

근접전계 측정 시설을 이용한 원전계 방식의 능동위상배열안테나 자동보정 방법

박상혁*¹, 김건우*²

Automatic Calibration Method of Active Phased Array Antenna using Far-Field Measurement In Near-Field Chamber

Sang-Hyuk Park*¹, Kun-Woo Kim*²

요약

능동위상배열안테나는 다기능 레이더를 구성하는 데 있어서 가장 중요한 핵심 구성품이며 이를 활용하기 위해서는 위상 및 신호 세기 보정이 필수적이다. 본 논문에서는 144개 소자로 구성된 능동위상배열안테나 및 송수신 조립체를 제한된 공간에 설치 가능한 근접 전계(Near-Field) 시설을 활용하여 원전계(Far-Field) 방식으로 매우 빠르고 정확한 방법으로 보정하는 방법에 대하여 설명하고 실제 측정을 통하여 이를 검증하였다. 위와 같은 방법으로 보정을 진행하게 될 경우 기존 보정 방식 대비 매우 빠르고 정확하며 능동위상배열안테나 시스템 특성상 많은 시제들을 보정해야 하기 때문에 보정 시간을 줄이는 것이 매우 중요하다. 그뿐만 아니라 원전계 측정 방식이긴 하지만 원전계 측정 시설을 필요로 하지 않기 때문에 최소한의 측정 환경 구성으로 시험이 가능하다.

Abstract

The active phased array antenna is the most crucial core component in the system of multi-function radars. To effectively utilize it, phase and amplitude calibration are essential. This paper describes a method for calibrating an active phased array antenna and transmit/receive module composed of 144 elements using a Near-field facility that can be installed in a limited space, applying a Far-field approach for fast and accurate calibration. The method is validated through actual measurements. When calibration is performed using the method described above, the process is faster and more accurate compared to conventional calibration methods. This is particularly important as the active phased array antenna system requires calibration of numerous modules, making it crucial to reduce calibration time. Furthermore, although it utilizes a Far-field measurement method, it does not require a Far-field measurement facility, allowing for testing with a minimal measurement setup.

Keywords

auto calibration method, far-field measurement, near-field measurement, AESA antenna

* 한화시스템 연구원(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-5650-9792>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-4585-4080>

• Received: Nov. 19, 2024, Revised: Dec. 18, 2024, Accepted: Dec. 21, 2024
• Corresponding Author: Sang-Hyuk Park
Dept. of 491-23, Gyeonggidong-Ro, Chang-Li, Namsa-Eup, Cheoin-Gu
Tel.: 82+31-8020-7209, Email: darkdrop7@naver.com

1. 서 론

$$d = 2D^2/\lambda \tag{1}$$

기존의 위상배열안테나 보정방법으로는 전파 무반사실(Anechoic chamber)에서 원전계(Far-Field) 측정 방식을 통하여 크기 및 위상을 보정하거나 근전계(Near-Field) 측정을 통하여 보정을 하였다. 원전계 측정 방식은 측정 속도가 빠르나 정확한 측정을 위하여 충분한 크기의 무반사실 환경이 필요하고 보정을 위한 알고리즘이 다소 복잡하다는 특징이 있다. 반면 근전계 측정 방식은 작은 크기의 무반사실 환경으로 측정이 가능하나 측정용 프로브가 안테나 각 소자에 맞추어 이동을 하며 측정을 하기 때문에 측정 시간이 오래 걸린다는 특징이 있다. 본 논문에서는 두 가지 측정 방식의 장점들을 활용하여 적당한 크기의 무반사실 환경에서 프로브가 움직이지 않고 고정된 상태로 빠른 측정 속도로 크기 및 위상을 보정할 수 있도록 하였다.

근접전계 측정 시 최소 이격 거리 d 는 안테나의 개구면으로부터 $3\lambda \sim 5\lambda$ 으로 설정하는 것이 일반적이다[3][4]. 반면 원전계 측정 시 최소 이격 거리 d 는 식 (1)에 의하여 측정하고자 하는 대역인 9 ~ 10 GHz 에서는 약 5.3m 정도가 된다. 식 (1)에서 D 는 개구면 지름, λ 는 파장을 의미한다.

시험에 사용된 안테나는 그림 2와 같으며 측정용 혼 안테나는 그림 3과 같다. 혼 안테나의 주파수 대역은 8.2~12.4 GHz 이며 이득은 10 dBi이다. 실제 원전계 환경으로 측정을 진행하려면 측정용 혼 안테나와 위상배열안테나와의 이격 거리 그리고 흡수체 설치 공간 등을 생각하면 이번의 경우에는 최소 7m 이상 길이의 무반사실 구성이 필요하다. 하지만 이번 실험에서는 단 2.6m 크기의 무반사실을 이용하여 측정을 진행하기 때문에 혼 안테나와 위상배열안테나 간의 적절한 이격 거리 설정이 필요하다.

