

위상 간섭 회피를 위한 지향성 패턴 기반 원형 배열 인터페로미터 방향 탐지 기법

강 종 진*, 김 재 현^o

Directional Pattern Based Circular Array Interferometer Direction Finding Technique for Phase Interference Avoidance

Jong-Jin Kang*, Jae-Hyun Kim^o

요 약

미상의 신호원에 대하여 수신된 신호의 위상차를 비교하여 방향을 추정하는 인터페로미터 방향 탐지 장치는 탐지 확률 향상을 위하여 360° 전 방향에 대하여 신호의 도래 방향 추정이 가능한 원형 배열 안테나를 사용한다. 기존의 등 방향성 다이폴 소자가 적용된 원형 배열 안테나는 지지대 및 구조물의 영향으로 위상 간섭이 발생하고 방향 탐지 정확도가 열화된다. 본 논문에서는 위상 간섭 회피를 위하여 지향성 패턴을 가지는 스파이럴 안테나를 적용하여 위상차 비교를 위한 섹터를 선택하고, 신호 세기 비율을 조합하여 위상차 측정 모호성을 제거하는 방향 탐지 기법을 제안한다. 제안한 기법을 적용하여 방향 탐지 장치를 제작하고 전자파 무반향 챔버에서 실제 레이더 펄스 신호를 측정하여 성능을 확인하였다. 측정 결과로부터 넓은 주파수 범위에서 단지 5개의 안테나 및 수신 채널을 사용하여 RMS 1° 이하의 높은 방향 탐지 정확도를 확보하였다. 제안한 기법은 레이더 및 통신 신호의 정밀 방향 탐지 분야에 광범위하게 적용이 가능할 것으로 기대된다.

Key Words : Circular Array, Interferometer, Direction Finding, Phase Interference, Amplitude Ratio

ABSTRACT

Interferometer direction finding system estimates the direction of arrival by comparing the phase difference of the received signals. To improve probability of interception, circular array antenna structure is usually applied for covering in all directions. Conventional direction finding system is used omni-directional dipole elements but phase interference occurs due to the antenna geometric structure and thus direction finding accuracy is degraded. In this paper, we propose interference avoidance technique which use directional spiral antenna to configure circular array and applying weight value to amplitude ratio of received signal to remove ambiguity of phase differences. By applying proposed technique, a digital direction finding system is implemented and conduct performance verification by measuring the real radar pulse signal. Through the measurement result, proposed technique obtained a high direction finding accuracy of less than RMS 1° only using 5 antenna and receiving channels in the broadband frequency range. This technique can be widely applied to the field of precision direction finding applications against radar and communication signals.

* First Author : Hanwha Systems Co., Ltd., jongjin.kang@hanwha.com, 정희원

^o Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 종신희원
논문번호 : 202204-048-D-RE, Received April 1, 2022; Revised May 29, 2022; Accepted June 9, 2022

I. 서 론

무선 신호의 도래 방향을 탐지하는 방향 탐지 (Direction Finding) 기술은 민수, 국방 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 미상의 레이더 신호를 수집하는 전자정보(ELINT: Electronic Intelligence) 장비는 수신 신호의 펄스 폭, 펄스 반복 주기, 주파수, 변조 형태, 방향 등을 측정하여 레이더의 목적(탐지/추적) 및 위치를 파악한다. 다양한 종류의 레이더 신호가 동시에 수신되는 경우 신호의 밀도가 증가하여 신호 분석 및 식별이 어려우므로 신호를 특정 그룹으로 분류(deinterleaving) 하여 처리하는데, 방향 정보를 최우선 분류 기준으로 선정한다^{1,2}.

능동 전자주사식 위상배열(AESA: Active Electronically Scanned Array) 레이더 신호는 전자적인 빔 조향을 통해 송출 신호의 펄스 및 스캔 패턴 등을 무작위로 변경하므로 신호의 탐지가 곤란하다. 그러나 레이더 신호를 수집하는 측면에서는 상대 레이더에서 이미 방사한 신호의 방향을 임의로 변경하는 것이 불가능하므로 방향 정보가 신호 수집에 있어 매우 중요한 요소이다³.

