

# 디지털 빔합성 기반 스위치형 진폭 방향 탐지기 설계

박철순, 김정민, 김선교, 장재원, 조성진, 나선필

국방과학연구소

helione@nate.com

## Design of Switched Amplitude Comparison Direction Finder using Digital Beamforming

Cheolsun Park

Agency for Defense Development

### 요약

본 논문은 디지털 빔합성을 이용해 고감도로 원거리 신호의 탐색과 방향탐지가 가능한 스위치형 진폭 방향탐지기의 설계에 관한 것이다. 디지털 빔합성은 위상 천이기 및 신호 감쇠기와 같은 RF 소자를 사용하지 않고, 기저대역의 디지털 신호처리로 신호의 진폭과 위상 값을 제어함으로 아날로그 빔합성에 비해 상대적으로 하드웨어 구성이 단순하고 정교한 제어가 가능할 뿐 더러 다양한 알고리즘의 유연한 적용이 가능한 장점이 있다. 탐지가 내에 탐색과 방향탐지에 적절한 빔의 개수를 설정하고, 스위치형 진폭 방향탐이 가능하도록 합성빔간 진폭비를 도출함으로써 입사신호의 방향탐지를 수행할 수 있다. 또한 상용 안테나의 소자 이득 패턴 데이터를 활용하여 신호 탐색을 위한 합성빔 패턴을 계산하고 방향탐지를 위한 각도별 합성빔간 진폭비를 도출해 방위각별 추정오차 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

### I. 서론

합성 빔 생성기술은 레이더, 소나 및 통신 등 다양한 응용 분야에 활발히 연구되고 있다. 특히, 디지털 빔 합성은 안테나 기술과 디지털 신호처리 기술의 결합체로서 안테나는 시공간 신호를 시간 신호로 변환하는 장치로 볼 수 있고, 매우 다양한 신호처리 기법을 적용할 수 있다. 또한 레이더 및 전자전 등의 분야에서 기계적인 안테나의 회전 없이 전기적으로 고속으로 빔을 자유롭게 조향할 수 있는 장점과 목적에 따라서 디지털 신호처리를 통해 빔 폭과 부엽의 크기를 조절할 수 있는 장점이 있다.

입사 신호의 방위각(DoA) 정보는 MUSIC, ESPRIT, ML(Maximum Likelihood) 계열(DML, SML 등), WSF, Atomic Norm 등 다양한 알고리즘이 사용되고 연구되고 있다[1-4]. 스위치형 진폭비교 방향탐지(이하, 스위치형 방탐) 기법은 다른 알고리즘에 비해 상대적으로 탐지 각도의 오차가 크지만 연산양이 적어 계산속도가 빠르고 구현이 간편하다는 장점이 있어 널리 사용되는 방법이다.

본 논문에서는 고감도 방향탐지를 위하여 배열 안테나를 이용하여 합성빔을 기반한 스위치형 방탐기법을 적용하여 정의된 탐지 각도내의 입사신호를 원거리 탐지하고 신호원의 방향을 추정하는 방향탐지기를 설계 및 시뮬레이션을 수행하고 그 성능을 분석하였다.

### II. 스위치형 진폭비교 방향탐지 기법

진폭비교 방향탐지 기법에서 입사신호의 각도를 추정하기 위해서는 수신한 두 빔의 합 신호( $\Sigma$ )와 차 신호( $\Delta$ )의 비를 이용한다. 본 논문에서는 탐지하고자 하는 각도 범위를 커버하기 위한  $M$ 개의 합성빔을 만들기 위한 조향 벡터  $a_n$ 을 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다[4].

$$\alpha = \frac{M}{M-1} \frac{2\pi}{\lambda} d(\sin\theta_{stop} - \sin\theta_{start}) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{M}{M-1} \left( 1 - \frac{\sin\theta_{stop}}{\sin\theta_{start}} \right) \quad (2)$$

$$a_n = e^{-j\frac{\alpha}{M}(k-\frac{M}{\beta})n} \quad (3)$$

여기서,  $\theta_{start}$ 와  $\theta_{stop}$ 는  $M$ 개의 합성빔 중 첫 번째와 마지막 합성빔의 보어사이트 각도,  $k=1, 2, \dots, M$ 의 합성빔 번호, 그리고  $n=0, 1, \dots, N-1$ 은 채널 번호를 나타낸다. 위와 같은 방법으로  $M$ 개의 합성빔을 만들었을 때 각 빔의 위치는 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_k = \sin^{-1} \left[ \frac{\alpha}{M} \left( k - \frac{M}{\beta} \right) \cdot \frac{\lambda}{2\pi d} \right] \quad (4)$$