II. 보정데이터 측정 준비

기존 근접전계 측정 시설에서의 측정 방법과는 달리 혼(Horn) 안테나가 측정 과정에서 움직이지 않고 원전계 측정과 같이 고정되어 있다[1][2]. 먼저 송수신조립체(TRM)의 위상 및 신호세기를 측정하기 전에 그림 1과 같이 시험 환경에 의한, 정확하게는 혼 안테나와 안테나 면 사이의 이격 거리(d)에 따른 신호 특성을 확인하기 위해 그림 1과 같이 구성하여 시험을 진행한다.

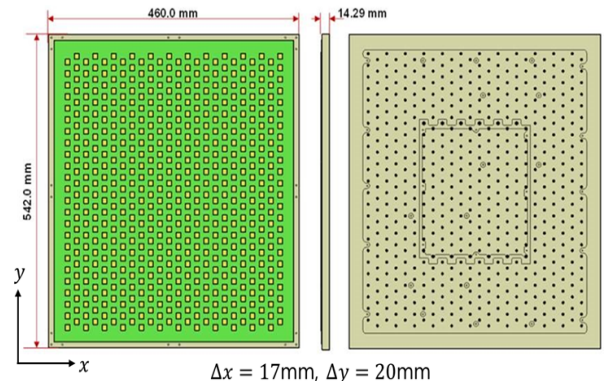


그림 2. 위상배열안테나 크기
Fig. 2. Size of phased array antenna

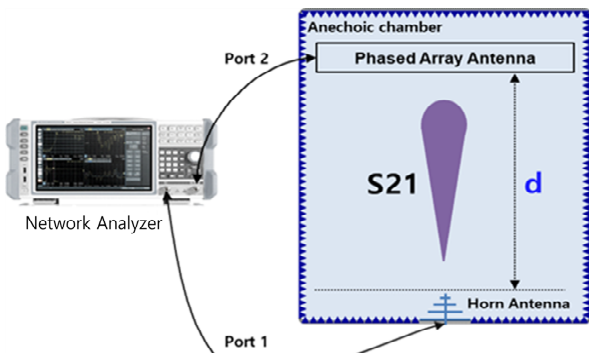


그림 1. 무반사실 환경에서의 혼 안테나에 의한 빔 패턴 측정

Fig. 1. Measurement of beam-pattern by horn antenna in anechoic chamber

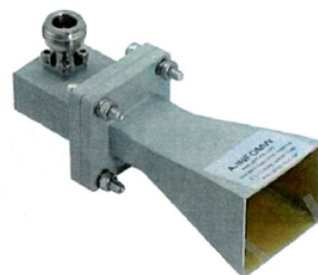


그림 3. 측정용 혼 안테나
Fig. 3. Horn antenna for measurement

신호 세기보다는 위상 오차가 최소화가 되는 이격 거리를 찾는 것을 목표로 하였다. 실제로 신호 세기의 경우는 위상에 비해 이격 거리에 따른 오차가 크지 않았기 때문에 최종 이격 거리는 위상 오차가 최소화되는 지점으로 결정하였다. 무반사실 제한적인 크기로 인하여 가능한 이격 거리는 최소 750mm에서 최대 1,350mm까지 가능하였다. 처음 접근은 100mm 단위로 9~10GHz 주파수 중 샘플 주파수 11개 혹은 51개로 위상 오차를 측정하였으며 그 다음 단계로 오차가 제일 작았던 거리에서 λ (=30mm) 간격으로, 마지막으로 1mm 간격으로 위치를 조정해가며 최적의 이격 거리를 결정하였다. 위상 안정도는 그림 4와 같이 인접한 2개 혹은 최대 4개 채널 간의 위상 오차가 25° 이상 차이 나는 채널 개수로 판단하였다.

