

보정 경로를 활용한 디지털 레이더의 능동 위상 배열 근접전계 수신시험

Near-Field Rx-Measurement for Active Phased Array of Digital Radar Using Calibration Path

유제우 · 채희덕 · 박종국 · 임재환 · 김덕환 · 진형석 · 김한생

Je-Woo Yu · Heeduck Chae · Jongkuk Park · Jae-Hwan Lim · Duckhwan Kim · Hyoung-Seog Jin · Han-Saeng Kim

요 약

본 논문에서는 디지털 수신 능력을 갖는 능동 위상 배열 안테나의 근접전계 수신시험 중, 수신 채널에 이득 및 위상 변화가 발생하더라도 보정 경로 및 수신 채널을 통과한 신호를 이용하여 수신 채널에 발생한 이득 및 위상 변화량을 추출하고, 이를 근접전계 데이터에 직접 보상하여 수신채널에 변화가 발생하지 않은 경우에 수행한 근접전계 시험과 동등한 결과를 획득할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 근접전계 수신시험을 위한 타이밍의 일정 구간에 보정 경로를 통하여 수신 채널의 상태를 감시하는 시간 구간을 추가하고 이를 보정하는 방식이다. 제안한 방법의 검증을 위하여 디지털 수신 능력을 갖는 X-대역의 능동 위상 배열 안테나와 평면형 근접전계 시험 시설을 이용하여 측정하였다. 수신 채널에 변화가 보정된 보상 패턴과 수신 채널에 변화가 없었던 기준 패턴과 비교할 때, 제안한 방법이 유효함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the method is proposed that the equivalent result can be obtained by compensating the variation of gain and phase in the comparison with the result of near-field measurement which is obtained in the steady state, although the gain and phase variation of rx-channels occurred in the near-field rx-measurement of digital active phased array antenna. The proposed concept has the time section for monitoring the state of the rx-channels through the calibration path in the measurement timeline, and is the method for compensating the variation of state. For validating the proposed method, the fabricated X-band digital active phased array antenna and the planar near-field measurement facility is utilized. The proposed method is validated in the comparison with the compensated pattern which the unstable state of rx-channels is calibrated and the reference pattern obtained under the steady state of the rx-channels.

Key words : Digital Radar, Digital Beam Forming, Active Phased Array, Near-Field Measurement

I. 서 론

능동 위상 배열 안테나는 장비의 안정성을 효율적으로 검증하기 위하여 무방향성 챔버로 구성된 시험시설을 통

한 근접전계 시험이 필수적이다. 이러한 능동 위상 배열 안테나의 근접전계 시험은 크게 송신 및 수신시험으로 분류된다. 송신 시험의 경우에는 공간상으로 방사된 고출력의 펄스 신호에 대해서 정확히 측정하여야 하기 때문

LIG넥스원(주)(LIGNex1)

· Manuscript received April 18, 2016 ; Revised May 30, 2016 ; Accepted June 16, 2016. (ID No. 20160418-045)

· Corresponding Author: Jongkuk Park (e-mail: jongsukpark@lignex1.com)

에 벡터 회로망 분석기를 이용하여 측정한다. 수신 시험의 경우에는 디지털 빔 형성을 위해 능동 위상 배열 안테나의 구조상 최종단이 디지털 수신기로 구성되어 있을 수 있으며, 이는 아날로그 신호가 디지털 및 광신호로 변환되는 형태이기 때문에 모든 주장비의 성능 검증을 위해서는 벡터 회로망 분석기를 이용하지 않고 데이터 저장 장치를 이용하여 원하는 타이밍에 데이터를 수집하고, 이를 가공하여 원전계(Far-Field) 수신 패턴으로 변환한다^[11~14].

