

AESA 레이더 능동위상배열 안테나의 배열오차 분석 및 보정

Array Error Analysis and Correction of Active Array Antenna for AESA Radar

이유리 · 김종필 · 강연덕 · 김선주*

YuRi Lee · JongPil Kim · Yeonduk Kang · SunJoo Kim*

요 약

본 논문에서는 항공기 레이더에 적용 가능한 능동배열 안테나의 배열오차 분석 및 보정에 대한 시험 결과를 기술하였다. 복사소자, TR 모듈, 급전기 등으로 구성되는 배열소자 간의 크기 및 위상오차는 안테나 부엽 준위에 영향을 미치며, 이는 안테나 개구면 weighting에 따른 이상적인 부엽레벨, 배열소자 개수, 안테나 효율 등에 의해 그 민감도가 달라진다. 시스템에서 요구되는 부엽준위를 만족시키기 위해서는 배열소자의 오차 보정이 반드시 이루어져야 한다. 그 방법은 오차요소에 따라 다르게 적용되어야 하며, 안테나 형태, 목표 부엽 준위에 따라 고려되는 수준의 차이가 달리 적용되어야 한다. 본 논문에서는 배열오차 요소와 그 영향에 대해 분석하였으며, 오차 보정 방안을 제시하였다. 또한, 근접 전계 시험을 통해 그 결과를 확인하였다.

Abstract

Array error analysis and correction of active array antenna are described in this paper. Array elements composed of radiator and TR(Transmit & Recive) module have error(magnitude and phase difference among array elements) which affects SLL(Side Lobe Level). Error affectedness level depends on ideal SLL according to antenna aperture weighting, number of array elements and antenna effective aperture. To satisfy required SLL, correction of array elements is necessary; adopted differently per errors, and weighted differently per shapes of antenna and required SLL. Errors of every individual element had been defined, performance of the antenna with or without error correction had been estimated and proved through near field test.

Key words: Active Phase Array Antenna, SLL(Side Lobe Level), Calibration, TR Module, Near Field Test

I. 서 론

과거에는 클라이스트론(Klystron), 진행파관 증폭기(TW-TA: Traveling Wave Tube Amplifier) 등의 단일 고출력 송신기를 이용한 기계식 안테나 혹은 각 배열의 위상 가변 등을 통해 빔조향이 이루어지는 수동위상배열 안테나 등

이 레이더 시스템에 주로 이용되었다. 그러나 최근 개발되는 레이더 시스템은 반도체 소자의 발달과 더불어 수백~수천 개의 TR 모듈을 이용한 능동 위상 배열 안테나가 주로 적용된다. TR 모듈을 적용할 경우, TR 모듈 단일로는 기존의 클라이스트론이나 진행파관보다는 낮은 출력 특성을 보이지만, 수백~수천 개의 TR 모듈을 사용하

「이 연구는 국방과학연구소(ADD) 연구과제로 연구되었음.」
LIG넥스원(LIGNex1)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 31, 2014 ; Revised December 8, 2014 ; Accepted March 25, 2015. (ID No. 20141031-091)

· Corresponding Author: YuRi Lee (e-mail: leeyuri@lignex1.com)

여 일부 TR 모듈이 고장나더라도 전체 시스템에 미치는 영향이 적은 점진적인 성능 저하(*graceful degradation*)의 장점을 가지며, TR 모듈의 위상/크기 변화를 통한 배열소자의 가변을 통해 다양한 빔 형성과 조향이 가능하다^{[1],[2]}. 그러나 안테나 개구면을 구성하는 배열 소자가 수백~수천 개로 이루어짐에 따라 배열소자 간의 오차가 필연적으로 발생하며, 이는 능동배열 안테나의 빔 성능 저하를 야기하게 된다.

II. 배열오차가 시스템에 미치는 영향

수백~수천 개의 배열소자로 구성되는 능동배열 안테나에는 필연적으로 배열소자 간의 크기 오차, 위상 오차가 존재하며, 이는 원하는 빔 성능을 저하시키지 않는 수준으로 규제되어야 한다. 배열소자 간의 허용오차는 원하는 부엽준위, 배열소자 개수, *aperture weighting*으로부터 정의될 수 있다(여기서 배열오차는 임의의 한 위치로 분산되어 있는 오차이며, 집중되어 있을 경우는 그 만큼을 전체 배열소자 개수에 대한 조정으로 보상하여야 한다).

전체 부엽 준위는 식 (1)과 같이 이상적인 부엽 준위와 안테나 효율(*weighting*에 의한), 배열소자 개수 및 채널 별 경로 오차의 조합으로 표현되고, 여기서 $Q_{channel}$ 은 채널별 오차에 따른 Q -value로, 크기 오차량에 의한 $Q_{amplitude}$ 와 위상 오차량에 의한 Q_{phase} 의 합으로 표현될 수 있다. 각 $Q_{channel}$ 은 식 (2)와 같이 표현될 수 있으며, 식 (2)의 합으로 이루어지는 Q -value를 도시하면 그림 1과 같다^{[3],[4]}.

