

조합 위상차를 이용한 광대역 고정밀 멀티베이스라인 2차원 방향탐지

Wideband High-Precision Multi-Baseline Two-Dimensional Direction Finding Using Combination Phase Differences

윤 창 열 · 최 대 규 · 이 규 송

Chang-Ryul Yun · Dae-Gyu Choi · Kyu-Song Lee

요 약

광대역 인터페로미터 방향탐지에서 레이돔/안테나/신호 편파로 인한 신호의 입사 방향에 따라 위상 전파 특성이 균일하지 않아 수신기 간 위상차가 왜곡될 수 있다. 이는 방향탐지 정확도에 영향을 미치고, 특히 방위각과 고각이 상호 영향을 미치는 2차원 방향탐지에 그 영향이 더 크다. 본 연구는 탐지 영역을 방위각/고각 축으로 여러 영역으로 구분하고, 2차원 개략 방위연산을 통해 영역을 선택하고 선택 영역에서 상관연산으로 방향탐지를 수행하는 2차원 방향탐지를 제안한다. 위상 전달 불균일 특성으로 인한 왜곡에 강인한 조합 방위각, 조합 고각 위상차를 2차원 개략방위연산에 활용하였다. 이 방법을 통해 비선형적인 위상 전달 특성을 극복하는 것뿐만 아니라, 입사각이 커질수록 오차가 커지는 현상을 최소화할 수 있다. 성능시험을 통해 제안된 알고리즘이 광대역(H/I/J 대역)에서 레이돔/안테나의 비선형 특성에도 탐지영역에서 1도 이하의 방향탐지 오차를 보여 고정밀의 2차원 방향탐지가 가능함을 확인하였다.

Abstract

In wideband interferometer direction finding, the inherent non-linearity owing to radome, antenna, and signal polarization can cause non-uniform phase propagation along the incident of the signal, leading to distortion of phase difference between receivers. This affects the accuracy of direction finding, particularly in two-dimensional direction finding where azimuth and elevation are mutually influential. In this study, we proposed a two-dimensional direction finding method to divide the detection range into several areas based on azimuth and elevation axes, select the area through a two-dimensional rough direction finding operation, and perform direction finding by correlation operation in the selected area. In addition, combination azimuth and combination elevation phase differences that are robust against phase delay distortion were used in two-dimensional rough direction operations. This method overcame nonlinear phase transfer characteristics and minimized the increase in error as the incidence angle increased. Performance tests confirmed that the proposed algorithm achieved high accuracy two-dimensional direction finding in a wideband (H/I/J band) system with a measurement error of 1 degree or less in the detection range, even in the presence of nonlinear characteristics of radome/antenna.

Key words: Electronic Warfare, Interferometer, Direction Finding, Multi-Baseline, Two-Dimension, Combination Phase Differences

「이 논문은 2022년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임.」

국방과학연구소 국방첨단과학기술연구원 레이더/전자전기술센터(Radar & EW Technology Center, Agency for Defense Development, Advanced Defense Science & Technology Research Institute)

· Manuscript received April 4, 2023 ; Revised April 26, 2023 ; Accepted May 22, 2023. (ID No. 20230404-025)

· Corresponding Author: Kyu-Song Lee (e-mail: ksong@add.re.kr)

I. 서 론

전자전 지원(electronic warfare support, ES) 장비의 중요 역할 중 하나는 미사일, 레이더 등의 신호원을 식별하는 것이다. 이들 신호원의 식별을 위해 짧은 시간에 방사되는 펄스의 신호 제원을 측정(주파수, 신호세기, 펄스폭 등)하고, 수집된 다수의 펄스들을 분류한다. 이때 수집된 펄스들을 분류하는 데 신호원의 방향을 탐지하는 기능이 중요하게 사용된다. 또한 전장 환경이 점점 복잡해짐에 따라 탐지 대상의 명확한 식별을 위해 2차원 방향탐지가 필요하다.

방향탐지 방법은 크게 두 개 이상의 안테나에서 수신되는 신호의 크기 차이를 이용하는 방식(진폭비교)과 신호의 위상을 비교하는 위상비교 방식(인터페로미터)이 있다. 진폭비교 방식은 멀티패스, 안테나의 진폭 부정합 등으로 정확도가 저하되므로, 고정밀 정확도가 요구되는 시스템에서는 인터페로미터 방식의 방향탐지가 많이 사용된다^[1].

$$\begin{aligned}\Delta\phi_1 &= \frac{2\pi d_1 \sin(\theta)}{\lambda} + 2m\pi \\ \Delta\phi_2 &= \frac{2\pi d_2 \sin(\theta)}{\lambda} + 2n\pi\end{aligned}\quad (1)$$

인터페로미터 방향탐지는 그림 1과 같이 입사각에 따라 안테나 간 위상차($\Delta\phi$)가 달라지는 점을 이용하여 방향

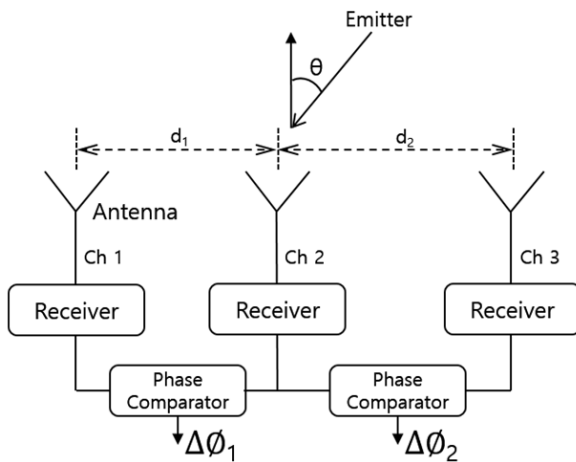


그림 1. 멀티 베이스라인 인터페로미터 방향탐지
Fig. 1. Multi-baseline interferometer direction finding.

을 탐지하는 방식이다. 안테나 간 위상차는 식 (1)과 같이 신호의 파장(λ), 베이스라인 길이(d), 입사각(θ)에 의해 결정된다(m, n 은 정수). 그러나 베이스라인의 길이가 $\lambda/2$ 이상인 경우는 입사각($-\pi \leq \theta \leq \pi$)의 범위에서 360도 이상으로 위상이 변화하므로 모호성이 발생한다. 위상차의 모호성은 방향탐지 오류로 이어지므로 베이스라인을 추가로 사용하여 모호성을 극복할 수 있다. 이 방식이 멀티 베이스라인 방향탐지이다.

