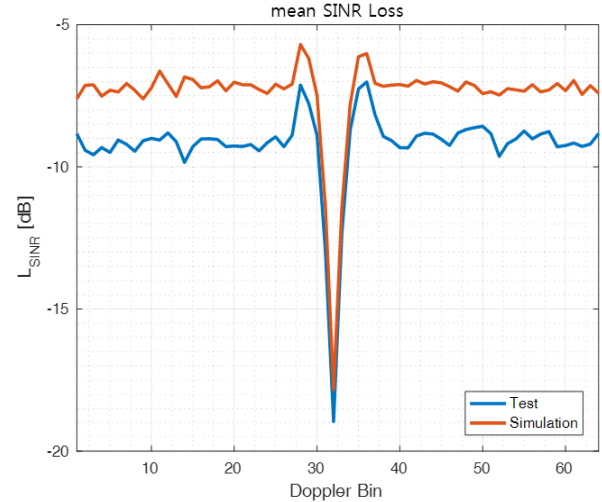


그림 6. SINR 손실 비교

Fig. 6. Comparison of SINR loss.

에서는 2 dB 정도 시뮬레이션 결과의 SINR 손실이 시험 결과보다 높다. 이는 SNR이나 잡음 레벨이 정확하지 않다는 점, 레이더와 표적 안테나 정렬이 정확하지 않다는 점, 시뮬레이션 신호 모델링이 단순화되었다는 점, 실제 시스템 파라미터와 시뮬레이션 파라미터가 일치하지 않는다는 점 등이 복합적으로 작용한 것으로 보인다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 무반향 챔버에서 실제 레이더를 이용해 획득한 신호와 시뮬레이션으로 얻은 신호에  $\Sigma\Delta$ -STAP 알고리즘을 적용하여 비교하였다. 비교 결과,  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리된 거리-도플러 맵은 정성적으로 살펴볼 때 표적 신호의 형태나 잡음 수준이 시뮬레이션과 시험 결과가 거의 유사하였다. SINR 손실의 경우, 두 결과가 비슷한 양상을 보이나, 시뮬레이션 결과가 1~2 dB 가량 높은 값을 보였다. 이를 통하여 이상적인 기저대역 신호 생성으로 시뮬레이션을 수행하여도 실제 시험 결과와 유사한  $\Sigma\Delta$ -STAP 처리 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서 표적 신호와 상황에 맞는 클러터 및 재밍 신호 모델링이 적합하게 수행된다면, 시뮬레이션을 통하여 실제 환경과 유사한 상황에서 알고리즘을 테스트해 볼 수 있다고 여겨진다. 추가적으로 안테나, 초고주파 회로, ADC 등의 이상적인

특성을 현실적으로 모사할 수 있다면, 더욱 더 실제와 유사한 환경에서 모의시험을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] J. Ward, "Space-time adaptive processing for airborne radar," *MIT Lincoln Laboratory, Technical Report 1015*, 1994.
- [2] V. Madisetti, "Space-time adaptive processing for airborne surveillance radar," in *The Digital Signal Processing Handbook - Wireless, Networking, Radar, Sensor Array Processing, and Nonlinear Signal Processing*, CRC Press, 2010.
- [3] H. Wang, L. Cai, "On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 660-670, Jul. 1994.
- [4] R. D. Brown, M. C. Wicks, Y. Zhang, Q. Zhang, and H. Wang, "A space-time adaptive processing approach for improved performance and affordability," in *Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference*, Ann Arbor, MI, 1996, pp. 321-326.
- [5] R. D. Brown, R. A. Schneible, M. C. Wicks, H. Wang, and Y. Zhang, "STAP for clutter suppression with sum and difference beams," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, no. 2, pp. 634-646, Apr. 2000.
- [6] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGraw-Hill, Inc., 2005.
- [7] 김태형, 윤정숙, 정재훈, 유성현, "항공기 레이더의 GMTI 모드를 위한 sigma-delta STAP의 적용 설계와 성능 분석 시뮬레이션," *한국전자과학회논문지*, 28(4), pp. 336-346, 2017년 4월.
- [8] B. D. Carlson, "Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 397-401, Jul. 1988.

### 권 보 준



2011년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)  
 2013년 2월: 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 (공학석사)  
 2013년 4월~현재: 국방과학연구소  
 [주 관심분야] 레이더 신호처리