방향 탐지 방법에는 MUSIC(MUltiple Signal Classification) 등의 부공간(subspace) 방법, 빔포밍 (beamforming) 방법, 순시 방향 탐지(instantaneous direction finding) 방법 등이 연구되고 있다. 부공간 방법은 정확도가 높고, 잡음이나 간섭신호에 강인하나, 방향을 탐지하기 위해 많은 샘플이 필요하다. 빔포밍 방법은 특정 방향에 빔을 집중하여 선택적으로 신호를 수신하는 방법으로써, 알고 있는 신호(레이더 반사파)를 대상으로 방향을 탐지하는 방식이며 미상의 신호 탐지에는 적합하지 않다. 순시 방향 탐지 방법은 신호의 진폭, 위상, 시간 등을 비교하여 수백 ns ~ 수 ms 이내 실시간으로 방향을 탐지하는 방법이며, 상대적으로 짧은 레이더 펄스 신호를 탐지하는 분야에 적합하다. 특히 위상차를 비교하는 인터페로미터 방향 탐지 방법은 플랫폼에 제약 없이 비교적 높은 방향 탐지 정확도 확보가 가능하여 ELINT 장비에 널리 사용되고 있다^{4,5}.

안테나 설치 공간의 제약이 없는 경우 신호의 탐지 확률(POI: Probability of Intercept) 향상을 위하여 모든 방향에 대한 방향 탐지가 가능한 원형 배열 안테나를 사용한 방향 탐지 기법이 주로 사용된다⁶. 그러나 원형 배열 안테나를 지지하는 중앙 지지대, 안테나 제어기 및 신호 증폭기 등의 구조물에 의한 위상 간섭 영향으로 방향 탐지 성능이 열화된다. 안테나 빔 패턴

을 비교하거나 위상차 측정 안테나를 조합하는 방법이 연구되었으나, 수신 신호가 매우 짧은 레이더 펄스 신호의 경우 적용이 어려운 문제가 있다^{6,7}.

본 논문에서는 안테나 구조물에 의한 위상 간섭을 회피하기 위하여 지향성 패턴을 가지는 스파이럴 안테나를 사용하여 안테나 간 수신 신호의 세기를 비교하여 개략적인(coarse) 구역을 판별한 후 위상차 측정 모호성을 제거하여 방향 탐지 정확도를 향상하는 방법을 제안하며, 실제 신호를 대상으로 방향 탐지 성능을 측정하여 제안한 방법의 효과성을 실증하였다.

II. 인터페로미터 방향 탐지 기법

인터페로미터 방향 탐지 기법은 서로 다른 안테나로부터 수신되는 신호의 위상차를 측정하여 방향을 계산하는 방식이며, 안테나의 배치에 따라 선형 배열 방식과 원형 배열 방식으로 구분된다⁷. 그림 1과 같이 반지름이 R 인 동심원상에 등각도 θ_d 로 배열된 원형 배열 안테나에서 인접 안테나간의 거리 d 는 식 (1) 과 같으며 수신신호의 입사각이 θ 이고, 파장이 λ 인 경우 안테나 간 위상차 ϕ 는 식 (2)와 같다¹¹.

$$d = 2R \sin \theta_d \tag{1}$$

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \tag{2}$$

식 (2)로부터 안테나간 거리 d 가 신호의 반파장($\lambda/2$)인 경우 안테나 1과 안테나 2에서 수신된 신호의 입사각 θ 에 따른 이상적인 위상차 관계는 그림 2와 같다.

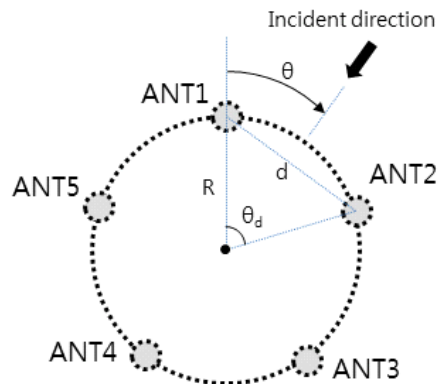


그림 1. 원형 배열 안테나
Fig. 1. Circular array antenna

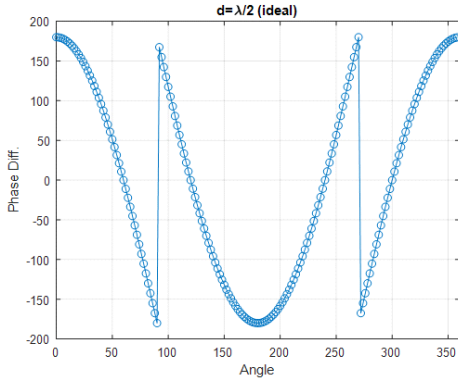


그림 2. 입사각에 따른 위상차
Fig. 2. Phase difference w.r.t. incident angle

모든 입사각에 대한 안테나 간 위상차를 측정하여 메모리에 저장한 후 실제 수신되는 신호의 위상차 값을 메모리와 비교하여 가장 상관도가 높은 각도를 입사각으로 추정한다. 이러한 방식을 상관형 인터페로미터(correlative interferometer) 방법이라 부른다⁸⁾.

