

# 디지털 빔 형성을 위한 배열 안테나 오차 보정

최 회영<sup>o</sup>, 박 형근, 김 영수

\*포항공과대학교 전자전기공학과

E-mail : eng40@postech.ac.kr

## Antenna Array Calibration for Digital Beamforming

Hee Young Choi, Hyung Geun Park and Young-Soo Kim

Department of Electronic and Electrical Engineering

Pohang University of Science and Technology

### Abstract

There are many antenna array errors. They will distort the array beam pattern and result in an increased sidelobe level. A calibration technique is proposed for correcting the antenna array errors such as mutual coupling and unequal feeder characteristics. These are modeled as a matrix representing the interaction between the radiating elements. The matrix is estimated from the measured array response vectors. The antenna array errors are corrected by modifying the beamforming weight vector. It is verified by the electromagnetic simulation and experiment that the proposed technique reduces the sidelobe level and increases the antenna gain

Key words : antenna calibration, mutual coupling, digital beamforming

### I. 서론

디지털 빔 형성 기법은 원하는 빔 패턴을 구현하기 위해 기저 대역에서 수신 혹은 송신 신호에 빔 형성 가중치를 곱해 신호의 크기와 위상을 조정함으로써 배열 안테나의 지향각을 제어한다. 예로는 첫째, 이동통신 기지국 시스템에서 여러 개의 다른 종류의 신호를 동시에 송수신하기 위해 디지털 빔 형성 기법으로 구현한 적응 배열 안테나 시스템은 각 신호마다 독립적인 안테나 빔을 형성해 다른 신호에 대한 간섭을 감소시킨다. 둘째, 위성 통신에의 적용으로 software 업그레이드로 노후된 빔형성기의 개선이 가능하기 때문에 위성의 수명을 연장 한다. 셋째, 방향 탐지 시스템에의 적용으로 수신 안테나 지향성에 따라 전파 수신 방향을 탐지하는 기술로 배열 소자 사이의 상호 간섭에 민감하고 방향

추정을 위해 정확한 배열 응답을 요구한다. 배열 안테나 오차는 안테나간 상호 간섭, 급전부의 전달 함수 오차, 안테나 위치 오차, 안테나 주위 구조체에 의한 산란, 유한 도체판에 의한 edge산란 등에 의해 발생하며 이와 같은 오차가 발생할 경우 패턴의 부엽레벨이 증가하고, 이득이 감소하여 지향각을 정확히 제어하는 것이 어려워진다.

본 논문에서는 안테나 방사패턴 모델을 바탕으로 디지털에서 빔 형성 가중치를 미리 왜곡함으로써 오차를 보정 했다. Ensemble로 시뮬레이션하여 결과를 제시하였고, 실제 배열 안테나를 제작 하고 그 측정 결과를 기술하였다.

### II. 본론

#### 2.1 오차 보정 행렬 추정 알고리즘

그림 1 에서 보듯 N개의 소자가 거리 d의 간격으로

배열 되어 있고 각각 개별source를  $V_1 \sim V_N$  까지 줄 수 있는 경우 임의  $\theta$  방향으로 거리 r만큼 떨어진 곳의 필드를  $\gamma_i$  라고 정의 하면

$$\gamma_i = f(\theta) \cdot \alpha \cdot \underline{a}^T(\theta) \cdot \underline{c}_i \cdot V_i \quad (1)$$

$\alpha$  는 비례 상수,  $V_i$  는 i번째 소자에 넣어준 source,

$$\underline{a}^T(\theta) = [1, e^{j\phi}, e^{j2\phi}, e^{j3\phi}, \dots, e^{j(N-1)\phi}]$$

오차가 없는 이상적 배열 응답 벡터,  $\phi$  = 위상차이,  $\underline{c}_i$  는 소자간 상호 커플링과 급전부의 전달함수오차를 포함한 벡터이다.

