

백 프로젝션 측정을 이용한 타일형 위상배열안테나의 자동보정 방법

Automatic Calibration Method of Tile-Type Phased-Array Antenna Using Back-Projection Measurement

김기태 · 박상혁 · 서종우* · 주태환*

Ki-Tae Kim · Sang-Hyuk Park · Jong-Woo Seo* · Tae-hwan Joo*

요 약

본 논문에서는 Ku 대역 위성통신용 송신 위상배열안테나를 구성하는 타일형태의 부배열에 대한 자동 보정 방법과 시험 결과에 대해 기술하였다. 위상배열안테나의 보정을 위하여 평면형 근접전계 측정장치에서 제공하는 개구면 전계분포를 이용하여 배열안테나 개구면의 위상 편차를 최소화하는 방법을 사용하였다. 근접전계 측정장치와 타일형 위상배열안테나의 제어보드를 연동하여 보정과정이 자동으로 진행되도록 하였으며, 자동보정을 종료하기 위한 조건으로 배열안테나의 이득, 빔폭 및 지향방향 등을 입력할 수 있도록 하였다. 제안된 방법의 검증에 사용된 타일형 송신 위상배열안테나는 Ku 대역에서 동작하는 8×8 배열의 마이크로스트립 패치안테나로서 22.5° 단위의 phase shifter를 갖고 있다.

Abstract

In this paper, we describe an automatic calibration method and test results for a tile-type subarray consisting of a Tx phased-array antenna for Ku-band satellite communication. For array antenna calibration, the aperture electric field distribution, which is supported by the planar near-field measurement system, is used to minimize the phase variations across the array aperture. All the calibration procedures are performed automatically through interoperation between the planar near-field measurement system and array antenna control board. As conditions for ending the automatic calibration process, the far-field gain, beam width, and pointing direction can be used. The tile-type Tx phased-array antenna used for verification of the proposed method is an 8×8 array of microstrip patch antennas operating in the Ku band and having a phase shifter with 22.5° resolution.

Key words: Phased Array Antenna, Tile Type, Tx Tile, Auto Calibration, Back Projection

I. 서 론

전자적 주사 배열(ESA: electronically scanned array) 안테

나는 다수의 복사 소자사이의 위상을 변화시켜 안테나의 지향방향이나 복사패턴을 변화시킬 수 있는 안테나로서, 위상 변화의 수단으로 위상천이기(phase shifter), 시간 지

「이 연구는 국방과학연구소가 지원하는 사업의 일환으로 수행되었음.」

MTG(Microwave Technologies Group)

*국방과학연구소 제2기술연구본부(The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received October 27, 2020 ; Revised November 15, 2020 ; Accepted December 11, 2020. (ID No. 20201027-091)

· Corresponding Author: Jong-Woo Seo (e-mail: jwseo@add.re.kr)

연 소자(time delay device) 혹은 주파수 변환에 사용되는 국부발진신호(local oscillator)의 위상변화 등이 사용된다. ESA는 전자적인 제어수단을 사용하기 때문에 고속의 빔형성이 가능하다는 장점이 있지만, 배열안테나를 구성하는 복사소자의 각 RF 경로에 대한 보정이 필요하며, 복사소자의 수가 증가할수록 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 또한 각각의 배열소자에 종속된 RF 경로의 불일치 특성뿐만 아니라, 배열 소자간의 상호 간섭(mutual coupling) 및 가장자리 효과(edge effect)를 포함하여 배열안테나를 구성하는 구조물 등의 영향으로 인해 안테나 소자 자체도 동일한 특성을 가지지 못하기 때문에 위상배열안테나의 정확한 보정을 위해서는 안테나를 포함한 시스템 보정이 이루어져야 한다.

일반적인 위상배열안테나의 보정 방법으로는 park & probe 방법^[1], 근접전계 측정 후 백프로젝션(back projection)을 사용하는 방법, 근(원)전계에서의 복사소자 패턴의 위상 비교 방법^[2] 등이 있다. 언급된 보정방법을 이용하여 이루어지는 대부분의 위상배열안테나 보정작업은 측정과 보정 데이터 추출의 반복적인 과정을 통하여 이루어지기 때문에 보정시험에 숙련된 인력을 투입하여 장시간에 걸쳐 이루어질 수밖에 없다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 근접전계 측정시설과 연동하여 위상배열안테나의 보정데이터를 자동으로 추출할 수 있는 방법을 제안하고, 제안된 방법을 구현하여 위상배열안테나의 보정 성능을 검증하였다. 위상배열안테나의 보정을 위한 방법으로 근접전계 측정을 통한 back projection 방법을 사용하였으며, 시스템적인 자동보정을 위하여 필요한 현재 단계에서의 보정데이터 추출, 보정상태를 평가하여 보정작업을 지속할지의 여부에 대한 판단 방법 및 시스템 구성 등을 2장에 제시하도록 한다. 3장에서는 제안한 자동보정 방법의 검증에 사용된 Ku 대역의 평면형 8×8 위상배열안테나와 코어칩 사양 및 시험 결과에 대해 기술하였으며, 마지막 장에서는 결론으로 마무리하였다.