그림 3은 5개의 다이폴 안테나 소자를 사용한 원형 배열 안테나 형상이다. 기존 원형 배열 안테나를 사용한 방향 탐지 장치는 등 방향성(omni-directional)의 다이폴 소자를 사용하였으며 안테나를 구조물을 지지하기 위한 마스트 등의 구조물이 장착된다. 수신 신호의 방향 및 다이폴 소자의 위치에 따라 구조물에 의한 신호 감쇄로 위상 간섭이 발생하여 위상차 측정 오차가 발생한다⁶⁾.

그림 4는 입사각에 따른 안테나간 위상차를 실측한 그림이다. 그림 2의 이상적인 위상차 패턴과 달리 1번 안테나와 2번 안테나 반대 방향(약 100° ~ 330°)으로 수신되는 경우 위상 왜곡이 발생한다. 해당 방향에서 수신되는 신호를 안테나 1과 안테나 2의 위상차를 적용하여 방향을 추정하는 경우 위상 간섭이 발생한다. 수신 신호의 방향을 사전에 알 수 없는 블라인드 탐지

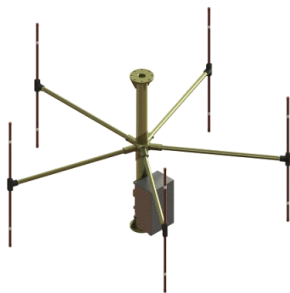


그림 3. 다이폴 소자를 이용한 원형 배열 안테나
Fig. 3. Circular array antenna using dipole

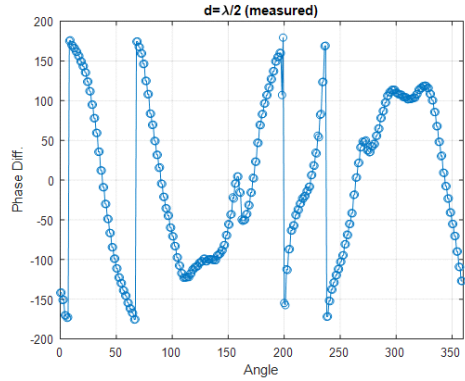


그림 4. 위상 간섭 영향
Fig. 4. Effect of phase interference

의 경우 실제 수신된 신호가 간섭이 발생하는 방향에서 수신된 신호인지 정상적으로 수신되었는지 구별하는 것이 불가능하다. 이런 문제점을 해결하기 위해 안테나 배열의 중앙에 탐지 전용 안테나를 추가하여 각 안테나에서 수신된 신호와 비교하는 추가적인 수신 채널이 필요하다^{1,2)}. 본 논문에서는 지향성의 안테나를 사용하여 별도의 탐지 채널이 필요 없는 방향 탐지 기법을 적용하였다.

III. 위상 간섭 회피 기법

3.1 안테나 설계

본 논문에서는 위상 간섭 회피를 위하여 지향성 안테나를 이용한 원형 배열 안테나를 사용하였다. 지향성 안테나를 사용하는 경우 다이폴 안테나 대비 방향 측정 정확도가 향상되고, 오차에 강인하다고 알려져 있다⁹⁾. 본 논문에서는 지향성 안테나로 광대역의 주파수 특성을 갖는 스파이럴 안테나를 적용하였다. 스파이럴 안테나는 광대역 특성과 함께 신호의 편파(polarization)와 무관하게 수신이 가능하고 소형으로 제작할 수 있다¹⁰⁾. 그림 5는 적용된 스파이럴 안테나의 형상 및 이득 패턴이다.

탐지할 주파수별 안테나의 반 전력(3 dB) 빔폭을 고려하여 안테나 배열 구성을 위한 소자의 개수를 선정해야 하는데, 안테나 및 수신 채널 수를 줄이면서 정확도를 확보하는 것이 매우 중요하다⁴⁾.