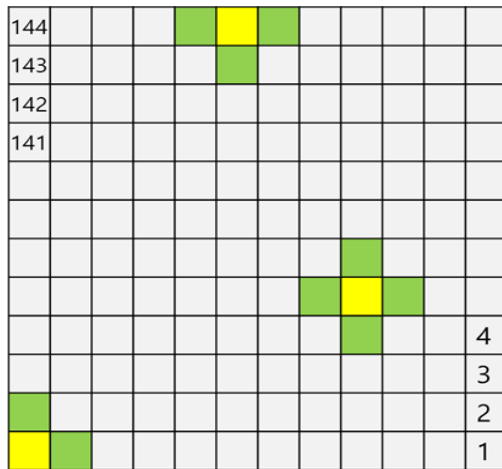


그림 4. 위상 오차 측정을 위한 인접 채널 표시
Fig. 4. Adjacent channel for phase error measurements

Δ degree	1350	1320	1290	1260	1230	1200	1170
Frequency [GHz]	Channel count of Δ degree > 25						
9.0	6	6	6	6	6	6	6
9.1	11	6	2	4	6	0	4
9.2	20	8	6	10	9	4	7
9.3	6	14	17	16	8	11	16
9.4	20	24	20	14	21	24	29
9.5	49	33	26	40	36	33	39
9.6	34	34	49	38	30	34	33
9.7	16	36	33	26	31	28	40
9.8	30	26	21	36	31	36	41
9.9	11	10	22	19	20	26	25
10.0	6	12	8	10	13	8	15
SUM	209	209	210	219	211	210	255

그림 5. 이격 거리에 따른 위상 오차 채널 개수
Fig. 5. Number of phase unstable channels according to separation distance

측정 결과 그림 5와 같이 측정용 혼 안테나와 시험 대상 안테나(AUT, Antenna Under Test) 간의 이격 거리가 무조건 멀거나 혹은 가까울수록 위상 오차가 커지거나 작아지는 것은 아니었으며 1,200~1,230mm에서 위상 오차 채널수가 가장 적었다. 여기서부터는 1mm 간격으로 이동시켜가며 위상 오차를 측정하였고 결과는 그림 6과 같이 최종 이격 거리는 1,226mm로 결정하였다.

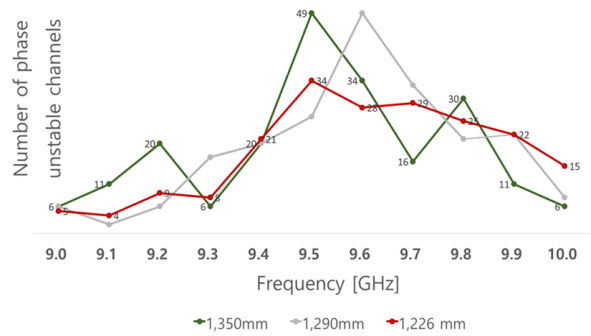
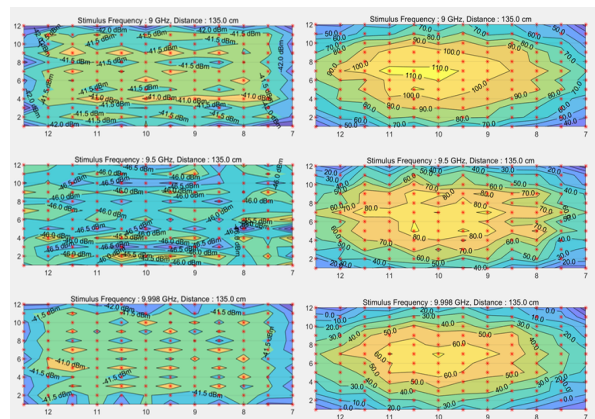


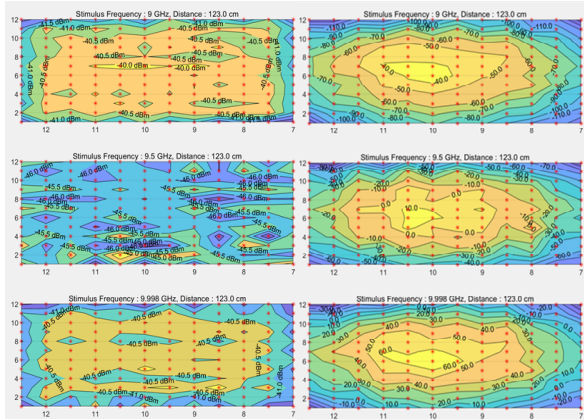
그림 6. 이격 거리 1,226mm에서의 위상 오차 채널 수
Fig. 6. Number of phase unstable channels at distance of 1,226mm

특이점으로는 9.5GHz에서 전반적으로 불안정한 위상 채널 수가 가장 많았으나 이는 무반사실 환경 특성으로 보인다.

주파수별 위상 오차에 대한 분포도가 아닌 측정된 위상 자체로의 분포도를 보면 그림 7과 같이 선형적인 등고선의 형태가 이격 거리 1,226mm 일 때 1,350mm 일 때 보다 안정적임을 확인할 수 있었다.



