

Mutual coupling을 이용한 능동 위상배열 안테나 교정

윤주호*, 박대성*, 정윤권*,
장동혁*, 황금철^o

Active Phased Array Antenna Calibration Using Mutual Coupling

Juho Yun*, Daesung Park*,
Youn Kwon Jung*, Donghyeok Jang*,
Keum Cheol Hwang^o

요약

본 논문에서는 mutual coupling을 이용하여 능동 위상배열 안테나 채널 간의 진폭과 위상 오차를 교정하는 방법을 제안한다. Mutual coupling을 이용한 교정 방법은 내부 소스원을 사용하기 때문에 추가적인 시스템이 필요하지 않다는 장점이 있다. 제안하는 교정 방법을 검증하기 위하여 5×5 비발디 안테나를 설계하였으며, 채널 간 오차가 없는 모델과 오차가 교정된 모델의 특성이 일치함을 통하여 제안하는 방법을 검증하였다.

Key Words : Calibration, mutual coupling, phased array antenna

ABSTRACT

In this paper, calibration using mutual coupling is proposed to calibrate active phased array antenna. Because the proposed calibration uses internal source, it does not need any additional system. To verify the proposed calibration, a 5×5 Vivaldi antenna was designed. When proposed calibration is applied to 5×5 Vivaldi antenna, the result between the model

without error and model with calibration is well matched.

I. 서론

최근 레이더 시스템에는 수백 개 혹은 수천 개 이상의 소자와 TR(Transmit/Receive) 모듈을 사용하는 능동 위상배열 안테나가 사용된다. 능동 위상배열 안테나는 TR 모듈을 이용하여 각 소자의 크기/위상을 변화시켜 다양한 빔을 형성할 수 있으며, 일부 모듈의 고장이 발생하더라도 전체 시스템에 큰 영향이 없다는 장점이 있다^{1,2}. 능동 위상배열 안테나를 이루는 다수의 RF 모듈은 각각 특성이 조금씩 다르기 때문에 교정 과정이 필요하며, 외부 소스원을 이용하여 각 채널의 특성을 측정 후 오차를 교정하는 방법이 이상적이다. 하지만, 실제 능동 위상배열 안테나가 운용되는 환경에서 외부 소스원을 이용하여 오차를 교정하기 위해서는 추가적인 시스템이 필요하다. 본 논문에서는 실제 운용되는 상황에서도 추가적인 시스템을 필요로 하지 않는 능동 위상배열 안테나 교정 방법을 제안한다. 소자 간의 mutual coupling을 이용하여 각 채널 간 오차를 교정 하였으며, 5×5 비발디 배열에 적용하여 제안된 방법을 검증하였다.

II. Mutual coupling을 이용한 교정

그림 1은 능동 위상배열 안테나 시스템을 나타낸 모델이다. w_m 은 감쇠기와 위상지연기를 이용한 m 번째 모듈의 감쇠와 위상 지연 설정 값을 나타내며, u_m 은 m 번째 모듈의 RF소자들로 인한 진폭과 위상 오차를 나타낸다. $C_{m,n}$ 과 $T_{m,n}$ 은 각각 m 번째 소자와 n 번째 소자의 mutual coupling과 전달함수이다. Mutual coupling은 복사소자 사이의 전압비를 의미하며, 전달함수는 RF 소자의 감쇠, 위상지연 특성을 포함한 채널 간의 전압비를 의미한다. 능동 위상배열 안테나의 교정은 각 채널의 특성을 동일하게 맞추어주는 과정이며, 이를 위해서는 각 채널의 감쇠와 위상지연 특성을 의미하는 $u \cdot w$ 값이 각 채널마

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

• First Author : (ORCID:0000-0001-9821-3351)Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, gh501@daum.net, 학생회원

◦ Corresponding Author : (ORCID0000-0002-8074-1137)Sungkyunkwan University Department of Electrical and Computer Engineering, khwang@skku.edu, 정회원

* Hanwha systems

논문번호 : 201907-121-A-LU, Received July 1, 2019; Revised July 22, 2019; Accepted July 22, 2019

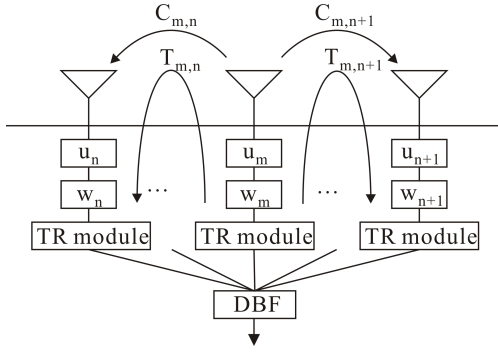


그림 1. 능동 위상배열 안테나 시스템
Fig. 1. Active phased array antenna system

다 동일하도록 설정해 주어야한다^[3]. RF소자들이 갖는 오차를 나타내는 u 값은 각 채널마다 다르며, 통제할 수 없는 값이다. 따라서 감쇠기와 위상지연기를 통하여 통제 가능한 w 값을 이용하여 각 채널 간 감쇠와 위상지연 특성이 같아지도록 보상 해주어야 한다. n 번째 채널의 특성을 기준으로 한, 각 채널의 보상값 계산은 아래의 식과 같다.