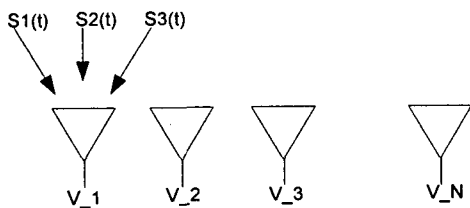


그림 [1] 배열 안테나 모델

i번째 소자만 source를 인가 할 때 S parameter의 비는 실제 오차를 포함하는 배열 응답 벡터(array response vector)  $\underline{b}_i(\theta)$  를 의미하므로 식(1)로부터

$$\underline{b}_i(\theta) \stackrel{\Delta}{=} \frac{\gamma_i}{\alpha \cdot V_i} = f(\theta) \cdot \underline{a}^T(\theta) \cdot \underline{c}_i \quad (2)$$

$$\underline{b}(\theta) = f(\theta) \cdot \underline{C} \cdot \underline{a}(\theta) \quad \text{by } (\underline{C} = \underline{C}^T) \quad (3)$$

따라서 커플링 행렬을 M 이라고 할 때 실제 배열 응답 벡터  $\underline{b}(\theta)$  는 다음과 같이 모델링 될 수 있다.

$$\underline{b}(\theta) = f(\theta) \cdot \underline{M} \cdot \underline{a}(\theta) \quad (4)$$

$f(\theta)$  는 무한 그라운드에 하나의 안테나 있을 때 방사 패턴이다. 식 (4)에서 제안된 배열 안테나 모델에 근거하여 배열 안테나 오차 보정 행렬(M)을 추정하고 이를 이용하여 오차를 보정하는 기존의 알고리즘은 다음과 같다. [1]에서는 M을 추정하기 위해 각 패턴을 Fourier 변환하는 방법과, 산란 행렬 S로부터 M을 얻는 방법을 이용했는데 전자의 경우 소자간 간격이  $0.5\lambda$  이상 일때만 적용 가능하고 측정하기 어려운  $f(\theta)$  을 정확히 알고 있어야 한다는 단점이 있고 후자의 경우 S를 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다. 그래서 M을 추정하기 위해 Least mean square방식이 제시되었다[2]. 측정량이 [1]보

다 작지만 이 방법 역시 정확한  $f(\theta)$  을 요구한다. [3]에서 수신 신호에 대한 공분산 행렬을 만들고 잡음 고유 벡터와  $\underline{b}_i(\theta)$  의 직교성을 이용하여 보정 행렬을 추정하는 방법을 제시했다. [1],[2]와는 달리 정확한  $f(\theta)$  와 위상 오차는 필요없지만 off-line 오차 보정에 못 적용하는 단점이 있다. 본 논문에서는 off-line 오차 보정이 가능하도록 [3]의 알고리즘을 변형하였다. M을 추정하는 과정은 다음과 같다.

1단계:  $\underline{b}(\theta_i)$  를 측정한다.  $i = 1, 2, 3 \dots Naz$  ( $Naz > N$ )

2단계: 1단계에서 측정한  $\underline{b}(\theta_i)$  를 외적하여 공분산 행렬을 만들고 잡음 고유치에 해당하는 고유 벡터를 구한다. 공분산 행렬은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\underline{R}_i = \underline{b}(\theta_i) \cdot \underline{b}(\theta_i)^H \quad (5)$$

$$\underline{R}_i = \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j \cdot \underline{u}_{j,i} \cdot \underline{u}_{j,i}^H \quad (6)$$

3단계 : rank는 1이기에 고유치가 다음의 관계가 있음으로  $\lambda_{1,i} < \lambda_{2,i} < \dots \lambda_{N-1,i}$ , (N-1)개의 잡음 고유

벡터를  $\underline{u}_{j,i}$  로 놓으면 다음과 같은 관계가 된다.

$$\underline{b}(\theta_i) \perp \underline{u}_{j,i} \quad (\text{단, } j = 1, 2 \dots (N-1)) \quad (7)$$

4단계 :  $\underline{U}_i \stackrel{\Delta}{=} [\underline{u}_{1,i}, \underline{u}_{2,i}, \underline{u}_{3,i}, \dots, \underline{u}_{N-1,i}]$  두고 다음과