II. 자동보정 시스템 구성 및 동작

일반적인 근접전계 측정시스템을 그림 1에 나타내었

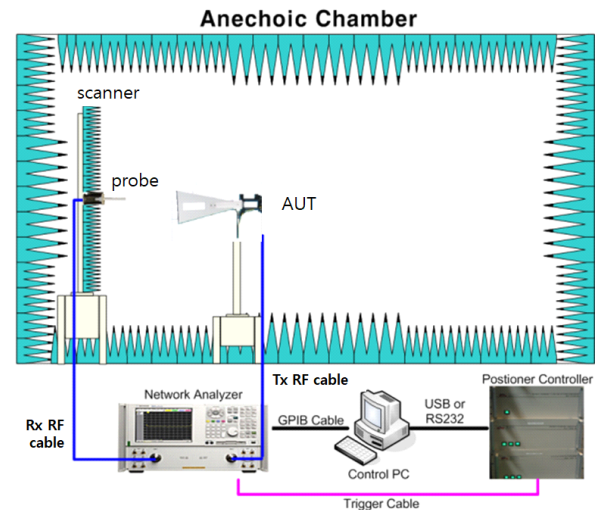


그림 1. 근접전계 측정시스템

Fig. 1. Near-field measurement system.

다. AUT(antenna under test), RF 프로브, 프로브를 움직일 모터, 안테나와 프로브의 RF 특성을 측정할 회로망 분석기, 각 구성품을 제어할 PC와 소프트웨어로 구성된다. 근접전계 측정시스템과 연동하여 위상배열안테나의 자동보정을 수행하기 위한 시험 구성도를 그림 2에 나타내었다. 근접전계 측정시스템은 측정하고자 하는 안테나의 개구면으로부터 $3\lambda \sim 5\lambda$ (측정주파수의 자유공간 파장) 사이의 이격 거리에 위치하는 도파관 프로브를 이용하여 안테나 개구면 주위의 근접전계를 측정하고, 신호처리하여 안테나의 원거리에서 이득, 안테나 패턴 및 안테나 개구면에서의 전계분포를 제공한다.

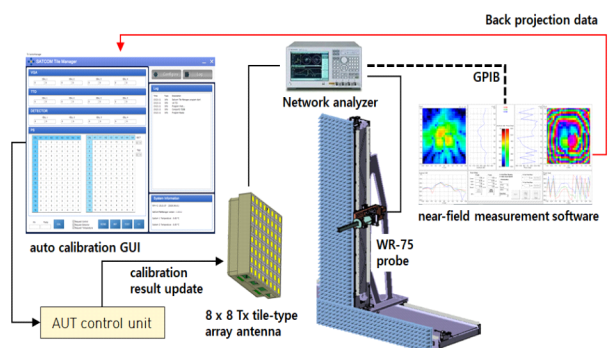


그림 2. 자동보정 시스템 구성도

Fig. 2. Test setup configuration for auto calibration.

그림 2에서 자동보정 알고리즘이 탑재된 GUI는 근접전계 측정시스템에서 제공받은 개구면 전계분포로부터 AUT의 현재 보정상태를 판단하고, 새로운 보정데이터를 산출하여 AUT의 제어부로 전달하는 역할을 한다. 근접전계 측정시스템에서 제공하는 개구면 전계분포는 안테나 측정 셋업시 설정한 도파관 프로브의 원점으로부터의 이차원적 옅썰좌표와 해당좌표에서 계산된 전계의 크기와 위상값으로 이루어져 있다. N개의 복사소자로 이루어진 위상배열안테나의 원하는 보정값을 \underline{E}_{wanted}^T , 현재 측정된 개구면의 전계분포를 $\underline{E}_{measured}^T$ 라 하고, 다음과 같이 표현하였다.