이러한 능동 위상 배열 안테나의 근접전계 시험에서 검증되는 모든 주장비는 근접전계 시험 데이터 취득 시간동안에 안정화 상태가 유지 되어야 한다. 왜냐하면 원전계 패턴 시험에서는 측정되는 각도 별로 서로 영향을 주지 않고 독립적인 측정이 이루어지지만, 근접전계 패턴 시험에서는 특정 위치에서의 측정 데이터가 원전계로 변환 될 때 정의된 좌표계의 모든 각도의 패턴에 영향을 줄 수 있기 때문이다. 이러한 주장비의 안정화 상태를 검증하기 위해서 기존의 근접전계 시험 구성에서는 근접전계 패턴 시험의 사전/사후에 보정 경로를 통과하는 신호를 이용하여 시험 전/후의 수신 채널에 발생한 변화를 확인하고 근접전계 패턴 시험 시간 동안에 취득된 데이터의 유효성을 결정하였다. 또한, 근접전계 시험 데이터에서의 백프로젝션 및 변환된 원전계 패턴 형태 등으로도 유효성에 대해 확인할 수 있는 가능성은 있으나, T/R 모듈(Transmit/Receive Module)의 고장과 같이 변화가 매우 큰 경우가 아니면 근접전계 시험의 이상 여부를 정확히 판단하기는 어렵다. 따라서, 패턴 측정을 위한 근접전계 시험 데이터 취득 구간에서 특정 채널에 변화가 발생한 상태를 보다 효과적으로 감시할 수 있고, 이상 여부를 판단할 수도 있으며, 변환된 원전계 패턴 결과의 유효성까지 보장할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 디지털 수신 능력을 갖는 능동 위상 배열 안테나의 근접전계 수신시험에서 보정 경로를 활용하여 모든 채널의 이득 및 위상 변화를 감시하고 변화량을 추출하여 원전계 패턴 변환을 위한 근접전계 시험 데이터를 보상할 수 있는 방법을 제안하였고, 이미 개발된 X-대역 능동 위상 배열 안테나에 적용하여 검증하였다. II 장에서는 기존의 근접전계 수신시험 구성 및 신호흐름과 발생할 수 있는 문제점에 대해서 상세히 기술하였고, III

장에서는 제안된 근접전계 수신시험 구성 및 보상방법을 서술하였다. IV 장에서는 제안한 방법이 유효함을 확인하기 위한 시험 결과를 제시하였으며, V 장에서는 결론으로 마무리하였다.

II. 근접전계 수신시험

그림 1은 디지털 빔 형성 능동 위상 배열의 근접전계 수신시험을 위한 시험구성 및 신호흐름도를 보여준다. 일반적으로 근접전계 수신시험은 주장비에서 발생시킨 연속(CW) 신호를 근접전계 프로브를 통하여 주장비에 입력시켜 각 수신 채널마다의 특성을 측정한다. 주장비인 파형발생기에서 발생된 신호를 주파수상향변환기를 통하여 운용주파수로 상향변환시키고 이를 근접전계 시설의 케이블 및 프로브로 입력시킨다. 여기에서 프로브의 출력은 수신채널의 동적범위를 고려하여 알맞은 전력 레벨을 산정하고 이를 유지시켜주기 위해서 측정되는 주파수 대역에 대해 일정한 감쇄 특성을 갖는 감쇄기를 이용한다. 한편, 프로브를 통해 출력된 신호는 주장비의 안테나를 통해 모든 수신채널마다 입력되며, 이를 정의된 근접전계 측정 위치마다 프로브를 이동시켜 측정/저장하고, 데이터를 변환하여 최종적인 원전계 패턴을 계산한다.

그림 2는 주파수 변경과 측정이 안정적으로 이루어 질 수 있는 시간 자원 하에 정해진 주파수 시나리오 개수 f_n 을 선정하고 프로브의 각 위치 p_m 마다 선정된 주파수 시나리오를 측정하는 기존의 근접전계 수신시험의 타이밍 개념도를 보여준다. 요구되는 주파수 대역의 원전계 패턴 특성을 모두 검증하기 위하여 주파수 대역의 샘플링 개수를 선정하고 측정의 효율성을 위하여 프로브 스캔 위치마다 시험 가능한 주파수 시나리오의 최대 개수를 선정한다. 즉, 요구되는 측정 위치마다 가용한 주파수 시나리오를 측정하여 수행하는 근접전계 스캔시간 내에 최대한 많은 수의 주파수 특성인 NF_{avg} 를 측정한다.

