

Skeleton Array를 이용한 능동 위상배열 안테나 교정

박대성*, 윤주호*, 정윤권**, 장동혁**, 황금철*, 최재훈*

Active Phased Array Antenna Calibration Using Skeleton Array

Daesung Park*, Juho Yun*,
Youn Kwon Jung**, Donghyeok Jang**,
Keum Cheol Hwang*, Jaehoon Choi*

요약

본 논문에서는 skeleton array 이용하여 능동 위상배열 안테나 채널간의 오차를 교정하는 방법을 제안한다. 상호 간섭을 이용한 내부 교정 방법은 추가적인 시스템이 필요하지 않지만, 상호 간섭 측정에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. 이러한 상호 간섭 측정에 소요되는 시간을 최소화하기 위하여 skeleton array를 도입하였다. 또한, 11×11 배열 교정을 통하여 제안된 방법을 검증하였다.

Key Words : Active phased array antenna, calibration, skeleton array

ABSTRACT

In this letter, calibration method for active phased array antenna using skeleton array is proposed. An internal calibration method using mutual coupling does not require an additional system, but has the disadvantage of taking a long time to measure the mutual coupling. In order to minimize the time required for mutual coupling measurement, a skeleton array is introduced. In addition, the proposed method

is verified through 11×11 array calibration.

I. 서론

능동 위상배열 안테나는 각 채널을 구성하는 송수신 모듈의 특성 변화로 인하여 교정 과정을 거치게 된다. 송수신 모듈의 특성 변화는 채널간 오차를 발생시키며, 이는 빔 조향, 다중빔 형성 등과 같은 기능의 저하를 불러온다. 따라서, 외부 소스원을 이용하여 각 채널의 특성을 측정된 후 오차를 교정하는 방법이 사용되어 왔다. 하지만, 외부 소스원을 사용한 교정 방법은 실제 안테나가 운용되는 환경에 적합하지 않으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 내부 소스원과 상호결합을 이용하는 교정 방법이 제시되었다¹⁾. 그러나 상호결합을 이용한 교정 방법은 다수의 소자를 사용할 경우 상호결합 값 측정에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 skeleton array를 사용한 상호결합 값 예측 기법을 적용하여, 상호결합 값 측정에 소요되는 시간을 최소화하는 교정 방법을 제안한다. Skeleton array를 이용하여 예측한 상호결합 값을 채널간 오차 교정에 이용하였으며, 11×11 배열 안테나에 적용하여 제안된 교정 방법을 검증하였다.

II. Skeleton array를 이용한 교정 방법

그림 1은 능동 위상배열 안테나 시스템이다. 그림 1의 시스템에서 능동 위상배열 안테나의 교정은 교정 모듈을 이용하여 이루어지며, 교정 모듈은 각 채널의 상대적 오차를 계산하여 디지털 빔 형성 장치에 보정 값을 전달한다. 디지털 빔 형성 장치는 n번째 채널의 진폭과 위상 설정 값인 w_n 을 조정하여 각 채널에 보정 값을 인가해 줌으로서, 채널간 특성을 균일하게 맞추어 준다. 각 채널의 상대적 오차는 m번째 소자와 n번째 소자 사이의 상호결합 값 $C_{m,n}$ 과 전달함수 $T_{m,n}$ 을 이용하여 계산된다. $C_{m,n}$ 은 복사 소자 사이의 전압 비를 의미하며, $T_{m,n}$ 은 상호결합과 송수신 모듈의 특성까지 포함한 값을 채널간의 전압 비를 의미한다. $C_{m,n}$ 과 $T_{m,n}$ 을 이용한 상대적 오차는 다음의 식으로

* 이 논문은 2018년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

• First Author : Hanyang university Department of Electronics & Computer Engineering, daipark99@hanyang.ac.kr, 학생(박사과정), 정회원

◦ Corresponding Author : Hanyang university Department of Electronics & Computer Engineering, choijh@hanyang.ac.kr, 정교수, 정회원

* Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, 학생회원

** Hanwha systems

논문번호 : 202008-182-A-LU, Received August 3, 2020; Revised September 3, 2020; Accepted September 5, 2020

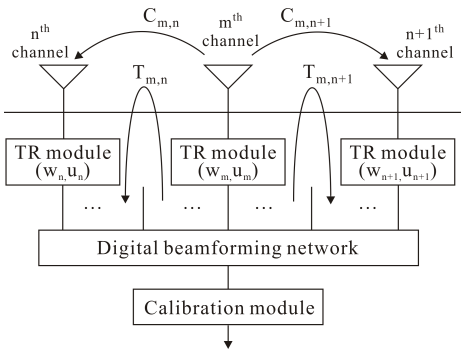


그림 1. 능동 위상배열 안테나 시스템
Fig. 1. Active phased array antenna system

계산된다^[1].