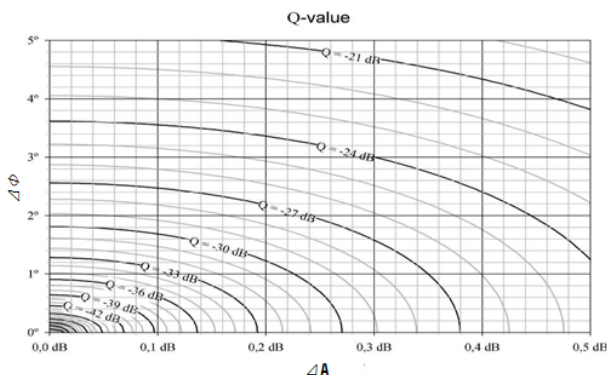


그림 1. 크기 오차 및 위상 오차에 의한 Q -value
Fig. 1. Q -value by amplitude and phase error.

$$SLL_{total} = SLL_{ideal} + \frac{Q_{channel}}{N_{element} \cdot \eta_{ant}} \quad (1)$$

SLL_{total} : 전체 부엽 준위
 SLL_{ideal} : 이상적인 부엽 준위
 $Q_{channel}$: 채널 별 오차에 따른 Q -value
 $N_{element}$: 배열소자개수
 η_{ant} : 안테나 효율

$$Q_{amplitude} [dB] = 20 \log(\Delta A - 1)$$

$$Q_{phase} [degree] = 20 \log\left(\frac{1}{\Delta \phi}\right)$$

$$Q_{channel} = Q_{amplitude} + Q_{phase} \quad (2)$$

$Q_{amplitude}$: 크기 오차량에 의한 Q -value
 Q_{phase} : 위상 오차량에 의한 Q -value
 ΔA : 크기 오차량
 $\Delta \phi$: 위상 오차량

원형의 개구면을 갖는 안테나에 이상적인 부엽준위가 -33 dB인 *Taylor weighting*을 적용할 경우, 부엽준위 -30 dB를 만족해야 한다고 할 때, 크기 오차가 발생하지 않을 경우 위상오차의 허용 범위는 25° 이며, 위상오차가 발생하지 않을 경우 크기 오차의 허용 범위는 3 dB가 된다. 또한, 이상적인 부엽준위가 -17.5 dB인 *Uniform weighting*을 적용할 경우, *Taylor weighting*의 오차 허용 범위 내에서는 이상적인 부엽준위와 거의 차이가 없으며, 부엽준위 -15 dB를 만족해야 한다고 할 때, 크기 오차가 발생하지 않을 경우 위상오차의 허용 범위는 120° 이며, 위상오차가 발생하지 않는 경우, 크기 오차의 허용 범위는 10 dB가 된다. 이를 통해 이상적인 부엽준위가 높을수록 크기오차 및 위상오차에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 분석 결과를 바탕으로 원형 안테나 개구면에 *Uniform weighting* 적용 시 부엽준위 -15 dB, *Taylor weighting* 적용 시 부엽준위 -30 dB를 규격으로 설정하고, 배열오차를 보정하기 위한 방안을 구현하고, 실험을 통해 확인하였다.

III. 배열오차 요소

능동위상배열 레이더용 안테나 시스템은 다수의 TR 모듈로 구성되어 이 TR 모듈들의 비선형오차 및 모듈간 경

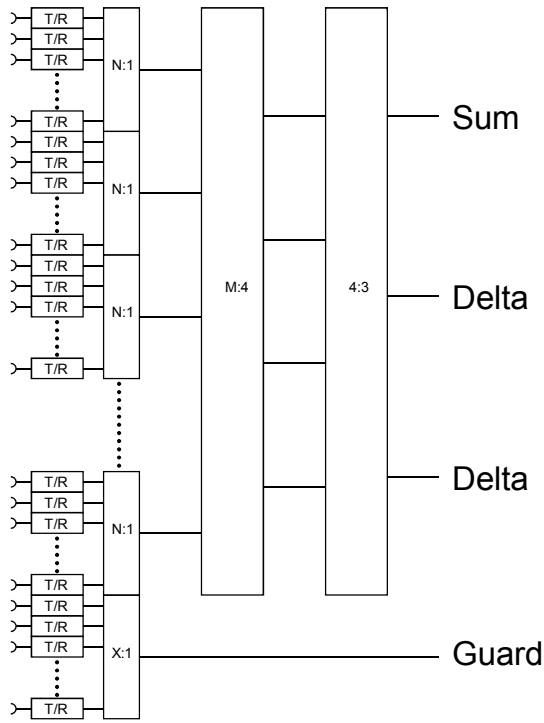


그림 2. 일반적인 안테나 시스템 구성도
Fig. 2. Generic block diagram for array antenna system.

로상의 길이 차로 인해 발생하는 선형오차가 존재한다.