(a) 이격 거리 1,350mm에서의 신호 세기 및 위상 분포도
(a) Amplitude and Phase distribution diagram at distance of 1,350mm



(b) 이격 거리 1,226mm에서의 신호 세기 및 위상 분포도
 (b) Amplitude and Phase distribution diagram at distance of 1,226mm

그림 7. 신호 세기 및 위상 분포도
 Fig. 7. Amplitude and phase distribution diagram

III. 위상 보정 데이터 계산

이격 거리를 1,226mm가 되도록 혼 안테나와 위상배열안테나를 설치하고 그다음 단계로는

$RMS_S_{21_Phase}$ 를 구해야 한다. 이는 그림 1에서와 같이 혼 안테나를 통해 송신된 신호를 위상배열안테나를 통해 수신하였을 때의 식 (2)와 같이 측정된 위상값들에 대한 RMS값이다. RMS값이 아닌 일반적인 위상값을 사용하여도 상관 없지만 낮은 세기 신호의 위상일 경우 측정 오차가 존재할 수 있기 때문에 RMS값을 통해 위상 측정에 대한 오차가 줄어들도록 하였다.

$$RMS_S_{21_Phase} =$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m S_{21_Phase}^2 - (S_{21_max_phase}^2 - S_{21_min_phase}^2)}{m - 2}} \quad (2)$$

여기서 m 은 반복 측정 회수로 본 실험에서는 20회로 측정을 진행하였다. 앞에서 최적의 이격 거리를 실험을 통해 위상 오차가 최소가 되도록 하였다. 이제 각 채널별 위상 조정이 가능하도록 위상배열안테나에 TRM(Transmit and Receive Module)을 연결하여 위상을 측정하면 측정된 위상($Meas_Phase_0$)은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Meas_Phase_0 = (RMS_S_{21_Phase} + Ref_Phase) + TRM_Phase_0 \quad (3)$$

여기서 REF_Phase 는 혼 안테나를 통해 송신하는 신호의 절대 위상값이며 TRM_Phase_0 는 TRM의 보정 전 초기 위상 상태 값이다.

측정된 위상에서 측정용 혼 안테나와 위상배열안테나 간 이격 거리에 의한 위상과 혼 안테나에 의해 송신된 절대 위상값을 빼주면 TRM에 의한 위상 변화 값만 남게 되며 이는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$Meas_Phase_0 - RMS_S_{21_Phase} - Ref_Phase \quad (4)$$

여기서 $Meas_Phase_0$ 는 식 (3)을 이용하여 대입법을 적용하면 식 (5)와 같이 표현된다.

$$(RMS_S_{21_Phase} + Ref_Phase + TRM_Phase_0) - RMS_S_{21_Phase} - Ref_Phase \quad (5)$$

소거법을 통해 결국 TRM_Phase_0 값만 남게 되며 결국 이 값을 역으로 보상 해주어야 위상이 보정되기 때문에 보정 해야 하는 위상 값인 Cal_Phase_0 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$Cal_Phase_0 = -TRM_Phase_0 \quad (6)$$

위와 같은 과정을 통해 구해진 보정 값인 Cal_Phase_0 를 TRM에 적용하여 위상을 제어한 뒤 다시 측정을 한다면 이상적으로는 반복 측정을 통해 구한 두 번째 보정값인 Cal_Phase_1 은 0에 수렴해야 하며 $Meas_Phase_1$ 은 식 (7)에 의하여 $RMS_S_{21_Phase} + Ref_Phase$ 와 유사하게, TRM에 의한 위상 오차는 없고 시험 환경에 의한 위상 변화량만 나타나야 한다.

$$Meas_Phase_1 = RMS_S_{21_Phase} + Ref_Phase + TRM_Phase_0 + Cal_Phase_0 \cong RMS_S_{21_Phase} + Ref_Phase \quad (7)$$

IV. 실험 및 측정 결과

측정용 혼 안테나와 위상배열안테나 사이의 이격 거리를 1,226mm로 설정한 후 TRM을 위상배열안테나에 연결한다. 이때 144개의 SMP 타입의 RF Bullet(연결기)가 사용되고 이 연결기까지를 포함하여 보정한다. 측정 시설은 그림 8과 같이 근접전계용 무반사실 챔버를 이용하여 실험을 진행하였다. 무반사실 챔버의 전체 크기는 2,600(L) × 1,700(D) × 2,050(H)mm 이며 측정용 혼 안테나와 AUT와의 최대 거리는 1,750mm이다.