$$\underline{E}_{wanted}^T = \begin{bmatrix} E^w(x_1, y_1), E^w(x_2, y_2), \\ \dots E^w(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{E}_{measured}^T(k) = \begin{bmatrix} E_k^m(x'_1, y'_1), E_k^m(x'_2, y'_2), \\ \dots E_k^m(x'_M, y'_M) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 k 는 측정 횟수를 의미하며, 안테나간의 상호결합에 의하여 개구면 전계분포와 각 안테나소자의 채널 특성간에 완전한 1:1 매칭 관계가 성립하지 않기 때문에 반복적으로 측정하여 최적의 보정데이터를 추출하여야 한다. 근접전계 측정장치는 근거리에서 등간격으로 샘플링된 근접전계 측정결과를 FFT(fast Fourier transform) 및 IFFT(inverse fast Fourier transform)하여 원거리 안테나 패턴 및 개구면 전계분포를 추출하기 때문에 전계분포값이 등간격으로 산출된다. 따라서 식 (1)로 주어진 목표 개구면 전계분포(\underline{E}_{wanted}^T)의 입력좌표(x_n, y_n)와 식 (2)로 주어진 측정된 개구면 전계분포($\underline{E}_{measured}^T$)의 측정좌표(x'_m, y'_m)는 배열소자의 간격과 측정 간격의 차이 등으로 일치하지 않을 수 있다. 따라서 목표 개구면 전계분포의 좌표와 측정된 개구면 전계분포 입력 좌표의 일치를 위해 입력좌표 주위의 측정좌표에서의 전계분포로부터 이중선형보간법(Bilinear interpolation)을 이용하여 계산할 수 있으며, 계산된 입력좌표에서의 k 번째 측정 개구면 복소 전계분포는 식 (3)과 같이 표시된다.

$$\hat{\underline{E}}_{measured}^T(k) = \begin{bmatrix} \hat{E}_k^m(x_1, y_1), \hat{E}_k^m(x_2, y_2), \\ \dots \hat{E}_k^m(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

입력된 목표 안테나 개구면 전계분포를 충족하기 위한 보정데이터는 식 (4)와 같이 식 (1)과 식 (3)의 벡터 요소별 나눗셈으로 추정하고, k 번째 측정에서의 오차는 계산된 N개의 보정데이터의 RMS(root mean square)로 정의하였다. 식 (4)으로 주어지는 보정데이터는 목표 개구면 전계분포와 k 번째 측정된 개구면 전계분포간의 차이를 보상하기 위한 제어 변화량으로 해석될 수 있고, 보정데이터의 갱신이 정상적으로 이루어질 경우 측정 횟수가 증가할수록 식 (5)로 나타낸 RMS오차는 감소하게 된다.

$$\begin{aligned} \hat{\underline{E}}_{cal}^T(k) &= [c_1(k), c_2(k), \dots, c_N(k)] \\ &= \begin{bmatrix} \frac{E_k^w(x_1, y_1)}{\hat{E}_k^m(x_1, y_1)}, \frac{E_k^w(x_2, y_2)}{\hat{E}_k^m(x_2, y_2)}, \\ \dots, \frac{E_k^w(x_N, y_N)}{\hat{E}_k^m(x_N, y_N)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\Delta(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i(k) - 1)^2} \quad (5)$$

만약 AUT에 각 RF 경로의 위상만 제어할 수 있는 경우에는 식 (4)에서 각 벡터요소의 위상만을 추출하여 AUT로 전송하도록 한다.

반복적으로 수행되는 자동보정 과정을 종료하기 위한 조건으로는 식 (5)로 주어지는 RMS 오차에 적절한 임계값을 부과하는 방법 또는 근접전계 측정결과로부터 산출된 원거리 빔 패턴의 특성이 될 수 있는데, 본 논문에서는 안테나 원거리 빔 패턴의 빔 지향 오차 및 빔 폭이 사용되었다. 각 보정 회차마다 근접전계 측정장치에서 GUI로 전달되는 원거리 빔 패턴 정보를 판단하여 목표한 규격에 도달하는 경우, 자동보정 과정을 종료하도록 하였다.

그림 3에 전술한 근접전계 측정시스템을 이용한 자동보정 과정을 나타내었다. 근접전계 측정장치가 자동보정 GUI로 측정 준비 상태를 요구하면 자동보정 GUI가 AUT로 초기 제어데이터를 전송하고, AUT로부터 제어 완료에 대한 응답을 받으면 근접전계 측정시스템으로 측정 시작을 알려 근접전계 측정을 수행한다. 근접전계 측정시스템에서는 수행된 근접전계 측정 데이터를 토대로 원거리 패턴 및 개구면 전계분포를 계산하여 원거리 패턴 정보로부터 자동보정 과정의 지속 여부를 판단하게 된다. 추가적인 보정이 필요하다고 판단되면 개구면 전계분포가

