

디지털 빔 형성을 위한 배열 안테나 오차 보정

Antenna Array Calibration for Digital Beamforming

최희영 · 박형근 · 김영수 · 방승찬*

Hee-Young Choi · Hyung-Geun Park · Young-Soo Kim · Seung-Chan Bang*

요 약

배열 안테나는 많은 오차 요인을 포함하고 있는데 그로 인하여 빔 패턴의 부엽 레벨이 증가하고 안테나 이득이 감소하게 된다. 본 논문에서는 배열 안테나 오차 중 소자간 상호 커플링과 급전부의 불균일한 전달 함수 오차를 제거하는 알고리즘을 제시하였다. 이러한 오차들은 방사 소자간 상호 연동을 나타내는 행렬로 모델링하였고 이 행렬은 특정 각도들에서 측정된 배열 응답 벡터로부터 추정하였다. 배열 안테나 오차는 추정된 오차 보정 행렬을 이용하여 빔 가중치를 미리 왜곡함으로써 보정하였다. 전파 시뮬레이션과 실험을 통하여 제시된 보정 알고리즘이 부엽 레벨을 감소시키고 안테나 이득을 증가하는 것을 확인하였다.

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. 서 론

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. 이러한 디지털 빔 형성 기법은 다중 빔 생성이 용이하기 때문에 기존의 아날로그 빔 형성에 비해 유용하다. 대표적인 예로 스마트 안테나 시스템을 들 수 있다^[6]. 기존의 CDMA 방식을 사용하는 셀룰러의 경우 중심각을

3개(120도)의 고정각도로 나눈 섹터 별로 처리하기 때문에 동일 섹터내의 사용자들 사이의 간섭이 발생한다. 그러나 디지털 빔 형성 기법을 이용하는 스마트 안테나를 적용할 경우 각 사용자마다 독립적인 빔을 형성하므로 동일 섹터 내에서도 서로 간섭을 일으키지 않는다. 이러한 디지털 빔 형성 기법의 이점에도 불구하고 여러 요인으로부터 야기되는 오차로 인해 배열 안테나의 빔이 왜곡되어 안테나 이득이 감소하고 부엽 레벨이 증가하여 지향각을 정확하게 제어할 수 없게 된다. 따라서 정확한 지향각의 제

「이 연구는 한국전자통신연구원 지원으로 수행되었음.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Dept. of EEE-Pohang University of Science and Technology)

*한국전자통신연구원 이동통신연구소(Electronics and Telecommunications Research Institute, Mobile Telecommunication Research Laboratory)

· 논문 번호 : 20031115-14S

· 수정완료일자 : 2002년 12월 22일

어를 요구하는 시스템에서는 발생한 오차를 보정할 필요가 있다. 배열 안테나 오차는 안테나간 상호 간섭, 급전부의 전달 함수 오차, 안테나 위치 오차, 안테나 주위 구조체에 의한 산란, 유한 도체판에 의한 edge 산란 등에 의해 발생하며 이와 같은 오차가 발생할 경우 패턴의 부엽 레벨이 증가하고, 이득이 감소하여 지향각을 정확하게 제어하는 것이 어려워진다.

본 논문에서는 안테나 방사패턴 모델을 바탕으로 디지털에서 빔 형성 가중치를 미리 왜곡함으로써 오차를 보정하는 방법을 제시하였다. 제안된 알고리즘은 부엽 레벨을 감소시키고 안테나 이득을 증가하는 것을 Ensemble을 이용한 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

II. 오차 보정 행렬 추정 알고리즘

그림 1에서 보듯이 N 개의 소자가 거리 d 의 간격으로 배열되어 있고 각각 개별 전압을 $V_1 \sim V_N$ 라고 할 때 i 번째 소자에 전압을 인가할 경우 임의의 θ 방향으로 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 필드 세기를 γ_i 라고 정의하면 식 (1)과 같다.

