

위상비교 방식을 이용한 2차원 방향탐지 정확도 분석

Accuracy Analysis of 2-D Direction Finding Based on Phase Comparison

채 명 호

Myoung-Ho Chae

요 약

본 논문에서는 신호의 고각과 방위각을 추정하기 위한 위상비교 방식의 방향탐지 정확도에 대해 분석하였다. 안테나 4개를 균일 배치한 구조와 3개를 균일 배치한 구조의 고각과 방위각 추정에 대한 분석적 표현을 제시하였고, 방향탐지 오차를 분석하였다. 또한 정확도, 형상, 채널수 관점에서 두 구조를 비교하여 방향탐지 장치 설계에 대한 방향을 제시하였다. 방향탐지 분석결과는 시뮬레이션 결과와 유사한 분포를 나타내고, 1.2 °RMS 이내의 차이를 갖는 것을 확인하였다. 분석 결과로부터 SNR 20 dB, 베이스라인 길이가 반파장일 때, 안테나 4개를 균일 배치한 구조의 경우, 안테나 3개를 배치한 구조에 비해 고각 방향탐지 정확도는 1.15 배 높으며, 방위각 방향탐지 정확도는 서로 동일함을 확인하였다. 또한 2차원 방향탐지 구조는 1차원 방향탐지 구조에서 발생하는 코닝에러가 제거되는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the author analyzes direction finding accuracy based on phase comparisons to estimate elevation and azimuth angles of arrival signals. This paper considers the uniform array configurations using four and three elements. In that direction finding structures, I present the analytic expressions for estimated elevation and azimuth angles and then analyze the direction finding errors. And one presents the design guideline of direction finding system in comparison with aspects of accuracy, structure, the number of channels in that structures. The analysis result is similar with simulation one and has difference within 1.2 °RMS. From the proposed analysis results, one knows that when SNR is 20 dB and the baseline is half of wavelength, the estimated elevation accuracy of the uniform array using four elements is 1.15 times better than the one of the uniform array using three elements and the estimated azimuth accuracy is same each other. In addition, one knows coning error is eliminated in 2-D direction finding structure.

Key words: Interferometer, Azimuth Error, Elevation Error, AOA(Angle of Arrival), DF(Direction Finding), 2-D Baseline

I. 서 론

탐지 대상의 신호원의 방향을 탐지하는 기술은 크게 수동형 방향탐지 방식과 능동형 방향탐지 방식으로 나뉜다. 능동형 방향탐지 방식은 레이더와 같이 신호를 송신하여 목표물에 맞고 돌아오는 신호를 수신하여 방향을

탐지하는 방식이다. 반면, 수동형 방향탐지 방식은 탐지 대상의 신호원을 수신하여 방향을 탐지하는 방식이다. 수동형 방향탐지 방식의 경우, 진폭 비교 방향탐지, 위상비교 방향탐지 방식, 모노펄스 합/차 방식 등 여러 방식으로 나뉜다^[1]. 위상비교 방향탐지 방식은 하나의 베이스라인에 배치된 두 개 안테나에 수신된 신호의 위상차를 이용

국방과학연구소 기술연구본부(Research and Development, Agency for Defense Development)

· Manuscript received May 29, 2017 ; Revised July 10, 2017 ; Accepted August 16, 2017. (ID No. 20170529-053)

· Corresponding Author: Myoung-Ho Chae (e-mail: mhchae4940@naver.com)

하여 방향탐지를 수행하는 방식이다^{[1],[2]}. 도래각을 갖는 신호원은 공간차에 따른 전파지연시간을 갖게 되어, 두 개의 수신 신호간 위상차가 발생되는 원리를 이용한 것이다. 본 논문에서는 위상비교 방향탐지 방식을 이용하여 두 개의 도래각을 추정하기 위한 2차원 위상비교 방향탐지 방식에 대해 다루었다.