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

식 (1)은 n 번째 채널에서 발생하는 오차와 k 번째 채널에서 발생하는 오차간의 비를 나타낸다. 이와 같은 식을 통하여 k 번째 채널이 n 번째 채널에 비하여 얼마만큼의 오차를 갖는지 알 수 있으며, 계산된 값을 w 를 이용하여 보상하면 k 번째 채널과 n 번째 채널의 특성이 같도록 만들 수 있다. 소자 간의 동일한 간격과 대칭적인 방사특성을 요구하는 [3]과는 다르게 일반적인 능동 위상배열 안테나에서 소자 간 간격은 동일하지 않을 수도 있으며, 안테나의 방사특성도 대칭적이지 않을 수 있다. 소자 간 mutual coupling을 측정하면 이러한 일반적인 능동 위상배열 안테나에서의 채널 간 오차 교정이 가능하다. 본 논문에서는 일반적인 배열 상황을 가정하였으며 5×5 비발디 안테나를 설계하여 제안한 오차 교정 방법을 적용하였다.

III. 5×5 비발디 배열 안테나의 오차 교정

그림 2는 5×5 비발디 배열을 구성하기 위한 단일 안테나 구조이다. 9.5 GHz 대역에서 동작하도록 설계하였으며, 구조는 [4]와 같이 2개의 기판을 사용하고

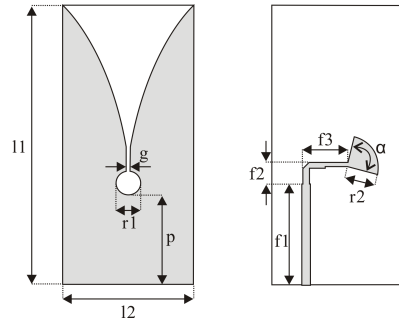


그림 2. 비발디 단일 안테나의 형상
Fig. 2. Design of single Vivaldi antenna

strip-line 급전을 이용하였다. $l1 = 40.72$ mm, $l2 = 15$ mm, $r1 = 2.86$ mm, $r2 = 3.09$ mm, $g = 0.47$ mm, $p = 10.37$ mm, $f1 = 11.63$ mm, $f2 = 2.5$ mm, $f3 = 2.52$ mm, $a = 90$ deg가 비발디 안테나의 파라미터로 이용되었다. 그림 3은 5×5 배열 안테나의 구조를 나타낸다. 그림 3(a)는 배열 구조와 소자 간 간격을 나타내며 $dx = 15$ mm, $dy = 15$ mm 값을 갖는 삼각배열로 구성하였다. 비발디 안테나를 사용하여 형성한 5×5 배열의 형상은 그림 3(b)와 같다. 일반적인 배열을 가정하였기 때문에 소자 간 간격이 동일하지 않으며, 소자의 방사패턴 또한 대칭적이지 않다. 채널 간 오차를 적용하기 위해서 각 소자에 급전되는 coaxial cable의 길이를 달리 하였으며, coaxial cable 길이에 따른 손실은 크지 않아 오차 교정은 채널 간 위상 오차만을 고려하였다. n 번째 소자의 coaxial cable 길이를 $C_l(n)$ 이라 할 때, 각 소자에 급전되는 coaxial cable 길이는 표 1과 같다.

소자 1의 위상을 기준으로 하여 각 소자에 급전되는 위상차를 계산하면 그림 4의 그래프와 같다. 그림 4에는 제안된 방법을 이용하여 계산된 교정 위상 또한 나타내어져 있으며, 소자 1을 기준으로

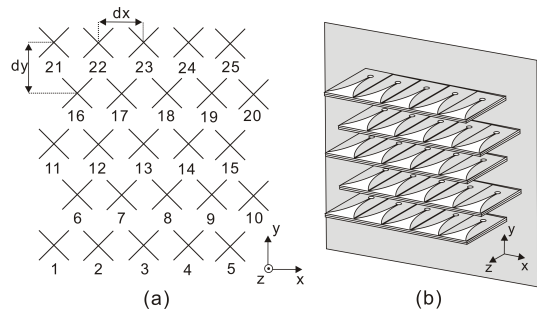


그림 3. 5×5 배열 안테나의 구조: (a) 소자 간 간격, (b) 비발디 배열 형상
Fig. 3. Design of 5×5 array: (a) distance of array, (b) array using Vivaldi antenna

표 1. 각 소자에 급전되는 coaxial cable의 길이
Table 1. Coaxial length of each element

C_l(1)	C_l(2)	C_l(3)	C_l(4)	C_l(5)	C_l(6)
2 mm	28 mm	9 mm	18 mm	4 mm	10 mm
C_l(8)	C_l(7)	C_l(9)	C_l(10)	C_l(11)	C_l(12)
32 mm	22 mm	10 mm	16 mm	14 mm	24 mm
C_l(13)	C_l(14)	C_l(15)	C_l(16)	C_l(17)	C_l(18)
12 mm	6 mm	20 mm	11 mm	8 mm	17 mm
C_l(19)	C_l(20)	C_l(21)	C_l(22)	C_l(23)	C_l(24)
16 mm	6 mm	21 mm	4 mm	19 mm	8 mm
C_l(25)					
12 mm					