$$\gamma_i = \alpha f(\theta) c_i^T a(\theta) V_i \quad (1)$$

여기서 α 는 비례 상수이고 V_i 는 i 번째 소자에 넣어 준 전압이며 c_i 는 소자간 상호 커플링과 급전부의 전달 함수 오차를 포함한 벡터이다. 또한 $f(\theta)$ 는 단일 소자 방사패턴이고, $a(\theta) = [1 e^{j\theta} e^{j2\theta} \dots e^{j(N-1)\theta}]^T$ 는 오차를 포함하지 않는 배열 응답 벡터를 나타낸다. 배열 응답 벡터를 각 안테나 소자에 인가한 전압과 필드 세기의 비로 정의하면 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$b(\theta) = \left[\frac{\gamma_1}{\alpha V_1} \frac{\gamma_2}{\alpha V_2} \dots \frac{\gamma_N}{\alpha V_N} \right]^T \quad (2)$$

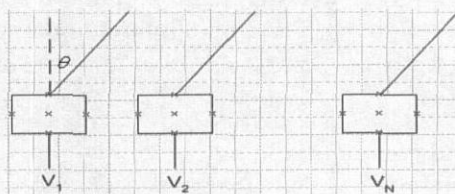


그림 1. 배열 안테나 모델
Fig. 1. Array antenna model.

식 (1)과 식 (2)을 이용하여 배열 응답 벡터를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$b(\theta) = f(\theta) C^T a(\theta) \quad (3)$$

여기서 $C = [c_1 c_2 \dots c_N]$ 이다. 소자간 커플링과 급전부의 전달 함수 오차를 포함하는 행렬 C^T 를 오차 보정 행렬 M 이라고 하면 오차를 포함하는 배열 응답 벡터는 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$b(\theta) = f(\theta) M a(\theta) \quad (4)$$

식 (4)와 같은 배열 안테나 모델에 이용하는 오차 보정 알고리즘에는 다음과 같은 것들이 있다. [1]에서는 M 을 추정하기 위해 각 패턴을 푸리에 변환하는 방법을 이용했는데 이 방식은 소자간 간격이 0.5 λ 이상일 때에만 적용이 가능하고 단일 방사 패턴 $f(\theta)$ 을 정확히 알고 있어야 한다는 단점이 있다. [2]에서는 Least mean square 방식을 이용하여 M 을 추정하였다. 측정량이 [1]보다 작지만 이 방법 역시 정확한 $f(\theta)$ 을 요구한다. [3]에서는 단일 방향으로부터 수신되는 레이다 신호에 대한 공분산 행렬을 만들고 그것의 잡음 고유 벡터와 배열 응답벡터의 직교성을 이용하여 오차 보정 행렬을 얻을 수 있다. 이 알고리즘에서는 오차 보정 행렬을 대칭 행렬로 모델링하므로 상호 커플링 행렬은 포함하지만 급전부 전달함수 오차를 포함하지 못하는 단점이 있다. 또한, 수신 신호가 상관성이 큰 다중 경로로 구성된 경우에는 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 기존 알고리즘의 단점을 보완하기 위하여 안테나 측정 시설에서 직접 측정된 배열 응답벡터를 이용하여 오차 보정 행렬을 구하는 방법을 제시한다.

M 을 추정하는 과정은 다음과 같다.

1단계: $b(\theta_i)$ 측정. $i = 1, 2, \dots, N_{az} (N_{az} > N)$

2단계: 1단계에서 측정된 $b(\theta_i)$ 를 외적하여 공분산 행렬을 만들고 잡음 고유치에 해당하는 고유 벡터를 구한다. 이때 Eigen-decomposition에 의해 공분산은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$R_i = b(\theta_i) b^H(\theta_i) \quad (5)$$

$$= \sum_{j=1}^N \lambda_j u_{ji} u_{ji}^H \quad (6)$$

3단계: 공분산 행렬은 Rank가 1이므로 고유치가

$\lambda_{1,i} < \lambda_{2,i} < \dots < \lambda_{N,i}$ 의 관계에 있다. 가장 큰 고유치를 제외한 $(N-1)$ 개의 잡음 고유벡터를 $\mathbf{u}_{j,i}$ 로 놓는다면 배열 응답 벡터와 $\mathbf{u}_{j,i}$ 는 식 (7)과 같이 직교한다.