현대의 방향탐지에서는 소형화, 저전력, 저비용을 요구한다. 따라서, 목표 방향탐지 정확도를 만족하면서 구조를 단순하게 하는 과정이 요구된다^[3]. 이를 위해서는 설계 과정에서 방향탐지 정확도를 계산할 수 있어야 한다. 현재 많은 문헌에서 위상비교 방식을 이용한 1차원 방향탐지 정확도에 대해서는 다루고 있지만, 2차원 방향탐지 정확도에 대해서는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 일반적인 형태의 위상차 수식을 이용하여 간단한 2차원 위상비교 방향탐지 구조인 안테나 4개를 균일 배치한 구조와 3개를 균일 배치한 구조의 방향탐지 오차 수식을 도출하였다. 이 두 구조는 제한된 안테나 배치 공간에서 구현할 수 있는 간단한 구조로, 도출한 식을 비교 분석하여 두 구조의 특징을 확인하였다. 또한 이를 1차원 위상비교 방향탐지 구조의 방향탐지 오차와 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 각 2차원 위상비교 방향탐지 구조에 맞는 도래각 추정식을 도출하고, 1차원의 결과와 비교하였다. III장에서는 II장에서 도출한 식을 이용하여 각 구조에 맞는 방향탐지 오차 수식을 도출하고, 비교 분석하였다. 그 후 논문의 결론을 맺었다.

II. 일반적인 형태의 위상차 수식을 이용한 도래각 추정식 도출

2-1 2차원 위상비교 방향탐지

본 논문에서는 2차원 공간에서 입사되는 신호의 도래각을 추정하기 위해 일반적인 형태의 위상차 수식을 도출하였다. 그림 1에 신호원의 도래각을 추정하기 위해 안테나 4개를 균일 배치한 구조를 직각좌표계에 나타내었다^[4]. 신호원은 구좌표계의 \vec{r} 벡터로 입사된다. \vec{r} 벡터를 직각 좌표계로 표현하면 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다. 고각 θ_{EL} 과 방위각 θ_{AZ} 은 y축을 기준선으로 상대

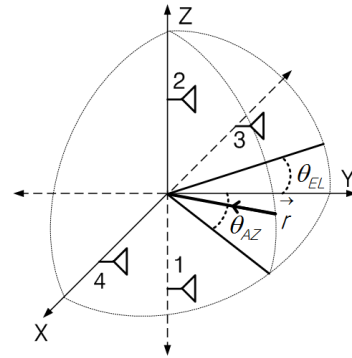


그림 1. 안테나 4개를 균일 배치한 구조

Fig. 1. Uniform array using four elements.

고각과 방위각으로 설정하였다. 안테나 1과 2 사이가 고각 베이스라인, 안테나 3과 4 사이가 방위각 베이스라인이다.

$$\begin{aligned}\phi_{12} &= \beta \vec{d}_{12} \cdot \vec{r} \\ &= \beta [(x_2 - x_1) \sin \theta_{AZ} \cos \theta_{EL} \\ &\quad + (y_2 - y_1) \cos \theta_{AZ} \cos \theta_{EL} + (z_2 - z_1) \sin \theta_{EL}]\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\phi_{34} &= \beta \vec{d}_{34} \cdot \vec{r} \\ &= \beta [(x_4 - x_3) \sin \theta_{AZ} \cos \theta_{EL} \\ &\quad + (y_4 - y_3) \cos \theta_{AZ} \cos \theta_{EL} + (z_4 - z_3) \sin \theta_{EL}]\end{aligned}\quad (2)$$

ϕ_{ij} 는 안테나 j 와 i 의 위상차(rad), β 는 위상상수(rad/m), \vec{r} 은 신호원의 입사방향에 대한 단위벡터, \vec{d}_{ij} 는 j 와 i 사이의 베이스라인 길이(m), x_i, y_i, z_i 는 안테나 i 의 좌표이다. 식 (1), (2)는 일반화된 형태의 위상차 수식이므로, 다양한 안테나 배치 구조의 수식을 도출하는데 활용할 수 있다.

그림 1의 각 안테나의 좌표를 식 (1)과 식 (2)에 대입하면 식 (3), (4)와 같이 식이 간단해진다.

$$\phi_{12} = \beta (z_2 - z_1) \sin \theta_{EL} \quad (3)$$

$$\phi_{34} = \beta (x_4 - x_3) \sin \theta_{AZ} \cos \theta_{EL} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 연립하여 풀면, 방위각과 고각에 대한 식 (5), (6)을 구할 수 있다.

$$\theta_{EL} = \arcsin \left(\frac{\phi_{12}}{\beta (z_2 - z_1)} \right) \quad (5)$$

$$\theta_{AZ} = \arcsin\left(\frac{\phi_{34}}{\beta(x_4 - x_3)\cos\theta_{EL}}\right) \quad (6)$$

식 (6)을 살펴보면, 방위각을 추정하기 위해서는 고각 값이 필요한 것을 알 수 있다. 위 식을 통해 고각은 방위각에 독립적이지만, 방위각은 고각에 종속적임을 알 수 있다.