2장에서 분석한 바와 같이, 이러한 오차는 안테나의 빔 성능에 치명적인 저하를 야기하며, 원하는 빔 성능을 만족하는 수준 이내의 오차로 반드시 보정되어야 한다.

안테나시스템의 간략한 구성도는 그림 2와 같다.

각 배열소자로부터 부배열급전기 출력까지의 경로상에는 다음 표 1과 같은 오차가 존재한다.

표 1. 배열소자 오차
Table 1. Array error.

구분	오차종류	비고
TR 모듈	비선형오차	능동소자에 의한 오차
TR 모듈 분배/결합기	선형오차	경로차에 의한 오차
배열급전기	선형오차	경로차에 의한 오차
복사소자	선형오차	복사소자 간 제작공차에 의한 오차
TR 모듈-복사소자	선형오차	체결에 따른 경로오차

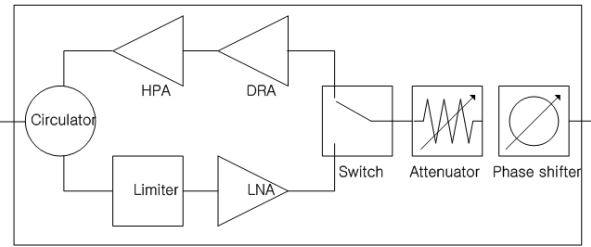


그림 3. 일반적인 TR 모듈 블럭도
Fig. 3. Generic block diagram for TR module.

이 중 TR 모듈의 오차는 내부 능동소자들의 비선형성에 의해 발생하는 오차이며, 나머지 오차들은 선형오차에 해당한다. 이러한 오차들은 성격에 따라 다른 보정방안을 적용해야 한다.

일반적으로 TR 모듈에는 송/수신을 위한 HPA와 LNA 블럭이 포함되고, 송/수신 빔 형성 및 조향을 위한 위상변위기(phase shifter)와 가변감쇄기(variable attenuator)가 포함된다. 위상변위기는 아래 그림 4와 같이 switchable delayline 형태이며, 이로 인해 위상가변 시 원치 않는 크기의 변화(PM to AM)가 발생한다. 마찬가지로 가변감쇄기는 그림 5와 같이 switchable attenuator 형태이며, 이로 인해 크기가 변할 때 원치 않는 위상의 변화(AM to PM)가 발생한다. 본 논문에서 사용한 위상가변기, 가변감쇄기의 PM to AM, AM to PM은 그림 6과 같은 특성을 갖는다.

일반적인 증폭기의 AM to AM, AM to PM은 그림 7과 같은 특성을 갖는다. 특히 TR 모듈 송신의 경우에는 다량의 TR 모듈까지의 경로차, 손실차, 운용온도의 변화로 인해 발생하게 되는 원치 않는 출력 저하를 방지하기 위해

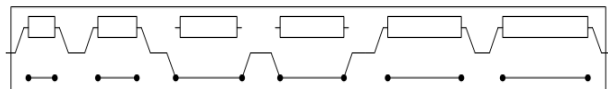


그림 4. 위상변위기 구성
Fig. 4. Schematic for variable phase shifter.

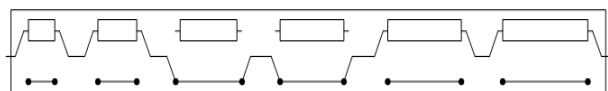


그림 5. 가변감쇄기 구성
Fig. 5. Schematic for variable attenuator.

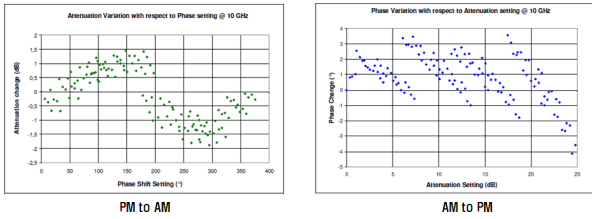


그림 6. 사용한 위상변위기/가변감쇄기의 PM to AM/AM to PM 특성

Fig. 6. PM to AM/AM to PM characteristic of selected phase shifter and attenuator.

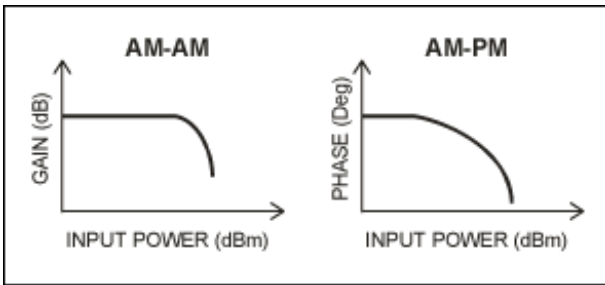


그림 7. 일반적인 증폭기의 PM to AM/AM to PM 특성
Fig. 7. PM to AM/AM to PM characteristic of generic amplifier.

최종단의 HPA를 적정량 포화시켜 사용하기 때문에 위상 변위기와 가변감쇄기의 PM to AM, AM to PM은 증폭기의 비선형 특성의 영향을 받아 위상가변시 발생하는 감쇄량에 따라 다른 출력 위상특성을 얻게 되고, 이는 결과적으로 빔 성능의 저하요인으로 작용되게 된다.