인터페로미터 방향탐지의 방위각 탐지는 그림 1과 같이 안테나를 선형으로 배치하여 수행한다. 따라서 안테나를 수직 방향으로 추가 배치하여 고각에 대한 탐지가 가능하다. 방위각 베이스라인과 고각 베이스라인이 위상차는 상호 영향을 미치고, 이 관계는 구면좌표계로 그림 2와 같이 정의된다.

방위각, 고각의 2차원 방향의 기술을 위한 구면 좌표계는 그림 2와 같이 $[r, \phi, \theta]$ 로 정의된다. r 은 표적까지의 거리, ϕ 는 z 축을 축으로 x 축과 이루는 각도(방위각(AZ)), θ 는 z 축과 이루는 각도이다. 본 연구에서는 수평면 기준의 각도 ($\pi/2 - \theta$)를 θ_{EL} 로 정의한다. 참고문헌 [2]에 의하면 방위각 위상차($\Delta\phi_{AZ}$)와 고각 위상차($\Delta\phi_{EL}$)는 식 (2)와 같고, 방위각과 고각의 연관성을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta\phi_{AZ} &= \frac{2\pi}{\lambda} d_{AZ} \sin(\theta_{AZ}) \cos(\theta_{EL}) \\ \Delta\phi_{EL} &= \frac{2\pi}{\lambda} d_{EL} \sin(\theta_{EL})\end{aligned}\quad (2)$$

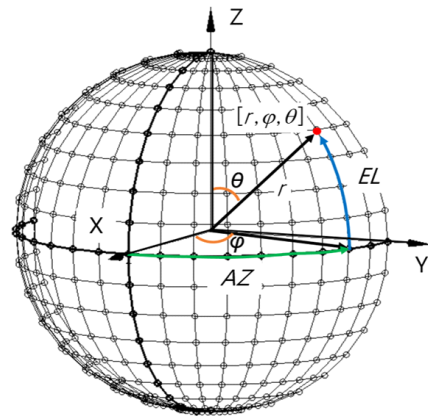


그림 2. 구면좌표계
Fig. 2. Spherical coordinate system.

방위각 위상차($\Delta\phi_{AZ}$)는 방위각(θ_{AZ})과 고각(θ_{EL})을 모두 고려해야 하나, 고각 위상차($\Delta\phi_{EL}$)는 고각(θ_{EL})만을 고려하면 된다. 이는 고각 측정 시 방위각에 영향을 받지 않고 독립적으로 처리 가능함을 의미한다. 따라서 고각 측정 후, 측정된 고각에 의해 방위각을 처리하면 방위각, 고각을 산출할 수 있다.

방향탐지 시스템에서는 레이돔/안테나/신호 편파 등에 위상전달의 비선형성 지연 특성이 내재한다. 레이돔/안테나 등을 통과하면서 신호의 위상 지연이 균일하지 않은 현상으로 채널 간 위상차가 왜곡되어 방위각, 고각 측정에 영향을 미친다. 그림 3은 입사방향, 레이돔의 유무에 따라 수신 신호의 위상변화를 측정한 그림이다. 레이돔이 없는 경우에도 안테나 특성에 따라 신호의 편파별로 위상 지연이 다르며, 레이돔이 있는 경우에도 입사각이 커질수록 위상 지연이 일정하지 않고, 특히 편파에 따라 크게 영향 받음을 알 수 있다. 제작된 레이돔/안테나가 광대역의 수신 범위에서 고른 특성을 보이지 않기 때문에 이런 위상 지연 특성이 주파수마다 다르게 나타난다.

이런 비선형적인 위상차 특성들은 방향탐지 결과에 큰 영향을 미친다. 이런 비선형적 위상특성으로 고각 측정 시 방위각에 의해서도 영향을 받는다. 그림 4(a)는 방위각 0도(bore-sight)에서 고각을 가변하며 측정한 베이스라인의 위상차 데이터이고, 그림 4(b)는 방위각 +45도 방향에서 측정한 베이스라인의 위상차이다. 그림 4(a)와 그림 4(b)가 동일 위상(그림 4 빗금 원)에 대해 서로 다른 방향탐지 결과(붉은 원)를 보인다. 이는 고각 측정 시 어느 방위각에서 측정하느냐에 따라 고각 연산 결과가 달라짐을 의미한다.

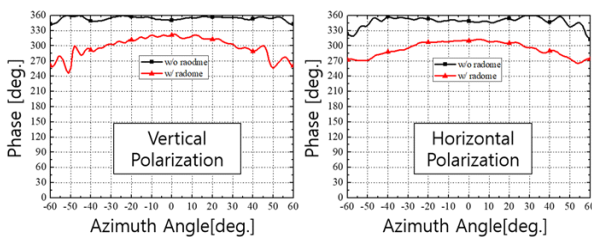


그림 3. 신호의 입사각에 따른 위상 변화
Fig. 3. Phase change of a signal according to the angle of incidence of the signal.

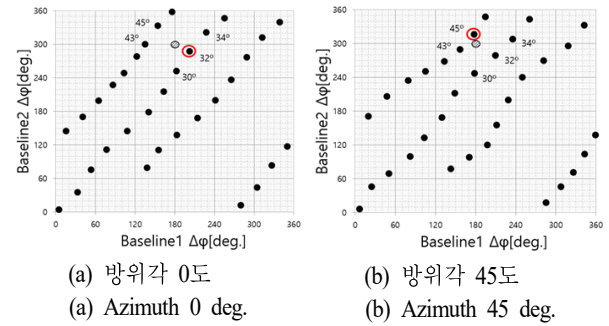


그림 4. 신호의 입사각에 따른 고각 위상차 그래프
Fig. 4. Phase difference graph according to the angle of incidence of the signal.

따라서 주파수, 입사각에 따라 레이돔, 안테나, 신호의 편파 등으로 신호 위상 지연 특성이 변화하므로, 정밀한 방향탐지를 위해서는 이들 특성(보정 데이터)을 측정하여 방향탐지 시 이들 변화 특성을 고려하여 방향을 결정해야 한다. 방위각 결정에도 고각이 필요하고, 고각 결정에도 방위각 정보가 필요하므로 이들에 대한 동시 고려가 반드시 필요하다.