다음은 그림 2에 안테나 3개를 균일 배치한 구조를 직각좌표계에 나타내었다^[5].

각 안테나 좌표를 식 (1), (2)에 대입하여 정리하면 식 (7), (8)을 얻을 수 있다.

$$\theta_{EL} = \arcsin\left(\frac{\phi_{ac} + \phi_{bc}}{2\beta z_c}\right) \quad (7)$$

$$\theta_{AZ} = \arcsin\left(\frac{\phi_{ab}}{\beta(x_b - x_a)\cos\theta_{EL}}\right) \quad (8)$$

식 (7), (8)을 살펴보면, 위상차 2개를 이용하여 고각과 방위각을 얻는 식 (5), (6)과는 달리, 총 3개의 베이스라인을 이용하여 얻은 위상차를 이용하여 방위각과 고각을 추정할 수 있는 것을 알 수 있다. 또한 식 (6)과 마찬가지로 식 (8)에서 고각은 방위각에 독립적이나, 방위각은 고각에 종속적임을 알 수 있다.

이처럼, 식 (1), (2)를 이용하면 안테나의 개수와 배치를 바뀌어도 방위각과 고각에 대한 식을 도출할 수 있음을 알 수 있다.

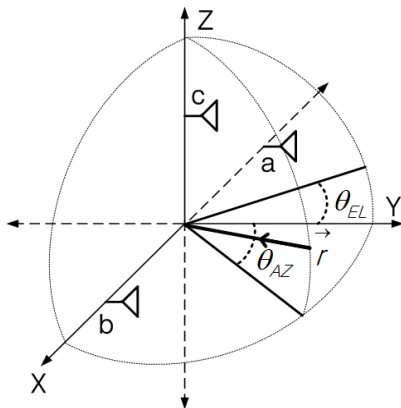


그림 2. 안테나 3개를 균일 배치한 구조
Fig. 2. Uniform array using three elements.

2-2 1차원과 2차원 위상비교 방향탐지 구조의 도래 각 추정 결과 비교

1차원 위상비교 방향탐지 구조를 이용한 입사된 신호원의 방위각 수식은 $\theta_{EL} = 0$ 을 식 (1)에 대입하여 구할 수 있다. 이때, 안테나는 x축 위에 배치한다.

$$\theta_{AZ} = \arcsin\left(\frac{\phi_{AB}}{\beta(x_B - x_A)}\right) \quad (9)$$

식 (9)는 앞서 구한 식 (6)과는 달리, 고각의 향이 빠져 있음을 확인 할 수 있다.

그림 3과 그림 4에 1차원 위상비교 방향탐지 구조를 이

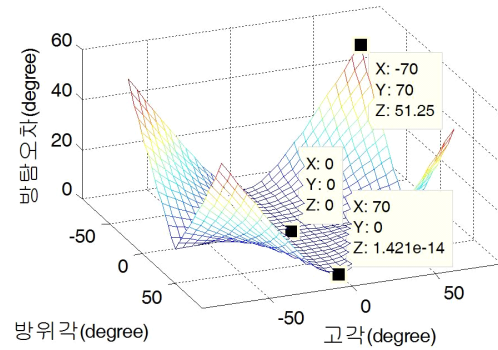


그림 3. 1차원 위상비교 방향탐지 구조를 이용한 방위각 추정

Fig. 3. Azimuth estimation results using 1-D phase comparison direction finding.

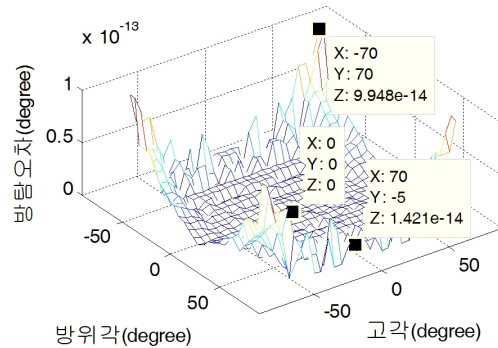


그림 4. 2차원 위상비교 방향탐지 구조를 이용한 방위각 추정

Fig. 4. Azimuth estimation results using 2-D phase comparison direction finding.

용하여 방위각을 추정한 것과, 식 (3)을 이용하여 2차원 위상비교 방향탐지 구조를 이용하여 고각 및 방위각을 추정하였을 경우를 비교하였다. 그림 3과 그림 4의 x축은 방위각, y축은 고각, z축은 방위각 방향탐지 오차이며, 이는 실제 도래각 대비 추정된 도래각의 차이를 의미한다.

