

# 선형-원형배열 안테나에 따른 MIMO의 DOA 추정과 적응 빔성형 분석

양두영<sup>1</sup>, 이민수<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 통신공학과, <sup>2</sup>대진대학교 통신공학과

## Analysis of DOA Estimation and Adaptive Beam-forming of MIMO between Linear-circular Array Antennas

Doo-Yeong Yang<sup>1</sup> and Min-Soo Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Telecommunication Engineering, Jeju National University

<sup>2</sup>Dept. of Telecommunication Engineering, Daejin University

**요약** 본 논문에서는 비변수 추정 알고리즘을 토대로 선형배열 안테나와 원형배열 안테나로부터 수신되는 다중신호의 DOA와 적응 빔성형 알고리즘을 연구하고 분석하였다. 비변수 추정 알고리즘에서는 입사각의 함수로써 신호에너지를 추정하기 위하여 고분해능과 잡음억압을 도출하도록 비이차놈을 사용하여 규칙화 목적함수를 최소화하였다. 그리고 나서, 신호와 잡음공간 조정벡터로부터 DOA를 추정하였고, 공간벡터에 의하여 도출된 가중치 벡터를 적용하여 적응 빔성형 패턴을 개선하였다. 특히, 안테나 배열방법과 배열소자의 수에 따라 입사되는 다중신호의 방향성 판별 능력과 적응빔을 성형하는 능력을 비교하고 고찰하였다.

**Abstract** In this paper, DOA(direction of arrival) of multiple incident signals received from linear array antenna and circular array antenna, which is based on nonparametric estimation algorithm, and adaptive beam-forming algorithm are studied and analyzed. In nonparametric estimation algorithm, we minimize a regularized objective function for finding a estimate of the signal energy as a function of angle, using nonquadratic norm which leads to supper resolution and noise suppression. And then, DOA is estimated by the signal and noise spatial steering vector, and adaptive beam-forming pattern is improved by weight vectors obtained from the spatial vector. Especially, the discrimination ability of DOA and the adaptive beam-forming ability according to antenna array methods and the number of array elements are compared and considered.

**Key Words** : linear array, Circular array, DOA, Nonparametric Estimation algorithm, Adaptive Beam-forming pattern, Weight vector, Super resolution

### 1. 서론

과거에는 무선통신 시스템이 고정 빔성형 시스템을 사용하였기 때문에 통신신호의 방향이 바뀔 때 마다 신속하게 대응하지 못하였다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 고안된 다중신호처리 시스템은 스마트 배열 안테나 소자들을 이용하여 시공간 다중 입력신호들을 RF 하드웨어 기술과 신호처리(DSP)를 통하여 동시에 처리한다. 이

원리는 배열된 안테나 소자들 간의 신호를 결합시켜 입사되는 신호들의 방향을 알아내고, 그 방향으로 빔패턴을 적절하게 성형시킨다. 이렇게 하면 통신을 수행 중인 특정한 다수의 가입자들에게 배열 안테나로부터 RF 신호를 집중시킬 수 있으므로 신호 품질을 저하시키는 잡음이나 간섭 영향을 최소화시킬 수 있다.

최근에 고속의 데이터 전송율과 고주파 대역에서의 넓은 대역폭 그리고 보다 많은 채널 용량을 갖도록 구성하

본 논문은 2011년도 대진대학교 학술연구지원비로 수행되었음.

\*교신저자 : 이민수(lmsoo@daejin.ac.kr)

접수일 11년 04월 01일

수정일 11년 04월 29일

게재확정일 11년 06월 09일

는 시공간 처리 시스템의 실제적인 구현 방법들은 스마트 안테나(smart antenna), 송수신 다이버시티 기법, 시공간 부호 처리 기법을 비롯하여 다중입력에 대한 다중처리 기법인 MIMO(multiple input multiple output)에 대한 관심이 집중되고 있다[1,2]. 특히, 스마트 안테나 시스템은 여러 개의 안테나 소자를 배열하여 각각의 안테나 소자에 수신되는 신호들의 이득 및 위상을 조절함으로써, 기지국에서 원하는 사용자의 방향으로부터 전파되어 오는 신호만을 수신하고 그 이외의 방향에서 전파되어 오는 다중간섭에 의한 잡음신호 레벨을 크게 감소시켜 시스템의 성능을 향상시키고 기지국의 채널 용량을 증가시키는 시스템이다. 그리고 기존 시스템을 사용할 때에 비해 단말기의 전력 소비를 줄일 수 있고 단말기의 통화 시간 및 배터리 사용 시간을 증가시킬 수 있다.