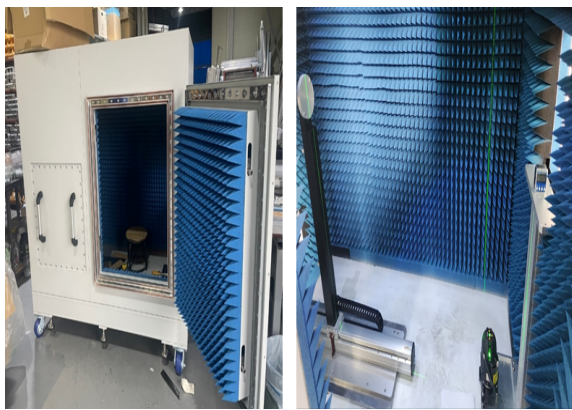


그림 8. 근접전계 무반사실 챔버 모습
Fig. 8. Photo of near-field anechoic chamber

$RMS_S_{21_Phase}$ 는 TRM을 연결하기 전에 측정하였으며 측정용 혼 안테나와 위상배열안테나 사이의 이격 거리를 변경하거나 두 안테나를 다른 시제로 바꾸지 않는 이상 한번 측정해놓은 값으로 계속해서 사용 가능하다. 이 역시 충분한 기간을 두고 반복 측정을 통해 변함이 없음을 확인하였다. 이격 거리 1,226mm에서의 위상 분포도는 그림 9와 같다. 그림 9에서의 위상 분포도는 앞서 이야기한 것처럼 송수신조립체(TRM)를 제외한 측정용 혼 안테나와 위상배열안테나 사이 거리에 따른 시험 측정 환경에 의한 위상 분포도만을 나타낸다.

마지막으로 Ref_Phase 변수 역시 매번 실험할 때마다 측정을 하는 것이 원칙이지만 그림 10과 같이 안테나 소자별 측정(P2P, Point to Point) 파형 송신기가 디지털 신호인 I/Q 데이터를 이용하여 만들어내는 파형이기 때문에 여러 번 반복 측정을 통해 확인한 결과 약 1° 수준의 위상 편차를 가져 보

쉬운 이해를 돕기 위하여 수식에는 동일한 변수로 적용하였으며 그때의 위상 분포는 그림 11와 같다.

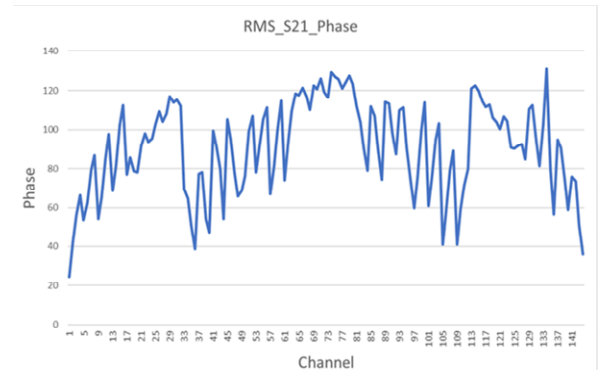


그림 9. 이격 거리 1,226mm 에서의 위상 분포도
Fig. 9. Phase distribution diagram at distance of 1,226mm

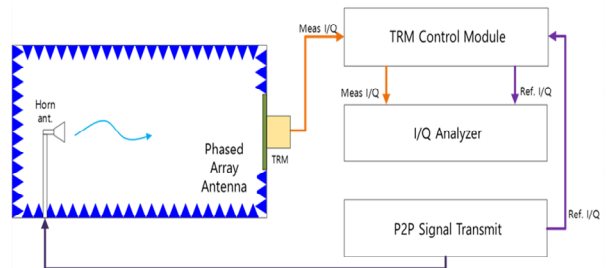


그림 10. P2P 시험 구성도
Fig. 10. Test block diagram of P2P

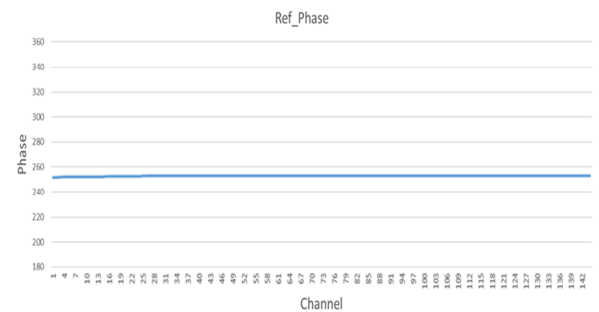


그림 11. P2P 파형발생기의 송신 위상 분포도
Fig. 11. Tx phase distribution diagram of P2P-wave generator

$RMS_S_{21_Phase}$ 와 Ref_Phase 데이터가 준비되었다면 그림 12와 같이 자동화 측정 프로그램을 통하여 $Meas_Phase_0$ 를 측정한다. 측정은 주파수 50 포인트 기준으로 약 5분 이내에 측정이 완료된다. 아직 위상 보정을 하기 전 상태이기 때문에 측정된 위상 분포도는 그림 13와 같이 불특정한 위상 분포를 보인다.