1차원 위상비교 방향탐지 구조를 이용하여 방위각을 추정할 때는 고각이 증가할수록 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 2차원 위상비교 방향탐지 구조를 이용한 방위각 추정 시, 이러한 오차는 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 1차원 위상비교 방향탐지 구조로 방위각을 추정할 경우, 고각의 정보를 모르기 때문에 오차가 발생하며, 이를 고각에 의한 코닝 오차(coning error)라고 부른다^{[2],[6]}. 2차원 위상비교 방향탐지 구조로 방위각을 추정할 경우, 고각정보가 있으므로 코닝 오차가 제거됨을 확인할 수 있다.

III. 방향탐지 정확도 분석

위상비교 방향탐지 방식에서 신호의 위상차를 변화시키는 요인은 신호의 SNR, 안테나 위상 부정합, 수신채널 간 위상 부정합이다^[1]. 이때, 수신채널 간 위상 부정합과 안테나 위상부정합은 방향탐지 보정절차를 통해 오차의 영향을 줄일 수 있지만, 신호의 SNR에 따른 위상차 오차는 방향탐지 보정으로 오차의 영향을 줄일 수 없다^[1].

따라서 본 논문에서는 신호의 SNR에 의한 위상차 오차를 구하고, 이를 이용하여 방위각, 고각 방향탐지 오차를 구하였다.

3-1 안테나 4개를 균일 배치한 구조

앞 장에서 구한 식 (3), (4)를 미분하면 안테나 4개를 균일 배치한 구조의 각 베이스라인에서의 위상차 변화를 얻을 수 있다.

$$\frac{d\phi_{12}}{d\theta_{EL}} = \beta(z_2 - z_1)\cos\theta_{EL} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{34}}{d\theta_{AZ}} &= \beta(x_4 - x_3)\cos\theta_{AZ}\cos\theta_{EL} \\ &\quad - \beta(x_4 - x_3)\sin\theta_{AZ}\cos\theta_{EL} \frac{d\theta_{EL}}{d\theta_{AZ}} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 고각은 방위각에 독립이므로, $\frac{d\theta_{EL}}{d\theta_{AZ}}$ 항은 0이 된다. 식 (10), (11)을 방위각 변화와 고각 변화로 정리하면 식 (12), (13)과 같다.

$$\begin{aligned} d\theta_{EL} &= \frac{d\phi_{12}}{\beta(z_2 - z_1)\cos\theta_{EL}} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{2SNR_2} + \frac{1}{2SNR_1}}}{\beta(z_2 - z_1)\cos\theta_{EL}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} d\theta_{AZ} &= \frac{d\phi_{34}}{\beta(x_4 - x_3)\cos\theta_{AZ}\cos\theta_{EL}} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{1}{2SNR_4} + \frac{1}{2SNR_3}}}{\beta(x_4 - x_3)\cos\theta_{AZ}\cos\theta_{EL}} \end{aligned} \quad (13)$$

방위각 변화와 고각 변화는 방위각과 고각의 방향탐지 오차로 해석할 수 있으며, 단위는 °RMS 이다. 이때, 각 베이스라인의 위상차 변화는 각 수신 채널별 신호의 SNR_i (dB)에 따라 결정되며^[1], 안테나 개수와 동일하게 총 4개의 수신 채널로 구성된다. 수식을 살펴보면, 방향탐지 오차는 SNR, 베이스라인 길이, 방위각과 고각에 따라 변하는 것을 확인할 수 있다.

식 (12)와 (13)을 이용하여 구한 도래각에 따른 고각 방향탐지 오차 및 방위각 방향탐지 오차를 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 이때 각 수신 채널별 신호의 SNR은 20

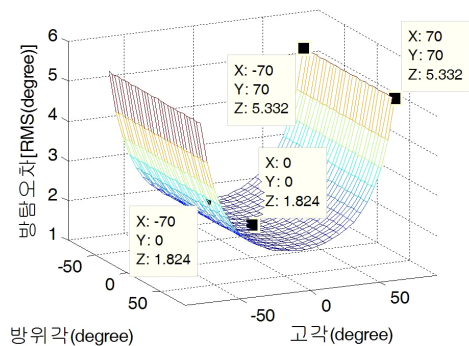


그림 5. 안테나 4개를 균일 배치한 구조의 도래각에 따른 고각 방향탐지 오차

Fig. 5. Elevation errors in uniform array using four elements according to the AOA.