II. 관련 연구

인터페로미터 방향탐지는 안테나를 선형으로 배치하여 방향탐지를 수행하므로 2차원 방향탐지를 위해서는 수직 평면상의 안테나를 추가로 배치하여 입사 방향을 결정할 수 있다. 방위각만을 고려하던 1차원 방향탐지는 베이스라인의 수(M)에 비례하여 연산량이 요구되나, 2차원 방향탐지는 추가된 베이스라인(N)과의 상관성을 추가 연산하여야 하므로, 연산량이 $M \times N$ 만큼 늘어나게 된다. 이런 제한점을 극복하기 위해 ULA(uniform line array)^[3], URA(uniform rectangle array)^[4], uniform L-shaped array^[5] 등의 형태로 안테나를 배치하는 방식들이 적용되고 있다. 이들 연구는 안테나를 2차원 방향으로 배치하고, 2차원 연산으로 인한 복잡도를 줄이기 위한 방안들이 제시되고 있다. 안테나를 다양한 형태로 안테나를 배치하고 안테나 간격은 최대 주파수 파장의 절반 이하로 설정하여야 하는 제한을 갖는다. 그러나 이런 방법은 레이더의 수 μs 의 간격을 갖는 펄스 신호를 처리하는 ES 시스템에서는 적합하지 않다. 펄스 신호가 지속적으로 유입되므로 제한

된 시간 내에 처리하기 어렵고, 방향탐지의 정확도 향상을 위해서는 최장 베이스라인의 길이가 보장되어야 하나 [6][7], 제안된 방법으로는 해당 베이스라인 길이를 충족하는 것이 곤란하다.

참고문헌 [8]에서는 고각 측정은 고각 연산을 수행하고, 결정된 고각을 이용하여 방위각을 연산하여, 방위각 방향탐지와 고각 방향탐지를 분리하는 방법을 제안하였다. 그러나 광대역 시스템에서는 레이돔/안테나 등의 위상지연 비선형적인 특성으로 고각 측정 시 방위각이 영향을 미치므로 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다.

III. 제안된 2차원 방향탐지 방법

2차원 방향탐지장치는 안테나를 방위각 축으로 서로 다른 간격으로 배치하여 방위각 다중 베이스라인을 형성하여 신호를 수신하고, 또한 안테나를 고각 축으로 서로 다른 간격으로 배치하여 고각 다중 베이스라인을 형성하여 신호를 수신한다. 본 연구에서는 방향탐지 정확도를 충족하기 위해 그림 5와 같이 방위각 베이스라인은 3개, 고각 베이스라인은 2개를 사용하여 방위각, 고각 탐지를 위한 베이스라인을 구성하였다.

본 연구에서는 방위각을 여러 구간으로 구분하고, 고각을 여러 구간으로 구분하여, 해당 영역의 위상지연 특성을 고려하여 방향탐지를 수행한다. 그림 6(a)는 방위각 위상지연 특성(방위각 보정 데이터)을 측정하기 위해, 고각 탐지 범위를 여러 영역으로 구분하고 방위각을 가변하며 보정 데이터를 획득하고, 그림 6(b)는 방위각 탐지

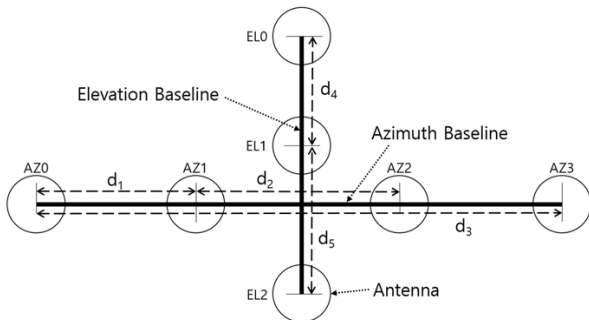
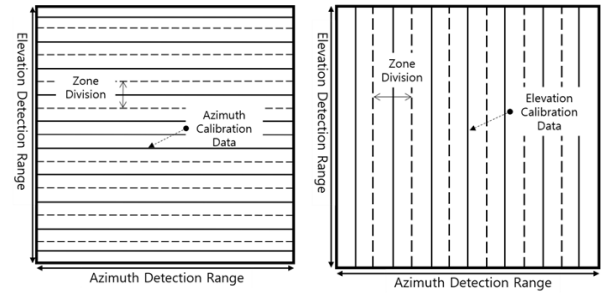


그림 5. 2차원 방향탐지를 위한 베이스라인
Fig. 5. Baseline of 2 dimensional direction finding.



(a) 방위각 위상 측정 위치 (b) 고각 위상 측정 위치
(a) The position and zone of azimuth (b) The position and zone of elevation

그림 6. 방위각/고각 영역 구분 및 위상특성 측정 위치
Fig. 6. Azimuth/elevation zone division and phase data measurement locations.

범위를 여러 영역으로 구분하고 영역 내에서 고각을 가변하며 고각 보정데이터를 획득한다. 본 연구에서는 방위각 위상 측정 위치는 10개, 고각 위상 측정 위치는 7개로 설정하였으나, 측정 위치의 수는 측정 위치의 수를 늘리면 방향탐지 오차를 줄일 수 있으므로, 위상 변화 특성 및 방향탐지 정확도를 고려하여 간격을 변경할 수 있다.

방향탐지 시 방위각, 고각 방향탐지를 위해 구분된 방위각, 고각 영역을 선택해야 하나, 식 (2)의 기술과 같이 방위각 측정에 고각 정보가 필요하며, 고각 결정에도 방위각 정보가 필요하므로, 방위각/고각이 상호 영향을 미친다. 따라서 방위각과 고각을 동시에 고려하는 2차원 방향탐지가 필요하다.

본 연구에서는 측정된 위상으로부터 베이스라인별 위상차를 생성하고, 생성된 위상차들로부터 조합 방위각 위상 및 조합 고각 위상차를 생성하여, 수신 신호의 주파수, 조합 방위각 위상차, 조합 고각 위상차를 입력으로 2차원 개략 방위연산을 수행한다. 2차원 개략 방위연산은 개략 방위각과 개략 고각을 결정한다. 개략 방위각으로 방위각 축으로 분할된 고각 영역을 선택하고, 해당 영역의 고각 보정 데이터와 측정된 고각 베이스라인의 위상차로 정밀 고각을 산출한다. 정밀 고각으로 고각 축으로 분할된 방위각 영역을 선택하고, 측정 주파수의 방위각 보정 데이터와 측정된 베이스라인의 위상차와의 최소 상관각도 연산을 수행하여 정밀 방위각을 결정한다. 2차원 방향탐지를 위한 전체 흐름은 그림 7과 같다.