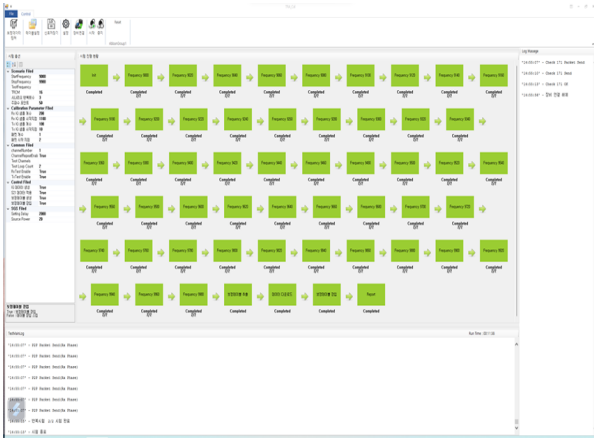


그림 12. 자동 보정 프로그램
Fig. 12. Auto calibration program

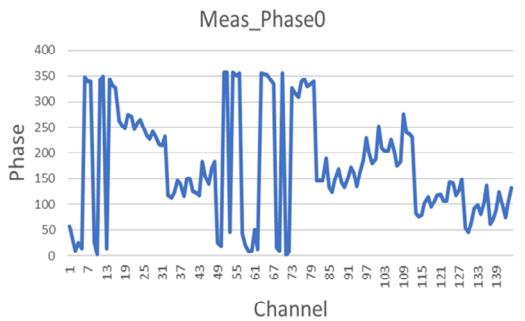


그림 13. 위상 보정 전 TRM을 포함한 위상 분포도
Fig. 13. Phase distribution diagram including TRM before phase calibration

측정이 완료되면 식 (5)와 식 (6)에 의하여 위상 보정을 위한 Cal_Phase_0 값이 계산이 되고 해당 위상 분포도는 그림 14와 같다. 위상 분포도를 보면 그림 14의 위상 분포도와 부호 반전인 상태로 반전인 것처럼 보임을 확인할 수 있다.

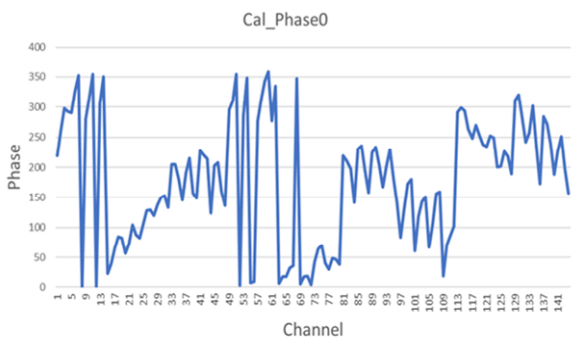


그림 14. 위상 보정을 위한 위상 분포도
Fig. 14. Phase distribution diagram for phase calibration

이렇게 구해진 Cal_Phase_0 값을 그림 15과 같이 자동화 측정 프로그램을 통해 TRM으로 위상 보정용 테이블을 장입한다. 해당 프로그램을 통해 송신, 수신 위상 보정 테이블을 별도로 장입할 수 있으며 현재 적용되어 있는 테이블을 불러오기를 통해 확인할 수도 있다.

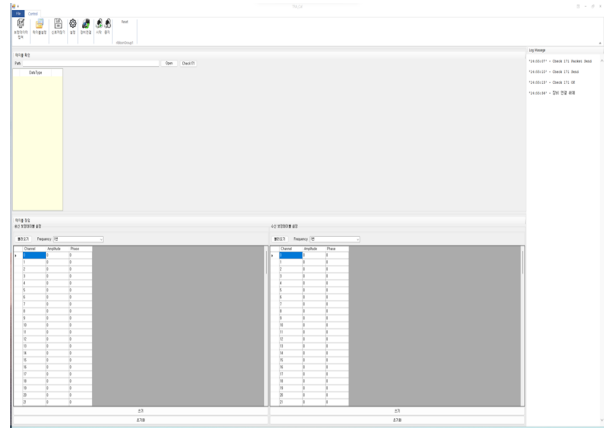


그림 15. 측정 프로그램을 이용한 위상 보정 값 장입
Fig. 15. Upload calibrated-phase values using auto calibration program