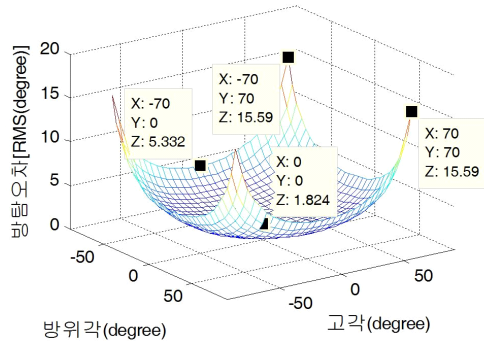


그림 6. 안테나 4개를 균일 배치한 구조의 도래각에 따른 방위각 방향탐지 오차

Fig. 6. Azimuth errors in uniform array using four elements according to the AOA.

dB, 각 베이스라인의 길이는 반파장으로 설정하였다. 그림 5와 그림 6의 x축은 방위각, y축은 고각이다.

그림 5의 고각 방향탐지 오차의 경우, 방위각이 변할 때 방향탐지 오차가 변하지 않고, 고각이 변할 때 오차가 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 신호원의 고각이 클수록 고각 방향탐지 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 방위각 방향탐지 오차의 경우, 고각과 방위각 영향을 모두 받는 것을 알 수 있다.

그리고 신호원의 방위각 또는 고각이 클수록 방위각 방향탐지 오차가 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 보어 사이트에서는 고각과 방위각의 방향탐지 오차는 동일하지만, 도래각이 증가할수록 방위각의 방향탐지 오차는 고각에 비해 큰 것을 확인할 수 있다.

위 결과를 이용하면, 방향탐지 시스템의 FOV(Field of View)에 따른 방향탐지 오차를 확인할 수 있다. 일반적으로 FOV는 안테나의 반전력 빔폭 또는 안테나의 배치 구조에 따라 결정되며, 위 결과를 이용하여 목표 방향탐지 정확도를 만족시키는 적절한 FOV를 설정할 수도 있다.

식 (12)와 (13)을 이용하여 구한 베이스라인 길이에 따른 고각 및 방위각 방향탐지 오차를 표 1에 나타내었다. 각 수신 채널별 신호의 SNR은 20 dB로 설정하였고, 고각과 방위각을 보어사이트 및 35°로 설정하여 나타내었다.

표 1을 살펴보면 베이스라인의 길이가 길어짐에 따라 방향탐지 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만, 베이스라인의 길이가 반파장 이상으로 길어지게 되면 위상차

표 1. 베이스라인 길이에 따른 고각 및 방위각 방향탐지 오차

Table 1. Elevation and azimuth errors according to length of baseline.

θ_{EL}	Length of baseline	$\frac{\lambda}{8}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	λ	2λ	4λ
θ_{AZ}	$\frac{d\theta_{EL}}{d\theta_{AZ}}$	7.3	3.6	1.8	0.9	0.5	0.2
θ_{EL}	$d\theta_{EL}$	8.9	4.5	2.2	1.1	0.6	0.3
θ_{AZ}	$d\theta_{AZ}$	10.9	5.4	2.7	1.4	0.7	0.3

가 $\pm 180^\circ$ 를 넘게 되어, 모호성이 발생한다.

베이스라인의 길이는, 주로 최소 주파수에서 목표 방향탐지 오차를 만족하는 길이를 선택한다. 그 후, 최대 주파수에서 모호성을 해결하기 위해 안테나를 추가 배치하거나, 진폭비교 방식을 추가로 사용하는 복합비교 기법을 사용한다^{[7]~[9]}. 안테나 배치공간이 제한된 경우, 위 결과를 이용하여 방향탐지 정확도를 계산하고, 부족한 부분은 SNR 또는 FOV를 조절하여 정확도를 개선해야 한다.

식 (12)와 (13)을 이용하여 구한 신호의 SNR에 따른 고각 및 방위각 방향탐지 오차를 표 2에 나타내었다. 베이스라인 길이는 반파장으로 설정하였고, 고각과 방위각을 보어사이트 및 35°로 설정하여 나타내었다.