같은 비용 함수를 정의 한다.[4]

$$J = \sum_{i=1}^{Naz} \left\| (\underline{M} \underline{a}(\theta_i))^H \cdot \underline{U}_i \right\|^2 \quad (8)$$

식(4)과 식(7)으로부터 비용함수 J가 최소값 일때 M 이 바로 추정하고자 오차 보정 행렬임을 알 수 있다. 그런데 행렬 M 을 구하는 것은 난해함으로 행렬 M 을 벡터 m으로 정의하여 식(8)에 대입하면.

$$\underline{M} \underline{a}(\theta_i) = \underline{A}_i \underline{m} \quad (9)$$

$$J = \underline{m}^H \sum_{i=1}^{Naz} (\underline{A}_i^H \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{U}_i^H \underline{A}_i) \underline{m} \quad (10)$$

$$\text{Let, } G = \sum_{i=1}^{Naz} (\underline{A}_i^H \cdot \underline{U}_i \cdot \underline{U}_i^H \underline{A}_i)$$

$$\therefore J = \underline{m}^H \cdot G \cdot \underline{m} \quad (11)$$

식(11)의 해를 얻기 위해 constrained least squares 방식을 이용하여  $\underline{m}^H \cdot e = 1$ 의 constraint를 두면

$$\underline{m} = \frac{G^{-1}e}{e^H G^{-1}e}, \quad e = [1, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (12)$$

5단계 : 4단계에서 구한 벡터  $\underline{m}$ 을 이용하여 행렬  $M$ 을 추정해 낸다.

배열 안테나의 빔 패턴 식은 배열 응답 벡터에 디지털 빔 형성 가중치 ( $w^T$ )을 씌운 것과 같다.

$$g(\theta) = w^T \cdot b(\theta) \quad (13)$$

오차를 무시한 빔 형성 가중치를 특정 각도에 대한 이상적인 배열 안테나의 배열 응답 벡터로 설정하면 왜곡된 빔 패턴은

$$g_{uncal}(\theta, \theta_0) = w^T \cdot b(\theta) \Big|_{w=\Lambda a^*(\theta_0)} = (\Lambda a^*(\theta_0))^T b(\theta) \quad (14)$$

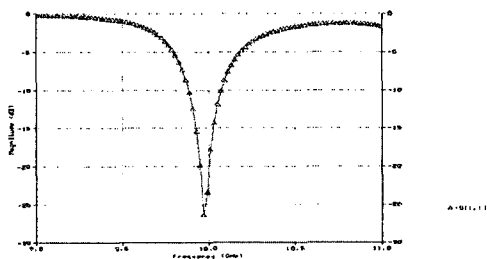
여기에서  $\theta_0$ 는 지향각이고  $\Lambda$ 는 부엽레벨을 감소시키기 위해 디지털 빔 형성 가중치에 곱해주는 윈도우로 Hamming을 사용한다. 오차가 없는 이상적인 배열 안테나의 빔 패턴은 식(15)와 같아서

$$g_{cal}(\theta, \theta_0) = f(\theta) w^T \cdot a(\theta) \Big|_{w=\Lambda a^*(\theta_0)} = f(\theta) (\Lambda a^*(\theta_0))^T a(\theta) \quad (15)$$

안테나의 오차를 보정한다는 것은 적절한 빔 가중치를 적용함으로써 빔 패턴을 식(15)으로 근사시키는 것인데 그러기 위한 빔 가중치  $w$ 는 식(16)과 같다.