위상 보정 테이블을 정상적으로 장입하였다면 다시 한번 측정을 통해 $Meas_Phase_1$ 을 측정한다. 이때 식 (7)에 의하면 위상 보정 후 측정된 위상인 $Meas_Phase_1$ 은 수식대로 $RMS_S_{21}_Phase + Ref_Phase$ 이지만 모든 채널에서 Ref_Phase 값은 동일한 수준의 값이므로 상수로 본다면 결국은 그림 9의 $RMS_S_{21}_Phase$ 의 분포도와 유사하여야 하고 이는 그림 16를 통해 확인할 수 있다.

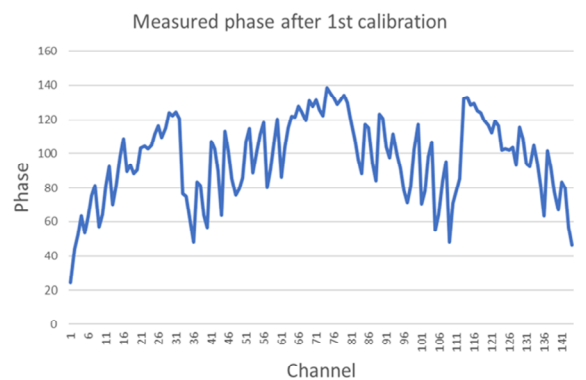


그림 16. 1차 위상 보정 후 측정된 위상 분포도
Fig. 16. Measured phase distribution diagram after 1st phase calibration

사실 $Meas_Phase_1$ 위상 분포도를 통해서도 위상 보정이 정상적으로 잘 되었는지 직관적으로 확인하기 어렵다. 만약 위상 보정이 정상적으로 되었다면 더 이상 보정할 필요가 없을 시, 즉 2번째 위상 보정 값인 Cal_Phase_1 은 0에 수렴하여야 한다. 그림 17은 Cal_Phase_1 의 위상 분포도이며 이 결과를 통해 위상 보정이 정상적으로 수행되었음을 확인할 수 있다. 위상 분포도가 완전히 0에 수렴하지 않는 이유는 TRM의 위상 천이기가 제어할 수 있는 각도에 대한 최소 해상도가 존재하기 때문에 편차가 발생함을 확인할 수 있으며 이는 해상도가 개선된 위상 천이기를 사용한다면 더욱 편차를 줄일 수 있음을 의미한다.

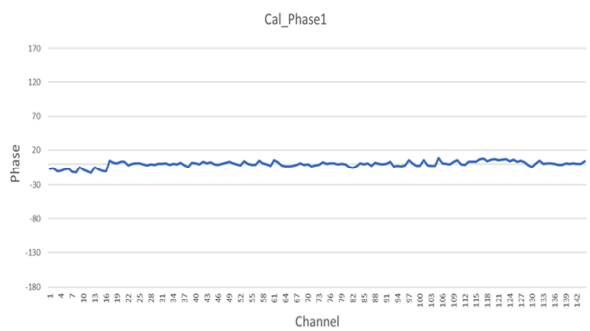


그림 17. 1차 위상 보정 후 측정된 2차 위상 보정 값 분포도

Fig. 17. 2nd phase calibration values distribution diagram after 1st phase calibration

본 논문에서는 근접전계 측정 시설을 이용한 원전계 측정 방식에서의 위상 보정 방식에 대하여 다루었다. 본문에서는 별도로 다루진 않았지만 수신 위상 보정과 마찬가지로 송신 위상배열안테나 보정도 동일한 시험 환경 구성으로 보정이 가능하다. 이때에는 P2P 파형 송신기가 수신기 역할을 수행하게 되며 TRM이 송신기 역할을 수행하게 된다.

마찬가지로 신호 세기에 대한 보정도 본문에서 다룬 수식에서 $Phase$ 를 $Amplitude$ 로만 바꿔서 적용하면 동일하게 적용된다. 물론 신호 세기의 편차가 큰 송,수신기의 경우 신호 세기 보정도 매우 중요하지만 본 시험에 사용된 TRM의 경우 신호 세기 편차의 정도가 크지 않았기 때문에 다루지 않았을 뿐 수행하는 절차는 위상 보정 절차와 동일하다.