표 2를 살펴보면 SNR이 증가할수록 방향탐지 정확도가 개선되는 것을 확인할 수 있다. SNR이 약 20 dB 이상이면 FOV 35°, 반파장 길이의 베이스라인에서 방향탐지 정확도는 3 °RMS 이내를 만족하는 것을 알 수 있다. 신호의 SNR은 수신기의 NF를 낮게 설계하고, 순시대역폭을 줄이면 높일 수 있다. 따라서 목표 방향탐지 정확도를 만

표 2. 신호의 SNR에 따른 고각 및 방위각 방향탐지 오차

θ_{EL}	SNR	1	5	10	15	20	30
θ_{AZ}	$\frac{d\theta_{EL}}{d\theta_{AZ}}$	16.3	10.3	5.8	3.2	1.8	0.6
θ_{EL}	$d\theta_{EL}$	19.8	12.5	7.0	4.0	2.2	0.7
θ_{AZ}	$d\theta_{AZ}$	24.2	15.3	8.6	4.8	2.7	0.9

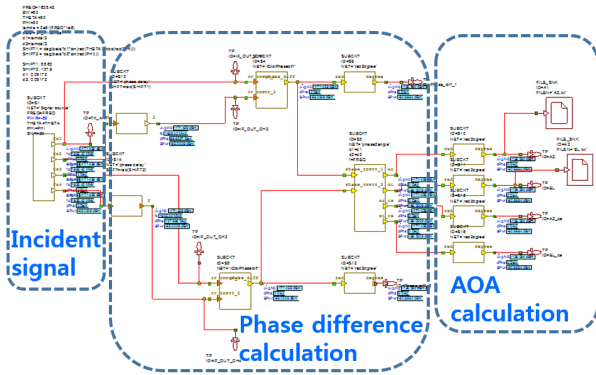


그림 7. VSS를 이용한 방향탐지 시뮬레이션 구성도
Fig. 7. Direction finding simulation diagram using VSS.

족하는 신호의 최소 SNR과 신호 탐지를 위한 순시 대역 폭을 적절하게 선택하여 설계를 해야 한다.

방향탐지 정확도 수식을 검증하기 위해 NI사의 AWR Design Environment 11 VSS를 이용하여 시뮬레이션하였고, 이를 그림 7에 나타내었다.

표 3에 식 (12), (13)을 이용하여 구한 방향탐지 오차와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 조건은 SNR 20 dB, 베이스라인 길이는 반파장으로 설정하였다.

시뮬레이션 결과, 계산결과와 유사한 추이를 나타내었고, 시뮬레이션 결과와 식을 이용한 계산결과와의 차이는 1.2 °RMS 이내임을 확인하였다.

방향탐지 시스템 설계 관점에서 목표 방향탐지 정확도

표 3. 방향탐지 오차 계산 결과와 시뮬레이션 결과 비교
Table 3. Comparison of direction finding error between calculation and simulation result.

θ_{AZ}	θ_{EL}	Azimuth error(°RMS)		Elevation error(°RMS)	
		Calculation	Simulation	Calculation	Simulation
0°	0°	1.82	1.73	1.82	1.66
10°	10°	1.88	1.79	1.85	1.69
20°	20°	2.07	1.98	1.94	1.77
30°	30°	2.43	2.42	2.11	1.93
40°	40°	3.11	3.48	2.38	2.19
50°	50°	4.41	5.21	2.84	2.47
60°	60°	7.30	7.97	3.65	3.63
70°	70°	15.6	16.8	5.33	5.44

를 만족하기 위해, 목표 탐지 신호의 형태와 수신기 구조, FOV, 안테나 배치 공간 등 여러 고려 사항을 설계과정에서 결정해야 한다. 목표 탐지 신호의 형태와 수신기 구조는 수신 신호의 SNR과 FOV는 방위각과 고각의 범위와, 안테나 배치 공간은 베이스라인 길이와 연관이 있으며, 이를 본 논문에서 제안한 수식을 이용하면 설계과정에서 각 변수 값을 결정하는데 활용할 수 있다.

3-2 안테나 3개를 균일 배치한 구조

식 (7), (8)을 미분하여 안테나 3개를 균일 배치한 구조의 방향탐지 오차를 식 (14), (15)에 나타내었다.

$$d\theta_{EL} = \frac{d\phi_{ac} + d\phi_{bc}}{2\beta z_c \cos\theta_{EL}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2SNR_c} + \frac{1}{2SNR_a}} + \sqrt{\frac{1}{2SNR_c} + \frac{1}{2SNR_b}}}{2\beta z_c \cos\theta_{EL}} \quad (14)$$

$$d\theta_{AZ} = \frac{d\phi_{ab}}{\beta(x_b - x_a)\cos\theta_{AZ}\cos\theta_{EL}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2SNR_b} + \frac{1}{2SNR_a}}}{\beta(x_b - x_a)\cos\theta_{AZ}\cos\theta_{EL}} \quad (15)$$

수신채널의 개수는 안테나 개수와 동일하므로, 총 3개의 수신 채널의 SNR을 나타내었다.