스마트 안테나 시스템에서 원하는 방향으로 빔을 성형 (beam-forming)하기 위해서는 먼저 신호의 방향성(DOA: direction of arrival)을 추정해야 한다. DOA를 추정하는 능력은 배열 안테나 소자들을 적절히 배치하여 구성하는 방법과 입사되는 신호의 DOA를 찾아내는 알고리즘에 달려 있다. 배열 안테나의 구성 원리는 선형배열(linear array), 평면배열(planar array) 등 다양한 방법들이 있다.[3] 그리고 DOA 추정 알고리즘은 변수 추정 알고리즘인 MUSIC알고리즘, ESPRIT 알고리즘, ML법, ILSP-CM 등이 있다.[4-7]

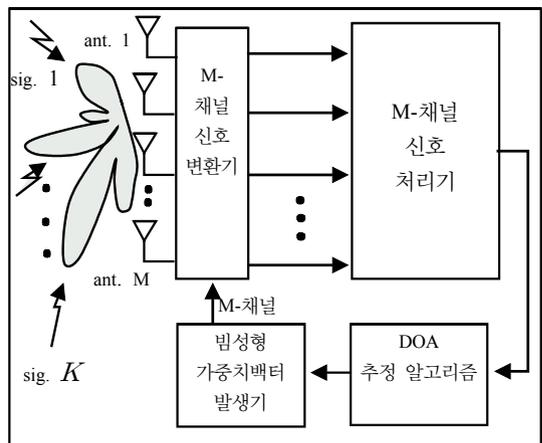
본 논문에서는 전형적인 선형배열(typical linear array) 안테나와 원형배열(circular array) 안테나로부터 입사되는 다중 입력신호의 방향을 판별하고 적응빔을 성형하는 능력을 분석한다. 그리고 안테나의 배열방법에 따라 수신 각도 별로 달라지는 분해능의 차이를 분석하고 적절한 배열 안테나 시스템을 구축하기 위한 방법을 도출한다. 다중 입력신호의 방향성인 DOA는 변수 추정 알고리즘보다 방향성 성능이 우수한 비변수 추정 알고리즘(nonparametric estimation algorithm)을 이용한다[8-12].

비변수 추정 알고리즘은 배열 안테나로부터 수신된 다중신호의 상관행렬을 희소강제와 고분해능을 만드는 데 적합한 비이차형(nonquadratic) 조정함수로 변환하고, 비이차놈( $l_p$ -norm) 결정법을 사용한다. 그리고 높 인자가 결정되면 다중신호의 전력 스펙트럼을 분석한 후 다중 입력신호의 DOA를 결정하고, 결정된 DOA을 토대로 가중치를 산출하여 원하는 방향에 빔을 성형시킬 수 있는 적응 빔성형 패턴을 구한다. 특히, 배열 방법에 따라 그리고 안테나로 입사되는 공간 신호원의 에너지 크기와 방향에 따라 분해능의 특성을 개선하는 적응 빔성형 알고리즘을 제안한다.

## 2. 다중신호의 표현과 관측 모델

그림 1은  $M$ 개의 배열 안테나에 입사되는  $K$ 개의 다중신호에 대한 관측 모델과 방향성 추정 알고리즘의 계통도이다. 이동통신 환경에서 다중경로를 거쳐서 온 신호는 그 진폭이나 위상이 직접 경로를 거친 신호와는 다르게 지연되고 감쇄된 형태를 갖는다[13,14,16]. 따라서  $M$ 개의 배열안테나 소자에 수신된 신호  $\mathbf{y}(t)$ 는  $K$ 개의 입사신호와 잡음의 조합으로 나타낼 수 있다. 여러 방향에서 다중신호원이 배열안테나로 입사될 때  $\{\theta_1, \dots, \theta_K\}$ 는 모든 신호의 도달 방향을 나타낸다. 그러므로 시간에 따른 안테나 수신신호  $\mathbf{y}(t)$ 는  $M \times 1$  벡터인  $\mathbf{s}(t)$ 로 표현할 수 있다. 이에 따른 관측모델은 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \tag{1}$$