V. 결 론

본 논문에서는 근접전계 측정 시설을 이용한 원전계 방식에서의 신호 세기와 위상에 대한 보정을 실험하고 검증하였다. 측정용 프로브가 이동하는 근접전계 방식으로 보정을 하게 될 경우 약 7분이 소요가 되는 반면 본 논문에서 제시한 방법으로 측정 시 약 2분의 시간이 소요되며 그 정확도 또한 우수하다. 위상배열안테나 시스템 특성상 많은 대수의 송수신조립체가 하나의 시스템을 구성하며 이 모든 송수신조립체를 보정을 해야 하기 때문에 보정에 소요되는 시간을 줄이는 것은 매우 중요하다. 하지만 그보다 더 중요한 것은 측정에 대한 정확도이다. 시스템을 구성하는 송수신조립체 각각이 보정이 정확하게 수행되어야 시스템 단위에서 성능이 보장되기 때문이다. 당연하게도 측정용 프로브를 측정하고자 하는 안테나 소자 간격에 맞추어 이동하며 측정을 하면 측정 시간은 오래 걸리지만 가장 정확한 보정일 수 있으나 본 논문에서 제시한 측정 방법의 실험 결과인 보정 후 위상 분포도를 보았을 때 속도뿐 아니라 정확도 또한 우수한 수준임을 알 수 있다. 또한 이와 같이 송수신조립체 개별로 보정이 가능하다면 전체 시스템에서의 보정 시험을 별도로 진행할 필요가 없으며 시스템에 대한 유지 보수 또한 송수신조립체 단위로 가능하다는 장점이 있다.

References

- [1] H. J. Visser, "Array and phased array antenna basics", John Wiley & Sons, Ltd, pp. 295-314, Jul. 2005. <https://doi.org/10.1002/0470871199.ch11>.
- [2] D.-H. Jang, "The calibration method of airborne active electrically scanned array(AESA) antenna using near-field measurement", Journal of KIIT, Vol. 21, No. 12, pp. 121-128, Dec. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.12.121>.
- [3] K.-T. Kim, S.-H. Park, J.-W. Seo, and T.-H. Joo, "Automatic calibration method of tile-type phased-array antenna using back-projection measurement", The Journal of Korean Institute of

- Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 31, No. 12, pp. 1033-1041, Dec. 2020. <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2020.31.12.1033>.
- [4] H. D. Chae, H. S. Kim, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. K. Park, "Transmit-beam pattern measurement of the active phased-array antenna using near-field measurement facility", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 22, No 12, pp. 1155-1164, Dec. 2011. <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2011.22.12.1155>.
- [5] B.-J. Park, S.-Y. Choi, W.-S. Choi, and B.-H. Lee, "Automatic measurement and calibration of transmit/receive module for active phased-array antenna device", Journal of KIIT, Vol. 20, No. 8, pp. 69-77, Aug. 2022. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.8.69>.
- [6] G. Babur, G. O. Manokhin, E. A. Monastyrnev, A. A. Gelster, and A. A. Shibelgut, "Simple calibration technique for phased array radar system", Progress in Electromagnetics Research M, Vol. 55, pp. 109-119, Mar. 2017. <https://doi.org/10.2528/PIERM16101203>.
- [7] I. Seker, "Calibration methods for phased array radars", Radar Sensor Technology XVII, Vol. 8714, pp. 294-308, May 2013. <https://doi.org/10.1117/12.2015694>.
- [8] G. He, X. Gao, and R. Zhang, "Impact analysis and calibration methods of excitation errors for phased array antenna", IEEE Access, Vol. 9, pp. 59010-59026, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073222>.

저자소개

박 상 혁 (Sang-Hyuk Park)



2014년 3월 : 단국대학교
전자전기공학과(공학사)
2016년 8월 : 성균관대학교
전자전기컴퓨터공학(공학석사)
2016년 8월 ~ 2021년 8월 :
(주) 엠티지 주임 연구원
2021년 8월 ~ 2023년 6월 :

LIG넥스원 선임 연구원

2023년 6월 ~ 현재 : 한화시스템 지상레이다체계 2팀
선임 연구원

관심분야 : 위상배열안테나, RF시스템, 신호처리

김 건 우 (Kun-Woo Kim)



2000년 2월 : 금오공과대학교
전자통신공학과(공학사)
2002년 2월 : 금오공과대학교
전자통신공학과(공학석사)
2009년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학박사)
2007년 1월 ~ 현재 : 한화시스템

지상레이다체계 2팀 수석 연구원

관심분야 : 안테나, 레이더 시스템