IV. 배열오차 보정

일반적인 능동배열안테나의 시험은 구성품 단품 시험 및 통합시험을 하는 시험실 시험과 실방사를 통해 능동배열 안테나의 빔성능을 측정하는 근접 전계 시험으로 진행되며, 각 시험 단계 별로 배열소자의 오차요소에 따른 보정이 이루어진다.

4.1 비선형오차 보정

오차요소 중 TR 모듈의 비선형 특성을 보정하기 위하여 TR 모듈 시험 시 해당 특성을 추출하고, 그 결과를 이용하여 원하는 위상, 이득 성능을 얻을 수 있는 보정

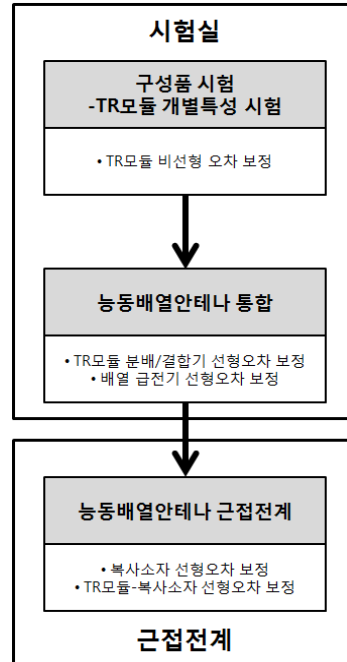


그림 8. 능동배열 안테나 시험 과정
Fig. 8. Active array antenna test process.

table을 구축하여 적용한다. TR 모듈 시험 결과, 크기 가변 오차는 0.5 dB 이내로 빔 성능에 영향을 미치지 않아 보정 table을 적용하지 않았으며, 위상 가변 오차는 50° 가량 발생하여 보정 table을 적용하였다.

5개 TR 모듈의 보정 table 적용 전 후의 특성을 비교하여 보았다. 5.625° 간격으로 0~360° 위상가변 과정 중 그림 9와 같이 약 50° 가량 발생한 위상오차가 그림 10과 같이 5° 수준으로 감소함을 확인하였다. 표 2에 그 값을 비교하였다.

4.2 선형 오차 보정

그림 2 및 표 1에서 볼 수 있듯이, 구성품 간 체결, 제작시 발생하는 경로오차 등 또한 보정되어야 하며, 이 중 실방사 시험이 필요한 복사소자의 오차, 복사소자와 TR 모듈 간의 체결에 의한 오차를 제외한 나머지 부분은 시험실 수준에서 시험을 통해 추출되고, 이를 이용하여 정렬 table 구축한 후 근접 전계 시험을 통해 최종 update된다.

근접 전계 과정에서 복사소자에 의한 선형오차와 TR 모듈-복사소자 체결에 의한 선형오차를 보정하게 되는데, 이

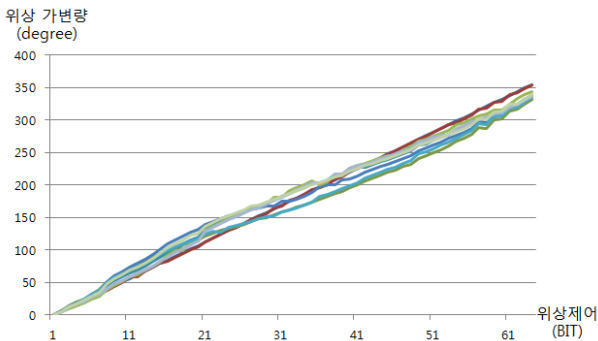


그림 9. 보정테이블 적용전 BIT별 TR 모듈 송신위상
Fig. 9. Transmitted phase performance without error correction.

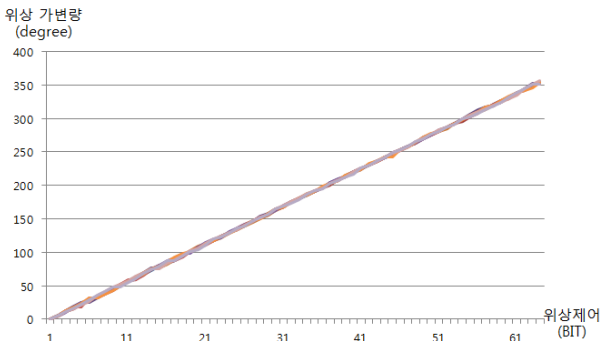


그림 10. 보정테이블 적용후 BIT별 TR 모듈 송신위상
Fig. 10. Transmitted phase performance with error correction.

표 2. 보정테이블 적용 전/후 TR 모듈 위상오차
Table 2. Comparison of TR module transmitted phase error with/without error correction.