그림 8과 같이, 안테나 3개를 균일 배치한 구조는 안테나 4개를 균일 배치한 구조에 비해 안테나와 수신채널의 개수가 1개 적다.

하지만 방위각 베이스라인의 길이가 서로 같을 경우, 안테나 3개를 균일 배치한 구조의 고각 베이스라인 길이

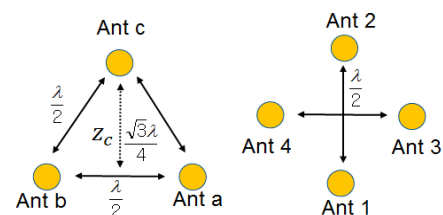


그림 8. 안테나 3개 및 4개를 균일 배치한 구조
Fig. 8. Uniform array using three or four elements.

표 4. 안테나 3개 및 4개를 균일 배치한 구조의 고각 방향탐지 오차 비교

Table 4. The comparison of elevation errors in uniform array using three and four elements.

Elements	Elevation error(°RMS)		
	Elevation 0°	Elevation 35°	Elevation 70°
4	1.8	2.7	15.6
3	2.1	3.1	18.0

가 안테나 4개를 균일 배치한 구조에 비해 짧은 것을 알 수 있다. 균일 배치 구조에서 방위각 모호성을 갖지 않기 위해 반파장으로 방위각 베이스라인의 길이를 가져가면, z_c 값은 $\sqrt{3}\lambda/4$ 가 된다. 즉, 고각 방향탐지 오차의 경우, 그림 5의 결과보다 약 1.15배 오차가 증가함을 알 수 있고, 이를 표 4에 나타내었다. 방위각 방향탐지 오차의 경우, 베이스라인 길이가 서로 동일하므로 오차는 동일하다.

한편, 제한된 원형 또는 정사각형 공간에 안테나를 배치할 경우, 안테나 4개를 균일 배치한 구조가 3개를 균일 배치한 구조보다 최대 베이스라인 길이를 길게 확보할 수 있으므로, 방향탐지 오차는 1.15배보다 더 크게 차이가 날 수 있다.

3.3 1차원과 2차원 위상비교 방향탐지 구조의 방위각 탐지 정확도 비교

1차원 위상비교 방향탐지 구조를 갖는 위상비교 방향탐지 방식의 경우, 방향탐지 오차의 형태는 식 (16)과 같다^[10].

$$\sigma_{AZ\ total\ error} = \sqrt{m_{coning\ error}^2 + \sigma_{AZ\ error}^2} \quad (16)$$

식 (16)과 같이 1차원 위상비교 방향탐지 구조의 방위각 총 방향탐지 오차($\sigma_{AZ\ total\ error}$)은 코닝오차($m_{coning\ error}$)와 방위각 방향탐지 오차($\sigma_{AZ\ error}$)의 제곱의 합의 제곱근으로 계산된다. 코닝 오차는 그림 3의 결과를 이용하였고, 방위각 방향탐지 오차의 경우, 식 (9)를 미분하여 얻을 수 있다. 1차원 위상비교 방향탐지 구조의 방위각 총 방향탐지 오차와 2차원 위상비교 방향탐지 구조의 방위각 방향탐지 오차를 표 5에 나타내었다.

표 5를 살펴보면, 2차원 및 1차원 위상비교 방향탐지

표 5. 2차원 및 1차원 위상비교 방향탐지 구조의 방위각 방향탐지 오차 비교

Table 5. The comparison of azimuth errors in 2-D and 1-D baseline.

	Azimuth error(°RMS)				
	0°	35°	35°	70°	70°
Azimuth	0°	0°	35°	0°	70°
Elevation	0°	0°	35°	0°	70°
2-D	1.8	2.2	2.7	5.3	15.6
1-D	1.8	2.2	7.3	5.3	51.3