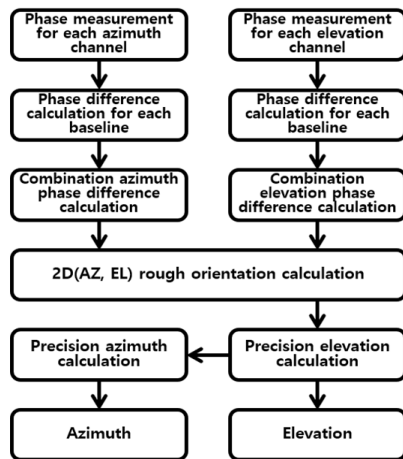


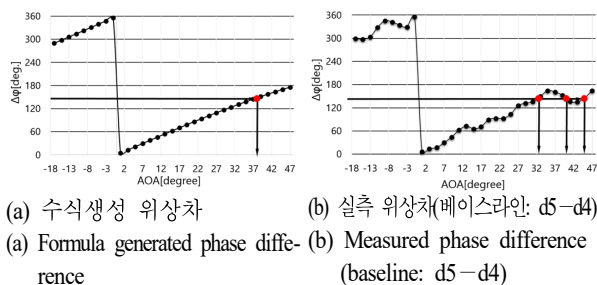
그림 7. 2차원 방향탐지 흐름도

Fig. 7. Flow chart of two-dimensional direction finding.

3-1 조합 방위각/고각 위상차

3-1-1 위상차에 의한 입사각 결정 제한점

신속한 방향탐지와 연산의 최소화를 위해 0.5λ 의 베이스라인을 활용할 수 있다. 식 (1)에 의하면 0.5λ 의 베이스라인은 해당 베이스라인에서 측정된 위상차와 입사각을 1:1로 매핑할 수 있기에 매우 단순한 구조로 방향탐지가 가능하다. 또한 탐지 범위(θ)를 제한하면 1.0λ 또는 1.5λ 로 방향 결정이 가능하다. 그림 8(a)는 식 (1)에 근거한 -15° 에서 $+45^\circ$ 범위에서 1.0λ 의 위상차 그래프로, 위상차로 입사각을 결정할 수 있다. 그러나 각 베이스라인의 실측 위상차는 비선형적인 위상 전달 특성 등으로 오차 정보를 포함하여 입사각(AOA)에 따라 위상차가 일관성 있게 증가하지 않고, 그림 8(b)와 같이 위상차

그림 8. 1.0λ 베이스라인의 위상차 그래프Fig. 8. Phase differences graph of 1.0λ baseline.

가 증가/감소를 반복하여 탐지 범위에서 위상차로 입사각을 결정할 수 없다(주파수가 높아짐에 따라 안테나를 1.0λ 간격으로 설치할 수 없어, 베이스라인의 조합으로 1.0λ 생성). 측정된 데이터로부터 다양한 위상차 조합으로 위상차를 생성하여 입사각을 결정할 수 있는지 분석하였으나, 광대역의 전 주파수를 모두 충족하는 조합을 찾지 못하였다. 이에 본 연구에서는 위상차 데이터로 입사각을 결정할 수 있는 새로운 조합 방위각/고각 위상차를 제안한다.

3-1-2 조합 방위각/고각 위상차

본 연구에서의 조합 위상차는 위상차에 의해 입사각을 결정하기 위해 베이스라인들로부터 가상의 위상차로 정의한다. 제안된 조합위상차는 두 베이스라인의 2차원 상의 위치 정보(베이스라인 위상차 변화의 비율)를 활용하는 것으로, 위상차 데이터를 회전을 통해 1차원으로 투영하고, 투영된 위상차와 베이스라인 위상차를 조합하여 생성된다.

베이스라인 위상차 그래프(그림 9)의 대각선 방향으로 입사각을 그룹핑(색터)하여, 그룹별로 동일 색터 번호를 할당하여 입사각 영역을 구분한다. 그림 9와 같이 2개의 베이스라인을 선정하고, 선정된 베이스라인의 위상차 그래프를 일정 각도로 회전하고, 색션이 잘 나뉘도록 각 축

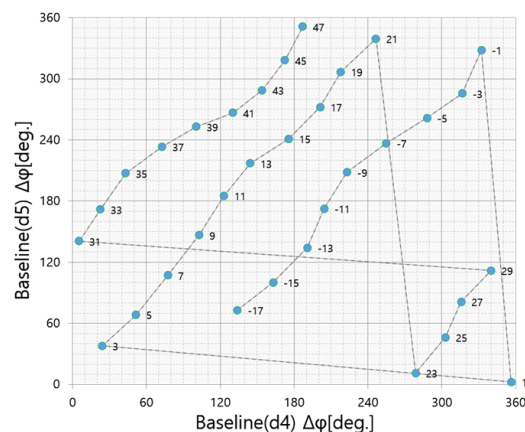


그림 9. 고각 베이스라인(d4, d5) 위상차 그래프

Fig. 9. Phase difference graph of the elevation baseline (d4, d5).

별로 shift 연산을 수행하고, 세로축의 값의 범위에 따라 섹터를 나눈다. 섹터 정보와 두 베이스라인 중 긴 베이스라인의 값을 이용하여 조합 방위각/고각 위상차를 생성한다. 이 방식으로 두 개의 베이스라인 관계 정보를 활용함으로써 산출되는 조합 위상차 데이터의 정확성을 높일 수 있었다. 오차를 포함하는 하위 데이터를 배제하고, 두 위상차 데이터의 상위 정보만을 활용하기 때문에 입사각에 따른 위상 지연의 비선형성을 극복할 수 있는 강인한 특성을 갖는다.

3-1-3 조합 방위각/고각 위상차 베이스라인 선정

조합 방위각/고각 위상차 생성을 위해 방위각/고각 각각 2개의 베이스라인을 선택한다. 베이스라인은 실제 안테나의 베이스라인이나, 베이스라인의 조합을 통해 생성한 가상의 베이스라인 중 섹터가 잘 구분될 수 있는 쌍을 선택한다. 선정 기준은 섹터 간 거리가 긴 조합을 선택한다. 그림 10(a)는 두 베이스라인의 이상적인 위상차 그래프이며, 그림 10(b)는 수신 대역 내, 탐지 범위의 2 GHz 대역의 고각 측정 데이터이다. 이상적 데이터는 주파수 및 입사각의 변화에 따라 위상 변화량은 가변되나, 두 위상의 변화량이 같기에 위상차의 기울기가 일정하다. 그러나 광대역 시스템에서는 주파수 및 입사각에 따라 레이돔/안테나 등의 영향으로 두 베이스라인의 위상전달이 달라져 그림 10(b)와 같이 위상차가 일정 영역에 퍼져서 나타난다. 주파수를 전 수신 대역으로 확대하면 각 섹터간을 구분할 수 없을 정도로 섹터 간 중첩되어 불규칙하게

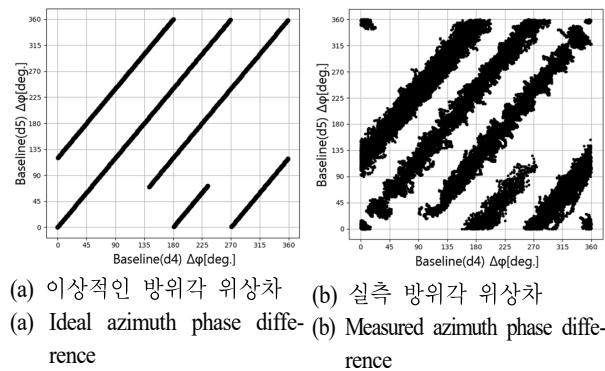


그림 10. 베이스라인의 위상차 그래프(d4, d5)
Fig. 10. Phase difference graph of two baseline (d4, d5).