구분	보정 전 위상오차	보상 후 위상오차
TR 모듈 #1	-15°~33°	-3°~3°
TR 모듈 #2	-20°~22°	-2°~2°
TR 모듈 #3	-26°~25°	-3°~4°
TR 모듈 #4	-18°~16°	-3°~2°
TR 모듈 #5	-14°~28°	-3°~5°

러한 일련의 과정을 배열정렬이라 칭하였다. 근접 전계의 배열정렬 과정은 그림 12와 같다. 먼저 시험실에서 보정된 패턴을 측정하고 분석하여 존재하는 배열간 크기/위상 차이를 줄이기 위한 정렬 결과를 안테나 시스템에 업데

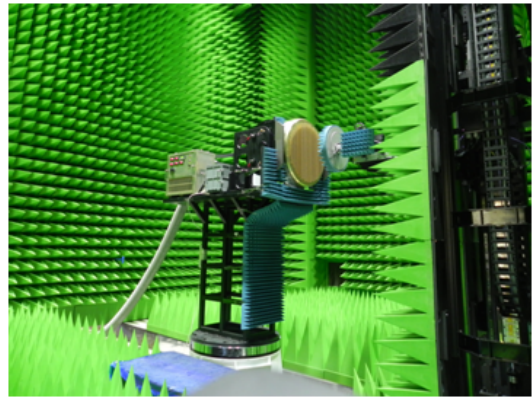


그림 11. 근접 전계 셋업
Fig. 11. Near-field test set-up.

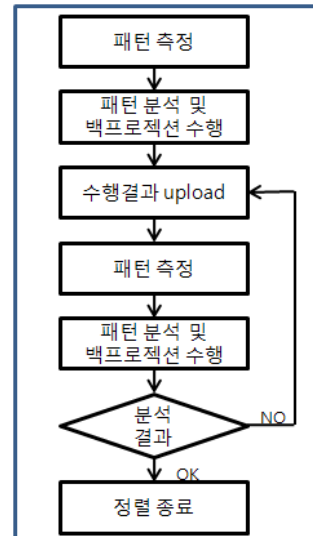
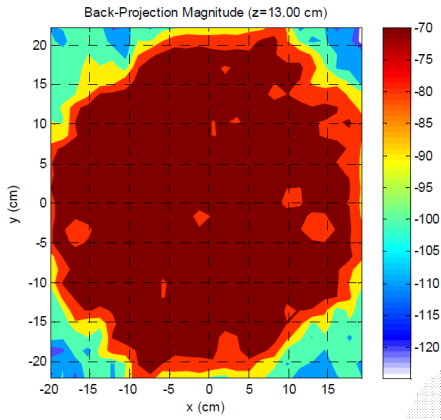


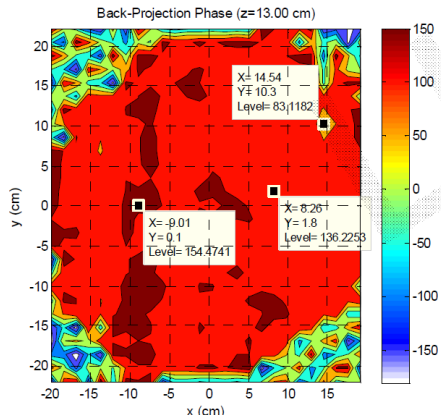
그림 12. 근접 전계 과정의 배열정렬 순서도
Fig. 12. Array element alignment flow chart in near-field test.

이트한 후 패턴을 측정하고 분석하는 과정을 반복한다. 배열정렬 과정은 모든 능동 채널을 on 상태 조건으로 하여 실제 운용에 가까운 조건에서 패턴 측정과 분석이 이루어진다.

그림 13과 그림 14는 근접 전계의 정렬 전/후의 배열분포 분석 결과이다. 정렬 이전에 비해 정렬 이후의 크기분포와 위상분포가 균일한 것을 확인할 수 있다. 위상 분포의 경우, 정렬 이전에 최대 70°의 위상편차를 가졌으나, 정



(a) 크기 분포
(a) Amplitude distribution

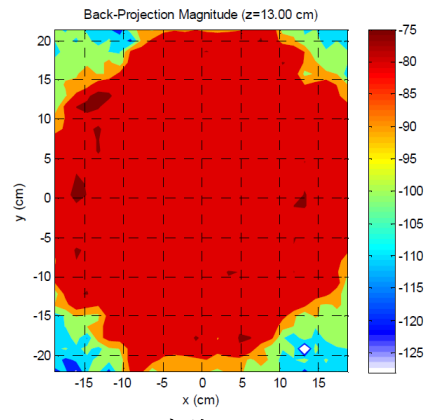


(b) 위상 분포
(b) Phase distribution

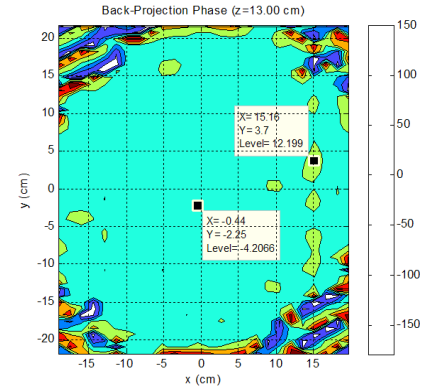
그림 13. 근접 전계 정렬 전 분석 결과
Fig. 13. Analysis result of pre-aligned beam.