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

4단계: 잡음 고유 벡터를 행렬로 묶어

$\mathbf{U}_i = [\mathbf{u}_{1,i}, \mathbf{u}_{2,i}, \mathbf{u}_{3,i}, \dots, \mathbf{u}_{(N-1),i}]$ 두고 다음과 같은 비용 함수를 정의한다.

$$J = \sum_{i=1}^{N_f} \|(\mathbf{M}\mathbf{a}(\theta_i))^H \mathbf{U}_i\|^2 \quad (8)$$

식 (4)과 식 (7)으로부터 비용함수 J 가 최소값 일 때 \mathbf{M} 이 바로 추정하고자 오차 보정 행렬임을 알 수 있다. 그런데 행렬 \mathbf{M} 을 구하는 것은 난해하므로 식 (9)와 같이 행렬 \mathbf{M} 을 벡터 \mathbf{m} 으로 정의하여 식 (8)에 대입하면 식 (10)과 같이 정리된다.

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

$$J = \mathbf{m}^H \sum_{i=1}^{N_f} (\mathbf{A}_i^H \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^H \mathbf{A}_i) \mathbf{m} \quad (10)$$

$$G = \sum_{i=1}^{N_f} (\mathbf{A}_i^H \mathbf{U}_i \mathbf{U}_i^H \mathbf{A}_i) \\ \therefore J = \mathbf{m}^H \mathbf{G} \mathbf{m} \quad (11)$$

식 (11)의 해를 얻기 위해 constrained least squares 방식을 이용한다. constraint를 다음과 같이 $\mathbf{m}^H \mathbf{e} = 1$ 두면 식 (12)와 같은 해를 얻을 수 있다.

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

5단계: 4단계에서 구한 벡터 \mathbf{m} 을 식 (9)를 이용하여 행렬 \mathbf{M} 으로 변환한다.

일반적으로 배열 안테나의 빔 패턴은 식 (13)과 같이 배열 응답 벡터와 디지털 빔 형성 가중치, \mathbf{w} 의 내적으로 표현한다.

$$g(\theta) = \mathbf{w}^T \mathbf{b}(\theta) \quad (13)$$

오차를 무시한 빔 형성 가중치를 지향 각도에 대한 이상적인 배열 안테나의 배열 응답 벡터로 설정하면 왜곡된 빔 패턴은 다음과 같다.

$$g_{unca}(\theta, \theta_0) = \mathbf{w}^T \mathbf{b}(\theta) \quad | \quad \mathbf{w} = \Lambda \mathbf{a}^*(\theta_0)$$

$$= (\Lambda \mathbf{a}^*(\theta_0))^T \mathbf{b}(\theta) \quad (14)$$

여기에서 θ_0 는 지향각이고 Λ 은 부엽레벨을 감소시키기 위해 디지털 빔 형성 가중치에 곱해주는 윈도우이다. 한편, 오차가 없는 이상적인 안테나의 빔 패턴은 식 (15)와 같다.

$$g_{ideal}(\theta, \theta_0) = f(\theta) \mathbf{w}^T \mathbf{a}(\theta) \quad | \quad \mathbf{w} = \Lambda \mathbf{a}^*(\theta_0) \\ = f(\theta) (\Lambda \mathbf{a}^*(\theta_0))^T \mathbf{a}(\theta) \quad (15)$$

따라서 안테나의 오차를 보정한다는 것은 적절한 빔 가중치를 적용함으로써 빔 패턴을 식 (15)로 근사시키는 것이므로 가중치 \mathbf{w} 는 식 (16)과 같이 정리된다.

$$\mathbf{w} = (\mathbf{M}^{-1})^T \Lambda \mathbf{a}^*(\theta_0) \quad (16)$$

III. 시뮬레이션 및 그 결과

Ensemble을 이용하여 안테나 오차 보정 알고리즘을 검증했다. 그림 2는 동일한 5개의 단일 안테나로 구현된 배열을 나타내고 소자간의 간격은 0.4λ 로 가정하였다.