나타날 수 있다. 따라서 전체 수신 대역을 여러 주파수 범위로 구분하여 섹터 정보를 처리해야 하며, 보정 데이터로부터 섹터 간 구분 특성이 좋은 조합을 선택한다. 베이스라인의 길이가 길수록 섹터간 간격(폭)은 줄어든다^[9].

3-1-4 섹터 구분을 위한 주파수 범위 분할 및 회전

수신 대역의 시작 주파수에서 주파수를 증가시켜가며 베이스라인의 데이터를 누적한다. 누적된 데이터가 섹터간 분리가 가능하면 다음 주파수를 추가하여 섹터 분리 여부를 판단하고, 섹터가 분리되지 않으면 주파수 범위를 구분하고, 해당 주파수부터 데이터를 누적하며 앞선 과정을 반복한다. 섹터 번호는 최저 각도에서 최고 각도 순으로 할당하며, 두 입력 위상차 중 하나라도 360도를 초과하면 섹터번호를 증가시킨다.

그림 11(b)와 같이 ④-②번에 속한 데이터를 대상으로 support vector machine^[10]을 적용하여 두 그룹으로 분할하고, 모든 데이터가 분할가능한지 여부와 최적의 분할 직선을 구한다. 이 직선을 이용하여 섹터 간 구분을 위한 기울기 및 세로축값을 결정한다. 이 방법을 반복하여 ②-①, ①-⑤, ⑤-③ 그룹에 대해서도 수행한다. 각 그룹별 거리가 일정기준 이상 벌어지면 섹터 간 구분 가능한 것으로 판단한다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

위상차의 범위는 360도를 초과하지 않기에, 해당 데이터를 각 축별로 shift하여, 최적의 그룹을 생성할 수 있다.

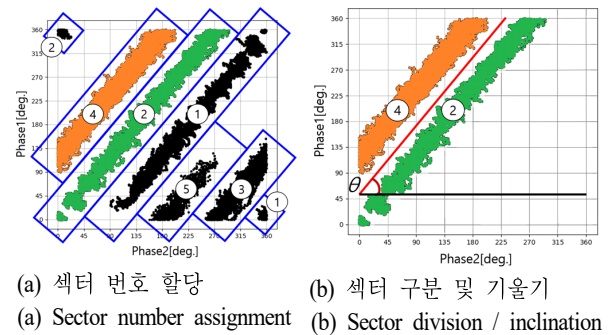


그림 11. 위상차 그래프의 섹터 구분
Fig. 11. Sector identification of phase difference graphs.

그림 12는 2개의 선택된 베이스라인을 2차원 그래프 상에서 shift하고, SVM을 통해서 생성한 기울기(θ)로 회전하는 수식을 표현한 개념도이다. 식 (3)은 2차원 공간에서 점을 θ 만큼 회전시키는 수식이다. 그림 13은 그림 10(b)의 데이터에 섹터 번호를 할당하고, SVM을 통해 섹터 분할 최적 기울기 및 구분선을 연산하고, 해당 기울기에 따라 회전한 위상차 그래프이다. 그림 14는 방위각 조합 위상차 생성을 위한 위상차 데이터를 회전한 그림이다. 섹터의 수는 고각의 섹터수보다 적다. 이는 방위각 수신 범위가 넓어 위상 변이의 비선형성이 크므로, 섹터의 구분을 위해 낮은 길이의 베이스라인을 선택했기 때문이다.

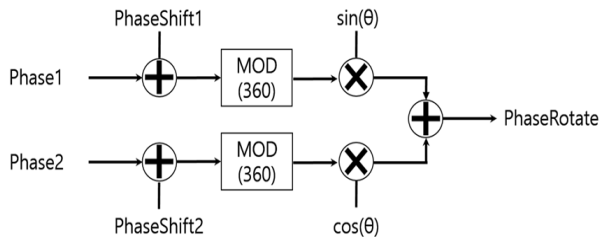


그림 12. 위상차 shift 및 위상 회전 블록도
Fig. 12. Block diagram of phase difference shift and phase rotation.

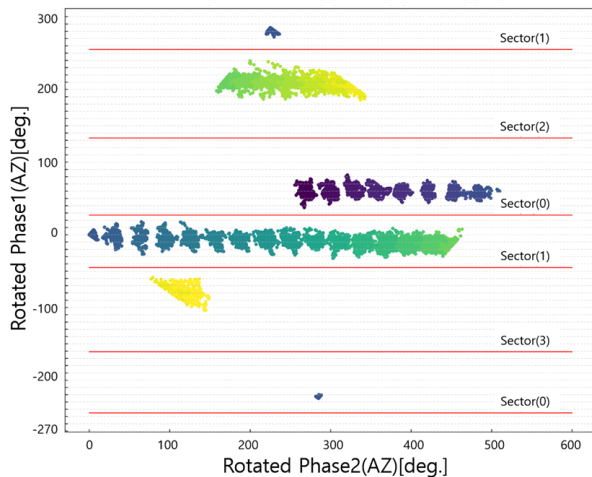


그림 13. 방위각 베이스라인 위상차 회전 그래프(J 밴드 0.5 GHz 대역폭 데이터)
Fig. 13. Phase difference rotation graph of azimuth baseline (0.5 GHz bandwidth data of J band).

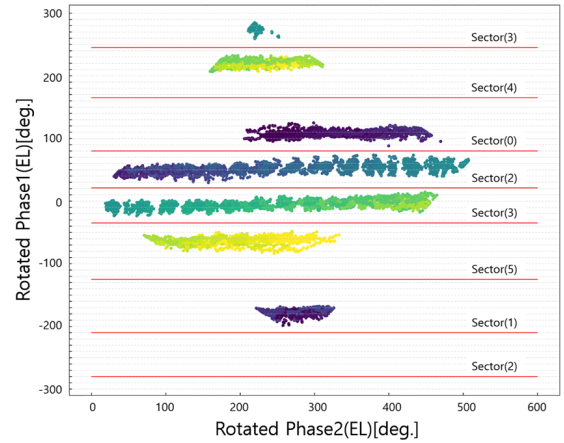


그림 14. 고각 베이스라인 위상차 회전 그래프(J 밴드 0.5 GHz 대역폭 데이터)
Fig. 14. Phase difference rotation graph of elevation baseline (0.5 GHz bandwidth data of J band).