렬 이후에 거의 균일한 위상편차(최대 약 16° 가량)를 갖는 것이 확인되었다. 실제 TR 모듈의 위상가변기는 5.625°의 위상제어 기능을 갖지만, 획득한 위상편차(최대 약 16° 가량) 내에서 요구된 규격을 만족할 것으로 판단되어, 시험의 편의성과 시간 단축을 위해 추가적인 배열정렬을 수행하지 않았다.

그림 15, 16은 Uniform weighting을 적용한 정렬 전/후의 2D 패턴과 방위각/고각의 1D main cut이다. 정렬 전후 부엽준위는 비슷하나, 패턴이 상당히 개선된 것을 확인할 수 있다. 그림 17, 18은 Taylor weighting을 적용한 정렬 전/후 2D 패턴과 방위각/고각의 1D main cut이다. 정렬 이



(a) 크기 분포
(a) Amplitude distribution



(b) 위상 분포
(b) Phase distribution

그림 14. 근접 전계 정렬 후 분석 결과
Fig. 14. Analysis result of aligned beam.

전에는 방위각 방향의 부엽준위가 -20 dB 가량으로 -30 dB의 규격에 미치는 못하는 것을 확인할 수 있으며, 고각 방향의 부엽준위 또한, 규격을 만족하지 못하는 부분이 있음을 확인할 수 있다. 반면, 정렬 이후에는 방위각/고각 방향 모두 부엽준위 -30 dB 미만으로 규격을 만족하며, 방사패턴이 상당히 개선되는 것을 확인할 수 있다. 근접 전계 시험을 통해 이상적인 부엽준위가 -17.5 dB인 Uniform weighting을 적용한 경우에는 복사소자와 TR 모듈-복사소자 간의 체결에 따른 배열소자 간의 선형 오차가 부엽준위 규격에 큰 영향을 미치지 않으나, 이상적인 부엽준위가 -33.0 dB인 Taylor weighting을 적용한 경우에는 부엽준위 규격에 영향을 주어 반드시 보정되어야 함

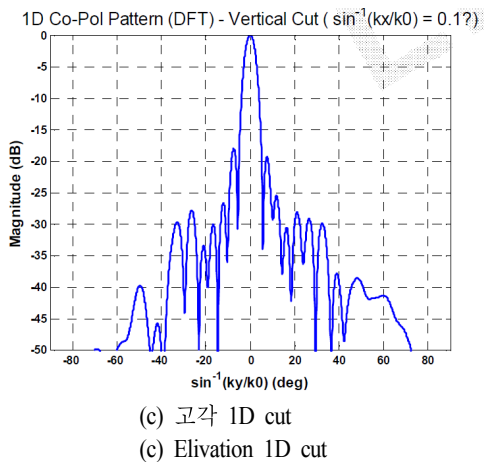
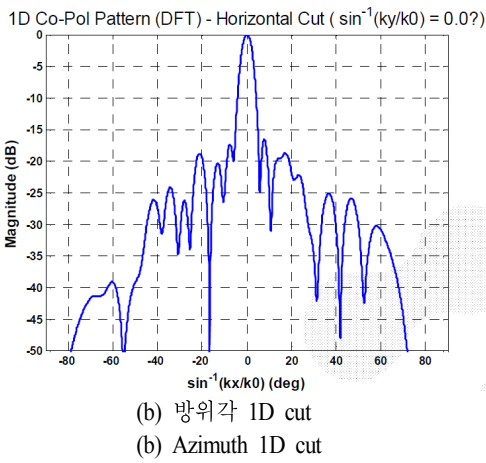
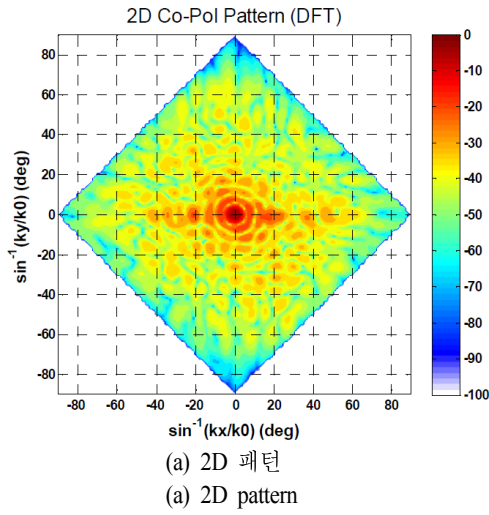


그림 15. 정렬 전 uniform weighting 방사패턴
Fig. 15. Radiation pattern of pre-aligned uniform weighting beam.