$$\frac{u_k}{u_n} = \frac{T_{m,k}}{T_{m,n}} \cdot \frac{C_{m,n}}{C_{m,k}} \quad (1)$$

식 (1)은 n번째 채널의 오차(u_n)와 k번째 채널의 오차(u_k)에 대한 비를 나타낸다. 계산된 상대적 오차를 k번째 채널에 보상하면 n번째 채널과 k번째 채널의 특성을 동일하게 맞추어 줄 수 있으며, 이와 같은 과정을 통해 모든 채널의 특성을 동일하게 만들 수 있다. 이때, 다수의 소자를 사용하는 능동배열 안테나의 경우 상호결합 값 측정에 많은 시간이 소요된다. 측정에 소요되는 시간을 줄이기 위하여, 임의의 위치에 존재

하는 소자와의 상호결합 값을 계산하기 위한 skeleton array를 도입하였다. 그림 2(a)는 기준소자(0번 소자)와 임의의 소자 사이의 상호결합 값을 계산하기 위한 skeleton array이다. 1 - 14번 소자는 임의의 소자에 대한 상호결합 값 계산식 구성을 위해 필요한 sample 소자를 의미한다. Sample 소자의 위치 선정은 기준 소자와의 거리에 따른 전파 특성을 고려하여 결정된다. Near-field, far-field, surface wave 영역에 대하여 sample 소자를 선정하며, 일반적으로 각 영역마다 x축 방향, y축 방향, 대각선 방향에 위치하는 소자를 sample 소자로 선정한다. Sample 소자의 개수가 늘어날수록 상호결합 예측 식은 좀 더 정확해진다. $2D^2/\lambda$ (D : 안테나의 최대 직경, λ : 파장) 보다 작을 경우 상호결합은 near-field 영역에서 발생하며, 먼 경우에는 far-field 영역에서 발생한다. Near-field 영역에서는 소자간 거리가 가까울수록 감쇠가 크게 일어나며, $1/r^2$, $1/r^3$ (r : 소자간 거리)에 비례하는 특성을 보인다. 또한, far-field 영역에서 전파는 $1/r$ 에 비례하는 특성을 보인다. Surface wave 영역은 near-field와 far-field 사이의 영역이며, $1/r^{1/2}$ 에 비례하는 특성을 갖는다. 이러한 전파 특성을 반영하여 임의의 소자와의 상호결합 값 예측을 위한 계산식은 다음과 같다^[2].

$$S_{ab} = \frac{e^{-jk_0r}}{4\pi} (A + B + C + D)$$

$$A = \left[\frac{C_1}{(k_0r)^{1/2}} + \frac{C_2}{k_0r} + \frac{C_3}{(k_0r)^2} + \frac{C_4}{(k_0r)^3} \right]$$

$$B = \left[\frac{C_5}{(k_0r)^{1/2}} + \frac{C_6}{k_0r} + \frac{C_7}{(k_0r)^2} + \frac{C_8}{(k_0r)^3} \right] \cos 2\Phi$$

$$C = \left[\frac{C_9}{(k_0r)^{1/2}} + \frac{C_{10}}{k_0r} + \frac{C_{11}}{(k_0r)^2} + \frac{C_{12}}{(k_0r)^3} \right] \cos 4\Phi$$

$$D = \frac{C_{13}}{(k_0r)^3} \cos 6\Phi + \frac{C_{14}}{(k_0r)^3} \cos 8\Phi \quad (2)$$

식 (2)에서 k 는 전파상수를 의미하며, 상호결합 값 S_{ab} 는 14개의 C 값과, 그림 2(b)에서 정의된 소자 사이의 거리(r)와 방위각(Φ)을 이용하여 계산된다. C_1 - C_{14} 로 표시된 계수 값은 0번 소자와 1-14번 소자 사이의 상호결합 값을 이용하여 도출할 수 있다. 독립된 환경에서의 상호결합 값을 계산하는 [2]와는 다르게 본 논문에서는 배열 환경에서의 상호결합 값 예측이 필요하며, 배열 환경에서의 상호결합 값을 계수 값 도출에 이용하였다. 최종적으로, 식 (2)를 통하여 임의의 소자

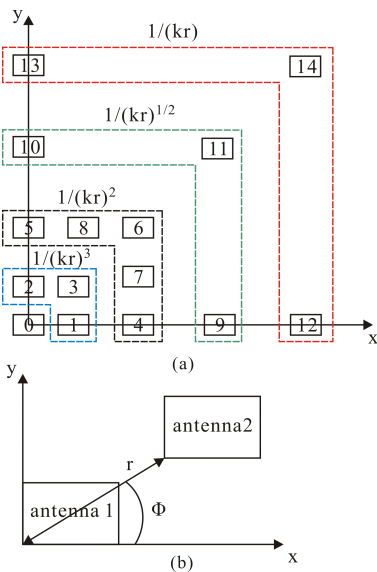


그림 2. (a) Skeleton array, (b) 소자간 거리 & 각도 정의
Fig. 2. (a) Skeleton array, (b) definition of distance and angle between element

에 대한 정보(r, Φ)만을 이용하여 상호결합 값을 계산할 수 있으며, sample 소자에 대한 14번의 상호결합 값 측정만으로 모든 소자와의 상호결합 값을 계산할 수 있다.