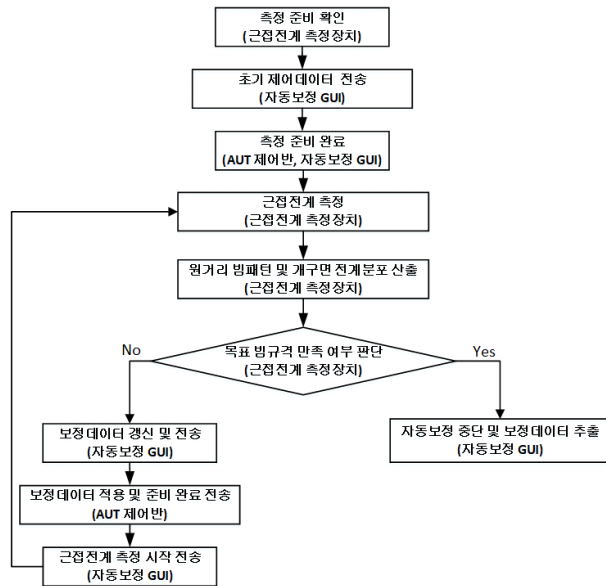


그림 3. 근접전계 측정시스템을 이용한 위상배열안테나의 자동보정 절차

Fig. 3. Auto calibration process using a near field measurement system.

자동보정 GUI로 전송되고, 자동보정 GUI에서는 식 (4)를 이용하여 보정데이터를 갱신하고 AUT로 전송하여 자동보정 과정을 되풀이하고, 목표 조건을 만족하면 자동보정 과정을 종료하고 최종 보정데이터를 추출하여 저장하도록 하였다.

III. 자동보정 시험 및 결과

제안한 자동보정 방법을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 시험구성도에서 AUT로 그림 4에 나타난 500 MHz 주파수대역폭을 가진 Ku 대역의 8×8 타일형 송신위상배열 안테나^[3]를 사용하였다. 수직/수평의 이중편파를 모두 지원할 수 있도록 설계된 AUT는 안테나 소자간의 간격은 10.57 mm이고, 각각의 RF 경로에 삽입된 128개 위상천이기의 분해능은 22.5°이며, 광대역 동작에 따른 주파수별 beam squint를 억제하기 위하여 4×4 부배열마다 TTD(true time delay) 소자가 존재하지만, 본 시험에서 TTD 소자의 제어는 생략하였다.

먼저 참고문헌^[4]에 주어진 평면형 array factor 계산방법을 사용하여 AUT로 사용된 8×8 배열안테나에 대한

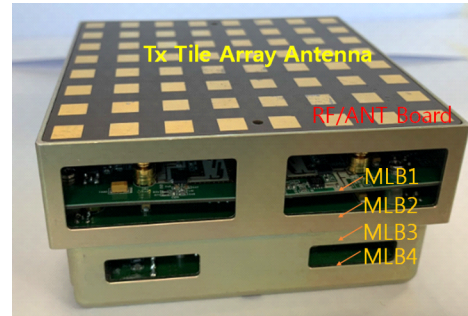


그림 4. 타일형 송신위상배열 안테나

Fig. 4. Tile type Tx phased array antenna.

broadside로 지향할 경우의 array factor를 모의분석하여 그림 5에 도시하였다. AUT로 사용된 배열안테나의 가로축과 세로축의 안테나 소자간 이격거리가 10.57 mm로 동일하기 때문에 방위각/양각 방향의 array factor는 동일하다. 그림 5에서와 같이 Array factor에 대한 모의분석 결과, 중심주파수(f_c)에서 빔폭은 약 12.8°이고, 첫 번째 부엽레벨은 -12.8 dBc인 것으로 나타났다. 본 시험에서는 AUT로 사용된 위상배열안테나의 위상천이기 분해능이 22.5°로 비교적 제어 간격이 넓으며, 이득제어 수단이 없어 발생하는 안테나 소자간의 상대적인 경로 이득의 불균형을 고려하여 broadside 빔지향 방향에 대한 자동보정 완료 조건을 표 1과 같이 설정하였다.