그림 6은 스파이럴 안테나를 이용한 원형 배열 안테나 형상이다. 5개의 안테나를 이용하여 등각도(72°)로 원형 배열을 구성하였으며, 안테나 보호를 위한 전파투과 레이돔으로 둘러싸여 있다. 스파이럴 안테나를 이용하여 원형 배열 안테나를 구성하는 경우 다이폴

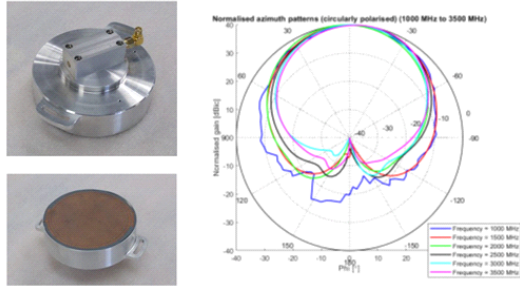


그림 5. 스파이럴 안테나와 이득 패턴
Fig. 5. Spiral antenna and gain pattern



그림 6. 원형 배열 안테나 구조
Fig. 6. Circular array antenna structure

소자를 이용한 원형 배열 안테나 대비 외형을 소형으로 제작할 수 있는 장점이 있다.

3.2 안테나 섹터 선정

미상의 신호에 대한 방향 탐지를 위해서는 여러 개의 안테나로부터 수신되는 신호를 동시에 감지하여 최대의 신호 세기가 측정되는 안테나를 선택하여야 한다. 레이더 펄스 신호는 응용 분야에 따라 100 ns 정도로 매우 짧은 경우도 있다¹¹. 그러므로 펄스가 존재하는 구간 내에서 수신 신호의 신호 세기를 측정하고 위상차 비교 연산을 수행할 채널을 선택한 후 위상차 측정까지 끝내야 한다. 이를 위해 고속 신호처리 연산을 위한 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 사용하여 신호 세기 측정 및 위상차 비교 연산을 수행하였다. 그림 7은 FPGA 내부의 연산처리 블록도이다. 위상차 측정은 CORDIC(COordinate Rotation DIgital Computer) 알고리즘을 이용한 디지털 위상차 측정 방법을 적용하였다¹².

스파이럴 안테나의 경우 주로브(main-lobe)와 백로브(back-lobe)의 이득차이가 약 20 dB 정도이므로, 안테나의 주로브 방향에서만 신호를 수신할 수 있도록 수신 임계값을 적용해야 한다. 그림 8은 방위각별 최대 신호 세기의 채널을 측정하는 그림이다. 최대 신호

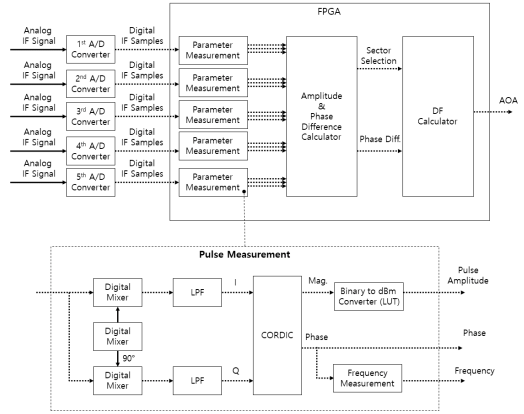


그림 7. FPGA 연산 블록도
Fig. 7. FPGA processing block diagram

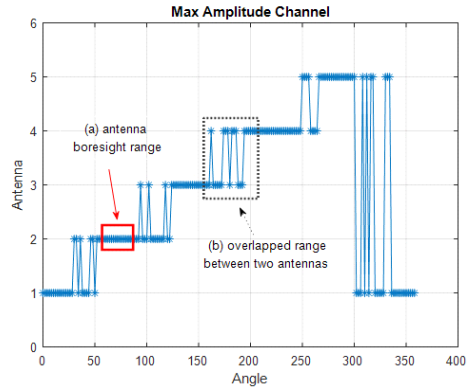


그림 8. 방위각에 대한 최대 진폭 세기 채널 선택
Fig. 8. Max amplitude channel w.r.t angle

세기 채널이 균일하게 유지되는 구간인 (a) 영역은 2번 안테나의 기준방향(boresight) 영역으로 수신되는 신호이다. 신호의 방향에 따라 두 번째 신호 세기 채널은 1번 혹은 3번 채널이 될 수 있다. 최대 신호 세기 안테나가 교차되는 구간인 (b) 영역은 3번과 4번 안테나의 빔패턴이 중첩되는 구간이다.