시뮬레이션 결과 방사 소자의 패턴이 상호 커플링으로 인해 많이 왜곡되어 있음을 알 수 있다. 그림 3은 오차 보정 전의 각 소자의 방사 패턴을 나타낸다.



그림 2. 배열 안테나
Fig. 2. Array antennas.

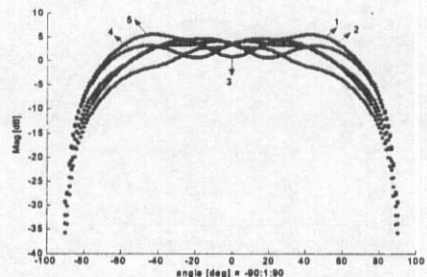


그림 3. 오차 보정 전의 각 소자의 방사 패턴
Fig. 3. Radiation patterns of the elements before calibration.

표 1. 추정된 오차 보정 행렬 크기 [dB]

Table 1. Magnitude of the estimated calibration matrix.

	1	2	3	4	5
1	0	-8.122	-13.38	-17.21	-20.45
2	-7.939	-0.479	-8.456	-13.18	-16.43
3	-12.57	-8.450	-0.771	-8.454	-12.60
4	-16.40	-13.18	-8.444	-0.478	-7.967
5	-20.42	-17.21	-13.37	-8.113	-0.005

표 1은 -60~60 deg까지 10도 간격으로 추출한 데이터로 추정된 오차 보정 행렬을 dB값으로 나타낸 것이다. (1, 1)의 값은 constraint에 의해 항상 0이고 각 값은 source를 인가한 소자에 의해 유기되는 전류의 크기에 비례하므로 대각 성분이 비 대각 성분에 비해 큰 값을 갖는다. 또한 소자에 따라 상호 간섭 크기의 차로 유기되는 전류의 양이 다르기 때문 대각 성분의 크기가 동일하지는 않다.

그림 4는 오차 보정 후의 개별 소자들의 방사 패턴이다. 오차 보정 전에는 그림 3처럼 커플링으로 인해 패턴이 모두 달랐으나 오차 보정 후에는 그림 4와 같이 모든 패턴이 동일해짐을 확인하였다. 이는 식 (4)에서 제시한 배열 안테나 모델이 시뮬레이션에서 사용한 배열 안테나에 대하여 성립한다는 것을 의미한다.

본 논문에서 제시한 알고리즘을 이용하여 오차를 보정하기 위하여 앞서 언급한 식 (14)와 식 (16)을 이용하였다. 다음의 표 2와 표 3은 배열 안테나가 60 deg를 지향하는 경우, 오차 보정 전후의 빔 패턴을 얻기 위해 Ensemble에서 개별 안테나에 인가되는 빔 가중치의 크기와 위상 정보이다.

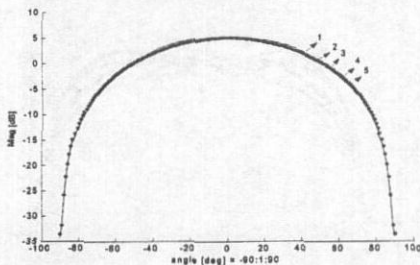


그림 4 오차 보정 후의 각 소자의 방사 패턴
Fig. 4. Radiation patterns of the elements after calibration.

표 2. 보정 전 빔 패턴을 위한 빔 가중치의 크기와 위상(지향각 : 60 deg)

Table 2. Magnitude and phase of beamforming weight for beam pattern before calibration.

	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 3. 보정 후 빔 패턴을 위한 빔 가중치의 크기와 위상(지향각 : 60 deg)

Table 3. Magnitude and phase of beamforming weight for beam pattern after calibration.

	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

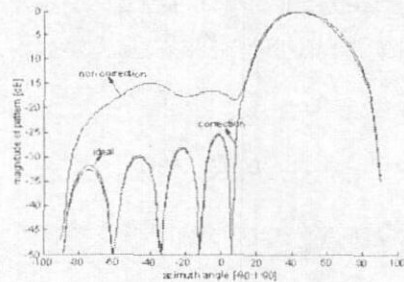


그림 5. 보정 전후 배열 안테나의 빔 패턴(지향각 : 60 deg)

Fig. 5. Beam pattern before and after calibration.