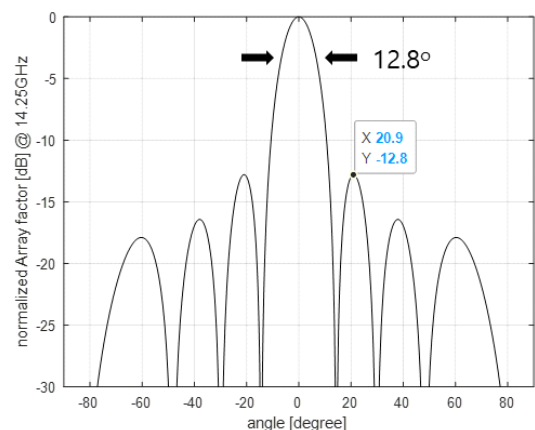


그림 5. Broadside 지향시 14.25 GHz에서 AUT의 정규화된 array factor

Fig. 5. Broadside direction array factor of AUT at f_c .

표 1. 자동보정 완료 조건

Table 1. Auto calibration target condition.

Auto calibration target specification	
Beam pointing error (broadside)	$< \pm 2^\circ$
Beam width	$< 14^\circ$

시험에 사용된 AUT가 능동위상배열안테나로서 안테나와 위상천이기를 포함한 능동소자부가 하나의 PCB에 집적된 형태이며, 타일형 위상배열안테나를 구성하는 64개의 능동소자부의 이득이 타일별로 동일하지 않기 때문에 자동보정 완료 조건에서 안테나 이득은 생략하였다.

그림 3에 제시된 근접전계 측정시스템을 이용한 위상배열안테나의 자동보정 절차를 구현하기 위하여 근접전계 측정시스템의 소프트웨어와 자동보정 GUI, 그리고 AUT 제어반 간의 신호 흐름도를 그림 6과 같이 구현하였으며, 메시지 전달은 UART 통신을 이용하였다. 그림 6에서 근접전계 측정 소프트웨어로부터 자동보정 GUI에 전달되는 `measure_report` 메시지는 식 (2)에 해당하는 근접전계 측정시스템에서 측정된 개구면 전계분포를 포함하고, 자동보정 GUI에서 AUT 제어부로 전달하는 `Cooked_measure_report` 메시지에는 식 (4)에 해당하는 갱신된 보정데이터가 포함된다.

그림 6의 메시지 흐름도에 나타나는 메시지 중에서 `measure_report`의 통신 프로토콜을 그림 7에 나타내었다. 시험에 사용된 AUT가 수직/수평의 이중 선회 편파를 지원하기 때문에 메시지 프로토콜의 `payload`에는 수직(V)/

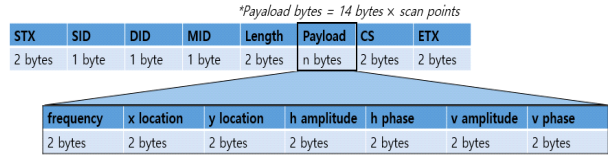


그림 7. `measure_report` 메시지의 데이터 프로토콜
Fig. 7. Data protocol of `measure_report` message.

수평(H) 편파에 대한 개구면 전계의 크기와 위상을 모두 전달할 수 있도록 하였다. 전체 `payload`의 길이는 근접전계 측정결과를 안테나 개구면으로 백 프로젝션하는 과정에 필요한 IFFT(inverse fast Fourier transform)의 설정에 따라 달라지므로 그림 7과 같이 `Length`를 추가하여 가변될 수 있도록 정의하였다.

그림 8은 근접전계 측정장치의 소프트웨어에 구현된 AUT 정보와 자동보정 중단조건을 설정하는 화면을 나타내고 있다. 화면의 좌측에서 안테나 개구면의 크기, 유효 안테나 패턴 각도 및 AUT와 도파관 프로브간의 거리와

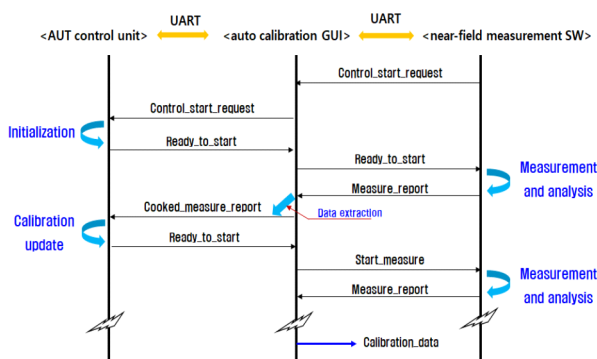


그림 6. 자동보정을 위한 시험 구성요소 간의 메시지 흐름도

Fig 6. Message flow between test components.