본 논문에서는 위상 간섭 영향을 회피하기 위하여 지향성 안테나 특성을 이용하여 레이더 펄스가 수신된 시점에 최대 신호 세기 채널과 두 번째 신호 세기 채널을 실시간으로 계산하여 위상차 연산을 수행할 섹터를 선정하여 위상 간섭 영역의 안테나를 배제하는 방법을 사용하였다.

3.3 방위 연산 모호성 제거

그림 9는 신호 세기를 측정하여 선정된 채널을 이용하여 방위각 별 위상차를 측정하는 그림이다. 안테나 1과 안테나 2가 동시에 수신되는 빔폭 영역($0^\circ \sim 72^\circ$)

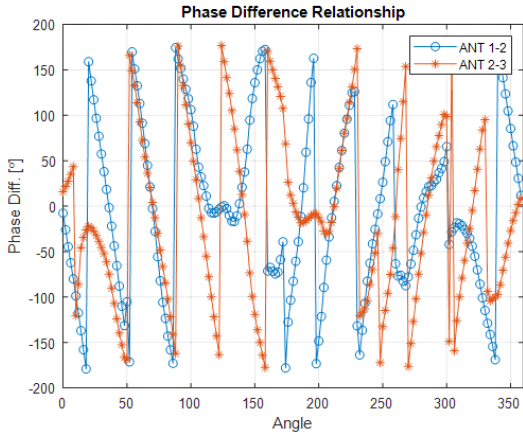


그림 9. 위상차 모호성
Fig. 9. Phase difference ambiguity

에 해당하는 섹터를 선정하여 방위 연산을 수행한다. 수신 신호의 파장이 안테나간 거리보다 2배 이하인 경우(주파수가 2배 이상인 경우) 방위 연산에 있어 모호성이 발생하게 된다¹³⁾. 예를 들어 그림 9에서 안테나 1과 2에서 측정된 위상차가 -50° 라면, 방위 연산 후보값은 약 $5^\circ, 35^\circ, 70^\circ$ 로 예상할 수 있으며 3개의 방향 중 어떤 방향이 실제 방향인지 알 수 없는 모호성이 발생하게 된다. 주파수가 높아지는 경우 후보값 경우의 수가 증가하여 모호성 발생 확률이 높아진다.

모호성을 해결하기 위하여 멀티 베이스라인 방법을 사용할 수 있지만, 선형 배열 안테나에 제한적으로 적용이 가능하다. 본 논문에서는 방위 연산 모호성을 해결하기 위하여 수신 신호의 신호 세기 비율을 측정하여 방향 값 후보군에 가중치를 두어 방위 연산을 수행하는 방법을 적용하였다.

지향성 안테나를 사용하고 안테나를 이격시키는 경우 인접한 두 안테나에 수신되는 신호는 입사 방향에 따라 신호 세기의 차이가 발생한다. 방위각에 따른 안테나 간 신호 세기 비율 R 은 식 (3)과 같으며, G_1 과 G_2 는 각각의 안테나에 대한 이득이다¹¹⁾.

$$R(\theta) = \frac{G_1(\theta)}{G_2(\theta)} \quad (3)$$

식(3)을 로그스케일로 다시 쓰면 식 (4)와 같다.

$$R_{dB} = G_{1dB} - G_{2dB} \quad (4)$$

무선 신호의 세기는 통상 로그 스케일을 사용하므로, 안테나 1과 안테나 2에서 수신된 신호의 세기를

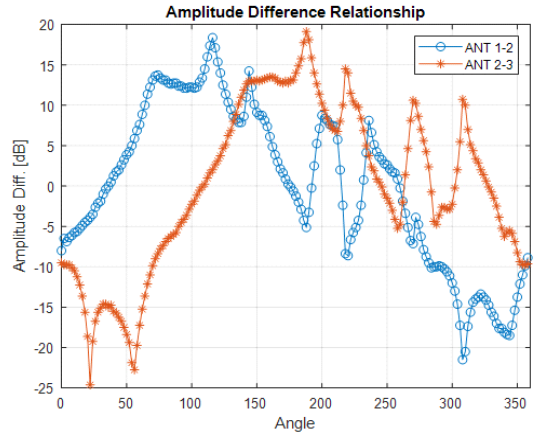


그림 10. 측정된 신호 세기 차
Fig. 10. Measured amplitude difference

로그 스케일로 측정된 후 그 차를 구하면 신호 세기 비를 간단히 구할 수 있다.