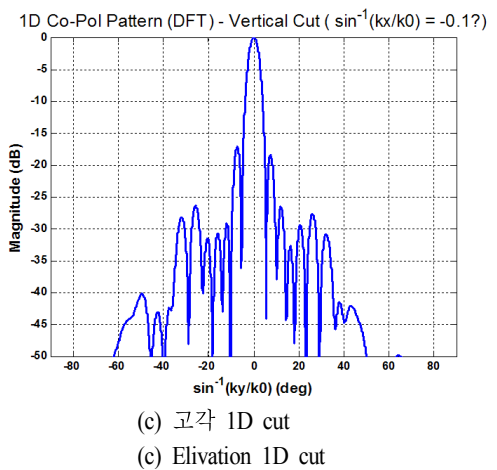
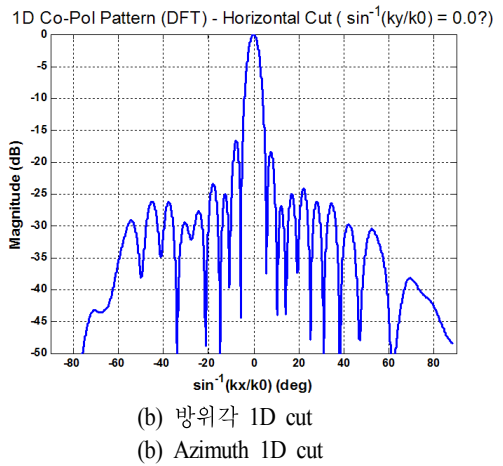
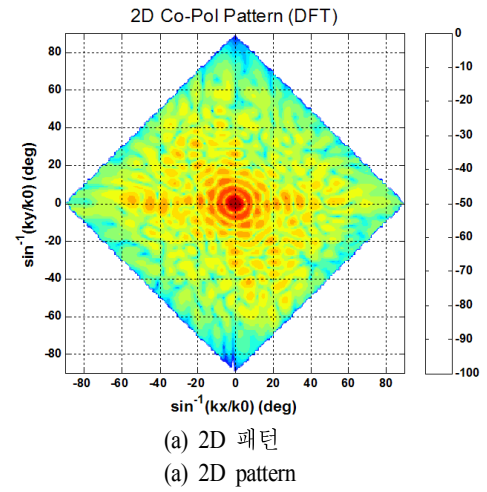


그림 16. 정렬 후 uniform weighting 방사패턴
Fig. 16. Radiation pattern of aligned uniform weighting beam.

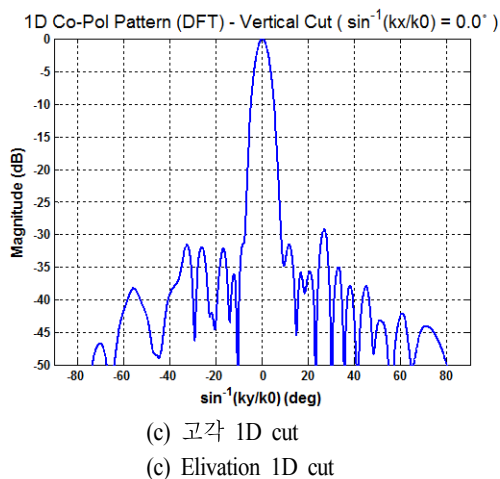
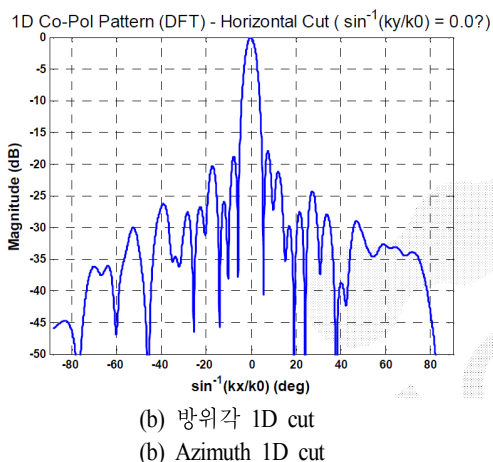
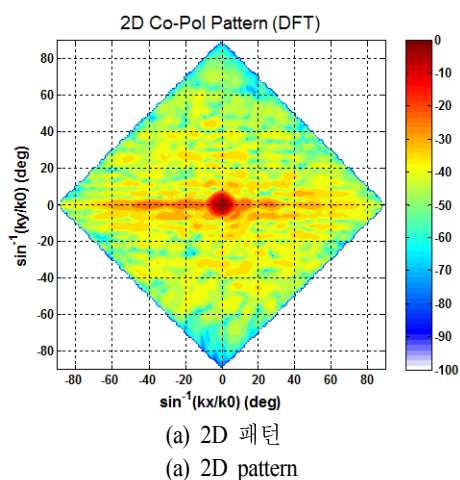


그림 17. 정렬 전 Taylor weighting 방사패턴
Fig. 17. Radiation pattern of pre-aligned Taylor weighting beam.