스위치형 방탐 기법은 수신 각도에서의 2개 합성빔의 합 신호( $\Sigma$ )와 차 신호( $\Delta$ )의 비를 계산하여 합성빔의 진폭 비율 값을 구할 수 있다. 이때, 수신 빔 신호는 식 (3)의 조향벡터와 수신 신호  $s_n$ 과의 행렬 곱으로 식 (5)와 같이 표현할 수 있다[4].

$$S_k = a_n \cdot s_n(x_n, \theta) \quad (5)$$

여기서  $s_n$ 은  $n$ 번째 채널에서 수신하는 신호이고,  $x_n$ 은 배열안테나의 중심으로부터의 거리이고,  $\theta$ 는 입사신호의 방향임.

또한 단일 신호원이라 가정했을 때, 합 신호와 차 신호는 인접한 두 빔 사이에서 계산함으로  $M-1$ 개의 합성빔간의 진폭 비율 곡선이 생기게 된다. 따라서 합 신호와 차 신호는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma_k(\theta) &= S_k + S_{k+1} \\ \Delta_k(\theta) &= S_k - S_{k+1} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $k'$ 은  $1, 2, \dots, M-1$ 을 의미하며 식 (6)을 사용하여 합성빔간 진폭비를 구하면 식 (7)과 같다.

$$E_{k'}(\theta) = \frac{\sum_k(\theta)}{\Delta_{k'}(\theta)} \quad (7)$$

최종적으로 합성빔간 진폭비 곡선은 식 (7)의 값을 가지게 되고, 진폭비 곡선의 시작과 끝점은 식 (4)의 값(즉, 각각의 합성빔의 보어사이트 각도)을 가지게 된다.

### III. 시뮬레이션 및 성능 분석

설계한 스위치형 방탐기의 성능을 확인하기 위해 동작 주파수인 3GHz에서 반과장 등간격으로 이격한 12개의 균일 선형 배열 안테나(ULA)를 이용하여 8개의 합성빔을 설계하여 그 성능을 시뮬레이션하였다.

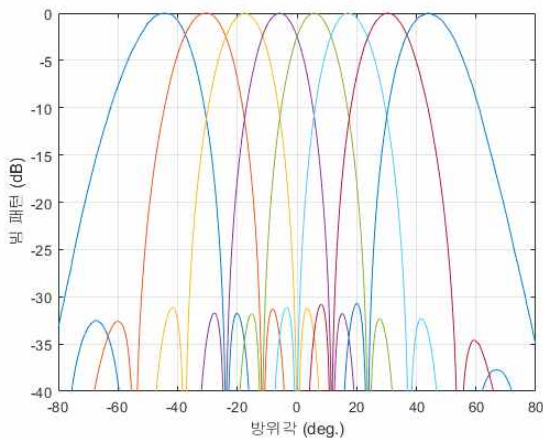


그림 1. 스위치형 진폭 방탐을 위한 합성빔 패턴(8개 합성빔)

배열 안테나를 구성에 사용한 안테나는 상용 Log periodic 안테나(모델명: HyperLOG 7040, 제작사: AARONIA AG사)로 700MHz~4GHz의 주파수 범위에서 약 4dBi의 이득을 갖는다. 제작사에서 제공한 데이터를 활용하여 소자 안테나의 빔패턴 생성에 적용하였다. 또한, 합성빔 생성시 부엽의 레벨을 낮추기 위해 Hanning 윈도우를 적용하였다.