이러한 수신 패턴을 추출하기 위한 기존의 근접전계 시험에서는 안테나 전체 면에 대한 근접전계 시험 데이터의 유효성을 판단하기 위해서 사전/사후에 보정경로를 통한 수신 채널 점검 시험을 수행하며, 사전/사후 점검 시험의 데이터를 비교하여 변화량이 일정 기준 수준 이내 일 경우에만 근접전계 시험 데이터가 유효하다고 판단하

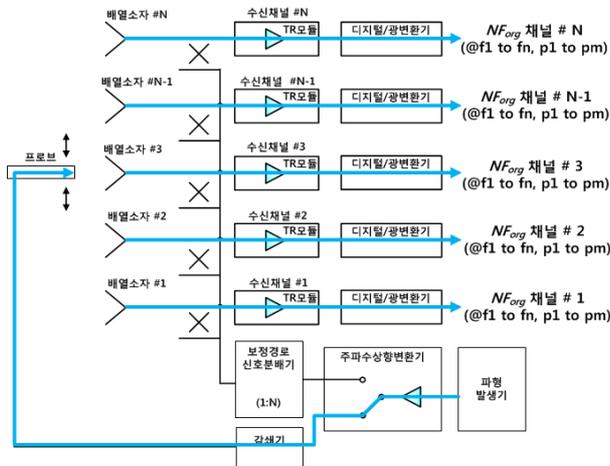


그림 1. 근접전계 수신시험의 블록도 및 신호흐름도
 Fig. 1. The block diagram and signal flow of the near-field rx-measurement.

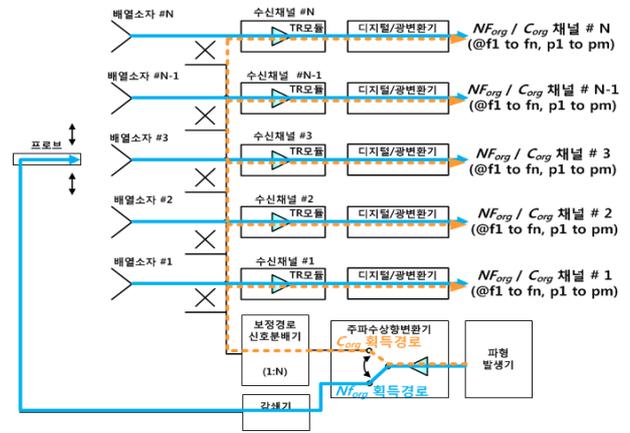


그림 3. 제안한 근접전계 수신시험의 블록도 및 신호흐름도
 Fig. 3. The block diagram and signal flow of the proposed near-field rx-measurement.

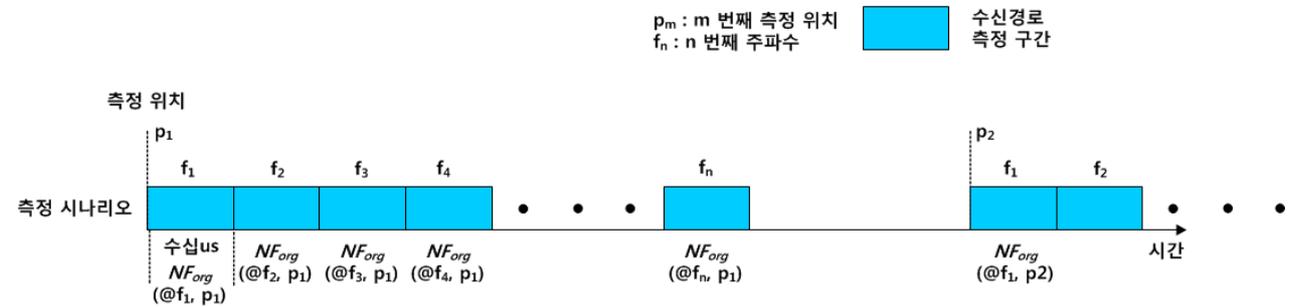


그림 2. 근접전계 수신시험의 타이밍 개념도
 Fig. 2. The timeline concept of the near-field rx-measurement.