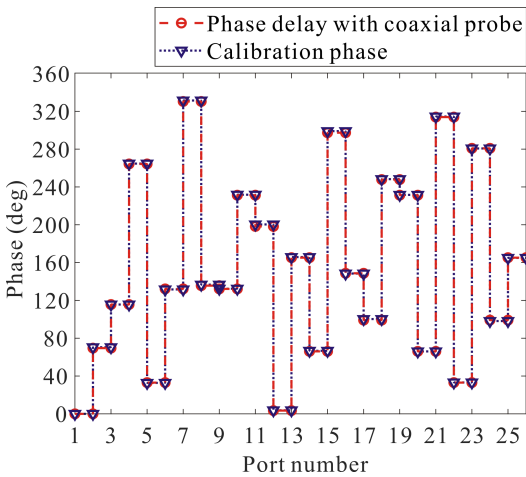


그림 4. 설정한 위상 오차와 교정 값의 비교
Fig. 4. Comparison of applied phase delay and calibration phase

계산된 결과이다. 소자 간 급전되는 위상이 다르기 때문에 각 포트별로 다른 위상값을 갖게 되며, 설정한 위상 오차와 계산된 교정 위상이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 위상 9.5 GHz에서의 오차 교정 전후의 방사패턴을 나타낸다. 위상 오차를 교정하기 전에는 각 소자 간 급전 위상이 달라, +z 방향으로 지향성을 나타내지 않는 것을 볼 수 있다. 이에 반해 위상 오차 교정 이후의 방사패턴은 각 소자 간 급전 위상이 같기 때문에 +z 방향으로 지향성을 보이며, 위상 오차가 존재하지 않는 방사패턴과도 동일함을 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 mutual coupling을 이용한 교정 방법의 유효성을 확인할 수 있다.

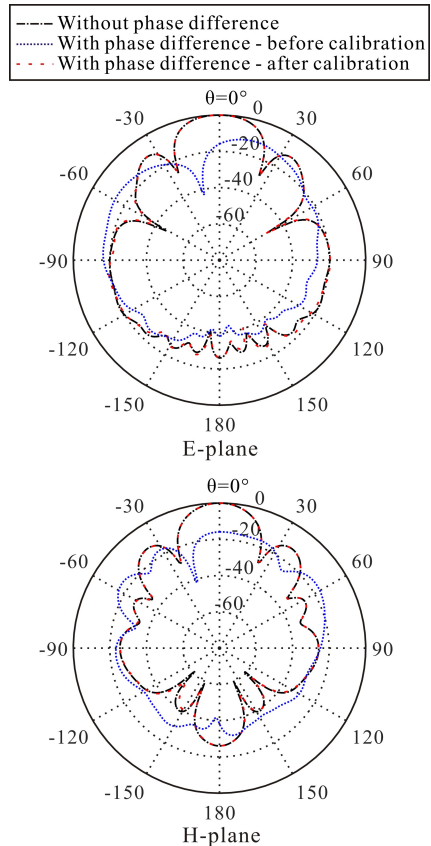


그림 5. 위상 오차 교정 전후의 방사 패턴 (9.5 GHz)
Fig. 5. Radiation patterns before and after calibration (9.5 GHz)

IV. 결론

본 논문에서는 능동 위상배열 안테나의 각 채널 간 진폭과 위상오차 교정을 위하여 mutual coupling을 이용하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 5×5 비발디 배열을 설계하였으며, 일반적인 배열을 가정하기 위하여 배열에서 각 소자 간 거리를 다르게 설정하였다. 또한 채널 간 오차를 설정하기 위하여 소자마다 급전되는 coaxial cable의 길이를 다르게 설정해 주었으며 설정한 위상 오차와 제안하는 방법을 이용한 교정 위상이 동일함을 확인하였다. 따라서 제안하는 mutual coupling을 이용한 교정방법은 능동 위상배열 안테나 교정에 적용 가능할 것으로 보인다.

References

- [1] R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, pp. 1-79, 2005.
- [2] B.-L. Cho, J.-S. Lee, S.-G. Sun, J.-M. Lee, E.-H. Lee, and S.-G. Lee, "A study on calibration of transmitter and receiver channels using coupling lines in an active phased array radar system," *The Journal of Korean Institute of Information Technology.*, vol. 14, no. 10, pp. 43-49, Oct. 2016.
- [3] H. M. Aumann, A. J. Fenn, and F. G. Willwerth, "Phased array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements," *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol. 37, no. 7, pp. 844-850, Jul. 2017.
- [4] J. Shin and D. H. Schaubert, "A parameter study of stripline-fed vivaldi notch-antenna arrays," *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol. 47, no. 5, pp. 879-886, May 1999.