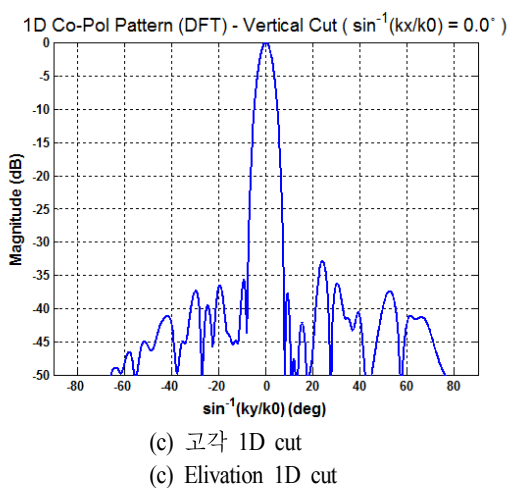
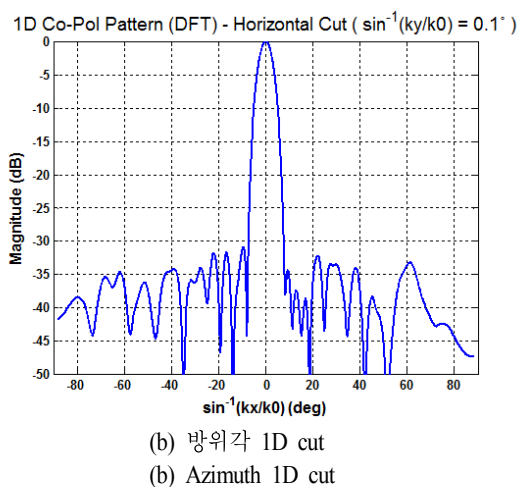
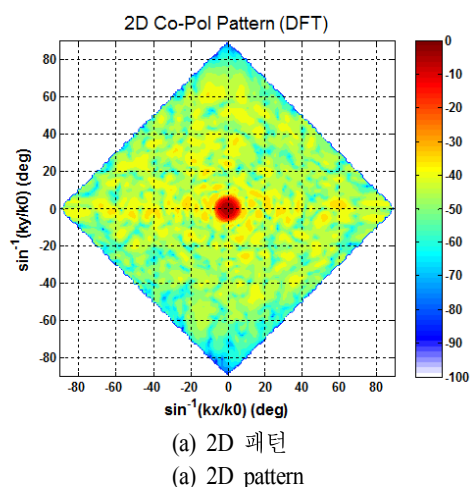


그림 18. 정렬 후 Taylor weighting 방사패턴
Fig. 18. Radiation pattern of aligned Taylor weighting beam.

을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 능동배열안테나 내의 배열오차를 야기하는 요소와 그 배열오차가 안테나 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 배열오차 요소에는 배열소자 간의 경로차에 의한 선형적인 요소와 배열소자 내부 능동소자들의 비선형성에 의해 발생하는 비선형적인 요소로 이루어지며, 그 성격에 따라 다른 방법으로 그 보정이 이루어져야 한다. 배열소자 자체의 비선형적 오차 요소와 선형적 오차 요소 중 배열 급전기에 의한 오차, TR 모듈 분배/결합기에 의한 오차는 시험실 내에서 보정이 가능하며, 실방사를 요하는 복사소자에 의한 오차 및 TR 모듈-복사소자 체결에 의한 오차는 근접 전계의 정렬 과정을 통해 보정이 가능하다. 이러한 보정은 규격 부엽준위에 따라 어느 단계까지 수행할 지 결정될 수 있다. 즉, 오차요소가 전체 부엽준위에 영향을 미치는 정도는 목표하는 부엽준위에 따라 달라지므로, 부엽준위 규격이 높아 배열소자 오차가 영향에 민감할 것으로 예상되는 경우에는 근접 전계를

통한 오차요소 보정이 반드시 요구되며, 부엽준위 규격이 다소 낮아 배열소자 오차에 둔감할 것으로 예상되는 경우에는 배열오차 분석을 통해 근접 전계 시험을 배제하여 시험단계를 효율화 할 수 있다.

References

- [1] M. E. Russell, "Future of RF technology and radars", *Radar Conference, IEEE*, pp. 11-16, Apr. 2007.
- [2] D. N. McQuiddy, R. L. Gassner, "Transmit/receive module technology for X-band active array radar", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, Issue 3, pp. 308-341, Mar. 1991.
- [3] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas, Radar Conference*, John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [4] Michael Hanczor, Mahesh Kumar, "12-kW S-band solid-state transmitter for modern radar system", *Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, Issue 12, pp. 2237-2242, Dec. 1993.

이 유 리



2005년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2007년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년~현재: LIG넥스원 선임연구원
 [주 관심분야] 반도체송수신모듈, 능동 위상 배열 레이더

김 중 필



1998년 2월: 경기대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년~2000년: 단암전자 주임연구원
 2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 반도체송수신모듈, 능동 위상 배열 레이더

강 연 덕



1993년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)

1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)

2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)

2000년~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더

김 선 주



1986년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)

1988년~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더