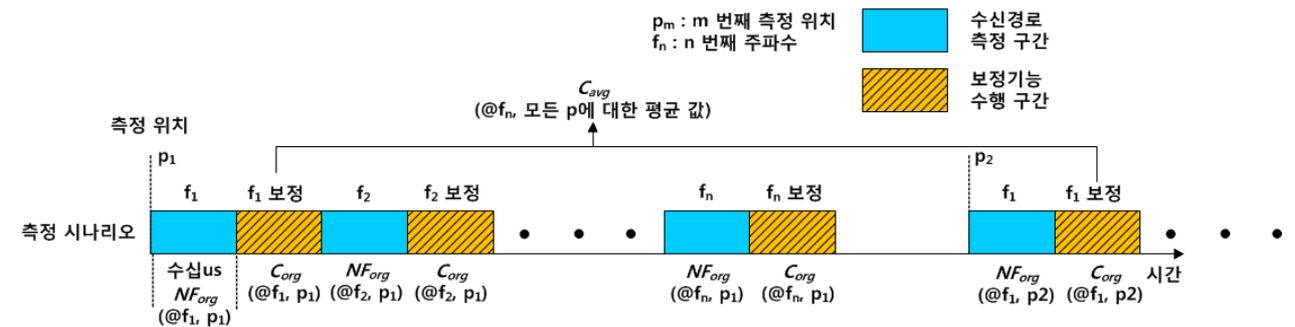


그림 4. 제안한 근접전계 수신시험의 타이밍 개념도
 Fig. 4. The timeline concept of the proposed near-field rx-measurement.

였다. 하지만, 특정 채널의 이득 및 위상이 지속적으로 변화하는 상태에서는 근접전계 시험 자체를 수행할 수 없

으며, 특히, 변환된 원전계 패턴의 이득 및 형태에 크게 영향을 주지 않는 경우에 발생한 특정 채널의 이득 및 위

상 변화는 확인할 수 없다.

Ⅲ. 제안한 근접전계 수신시험

3-1 시험구성 및 방법

그림 3은 제안한 근접전계 수신시험의 블록도 및 신호 흐름도를 보여주며, 그림 4는 제안한 근접전계 수신시험 타이밍 개념도를 보여준다. 그림 1과 그림3, 그림2와 4를 비교해 볼 때, 기존의 근접전계 수신시험에서는 파형발생기에서 발생시킨 신호를 프로브로 입력시키고, 이를 각 수신 채널마다 입력시키기 때문에 근접전계 측정 데이터 수집 시에 발생한 변화를 확인하기 어렵다. 하지만, 제안한 근접전계 수신시험 구성과 같이 주장비에서 제공하는 보정경로를 이용하면 특정 프로브 위치에서 각각의 주파수 측정 시나리오 마다 수십 us 이내에 수신채널의 변화를 감지하고 변화량을 추출하여 근접전계 측정 데이터에 직접 보상함으로써, 근접전계 시험 중에 발생할 수 있는 수신 채널의 모든 변화를 보상한 원전계 패턴을 추출해 낼 수 있다.

3-2 보정기능을 이용한 보상방법

보정경로를 통하여 얻어진 신호를 이용하여 근접전계 데이터를 보상하는 방법은 식 (1) 및 (2)와 같다.

$$NF_{com}(f_n, p_m) = \frac{NF_{org}(f_n, p_m) C_{avg}(f_n)}{C_{org}(f_n, p_m)} \quad (1)$$

$$C_{avg}(f_n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M C_{org}(f_n, p_m) \quad (2)$$

여기에서 f_n 은 임의의 주파수 시나리오 개수, p_m 은 임의의 근접전계 데이터 취득 위치, NF_{com} 은 수신채널별 변화량이 보상된 근접전계 시험 데이터, NF_{org} 는 수신 경로 측정구간에서 시험된 근접전계 데이터, C_{org} 는 각 프로브 위치별, 주파수별 보정경로를 통한 수신채널 특성 측정 데이터, C_{avg} 는 특정 주파수별로 취득된 전체 C_{org} 의 평균값, M 은 근접전계 데이터 취득을 위한 전체 측정 위치의 개수이다. NF_{com} 은 C_{avg} 을 보상을 위한 기준으

로 가정하고 C_{org} 와 비교하여 변화량을 추출한 후, 이에 대한 역수를 NF_{org} 에 보상함으로써 얻어 낼 수 있다. 모든 변수들은 복소수이며 항온/항습이 유지되는 근접전계 시험시설이므로 수신채널의 변화를 제외한 보정경로만의 변화량은 없다고 가정하였다.