[그림 1] DOA 추정과 적응 빔성형 알고리즘의 관측모델과 계통도

[Fig. 1] Observation model and flowchart for DOA estimation and adaptive beamforming algorithm

여기서  $M$ 개의 배열 소자 수를 갖는 안테나로부터 수신된  $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_M(t)]^T$  는 안테나 소자에서 측정되는  $M \times 1$  인 전치 벡터 신호원이고,  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$  는 전치 벡터 입사신호원,  $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$  는 전치 벡터 잡음원을 나타낸다. 그리고 방향성 조정(steering) 벡터  $\mathbf{A} = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$  는 모든 가능한 DOA에 대응하는  $M \times K$  인 벡터로 구성된다. 또한  $M$ 개의 다이폴 안테나에 입사되는  $i$  번째 공간 신호원은

$$s_i(t) = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q e_{i,p} b_{i,p}(t-t_q) c_{i,p}(t) \quad (2)$$

인 WCDMA 신호원을 고려한다[13-15]. 여기서  $e_{i,p}$ 는  $i$  번째 입사된 변조신호의 진폭을 나타내며,  $b_{i,p}$ 와  $c_{i,p}$ 은 각각  $i$  번째 데이터 신호의  $p$  번째 정보비트와 PN코드이다. 그리고  $t_q$ 는 다중경로 신호의 지연을 나타낸다.

### 3. 배열방법에 따른 방향성 추정 알고리즘

#### 3.1 선형배열과 원형배열에 따른 DOA 조정벡터

배열은 규칙적으로 배열된  $M$ 개의 동일 안테나 소자들 로 이루어진다.  $M$  개의 동일 안테나 소자들이 직선상에 놓여 있으면 선형배열이고, 원형 고리 상에 놓여 있으면 원형배열이다.

선형배열인 경우, 다중 입사신호에 대한 모든 가능한 DOA에 대응하는 방향성 조정(steering) 벡터  $\mathbf{A}$ 는

$$\mathbf{A}_l(\theta) = [\mathbf{a}_l(\theta_1) \ \mathbf{a}_l(\theta_2) \ \cdots \ \mathbf{a}_l(\theta_K)] \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_l(\theta_i) = [e^{-j\beta d_1 \cos \theta_i} \ e^{-j\beta d_2 \cos \theta_i} \ \cdots \ e^{-j\beta d_K \cos \theta_i}] \quad (4)$$

이다. 여기서  $\beta$ 는 입사 신호의 전파상수,  $d_K$ 는 원점에서  $K$ 번째 배열 소자간의 거리,  $\theta_i$ 는 신호의 입사각을 나타낸다. 식 (3)의 방향성 조정 벡터의 정보를 이용하면 전력 스펙트럼은 계산된다.

원형배열인 경우, 다중 입사신호에 대한 모든 가능한 DOA에 대응하는 방향성 조정(steering) 벡터  $\mathbf{A}$ 는

$$\mathbf{A}_c(\theta) = [\mathbf{a}_c(\theta_1) \ \mathbf{a}_c(\theta_2) \ \cdots \ \mathbf{a}_c(\theta_K)] \quad (5)$$

$$\mathbf{a}_c(\theta_i) = \begin{bmatrix} e^{-j\beta \rho_1 \cos(\theta_i - \theta_1) \sin \phi} & e^{-j\beta \rho_2 \cos(\theta_i - \theta_2) \sin \phi} & \cdots \\ & \cdots & e^{-j\beta \rho_K \cos(\theta_i - \theta_K) \sin \phi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

이다. 여기서  $\rho_K$ 은 원점에서 각 소자 중심까지의 방사상 거리이다. 모든 배열 소자들은 동일한 반경을 갖는다. 그리고  $\theta_K$ 은  $K$ 번째 소자가 위치한 방사상의 각,  $\theta_i$ 는 신호의 입사 각,  $\phi$ 는  $\theta$ 축과 직교하는 평면으로부터 이루는 각을 나타낸다.