3-1-5 방위각, 고각 조합 위상차 생성 결과

입사각별로 생성된 조합 고각 위상차가 그림 15이다. 최저 입사각부터 순차적으로 섹터를 할당하므로 입사각이 커질수록 위상차가 증가한다. 조합 위상차를 8비트로 표현하는 경우, 상위 3비트는 섹터번호, 하위 5비트는 베이스라인 위상차로 구성한다. 그림 8(b)와 동일 데이터(베이스라인)로부터 생성하였으나, 전 입사범위에서 위상이 중복되어 나타나지 않는다. 따라서 조합 위상차로 방향결정이 가능하다.

2차원 전 탐지 범위의 방향탐지를 위해 조합 위상차는 방위각 전 범위, 고각 전 범위에 대한 정보가 필요하다. 방위각별 조합 고각 위상차는 그림 6의 영역별로 측정된

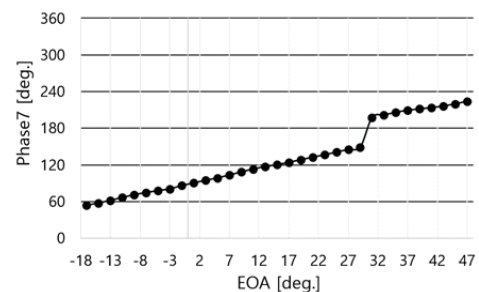


그림 15. 조합 고각 위상(Phase 7)
Fig. 15. Combination elevation phase difference.

보정 데이터로부터 생성하며, 측정되지 않은 입사각은 보간법을 활용하여 1도 단위로 생성한다. 그림 16은 방위각별 조합 고각 위상차 데이터이다. 동일 위상차가 그림 내의 선으로 표시되어 있다. 고각 조합 위상차는 방위각 전 범위에서 크게 변하지 않으나, 입사각에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.

고각별 조합 방위각 위상차 역시 그림 6의 영역별로 측정된 데이터로부터 생성하며, 측정되지 않은 보간법을 활용한다. 그림 17은 생성된 고각별 조합 방위각 위상차 데이터이다. 고각이 커짐에 따라 같은 위상차의 변화량이 작아짐을 알 수 있다.

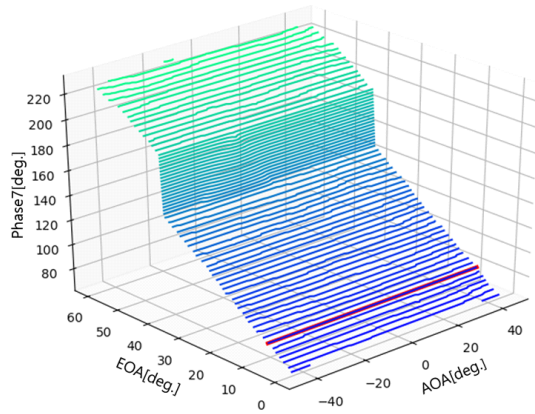


그림 16. 방위각별 조합 고각 위상차(Phase 7)
Fig. 16. Combination elevation phase difference by azimuth.

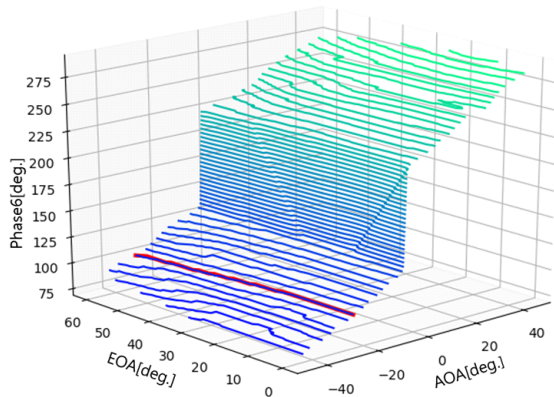


그림 17. 고각별 조합 방위각 위상(Phase 6)
Fig. 17. Combination azimuth phase difference by elevation.

3-2 2차원 개략 방위(방위각, 고각) 연산

방위각과 고각의 동시 고려를 위해, 조합 방위각 위상차(그림 17)와 조합 고각 위상차(그림 16)로부터 2차원 방위연산을 수행한다. 2차원 개략 방위연산 알고리즘은 그림 18과 같다. 알고리즘은 처리 시간의 단축을 위해 전 수신 주파수 대역에서, 입력 가능한 조합 방위각 위상차와 조합 고각위상차에 따른 2차원 방향탐지 결과를 탐색하여 연산 결과를 메모리 형태로 저장한다. 연산 결과를 주파수, 조합 방위각 위상차(Phase 6), 조합 고각 위상차(Phase 7)를 주소로 하는 메모리 영역에 저장하여, 방탐 결정 시에는 측정된 주파수, Phase 6, Phase 7로 해당 개략 방위각 연산 결과를 즉시 얻을 수 있다.

2차원 개략 방위연산 알고리즘은 모든 주파수 범위(f_k)에서 입력 가능한 모든 위상차(ϕ_6, ϕ_7)에 대해서 SearchAOA(f_k, ϕ_6, ϕ_7) 연산을 수행한다. SearchAOA(f_k, ϕ_6, ϕ_7) 함수는 모든 방위각 범위(m)와 모든 고각 범위(n)에서 위상차(ϕ_6, ϕ_7)와의 위상차 거리를 측정하여, 최소 거리를 갖는 방위각(m) 고각(n)을 결정한다. 일례로 조합 방위각 위상차 100도(그림 17 붉은 라인), 조합 고각 위상차 80도(그림 16 붉은 라인)인 경우에 방위각과 고각의 상관거리를 연산하여 그림 19와 같이 연산될 수 있고, 최소 상관거리를 갖는 점의 위치로 방위각(-20도)과 고각(10도)을 결정한다.

3-3 정밀 고각 연산

2차원 개략 방위 연산의 결과인 개략 방위각(TAOA)을 수신하여 고각 결정을 위한 고각 보정 데이터를 선택한

```

ConvertCombinationPhasetoAOA() {
  for all FrequencyRange( $f_k$ )
    for all Phase6( $\phi_6$ )
      for all Phase7( $\phi_7$ )
        Memory( $f_k, \phi_6, \phi_7$ ) = SearchAOA( $f_k, \phi_6, \phi_7$ )
}
SearchTAOA( $f_k, \phi_6, \phi_7$ ) {
  for all AOARange(m)
    for all EOARange(n)
      DistanceArray( $m, n$ ) =  $\sqrt{(\theta_m - \phi_6)^2 + (\theta_n - \phi_7)^2}$ 
      TAOA = MinDistanceAngle(DistanceArray)
    return TAOA
}
    
```

그림 18. 2차원 개략 방위연산 알고리즘
Fig. 18. The two-dimensional rough direction finding algorithm.