Ⅳ. 제안한 방법 적용 유무에 따른 시험 결과

제안한 방법을 검증하기 위하여 이미 개발된 X-대역 능동 위상 배열 안테나에 적용하여 근접전계 시험을 수행하였다. 이는 디지털 빔 형성 능력을 갖는 능동 위상 배열 안테나로서 근접전계 수신시험에서 각 채널별로 수신 패턴을 측정하고, 최종 합성 패턴은 수학적 연산을 통하여 추출한다. 본 논문에서는 각 채널의 이득 및 위상의 변화에 따른 패턴의 변화를 판단하기 위해서 각 수신 채널에서 측정된 방위각 패턴에 대해 분석하였다. 이는 검증을 위해 활용된 능동 위상 배열 안테나가 선 배열 형태를 고각방향으로 적층한 구조로 단독 수신 채널의 원전계 패턴 빔 폭 특성이 고각에서는 매우 넓지만, 방위각에서는 매우 좁기 때문에 고각 방향으로 스캔하여 측정된 근접전계 데이터의 변화에 따른 방위각 패턴의 변화를 보다 명확히 확인할 수 있기 때문이다. 그림 5와 6은 근접전계 수신시험에서 프로브 위치마다의 수신 채널 이득 및 위상 변화량을 보여준다. 각각의 이득 및 위상 변화는 가장 첫 번째 측정 위치의 절대값으로 정규화하였다. 또한, 모든 수신채널 중 일부의 결과만 선택되었다. 그림 5와 6에서 확인할 수 있듯이, 9,000번째 위치부터 13,000번째 위치 사이에서 다른 수신 채널과 비교해볼 때, 13번 및 18번 수신채널의 이득 및 위상에 큰 변화가 발생한 것을 확인할 수 있다.

13번 채널은 이득이 최대 약 1 dB 변화하고, 위상이 최대 약 20 도 변화하였다. 또한, 18번 채널은 이득이 최대 약 2 dB, 위상이 최대 약 30 도 변화하였다. 이러한 변화는 특히 패턴에 큰 영향을 미치는 부분의 측정 위치에서 발생하였으며, 이는 변환되는 원전계 패턴에 직접적으로 영향을 줄 수 있다. 그림 7과 8은 가장 많은 변화가 발생했던 18번 수신채널에서 측정된 방위각 패턴의 크기와

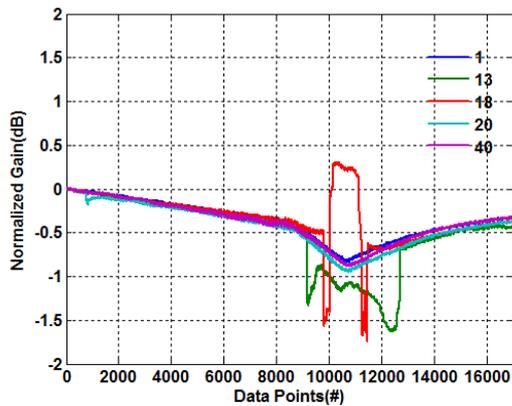


그림 5. 근접전계 시험 동안의 수신채널 이득 변화
Fig. 5. The gain variation of rx-channels during the near-field measurement.