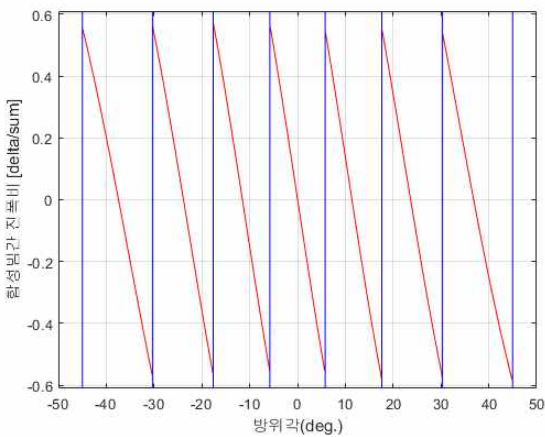


그림 2. 합성빔간 진폭비 곡선(8개 합성빔)

그림 1은 탐지 각도  $-45^\circ \sim +45^\circ$ 에 대응하는 합성빔간 진폭비 곡선을 정의하기 위한 8개 방향으로 조향된 빔 패턴의 모습이다. 원점  $0^\circ$ 로 조향된 빔의 경우 빔폭(-3dB) 각도는  $12.6^\circ$ 을 가지게 되고 원점에서 양쪽 끝단으로 멀어질수록 빔폭이  $13.3^\circ, 14.5^\circ, 17.2^\circ$ 로 증가하는 모습을 확인할

수 있다. 또한 Hanning 윈도우를 적용하여 주빔과 부엽간 SLL(Side Lobe Level)은 30dB이상으로 확보되었음을 볼 수 있다.

그림 2는 동작주파수인 3GHz에서 합성빔간 진폭비 곡선은 그림 1의 8개의 패턴에서 인접한 패턴의 합 신호와 차 신호의 비를 도식화한 그림이며, 조향각도인  $-45^\circ \sim +45^\circ$  범위에서 각각 인접한 빔의 7개의 선으로 정의된다.

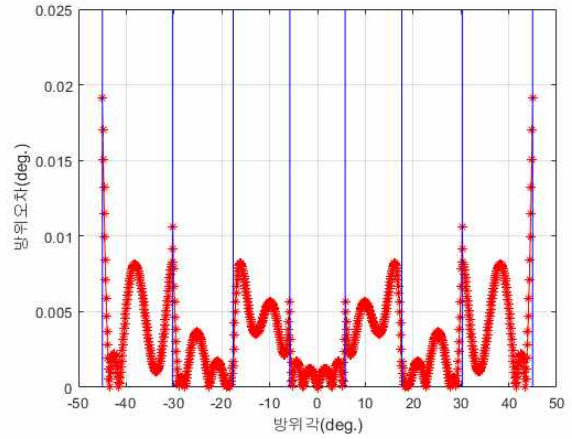


그림 3. 탐지각 내 방위각 추정 오차 시뮬레이션

그림 3은 탐지각 내 방위각을  $0.1^\circ$  간격으로 추정오차를 시뮬레이션한 결과를 보여준 것으로, 7개의 진폭비 곡선에 대해서는 3차 다항식 보상(curve fitting)을 추가로 적용하여 방위각 추정 정확도를 개선하였다. 설계된 방탐기의 탐지각내 DoA 내부 한계 오차(외부 오차요인 없는 상태)는  $0.0043^\circ$  RMSE로 나타났다(그림 3 참조).

방위각 오차 값의 변화량 흐름을 보면 0도를 기준으로 대칭성이 있으며, 각 합성빔의 보어사이트(그림 2와 그림3의 파란색 수직 실선)에서 오차가 크게 나타나고, 탐지각 양끝단으로 합성빔간 간격과 빔폭(-3dB)이 커짐에 따라 오차가 커짐을 알 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 고감도 원거리 신호 탐색과 방향탐지 기능을 갖는 합성빔 기반 스위치형 진폭 방탐기의 설계에 관한 것이다. 주파수 3GHz의 반과장( $0.5\lambda$ ) 간격의 배열 안테나를 사용하여 디지털 I/Q 신호를 획득하여 정의된 탐지 범위에서 합성빔을 이용한 스위치형 방탐기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 그 성능을 분석하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제(No. 915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

### 참고 문헌

- [1] Harry L. Van Trees, Optimum Array Processing, Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory, John & Sons, 2002
- [2] Robert Macharia, et al, "An Artificial Neural Network to DoA Estimation and Switched Beamforming in Rectangular Array based Smart Antenna," Progress In Electromagnetic Research C, , Vol. 93, 2019
- [3] Enqi YAN, et al, "Improving Accuracy of an Amplitude Comparison-based Direction-Finding System by Neural Network Optimization," IEEE Access, Vol. 8, 2020
- [4] 오현수, 박철순, 장래규, "디지털 빔포밍을 이용한 모노펄스 방향 탐지 기법 연구," 한국통신학회 논문지, Vol. 45, No. 06, 2020