$$w = \left\{ (\Lambda a_0^*(\theta))^T M^{-1} \right\}^T \quad (16)$$

## 2.2 시뮬레이션 및 그 결과



그림[2]은 단일 소자 Return Loss

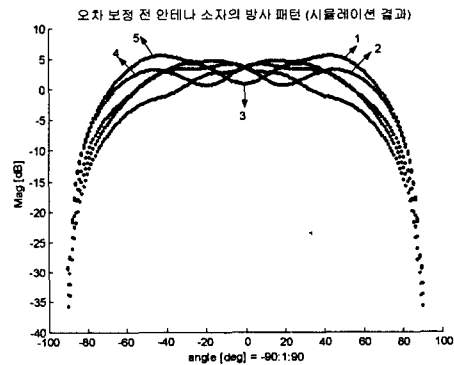
Ensemble을 이용하여 안테나 오차 보정 알고리즘을 검증했다. 그림[2]은 단일 Patch 안테나의 Return

loss이다. 동일한 5개의 단일 안테나로 구현된 배열은 소자간의 간격이  $0.4\lambda$ 다. Ensemble의 data는 정규화된 값이므로  $M$ 을 추정하기 위해 적절한 역정규화를 수행하였고 표[1]의 추정된  $M$ 값이 대칭적인 것으로 미루어 적절한 역 정규화였음을 확인 할 수 있었다. 표[1]은  $-60 \sim 60$ [deg]까지 10도 간격으로 샘플링한 데이터로 추정한 오차 보정 행렬의 [dB]값으로 (1,1)의 값은 constraint에 의해 항상 1이고 대각 성분은 source를 인가한 소자에 의해 유기되는 전류의 크기에 비례하므로 비 대각 성분에 비해 큰 값을 갖는다. 또한 소자에 따라 상호 간섭 크기의 차로 유기되는 전류의 양이 다르기 때문 대각 성분의 크기가 동일 하지는 않다.

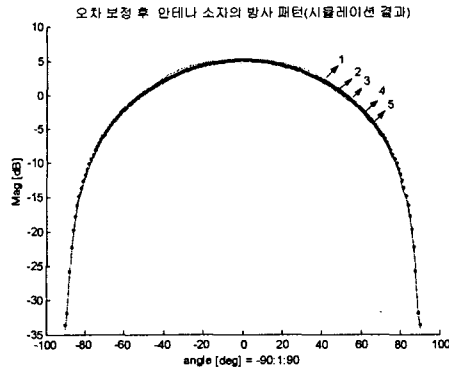
표 1 추정된 오차 보정 행렬 크기[dB]

	1	2	3	4	5
1	0	-8.122	-3.387	-7.213	-0.448
2	7.939	-0.479	-8.456	-3.188	-6.435
3	-2.575	-8.450	-0.771	-8.454	-2.603
4	-6.407	-3.181	-8.444	-0.478	-7.967
5	-0.427	-7.212	-3.376	-8.113	-0.005

그림[3(a)]와 그림[3(b)]는 오차 보정 전, 후의 개별 소자들의 방사패턴으로 오차 보정전에는 그림[3(a)]처럼 커플링으로 인해 패턴이 모두 달랐으나 오차 보정 후에는 그림[3(b)]와 같이 모든 패턴이 동일해짐을 확인하였다. 식(16)에서와 같이 추정된  $M$ 의 역행렬을 빔 패턴 가중치에 곱한 값을 Ensemble의 개별 소스로 인가함으로써 오차가 보정된 빔 패턴을 얻을 수 있다.



그림[3(a)] 오차 보정 전의 각 소자의 방사 패턴



그림[3(b)] 오차 보정 후의 각 소자의 방사 패턴 표[2(a)]와 표[2(b)]은 지향각 60[deg]일 때, 오차 보정 전, 후의 빔 패턴을 얻기 위해 개별 안테나에 인가되는 빔 가중치의 크기와 위상 정보이다.

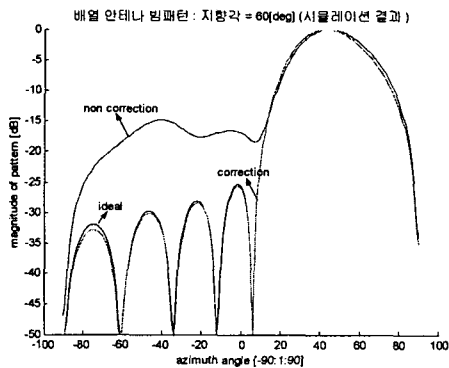
표[2(a)] 보정 전 빔 패턴을 위한 빔 가중치의 크기와 위상 : 지향각 = 60[deg]