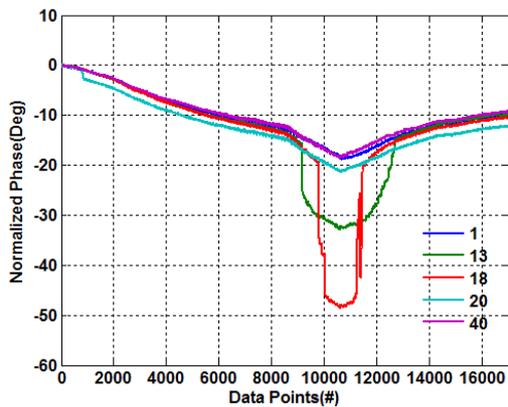


그림 6. 근접전계 시험 동안의 수신채널 위상 변화
Fig. 6. The phase variation of rx-channels during the near-field measurement.

위상의 형태를 비교하였다. 크기/위상은 주 빔의 최대 크기 지점에서 모두 정규화하였다. 여기에서 Ref 패턴은 수신채널에 변화가 거의 없는 상황에서 측정된 기준 패턴이며, CompOn 패턴은 그림 5와 6의 상태에서 측정하고 제안한 보상방법을 적용한 경우이다. CompOff 패턴은 CompOn과 동일한 상황이나 제안된 보상방법을 적용하지 않은 경우의 원전계 패턴이다. 제안한 보상방법을 적용한 패턴의 형태가 기준 패턴과 매우 유사한 형태를 갖는 것을 확인할 수 있으며, 특히 주 빔 근처의 위상 형태를 비교해 볼 때, 보다 기준패턴에 유사한 형태를 갖는 것

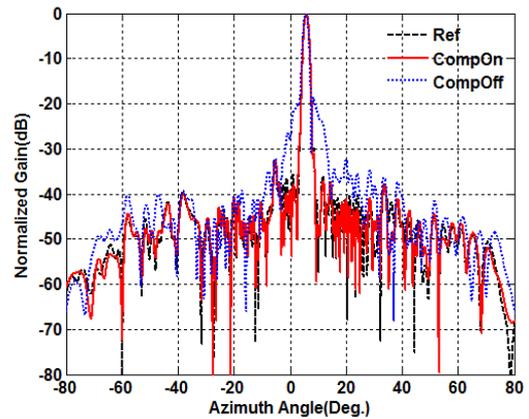


그림 7. 방위각 측정 패턴 이득 비교 @수신채널 18번
Fig. 7. The gain comparison of measured azimuth patterns @ rx-channel #18.

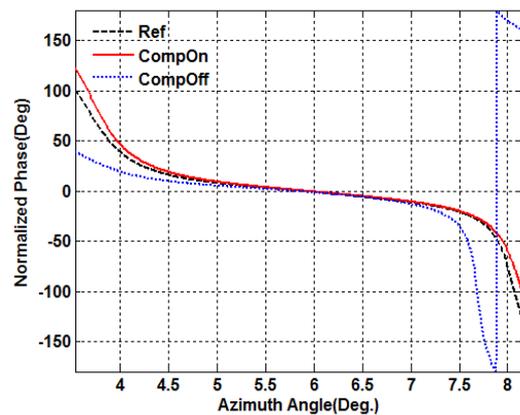


그림 8. 방위각 측정 패턴 위상 비교 @수신채널 18번
Fig. 8. The phase comparison of measured azimuth patterns @ rx-channel #18.

을 확인할 수 있다. 그림 9와 10은 13번 수신채널에서 측정한 방위각 패턴의 크기와 위상의 형태를 보여준다. 그림 7과 8에서의 비교 결과와 유사하게 보상한 패턴이 기준패턴에 매우 유사한 형태를 갖는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 디지털 빔 형성 능력을 갖는 능동 위상 배열 안테나의 수신시험 중 수신채널의 이득 및 위상 변화가 발생하더라도 이를 보상하고 유효한 시험결과를

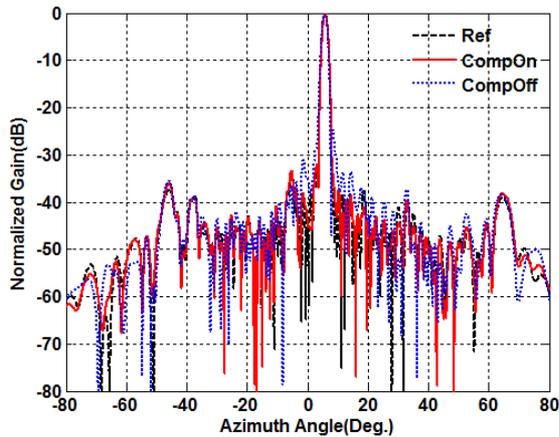


그림 9. 방위각 측정 패턴 이득 비교 @수신채널 13번
 Fig. 9. The gain comparison of measured azimuth patterns @ rx-channel #13.