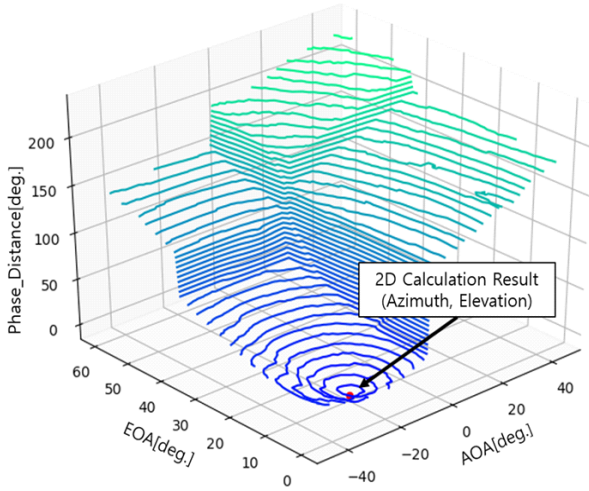


그림 19. 2차원 방위연산 결과
Fig. 19. The result of 2-dimensional rough direction finding computation.

다. 그림 4와 같이 선택된 보정 데이터와의 최소 상관각도를 갖는 위치를 찾아 고각으로 결정한다. 보정 데이터는 1도 분해능으로 측정된 데이터로부터 보간법을 통해 0.1도 분해능을 갖도록 생성한다. 고각 최소상관각도 연산 알고리즘은 그림 20과 같다. 측정 주파수의 입사각 범위의 모든 보정데이터와 최소거리를 갖는 고각으로 정밀 고각을 결정한다. 정밀 고각 데이터는 연산 시간의 단축을 위해 모든 입력 가능한 위상차에 대해 사전 연산을 통해 lookup 테이블을 생성할 수 있다. 주파수와 베이스라인 위상차를 주소로 정밀 고각 데이터를 획득할 수 있는 메모리 구조로 구현되어 처리시간을 단축할 수 있다.

```

Search_EOA( $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ )
{
    for all EOA_Range(m)
        DistArray(m) =  $\sqrt{(\theta_{k,1} - \Delta\varphi_1)^2 + (\theta_{k,2} - \Delta\varphi_2)^2}$ 
        EOA = MinDistPosition(DistArray)
    return EOA
}

•  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$  : Measured elevation baseline(4, 5) phase of the received signal
•  $\theta_{k,1}, \theta_{k,2}$  : Calibration data of elevation baselines(4, 5) at frequency(k)
    
```

그림 20. 정밀 고각 연산 알고리즘
Fig. 20. The precise elevation computation algorithm.

3.4 정밀 방위각 연산

정밀 고각(EOA)에 의해 방위각의 영역이 선택된다. 선택된 영역 내 전 수신 범위의 방위각 위상차와 측정된 베이스라인의 위상차 간 상관도를 연산하여 최소 상관거리를 갖는 방위각을 수신 방위각으로 결정한다. 방위각 연산 알고리즘은 그림 21과 같다. 수신 방위각과 인접 보간 데이터의 위상차 거리 비례관계를 통해 보간법으로 0.1도 수준의 정밀방위각을 산출한다.

IV. 2차원 방향탐지장치 방탐 시험 결과

복잡한 신호 환경의 다중 펄스 처리 시간의 제한으로, 2차원 방향탐지장치는 연산 복잡도를 줄이기 위해 방위각과 고각 처리를 분리 및 병렬처리가 가능토록 구성하였고, 모든 방탐 알고리즘은 FPGA 내에 구현되었다.

2차원 방향탐지는 방위각, 고각 탐지 범위에서 주파수, 방위각, 고각, 편파(수평, 수직)를 가변하며 방향탐지 정확도를 측정하였다. 그림 22는 X 밴드의 한 주파수에서 신호를 방사하며 방위각과 고각의 방향탐지 오차를 측정

$$AOA(i) = \arg \min_i \sqrt{\sum_{m=1}^3 (\varphi_{k,j,i,m} - \hat{\varphi}_m)^2}$$

- $\Delta\varphi_{k,j,i,m}$: Calibration data of baseline(m) at frequency(k), elevation(j), and azimuth(i)
- $\hat{\varphi}_m$: Measured baseline(m) phase of the received signal

그림 21. 정밀 고각 연산 알고리즘
Fig. 21. The precise elevation computation algorithm.

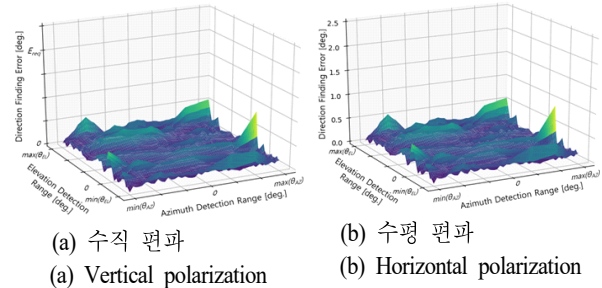


그림 22. 방위각, 고각 탐지범위 방향탐지 오차(J 밴드)
Fig. 22. The direction finding error in azimuth and elevation detection ranges (J band).

하였다. 특정 방위각, 고각에서의 방향탐지 오차는(방위각오차²+고각오차²)^{1/2}로 표현하였다. 방위각, 고각 탐지 범위는 각각 ($\max(\theta_{AZ}) \sim \min(\theta_{AZ})$), ($\max(\theta_{EL}) \sim \min(\theta_{EL})$)이다. 그림 22(a)는 수직편파 방사 시험의 오차이며 그림 22(b)는 수평편파의 오차이다. 탐지영역에서 입사 각도의 고저에 영향 없이 전체 영역에서 방향탐지오차 1도 이하의 고른 방향탐지 결과를 나타냈으며, 수직과 수평편파의 변화에도 정밀한 방향탐지가 가능함을 확인하였다.

전 수신 주파수 대역(H, I, J band: 군용표준대역 기준)에서 고각을 가변하며 방위각의 방향탐지오차를 측정된 결과가 그림 23에 나타나 있다. 고각 0도의 측정오차는 0.18도(RMS)이고, 고각 45도의 측정오차는 0.34도(RMS)이다. 주파수가 높아질수록 오차는 감소하는 특성을 보이나, 이는 최대 수신 주파수 기준으로 베이스라인을 설계했기 때문이다. 고각 45도에서 오차가 커진 이유는 광각에서 레이돔/안테나의 비선형적인 특성이 급격히 증가했기 때문으로 판단된다.