	1	2	3	4	5
크기	0.31	0.77	1.00	0.77	0.31
위상	0	-24.71	-10.58	-40.12	-38.83

표[2(b)] 보정 후 빔 패턴을 위한 빔 가중치의 크기와 위상 : 지향각 = 60[deg]

	1	2	3	4	5
크기	0.51	0.79	0.70	0.29	0.11
위상	-23.19	-143.0	-99.31	-12.74	0.34

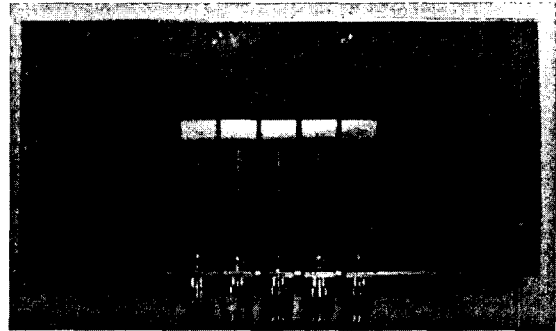
그림[4]는 60[deg]를 지향할 때 윈도우가 있는 경우로 보정 후 이상적인 빔 패턴으로 근사하므로 역정규화가 성공적임을 알 수 있고 윈도우를 씌움으로써, SLL이 감소됨을 확인 할 수 있다. 오차 보정 후의 배열 안테나의 이득이 약0.59[dB] 증가했다.



그림[4] 보정 후 배열 안테나의 빔패턴, 지향각: 60[deg]

### 2.3 배열 안테나 제작 및 측정 결과

10GHz의  $\epsilon_r = 6.15$ ,  $h = 25\text{mil}$ 의 마이크로스트립 기판으로 폭=10.6469mm, 길이=5.692mm의 Patch와 폭=0.2073mm, 길이=3.7590mm의 트랜스 포머로 구현된 5개의 개별 급전 배열 안테나를 설계하여 포항공대에서 보유하고 있는 안테나 측정 시설인 Compact range에서 측정하였다. 그림[5]은 제작된 배열 안테나의 모습이다. 측정 시 한번에 하나의 안테나에 급전을 주고 나머지 안테나는 50Ω 정합시켰다



그림[5]은 제작된 배열 안테나의 모습

표[3]은 측정된 data를 이용하여 추정된 오차 보정 행렬의 크기를 dB값으로 나타낸 것으로 행렬이 정확하게 대칭이 아닌 이유는 실험시에 소자간 커플링 이외에 다른 오차 요인이 존재하기 때문이다.

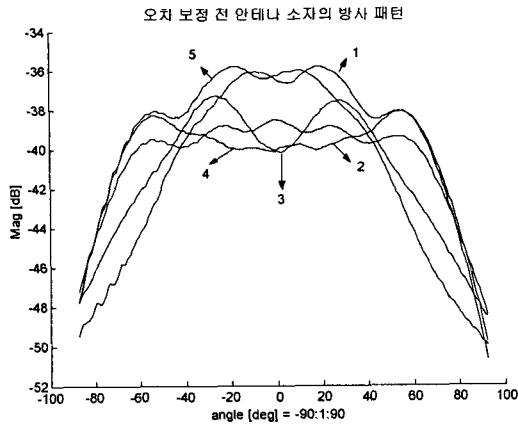
표 [3] 추정된 오차 보정 행렬의 크기[dB]

	1	2	3	4	5
1	0	-8.766	-12.50	-16.17	-20.74
2	-9.626	0.223	-8.384	-13.55	-18.91
3	-15.26	-8.049	0.564	-7.948	-14.73
4	-18.97	-13.59	-8.200	-0.063	-10.12
5	-20.96	-15.86	-11.90	-8.387	0.043