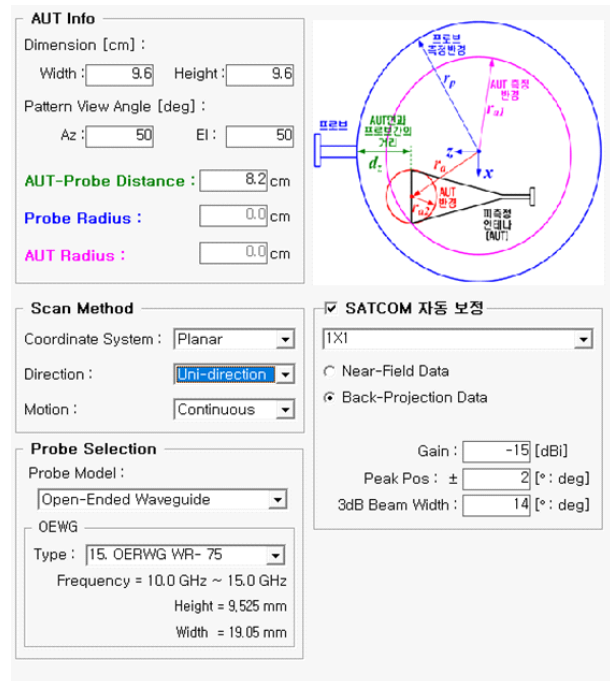


그림 8. 근접전계 측정장치 소프트웨어에 구현된 자동보정 목표규격 설정 화면

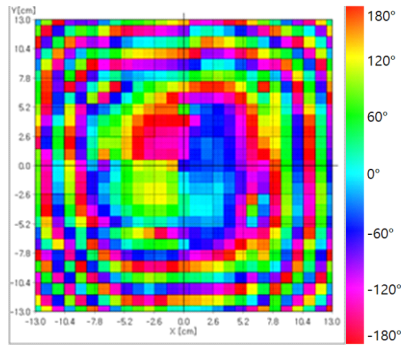
Fig. 8. GUI of Near field measurement system including the target specification of automatic calibration process.

근접전계 측정에 사용되는 도파관 프로브의 종류 등을 설정할 수 있고, 화면의 우측에 자동보정의 완료 조건으로 안테나 이득, 빔 지향 방향 오차 및 3 dB 빔폭을 입력할 수 있도록 하였다.

그림 2와 같이 시험 환경을 구성하고 그림 8과 같은 설정을 입력한 후 스캔 영역을 안테나 중심으로부터 좌우 26 cm, 상하 26 cm, 측정 간격은 1 cm를 설정하여 Ku 대역의 8×8 위상배열안테나의 broadside 지향에 대한 자동보정을 수행하였다. 위상배열안테나의 지향 방향이 broadside일 경우, 식 (1)로 주어지는 목표 개구면 전계분포의 구성요소가 모두 동위상이 되어야 하므로 64×1의 단위벡터로 설정하였다. 그림 9에 본 논문에서 제안한 자동보정

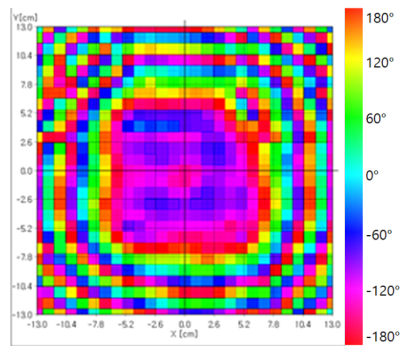
방법을 사용하여 8×8 위상배열안테나의 수직편파에 대한 보정을 수행한 결과 얻어진 보정 전과 후의 근접전계에서 측정된 위상 분포를 나타내었다. AUT의 500 MHz 주파수대역 내에서 가장 낮은 동작 주파수(f_l), 중심주파수(f_c) 및 가장 높은 동작 주파수(f_h)에서 측정을 진행하였으며, 자동보정에는 f_c 의 개구면 전계분포만이 사용되었다. 자동보정 후의 근접전계에서의 측정 위상 분포를 살펴보면 120° 근처에서 균일하게 분포하는 것을 관찰할 수 있으며, 22.5°의 위상조절 분해능을 감안하면 매우 정확한 결과임을 알 수 있다.