그림 5는 오차 보정 전후와 이상적인 경우의 안테나 빔 패턴을 나타낸다. 그 결과 오차 보정 후 이상적인 빔 패턴으로 근사하고 부엽레벨이 줄어들었음을 확인할 수 있다. 오차 보정 전 후의 배열 안테나의 이득은 약 0.59 dB이다.

IV. 배열 안테나 제작 및 측정 결과

동작 주파수 10 GHz의 배열 안테나를 제작하기 위해 $\epsilon_r = 6.15$, $h = 65 \text{ mil}$ 의 마이크로스트립 기판을 이용하여 폭과 길이가 각각 10.6469 mm, 5.692 mm의 Patch와 폭과 길이가 각각 0.2073 mm, 3.7590 mm의 트랜스포머로 구현된 5개의 개별 급전 배열 안테나를 설계하여 포항공대 안테나 측정 시설인 Compact range에서 측정하였다. 그림 6은 제작된 배열 안

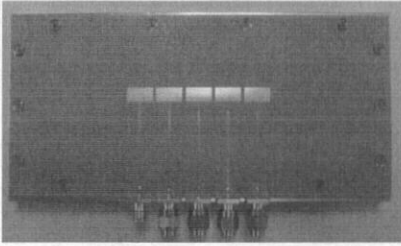


그림 6. 제작된 배열 안테나 사진
Fig. 6. Picture of fabricated array antenna.

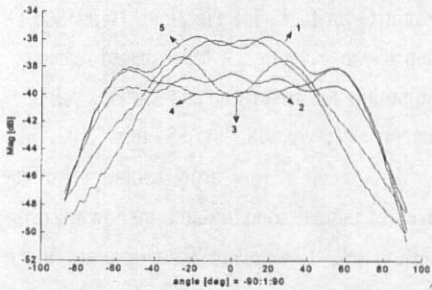


그림 7. 오차 보정 전 개별 소자 방사 패턴
Fig. 7. Radiation patterns of the elements before calibration.

테나의 모습이다. 측정 시 한번에 하나의 안테나에 급전을 주고 나머지 안테나는 50 Ω 정합시켰다.

그 결과를 그림 7에서 보인다. 그림 7은 오차 보정전의 개별 안테나의 방사 패턴으로 각 번호는 개별 안테나 소자의 번호를 의미한다. 소자간의 상호 간섭을 비롯한 많은 오차 요인 때문에 동일하지 않은 방사 패턴을 보인다.

표 4는 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.

그림 8은 추정된 오차 보정 행렬을 이용하여 오차

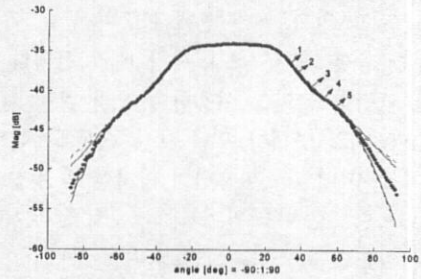


그림 8. 오차 보정 후 개별 소자 방사 패턴
Fig. 8. Radiation patterns of the elements after calibration.

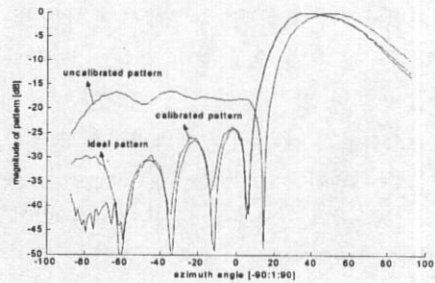


그림 9. 오차 보정 전후 빔 패턴: 지향각=60 deg
Fig. 9. Beam pattern before and after calibration.

를 보정한 후의 방사 패턴을 나타낸다. 그 결과 개별 소자의 방사 패턴이 시뮬레이션과 마찬가지로 거의 동일한 패턴으로 보정됨을 확인할 수 있다. 이때 그림 8의 방사 패턴 양끝에서 보이는 불일치의 원인은 주로 edge 산란 효과 때문인 것으로 추정된다^[4].