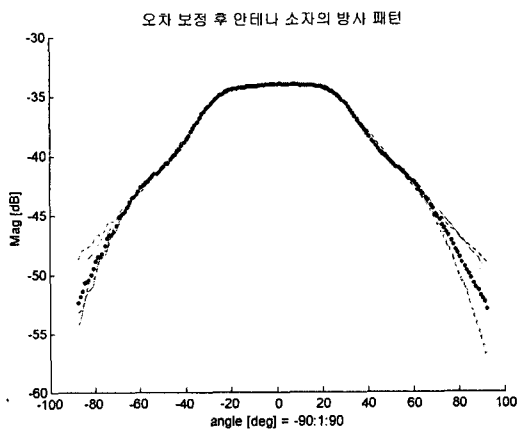
그림[6(a)]은 오차 보정 전의 개별 안테나의 방사 패턴으로 각 번호는 개별 안테나 소자의 번호이다. 소자간의 상호 간섭을 비롯한 많은 오차 요인 때문에 동일 하지 않은 방사 패턴을 보이고 있다. 그림[6(b)]는 오차 보정을 한 방사 패턴으로 추정된 오차 보정 행렬로 보정해 준 결과 안테나 패턴이 모두 동일하게 보정되었다.

### III. 결론

본 논문에서는 배열 안테나의 방사 패턴 모델을 제시하고 실험 data를 바탕으로 추정된 오차 보정 행렬로 디지털에서 빔 형성 가중치를 미리 왜곡시키는 알고리즘을 통해 배열 안테나의 오차를 보정해 보았다. 그 결과 오차 보정을 함으로써 모든 방사 소자 패턴이 동일해져 이상적인 빔 패턴에 근접할 수 있음을 알게 되었고, 빔 가중치에 윈도우를 씌움으로써 부엽레벨이 감소함을 확인 할 수 있었다.

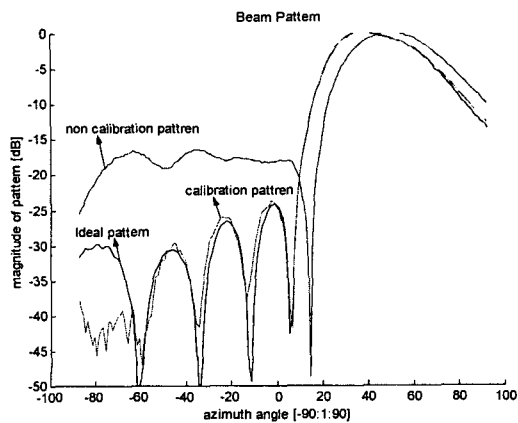


그림[6(a)] 오차 보정 전 개별 소자 방사 패턴



그림[6(b)] 오차 보정 후 개별 소자 방사 패턴

이때 방사패턴의 양 끝에서 보이는 불일치의 원인은 edge 효과이다. 그림[7]에서 오차가 보정된 빔 패턴이 이상적인 빔 패턴과 거의 같아짐을 확인할 수 있다. 또 부엽 레벨이 감소됨도 확인할 수 있다.



그림[7] 오차 보정 전 · 후 빔 패턴, 지향각 = 60[deg]

#### 참고문헌

- [1]H. Steyskal and J.S. Herd "Mutual coupling compensation in small array antenna", *IEEE, Trans. Antenna Propagat.*, vol. 39, pp. 1971-1975,c. 1990
- [2]J.Pierre and M. Kaveh, "Experimental performance of calibration and direction-finding algorithms",*Proc ICASSP-91*, pp. 1365-1368, 1991
- [3]I.S.D. Solomon, etal, "Over-the-horizon radar array calibration using echoes from ionized meteor trails ", *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, pp.173-180, 1998
- [4]Hyung Geun Park, Jae Ho Jung, Hyun Seo Oh ans Mun Geon Kyeong " Model based antenna array calibration for smart antenna systems ", *Electronics Letters 18th*, vol.38, No.15, July 2002
- [5]C.M.S. See, "Sensor array calibration in the presence of mutual coupling and unknown sensor gains and phase", *E.L.*, vol30, No.5, March 1994
- [6] John Litva and Titus kwok-Yeung Lo " Digital Beamforming in Wireless Communications", Artech House Boston, London,