그림 10은 안테나간 수신된 신호의 신호 세기 비율을 측정된 그림이다. 위상 비교 연산 후보군으로 선정된 안테나 1과 안테나 2가 수신하는 방위 구간($0^\circ \sim 72^\circ$) 사이에서 가중치를 적용할 방향을 선정할 수 있다. 그림 9에서 안테나 1-2에서 측정된 위상차가 -50° 이고 그림 10에서 안테나간 수신된 신호 세기 비율이 -7 dB 라고 가정하면 방위 측정 후보값 중 5° 에 가중치가 추가되어 모호성이 해결될 수 있음을 알 수 있다.

IV. 제작 및 측정

4.1 방향 탐지 장치 제작

5개의 안테나로부터 수신된 신호는 디지털 처리를 위하여 ADC(Analog to Digital Converter)를 이용하여 표본화한 후 레이더 펄스의 실시간 처리를 위하여 FPGA(Field Programmable Gate Array)를 이용하여 방위를 계산하였다. 적용된 ADC는 TI社 ADS42LB69이며, 16 bit 해상도에 최대 250 MSPS 샘플링 속도를 지원한다. FPGA는 Xilinx社 Kintex Ultrascale를 사용하였으며 소형 경량화를 위하여 VPX(VITA 65) 타입으로 제작하였다. 공간을 절약하기 위하여 ADC 모듈과 FPGA 모듈을 분리하여 제작한 후 적층 형태로 조립하였다. 그림 11은 제작된 디지털 방향 탐지 수신기이다.

4.2 측정 구성도

그림 12는 방향 탐지 장치의 측정 구성도이다. 반

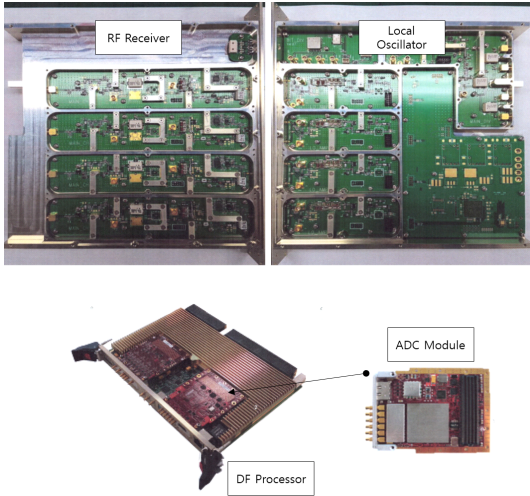


그림 11. 제작된 디지털 방향 탐지 수신기
Fig. 11. Implemented digital DF receiver

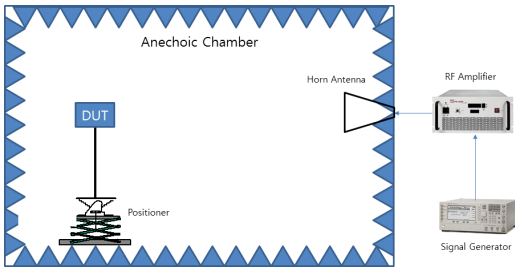


그림 12. 측정 구성도
Fig. 12. Measurement setup

사파 영향이 없는 전자파 무반향 챔버에 안테나를 설치하고, 포지셔너를 이용하여 신호의 방향을 변경하였다. 레이더 신호는 운용 목적에 따라 편파 (polarization) 특성이 달라진다. 수신 신호의 편파에 따른 정확도를 측정하기 위하여 송신 안테나는 수직 및 수평 편파 송신이 가능한 혼 안테나를 사용하였으며, 신호 증폭을 위한 고주파 증폭기 및 레이더 펄스 신호 생성용 고주파 펄스 신호 발생기를 사용하였다.