그림 9는 배열 안테나의 빔 패턴을 나타낸다. 그 결과 추정된 오차 보정 행렬을 이용하여 빔 형성 가중치를 변형함으로써 오차를 보정한 빔 패턴과 이상적인 빔 패턴이 같아짐을 확인할 수 있다. 또 부엽 레벨이 감소됨도 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 배열 안테나 오차 모델을 바탕으로 디지털 빔 형성을 위한 배열 안테나 오차 보정 알고리즘을 제시하고 실험 data를 바탕으로 추정된 오차 보정 행렬로 디지털에서 빔 형성 가중치를 미리 왜곡시키는 알고리즘을 통해 배열 안테나의 오차를 보정해 보았다. 제시한 알고리즘은 크게 배열 안테나 오차 행렬 추정 단계와 배열 안테나 오차 보정 단

표 4. 추정된 오차 보정 행렬 크기 [dB]
Table 4. Magnitude of the estimated calibration Matrix.

	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

계로 나눌 수 있다. 배열 안테나 오차 행렬 추정 단계에서는 유한 개의 각도에서의 배열 안테나 응답 벡터를 측정하고 이를 이용하여 오차 보정 행렬을 추정한다. 배열 안테나 오차 보정 단계에서는 추정된 오차 보정 행렬을 이용하여 디지털 빔 형성 가중치를 변형함으로써 배열 안테나 오차를 보정한다. 제시된 알고리즘을 검증하기 위하여 5개의 안테나 방사 소자로 구성된 마이크로스트립 배열 안테나에 대한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 Ensemble 틀을 이용하였으며 그 결과 오차 보정 후에 모든 안테나 방사 소자가 동일한 패턴을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 제시한 빔 형성 가중치 왜곡을 통한 오차 보정 방식을 채택하는 경우 배열 안테나 빔 패턴의 부엽 레벨이 최고 20 dB 정도 감소하고 안테나 이득이 약 0.6 dB까지 증가할 수 있음을 확인하였다. 포항공대 Compact range에서 수행한 실험 결과도 시뮬레이션과 거의 동일한 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] H. Steyskal, J. S. Herd, "Mutual coupling compensation in small array antenna", *IEEE, Trans. Antenna Propagat.*, vol. 39, pp. 1971-1975, 1990.
- [2] J. Pierre, M. Kaveh, "Experimental performance of calibration and direction - finding algorithms", *Proc. ICASSP - 91*, pp. 1365-1368, 1991.
- [3] I. S. D. Solomon, et al., "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 and 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", *Electronics Letters*, vol. 30, no. 5, March 1994.
- [6] John Litva, Titus kwok-Yeung Lo, *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House Boston, London.

최 희 영



1998년~2001년: 동국대학교 전자
전기공학과 (공학사)
2002년~현재: 포항공과대학교 전자
전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더, 안테나

박 형 근



1991년~1994년: 연세대학교 전기
공학과 (공학사)
1995년~1996년: 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학석사)
1997년~1998년: 포항공과대학교
전자파특화연구센터 연구원
1999년~2002년: 한국전자통신연

구원 연구원
2003년~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 레이더, 디지털 빔형성

김 영 수



1971년~1974년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1979년~1980년: Univ. of Kansas 전자공학과 (공학석사)

1981년~1984년: Univ. of Kansas 초고주파공학, 레이더/원격탐사 (공학박사)

1974년~1977년: 국방과학연구소 연구원

1978년~1983년: Remote Sensing Lab., Associate Project Engineer

1983년~1987년: Florida Atlantic Univ. 전자전기공학과, 조교수

1987년~현재: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 레이더, EMI/EMC, 원격탐사, 이동통신

방 승 찬



1984년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1986년: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1994년: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1986년~1987년: 금성사 중앙연구소

1987년~1992년: 디지털정보통신연구소

1994년~현재: 한국전자통신연구원 이동통신연구소 책임연구원

[주 관심분야] 다중안테나통신기술, 이동통신모뎀기술, 적응신호처리기술