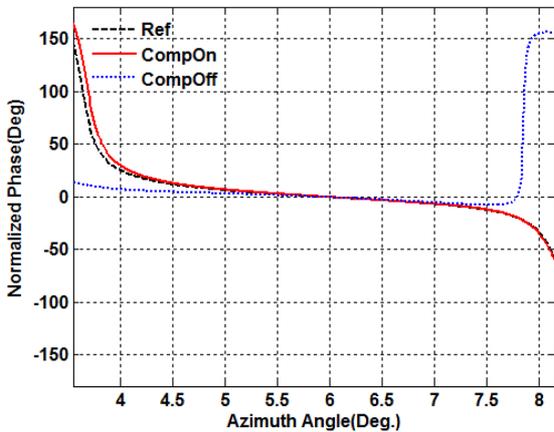


그림 10. 방위각 측정 패턴 위상 비교 @수신채널 13번
 Fig. 10. The phase comparison of measured azimuth patterns @ rx-channel #13.

추출할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 레이더의 실 운용 중 수신채널 보정 방법으로 사용되고 있는

보정 개념을 이용하였다. 기존의 근접전계 수신시험의 경우에는 근접전계 데이터 취득 중의 변화를 판단하여 유효성을 판단할 수 없었다. 그러나, 제안한 방법은 근접전계 시험 중에 보정경로를 활용하여 수신채널을 통과하는 타이밍을 추가하고 모든 수신채널의 변화를 효과적으로 감시하여 수신채널의 정확한 변화량을 추출할 수 있었다. 또한, 이를 근접전계 시험 데이터에 직접 보상함으로써 수신채널의 변화가 없었던 기준 패턴과 매우 유사한 보상 패턴을 추출할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 제안한 방법은 향후 디지털 빔 형성 능력을 갖는 능동 위상 배열 레이더의 수신 성능 검증에 매우 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단한다.

References

- [1] E. Grouud, C. Mehl, C. Renard, E. Semmler, and K. Weidmann, "Design and measurement of an active array antenna for an airborne X-Band SAR/MTI radar", *Proceedings of The European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP 2006)*, Nice, France, Nov. 2006.
- [2] W. Haselwander, M. Uhlmann, S. Wustefeld, and M. Bock, "Measurement on an active phased array antenna on a near-field range and an anechoic far-field chamber", *31st European Microwave Conference, London*, Sep. 2001.
- [3] J. J. H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 36, pp. 746-753, Jun. 1988.
- [4] 채희덕, 김한생, 이동국, 정명득, 박종국, "근접 전계 시험 시설을 이용한 능동 위상 배열 안테나 송신 빔 패턴 측정", *한국전자과학회논문지*, 22(12), pp. 1155-1163, 2011년 12월.

유 제 우



2005년 8월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
 2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2008년 2월~현재: LIG넥스원 레이더연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 레이더 시스템

임 재 환



2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2006년 2월~2008년 1월: 삼성전자 무선사업부
 2008년 2월~현재: LIG넥스원 레이더연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계/ 능동 위상 배열 레이더 시스템

채 희 덕



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2007년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

김 덕 환



2007년 2월: 경희대학교 전자정보학부 (공학사)
 2007년 2월~현재: LIG넥스원 레이더연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] 디지털하드웨어 설계, 능동 위상 배열 시스템 등

박 중 국



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2001년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

진 형 석



2000년 8월: 광운대학교 전파공학 전공 (공학석사)
 2000년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원
 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계/ 능동 위상 배열 레이더 시스템 및 TRM

김 한 생



2002년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더 시스템, 안테나시스템, 디지털 회로 설계