포지셔너는 기계적인 구동으로 인해 회전하는데 시간이 소요된다. 측정 시간을 줄이기 위해서는 방향을 고정하고 모든 탐지 주파수에 대하여 측정한 후 안테나를 회전하는 순서로 측정을 진행하였다. 포지셔너의 기계적인 오차를 고려하여 방위각을 2° 간격으로 측정한 후 방위측정 정확도 및 해상도 향상을 위하여 측정된 위상차 데이터를 0.25° 간격으로 선형 보간법 (linear interpolation)을 사용하여 생성한 후 메모리에 저장하였다.

그림 13은 제작된 원형 배열 안테나를 무반향 챔버

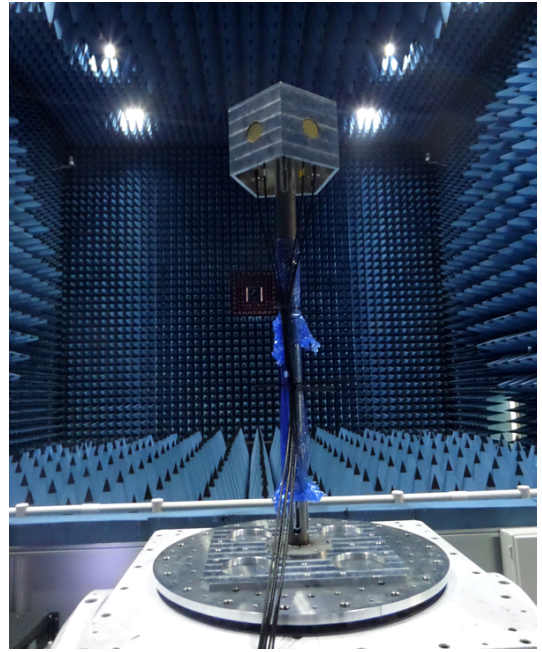


그림 13. 안테나 및 측정 사진
Fig. 13. Antenna and measurement photo

에 설치하여 측정한 사진이다. 원형 배열 안테나 반대편에 레이더 신호 송신용 혼 안테나가 배치되어 있다.

4.3 측정 결과

측정 주파수는 L대역에서 S대역 범위에서 40 MHz 간격으로 측정하였고, 1개의 주파수에 대하여 방위각 별 1000회 수행하였다. 송신 신호는 주파수 변조가 되지 않은 펄스 신호이며, 펄스폭은 1 μ s, 펄스반복주기는 100 μ s를 사용하였다.

방위각 오차 측정 결과 수평편파(H-pole) 신호에 대해서는 RMS 0.9225°, 수직편파(V-pole) 신호에 대

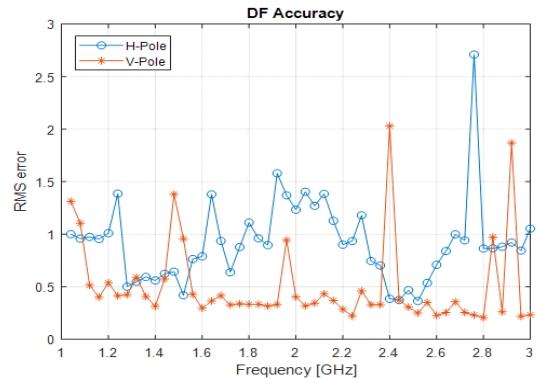


그림 14. 방향 탐지 측정 정확도
Fig. 14. Direction finding accuracy

해서는 RMS 0.5052° 의 정확도를 달성하였으며, 그림 14에 각 편파별 주파수에 대한 RMS 오차를 도시하였다.

기존의 연구 결과⁵⁻⁸⁾ 대비 주파수 범위, 안테나 채널 수, 측정 조건 등이 다르지만 시뮬레이션 결과 등을 종합하여 비교한 결과 약 2배 이상의 방향 탐지 정확도 개선 효과가 있음을 확인하였다.