III. 11×11 배열 안테나의 오차 교정

Skeleton array를 이용한 능동 위상배열 안테나의 교정 방안을 검증하기 위하여 11×11 배열 안테나를 설계하여 교정 과정을 수행하였다. 그림 3은 11×11 배열 안테나의 구조이다. 가장자리에 위치한 소자와 중심에 위치한 소자의 주변 환경을 동일하게 만들어 주기 위하여 한 줄의 dummy element를 추가하였다. 각 채널간 오차를 적용하기 위하여 각 채널의 크기와 위상을 다르게 설정하여 주었으며, 61번 소자의 채널을 기준으로 모든 채널의 크기와 위상 값이 동일해 지도록 교정을 진행하였다. 식 (1)을 이용하여 모든 소자와 61번 소자 사이의 상대적 오차를 계산하였으며, 이를 위하여 skeleton array를 이용한 상호결합 값 계산 과정을 수행하였다. 그림 3에 표시된 14개의 소자를 sample 소자로 이용하여 식 (2)의 14개의 C값을 도출하였으며, 61번 소자와 나머지 소자에 대한 상호결합 값을 계산하였다. 상호결합 값에 대한 시뮬레이션 결과와 계산 결과의 비교 그래프는 그림 4와 같다. 상호결합 값의 크기와 위상에 대한 결과를 비교하였으며, 시뮬레이션 값과 skeleton array를 통해 계산한 상호결합 값이 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다. [1]에서 제시된 교정 방법을 이용할 경우 121개의 소자에 대한 상호결합 값을 모두 측정해야하는 것에 비해, 제안된 방법은 14개의 소자에 대한 상호결합 값

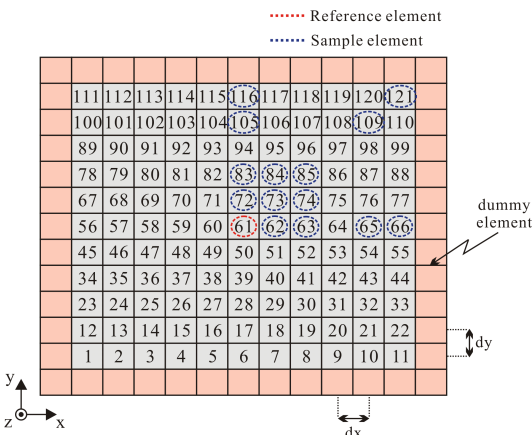


그림 3. 11×11 배열 구조
Fig. 3. Structure of 11×11 array

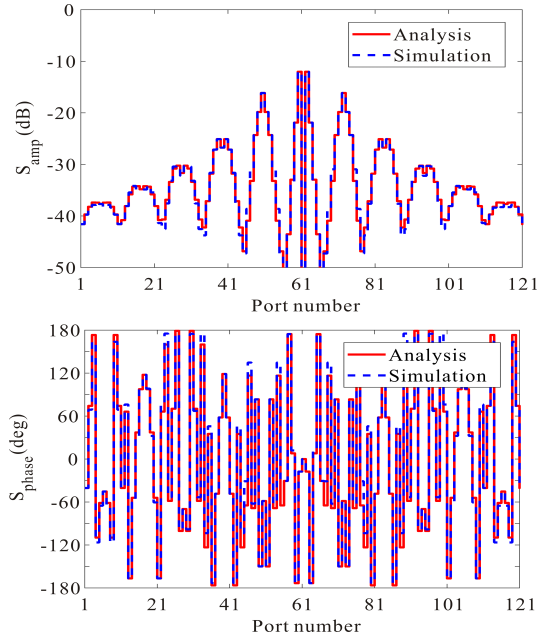


그림 4. 시뮬레이션 및 계산된 상호결합
Fig. 4. Simulated and calculated mutual coupling

측정만이 이루어지며, 이를 통하여 상호결합 값 측정 에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다.