그림 24는 방위각을 가변하며 고각을 측정한 데이터이다. 방위각 0도의 측정오차는 0.3도(RMS)이고, 방위각 45도의 측정오차는 0.33도(RMS)이다. 고각 역시 최대 수신 주파수 기준으로 베이스라인을 설계하였으므로, 주파수가 높을수록 오차가 감소하였다. 또한 방위각에 따라 영역별 보정 데이터를 적용하여 전 영역에서 고른 오차를 보였다. 또한 4개의 안테나 및 긴 베이스라인을 이용한

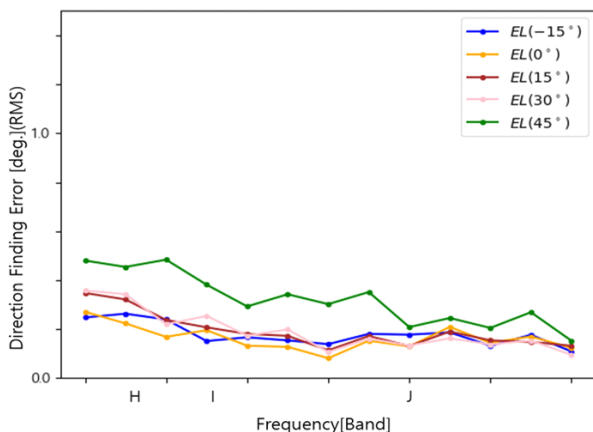


그림 23. 주파수별 방위각 방향탐지 오차(RMS)
Fig. 23. The azimuth direction finding error (RMS) by frequency.

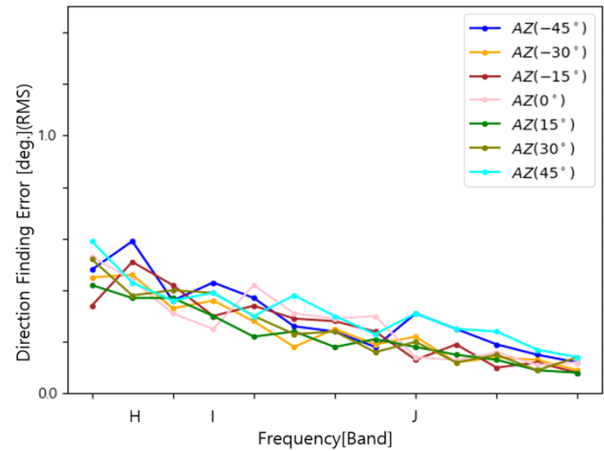


그림 24. 주파수별 고각 방향탐지 오차(RMS)
Fig. 24. The elevation direction finding error (RMS) by frequency.

방위각이 안테나 3개를 사용한 고각에 비해 전반적으로 더 정밀하게 측정되었다.

V. 결 론

2차원 방향탐지에 있어서 레이돔, 안테나의 위상전달 비선형적인 특성이 고려되어야 정확한 방향탐지가 가능하다. 본 연구에서는 탐지 범위를 방위각, 고각 축으로 영역을 구분하고, 영역의 선택은 조합 방위각/고각 위상차에 의한 2차원 방향탐지로 결정 후, 정밀 방위각과 정밀 고각을 결정하는 방법을 제안하였다. 탐지 영역별 보정 데이터를 적용하여 방향탐지 정확도를 높일 수 있었다. 제작된 멀티 베이스라인 2차원 방향탐지장치로 성능시험을 수행하였고, H, I, J 전 대역의 광대역 수신 주파수에서 2차원의 방위각, 고각 탐지 범위 영역에서 방향탐지 오차가 1도 이하로 측정되어 정밀한 방향탐지 성능을 확인하였다.

References

- [1] D. L. Adamy, *EW 104: Electronic Warfare Against a New Generation of Threats*, London, Artech House, 2015.
- [2] M. H. Chae, "Accuracy analysis of 2-D direction finding

based on phase comparison," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 8, pp. 653-660, Aug. 2017.

- [3] Z. Ye, J. Dai, X. Xu, and X. Wu, "DOA estimation for uniform linear array with mutual coupling," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 280-288, Jan. 2009.
- [4] P. Heidenreich, A. M. Zoubir, and M. Rubsamen, "Joint 2-D DOA estimation and phase calibration for uniform rectangular arrays," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 9, pp. 4683-4693, Sep. 2012.
- [5] H. Han, P. J. Zhao, "A two-dimensional direction finding estimation with L-shape uniform linear arrays," in *2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation(IMSNA)*, Toronto, ON, Dec. 2013, pp. 779-782.
- [6] S. Germishuizen, D. C. Baker, "Practical accuracy limitations in airborne microwave interferometric direction

윤 창 열 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3691-2883>



2000년 2월: 한남대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
 2002년 2월: 한남대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2006년 8월: 충남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2006년 8월~2007년 7월: 충남대학교

정보기술SW사업단 박사후연구원
 2007년 8월~현재: 국방과학연구소 전자전 기술부서 책임연구원
 [주 관심분야] 전자전 시스템, 전자전 신호처리, 신호/방향탐지

finding," in *Proceedings of IEEE AFRICON '96*, Stellenbosch, Sep. 1996, pp. 266-271.

- [7] J. Lee, C. Lee, "Analyzing the direction finding characteristics of linear array interferometer as a function of element count," in *Korea Institute of Intelligent Transport Systems Fall Conference*, Jeju, Dec. 2020.
- [8] T. Cheng, X. Gui, and X. Zhang, "A dimension separation-based two-dimensional correlation interferometer algorithm," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, p. 40, Feb. 2013.
- [9] J. H. Lee, J. K. Kim, H. K. Ryu, and Y. J. Park, "Multiple array spacings for an interferometer direction finder with high direction-finding accuracy in a wide range of frequencies," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 563-566, Feb. 2018.
- [10] C. Cortes, V. Vapnik, "Support-vector networks," *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273-297, Sep. 1995.

최 대 규 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6357-5811>



2007년 2월: 울산대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2009년 2월: 울산대학교 전기전자정보시스템공학과 (공학석사)
 2009년 2월~현재: 국방과학연구소 전자전 기술부서 선임연구원
 [주 관심분야] 전자전 시스템, 전자전 신호처리, 신호/방향탐지, 재밍

이 규 송 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1465-979X>



1989년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
 2010년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소 전자전 기술부서 수석연구원

[주 관심분야] 전자전, 신호/방향탐지, 초고주파 및 신호처리