구조의 방위각 방향탐지 오차의 차이는 고각 존재 유무에 따라 달라진다. 신호원의 고각이 0°일 경우, 방향탐지 오차는 서로 같고, 고각이 증가할수록 2차원 위상비교 방향탐지 구조를 사용하였을 경우 방향탐지 오차가 낮은 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 2차원 위상비교 방향탐지 정확도를 분석한 연구 결과를 기술하였다. 일반적인 형태의 위상차 수식을 이용하여 안테나 4개를 균일 배치한 구조와 3개를 균일 배치한 구조의 방향탐지 정확도를 분석하였다. 위 두 구조로 추정된 신호원의 고각은 방위각의 영향을 받지 않지만, 신호원 방위각의 경우 고각의 영향을 받는 것을 확인하였다. 고각 방향탐지 정확도의 경우, 신호의 SNR과 신호의 고각, 베이스라인의 길이에 따라 변하며, 방위각 방향탐지 정확도의 경우, 신호의 SNR과 신호의 방위각, 고각, 베이스라인의 길이에 따라 변함을 수식을 통해 나타내었다. 방향탐지 정확도 분석 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였고, 서로 유사한 추이로 1.2 °RMS 이내의 차이를 갖는 것을 확인하였다. 또한, 1차원 위상비교 방향탐지 구조로 위상비교 방향탐지를 수행할 경우, 코닝에러가 발생함을 확인하였고, 이는 2차원 위상비교 방향탐지 구조를 사용하면 해결 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 구조는 베이스라인 기준으로 상대 방위각 및 고각을 추정할 때 활용할 수 있다. 안테나 3개를 균일 배치한 구조를 사용하였을 경우, 4개를 배치한 구조에 비해 1개의 수신채널 및 안테나 개수를 줄일 수 있으나, 고각 방향탐지 오차가 약 1.15 배 증가한다. 따라

서 가격, 크기, 모호성, 방향탐지 정확도를 고려하여 구조를 선택할 필요가 있다.

본 연구를 통하여 다양한 2차원 위상비교 방향탐지 구조에 대한 방향탐지 오차식을 도출하였다. 이를 이용하여 목표 방향탐지 정확도를 만족하기 위한 베이스라인의 길이, 방위각 고각 범위, SNR을 설정할 수 있어, 방향탐지 시스템 설계 시 폭넓게 활용할 수 있다.

또한 본 논문에서 기술한 일반적인 형태의 위상차 수식을 이용한 도래각 추정식과 방향탐지 오차식의 도출 방법을 이용하면, 다양한 구조를 갖는 위상비교 방향탐지 구조에 대해서도 도래각 추정식과 방향탐지 오차식을 도출할 수 있다.

References

- [1] Stephen. E. Lipsky, *Microwave Passive Direction Finding*, John Wiley & Sons, USA, 1987.
- [2] 임중수, 정철구, 채규수, "원형 배열 복합 방식을 이용한 초고주파 방향 탐지 기술", *한국전자과학회논문지*, 1(6), pp. 549-555, 2005년 6월.
- [3] John Haystead, "New signals, new threats, new challenges-advanced DF systems and techniques rise to meet the challenge", *The Journal of Electronic Defense*, pp. 26-31, Jun. 2016.
- [4] Ernest Jacobs, Elizabeth W. Ralston, "Ambiguity reso-

lution in interferometry", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-17, no. 6, pp. 766-780, Nov. 1981.

- [5] Lionel Nicholas Menegozzi, "Azimuth and elevation direction finding system based on hybrid amplitude/phase comparison", *US Patent # 6,061,022*, May 2000.
- [6] Josph H. Acoraci, "Linear interferometer antenna capable of making error-free azimuth and elevation angle measurements", *US Patent # 5,955,990*, Sep. 1999.
- [7] 박철순, 김대영, "2차원 멀티베이스라인 방향탐지 배열 구조 설계", *한국통신학회논문지*, 31(10), pp. 988-995, 2006년 10월.
- [8] 임중수, 채규수, "진폭-위상 복합비교 기법과 상관형 위상비교 기법의 방향탐지 정확도 분석", *디지털융복합연구*, 14(1), pp. 195-201, 2016년 1월.
- [9] Boyd E. Guymon, II, "Two dimensional interferometer array", *US Patent # 5,657,027*, Aug. 1997.
- [10] David L. Adamy, *A Second Course in Electronic Warfare*, Artech house, 2004.
- [11] 이상준, 윤현구, 추호성, 장병준, "2개의 안테나 소자를 갖는 time-modulated array와 하나의 USRP를 이용한 실시간 방향탐지 시스템의 구현", *한국전자과학회논문지*, 28(4), pp. 347-350, 2017년 4월.

채 명 호



2012년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
 2014년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2014년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원
 [주 관심분야] 주파수합성기, 광대역 수신기 설계