그림 10은 그림 9의 근접전계 측정결과를 FFT(fast Fourier transform) 하여 얻은 원거리 안테나 패턴이다. 본 논문에서 제안한 자동보정 방법을 적용하기 전과 후의 안테나 패턴 차이가 뚜렷함을 볼 수 있다. 측정된 주파수별 차이가 존재하지만, 첫 번째 부엽레벨이 -10~-15 dBc 정도로 array factor로 분석한 -12.8 dBc 에 매우 근접한



(a) 보정 전 위상분포

(a) Near-field phase distribution before automatic calibration

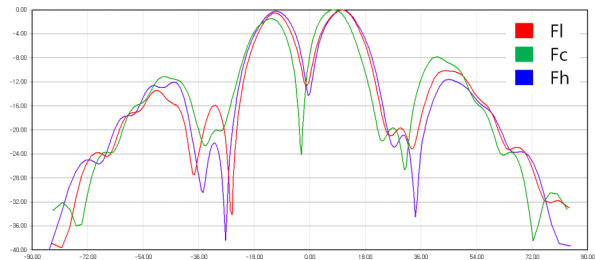


(b) 보정 후 위상분포

(b) Near-field field phase distribution after automatic calibration

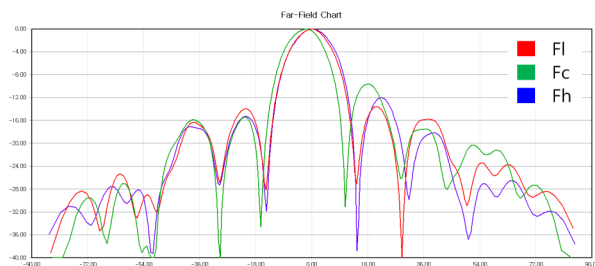
그림 9. 8×8 배열안테나의 보정 전과 후의 근접전계 위상분포 (수직편파)

Fig. 9. Near-field phase distribution of 8×8 phased array antenna before/after the proposed auto calibration (vertical polarization).



(a) 보정 전 원전계 그래프

(a) Far-field chart (before calibration)



(b) 보정 후 원전계 그래프

(b) Far-field chart (after calibration)

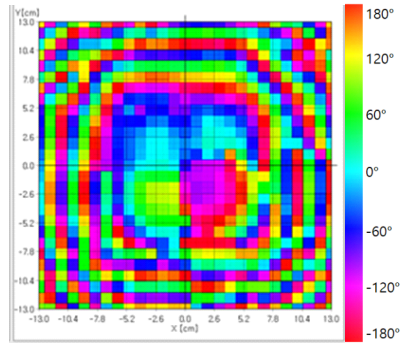
그림 10. 8×8 배열안테나의 보정 전과 후의 원거리 안테나 패턴 (수직편파)

Fig. 10. Far-field antenna pattern of 8×8 array antenna before/after the proposed auto.

값을 보여주고 있음을 알 수 있다.

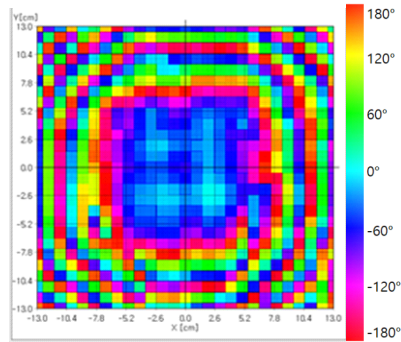
그림 11과 그림 12에는 동일한 AUT의 수평편파 성분
에 대한 자동 보정 전과 후의 근접전계 위상 분포와 원거리
안테나 패턴을 각각 나타내었다. 수직 편파의 경우와
마찬가지로 매우 정확하게 배열안테나에 대한 보정이 이
루어졌음을 알 수 있다.

표 2에 8×8 위상배열안테나의 수직/수평 편파에 대한
broadside 방향으로의 자동보정 결과 얻어진 원거리 빔패
턴의 특성을 정리하였다. 수평편파와 수직편파의 방위각
방향 빔지향 방향은 0.05° 이내의 오차로 매우 정확한 결
과를 보였고, 고각 방향 빔지향 방향이 수평편파에서
0.664°로 가장 큰 오차를 보였지만, 목표 조건으로 설정한



(a) 보정 전 위상분포

(a) Near-field phase distribution before automatic calibration

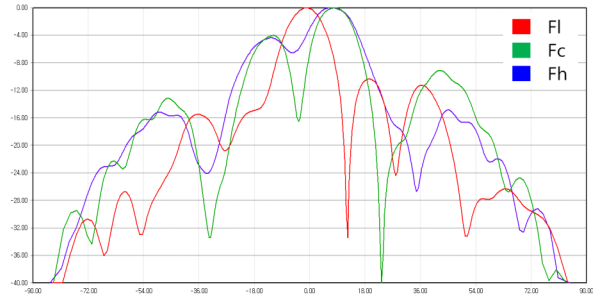


(b) 보정 후 위상분포

(b) Near-field field phase distribution after automatic calibration

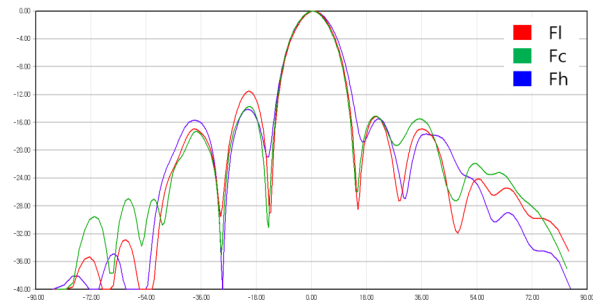
그림 11. 8×8 배열안테나의 보정 전과 후의 근접전계 위
상분포 (수평편파)

Fig. 11. Near-field phase distribution of 8×8 phased array
antenna before/after the proposed auto calibration
(horizontal polarization).