V. 결 론

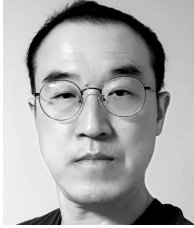
본 논문에서는 지향성 패턴의 원형 배열 안테나를 이용하여 위상 간섭을 회피하고 방향 탐지 정확도를 향상하는 기법을 제안하였다. 스파이럴 안테나의 지향성 패턴을 이용하여 방위 연산을 위한 안테나 섹터를 선정하고, 신호 세기 비율을 측정된 후 가중치를 적용하여 위상차 측정의 모호성을 해결하였다. 제안한 기법을 적용하여 방향 탐지 장치를 제작하고 실제 신호를 대상으로 방향 탐지 성능을 측정하여 제안한 방법의 효과성을 입증하였다. 측정 결과를 바탕으로 L 대역에서 S 대역까지 광대역의 주파수 특성을 가지면서도 단지 5개의 안테나 수신 채널만을 이용하여 360° 전 방향에 대하여 RMS 1° 이하의 높은 방향 탐지 정확도를 확보 하였다. 레이더 펄스 신호의 실시간 처리를 위하여 FPGA를 이용한 디지털 방향 탐지 기법을 적용하였으며, 레이더 및 통신 신호의 고속 방향 탐지 분야에 광범위하게 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] R. G. Wiley, *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, 2006.
- [2] D. L. Adamy, *EW102 A Second Course in Electronic Warfare*, Artech House, 2004.
- [3] B. J. Park, J. H. Lee, and K. S. Lee, "A VHF band 4 channel phase discriminator," *J. KIEES*, vol. 25, no. 9, pp. 912-918, Oct. 2014. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.9.912>)
- [4] B. J. Jang, "Direction finding technology: Tutorial, review, and research prospects," *J. KIEES*, vol. 30, no. 8, pp. 607-617, Aug. 2019. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.8.607>)
- [5] J. S. Lim, C. G. Jung, and G. S. Chae, "A technology of microwave direction finding with circular array combination method," *J. KIEES*, vol. 16, no. 6, pp. 549-555, Jun. 2005.
- [6] J. W. Chung and Y. K. Kim, "A study on improving the low capability of direction finding by interfered phase difference at circular array antennas," *J. KIICE*, vol. 14, no. 9, pp. 2157-2163, Oct. 2010. (<https://doi.org/10.6109/jkiice.2010.14.9.2157>)
- [7] J. S. Lim, "Direction finding method of the uniform circular array antenna using the pattern of phase differences," *J. Korea Convergence Soc.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-6, 2019. (<https://doi.org/10.15207/JKCS.2019.10.1.001>)
- [8] C. S. Park and D. Y. Kim, "The fast correlative interferometer direction finder using I/Q demodulator," in *Proc. Asia-Pac. Conf. Commun.*, pp. 1-5, Busan, South Korea, 2006. (<https://doi.org/10.1109/APCC.2006.255915>)
- [9] B. R. Jackson, S. Rajan, B. J. Liao, and S. Wang, "Direction of arrival estimation using directive antennas in uniform circular arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 2, Feb. 2015. (<https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2384044>)
- [10] N. D. Jeon, D. H. Shin, and D. C. Park, "Design of a 0.5~2 GHz cavity-backed spiral antenna," *J. KIEES*, vol. 21, no. 3, pp. 269-277, Mar. 2010. (<https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2010.21.3.269>)
- [11] J. I. Choi, S. W. Kim, H. C. Chin, and W. H. Choi, "A study on the improvement of direction error for electronic warfare system," *J. Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, vol. 18, no. 6 pp. 567-575, 2017. (<https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.6.567>)
- [12] J. J. Kang, S. K. Park, and J. H. Roh, "Performance analysis on digital phase difference measurement techniques for interferometer direction finder," *J. KIICE*, vol. 22, no. 8, pp. 1076-1082, Aug. 2018. (<https://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.8.1076>)

[13] G. Kratschmer, Introduction into theory of direction finding, in *Radiomonitoring & Radiolocation 2010/2011*, Munich, Rhode & Schwarz, 2010.

강 종 진 (Jong-Jin Kang)



2019년~현재 : 아주대학교 국방
디지털융합학과 박사과정
2008년~현재 : 한화시스템(주)
미래정보통신연구소 수석연
구원
<관심분야> 방향탐지, 전자전,
기계학습, 군 지휘통신

[ORCID:0000-0002-5187-7051]

김 재 현 (Jae-Hyun Kim)



1987년~1996년 : 한양대학교 전
산과 학사 및 석/박사 졸업
1997년~1998년 : 미국 UCLA 전
기전자과 박사 후 연수
1998년~2003년 : Bell Labs, NJ,
USA, 연구원
2003년~현재 : 아주대학교 전자
공학과 교수

<관심분야> QoE/QoS, 무선 MAC 프로토콜, IEEE
802.11/15, B5G 통신 시스템, 국방 기술네트워크,
위성시스템 등

[ORCID:0000-0003-4716-6916]