표 1은 sample 소자 위치에 따른 상호결합 값의 크기와 위상 오차의 최대값을 비교한 표이다. Case 1은 그림 3과 같이 sample의 위치를 선정한 경우이며, case 2는 그림 3과 같은 sample에서 65, 105, 66, 116번 소자 대신 87, 107, 99, 119번 소자를 sample로 선정한 경우이다. 시뮬레이션으로 확인한 상호결합 값과의 차이를 오차로 정의하였으며, case 1은 2.29 dB의 최대 크기 오차와 18.22 deg의 최대 위상 오차를 갖는다. 이에 비해 case 2는 7.12 dB의 최대 크기 오차와 75.17 deg의 최대 위상 오차를 갖는다. 이를 통하여, 같은 영역에 위치하는 소자를 sample로 선정하더라도 x축 방향, y축 방향, 대각선 방향에 위치하는 소자를 sample 소자로 선정하는 것이 좀 더 정확한 값을 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Skeleton array를 통하여 계산한 상호결합 값을 이

표 1. Sample 소자 위치에 따른 오차 비교
Table 1. Comparison of errors according to the sample position

	Case 1	Case 2
최대 크기 오차	2.29 dB	7.12 dB
최대 위상 오차	18.22 deg	75.17 deg

IV. 결 론

본 논문에서는 skeleton array를 이용하여 상호결합 값을 계산 후, 능동 위상배열 안테나의 각 채널간 오차 교정을 수행하였다. 14번의 상호결합 값 측정을 통하여 모든 소자에 대한 상호결합 값을 도출하였으며, 이를 이용하여 11×11 배열에 대한 교정을 진행하였다. 시뮬레이션 및 계산된 상호결합 값이 거의 일치함을 확인하였으며, 오차 교정 또한 복사패턴을 확인함으로써 성공적으로 이루어졌음을 확인하였다. 따라서 제안된 방법은 능동 위상배열 안테나의 오차 교정에 유용하게 쓰일 것으로 생각된다.

References

[1] J. Yun, D. Park, Y. K. Jung, D. Jang, and K. C. Hwang, "Active phased array antenna calibration using mutual coupling," *J. KICS*, vol. 44, no. 9, pp. 1678-1681, Sep. 2019.

[2] Y. X. Sun, Y. L. Chow, and D. G. Fang, "Mutual impedance formula between patch antennas based on synthetic asymptote and variable separation," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 35, no. 6, pp. 466-470, Dec. 2002.

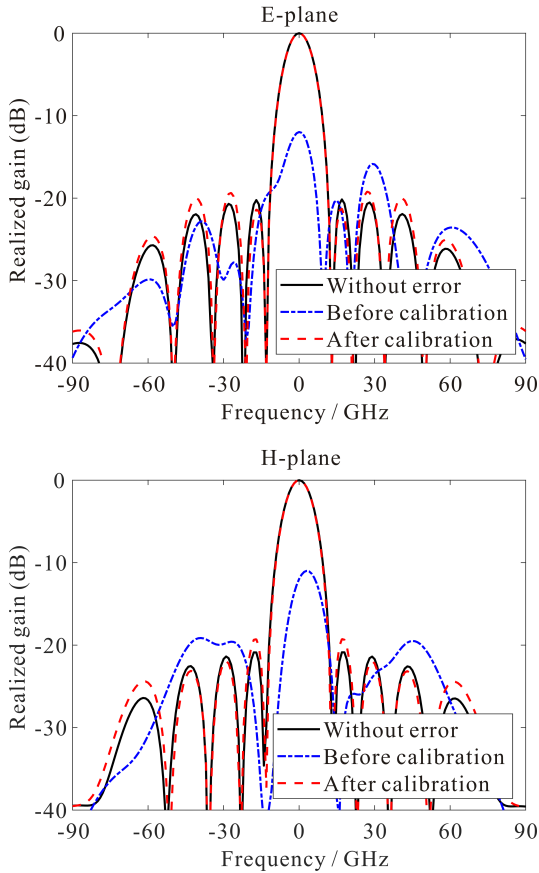


그림 5. 오차 교정 전 후의 복사패턴 비교
Fig. 5. Radiation patterns before and after calibration

용하여 보정 값을 계산한 후 교정을 수행하였으며 그 결과는 그림 5와 같다. 그림 5는 능동 위상배열 안테나의 오차 교정 전 후의 방사패턴 그래프이다. 오차를 교정하기 전에는 각 채널간 크기와 위상이 달라 +z 방향으로 지향성을 나타내지 않으며, 이득 또한 오차가 없는 모델에 비하여 낮은 것을 볼 수 있다. 이에 반해 skeleton array를 이용하여 계산된 보정 값을 이용한 교정 이후의 방사패턴은 각 채널간의 오차가 거의 없기 때문에 +z 방향으로 지향성을 보이며, 오차가 존재하지 않는 방사패턴과도 거의 일치한다. 따라서 제안하는 skeleton array를 이용한 교정 방법의 유효성을 확인할 수 있다.