(a) 보정 전 원전계 그래프

(a) Far-field chart (before calibration)



(b) 보정 후 원전계 그래프

(b) Far-field chart (after calibration)

그림 12. 8×8 배열안테나의 보정 전과 후의 원거리 안
테나 패턴 (수평편파)

Fig. 12. Far-field antenna pattern of 8×8 array antenna
before/after the proposed auto calibration (hori-
zontal polarization).

표 2. 자동보정 결과 얻어진 원거리 빔패턴 특성

Table 2. Far-field beam pattern results after the proposed
auto calibration.

Horizontal polarization (f_c)	
Beam pointing error (broadside, h-cut)	-0.035 deg
Beam pointing error (broadside, v-cut)	0.664 deg
3 dB beam width (h-cut)	12.219 deg
3 dB beam width (v-cut)	12.375 deg
Vertical polarization (f_c)	
Beam pointing error (broadside, h-cut)	-0.051 deg
Beam pointing error (broadside, v-cut)	0.168 deg
3 dB beam width (h-cut)	12.125 deg
3 dB beam width (v-cut)	11.984 deg

2° 내에 들어오는 수치이다. 또 하나의 자동보정 완료 조건인 3 dB 빔폭 결과를 보면 수평/수직 편파 모두 방위각과 고각 방향으로 12°~12.4°의 빔폭을 가지며, 종료 조건으로 설정한 14° 이내를 만족하였다. 설정한 종료조건까지 도달하는 보정횟수는 대부분 초기상태로부터 보정 1회만에 도달하였고, 낮은 빈도로 보정 2회째에 종료조건 내로 보정됨을 확인하였다. 따라서 실험 환경과 같은 스캔 영역과 스캔 간격, 좌우 10 cm/s 상하 6 cm/s 의 스캐너 모터 속도로 측정할 때 스캐닝에 약 20분이 소모되며, 보정 완료까지 40분~60분이 소모되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위상배열안테나를 근접전계 측정장치와 연동하여 자동으로 보정을 수행할 수 있는 방안을 제시하고, Ku 대역 위성통신용 8×8 타일형 송신 위상배열 안테나로 검증하여 그 방법의 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제시한 위상배열안테나에 대한 자동보정 방안은 위상배열안테나의 보정 과정에 소요되는 시간의 절감 및 절차적 편의성을 확보할 수 있으며, 향후 분리 가능하고 개별 제어 가능한 다수 부배열로 구성된 안테나의 개

발 및 대량 생산에 높은 응용 가능성을 가지고 있다.

References

- [1] K. Hassett, "Phased array antenna calibration measurement techniques and methods," in *EuCAP Conference Invited Paper*, Davos, Apr. 2016.
- [2] H. Chae, H. S. Kim, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. 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.
- [3] T. Joo, K. Kim, Y. Kim, C. Hwang, and J. Seo, "Design of a conformal Rx phased array antenna system for Ku-band satellite communications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 6, pp. 495-509, Jun. 2020.
- [4] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 260-272, 1982.

김 기 태 [엠티지/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2564-7313>



2018년 2월: 전북대학교 전자공학부 (공학사)
 2020년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2019년 11월~현재: 엠티지 연구원
 [주 관심분야] 임베디드 시스템, 전자통신 시스템

박 상 혁 [엠티지/주임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5650-9792>



2014년 3월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 2016년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
 2016년 8월~현재: 엠티지 주임연구원
 [주 관심분야] RF System, Embedded System

서 중 우 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6784-2745>



2000년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)

2002년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

2002년 1월~현재: 국방과학연구소 책임연구

원 (2본부 1부)

[주 관심분야] 널링 안테나, 패턴합성 알고리즘, 컴포넌트 안테나

주 태 환 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8750-9779>



2008년 2월: 부산대학교 전기 및 전자공학부 (공학사)

2010년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)

2014년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)

2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] RF Transceiver, 데이터링크 시스템