#### 3.2 비변수 방향성추정 알고리즘

희소강제조정(regularized sparsity constraint)을 포함하는 비변수(nonparametric) 추정 알고리즘은 각도의 함수로 된 신호 에너지를 추정하기 위해 조정된 목적함수를 최소화하는 변환 구조를 이용하게 된다[8-12]. 특히 문제를 해결하고 희소강제와 고분해능을 만드는 데 적합한 비이차방정식(nonquadratic) 조정함수의 기능을 갖는  $l_p$ -norm을 사용하는 것이 이 알고리즘의 요점이다. 특히, 배열 안테나로 입사되는 공간 신호원의 에너지 크기와 방향에 따라 분해능의 조정기능을 갖는  $l_p$ -norm의  $p$ 값이 달라지기 때문에  $p$ 값을 최적으로 수립시킬 수 있는 방법과 분해능변수  $\alpha$ 값을 최적으로 수립시킬 수 있는 알고리즘이 필요하다.

식 (1)의  $\mathbf{s}(t)$ 는 기본적으로 신호원의 DOA에서 최대치를 갖는다. 따라서 안테나에서 관측된  $\mathbf{y}(t)$ 로부터  $\mathbf{s}(t)$ 를 얻어야 한다. 이러한 과정은 일반적으로 불량설정 역문제(ill-posed inverse)이다. 이러한 불량설정 역문제를 희소강제조정을 통해서 해결하게 된다. 그러면 에너지는 적은 수의 DOA들에 집중된다.

다중 신호원으로부터 입사신호원의 방향을 추출하기 위한 시간적 관측에서 합성된 목적함수는 다음과 같다.

$$L(\bar{\mathbf{s}}) = E[\|\mathbf{y}(t) - \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}\|_2^2] + \|\bar{\mathbf{s}}\|_p^p \quad (7)$$

여기서  $E$ 는 앙상블 시평균 연산자(ensemble expectation operator)를 나타내며  $\|\cdot\|_2^2$ 는  $l_2$ -norm으로

$$\|\bar{\mathbf{s}}\|_p = \left( \sum_{i=1}^K |\mathbf{s}_i|^p \right)^{1/p}$$

을 나타낸다.  $\bar{\mathbf{s}}$ 는 신호가 시간적으로

로 샘플링되어 조합된 수신 신호임을 표현한 것이다. 식 (7)의 첫 번째 항은  $l_2$ -norm에 근거한 신호 충실도 항으로 최적화를 하기 전에 시간적으로 신호를 조합하며, 두 번째 항은 강제하고자 하는 희소강제조정 항이다. 두 번째 항에서 파라미터  $p$ 의 선택이 고분해능과 잡음 억제 목적을 달성하는데 중요한 매개체 역할을 담당한다.

식(7)에서  $p \leq 1$ 일 때 원 신호 근처에서  $l_p$ -norm의 미분 불능으로 인한 문제를 해결하기 위해 식 (8)과 같이  $l_p$ -norm을 근사화 시킨다. 식 (7)에 근사화를 적용한 목적함수는 다음과 같다.

$$L_\epsilon(\bar{\mathbf{s}}) = \frac{1}{N_s} \left( \sum_{t=1}^{N_s} \|\mathbf{y}(t) - \mathbf{A}\bar{\mathbf{s}}\|_2^2 \right) + \alpha \sum_{i=1}^K (|\bar{\mathbf{s}}_i|^2 + \epsilon)^{p/2} \quad (8)$$

여기서  $N_s$ 는 알고리즘이 초당 처리해야 할 표본(snapshot)의 수를 나타내며 식 (7)을 목적함수로 사용하여  $L_\epsilon(\bar{\mathbf{s}})$ 의 값을 최소화시킨다. 식 (7)에서 수치적 최적화 문제를 해결하기 위하여  $p$ 와  $\alpha$ 의 근사값을 갖는 반이차(half-quadratic) 조정법을 사용한다. 반이차조정법은 비이차형(non-quadratic)의 최적화 문제를 이차형(quadratic) 문제의 수열로 변환시킨다. 결과적인 반복 알고리즘은 다음과 같다.

$$\mathbf{H}(\hat{\mathbf{s}}^{(n)})\hat{\mathbf{s}}^{(n+1)} = \frac{1}{N_s} \left( \sum_{t=1}^{N_s} \mathbf{A}^H \mathbf{y}(t) \right) \quad (9)$$

여기서  $n$ 은 반복 횟수를 나타내고,  $\mathbf{A}^H$ 는  $\mathbf{A}$ 의 공액 복소(conjugate complex) 전치행렬,  $\hat{\mathbf{s}}$ 는 반복 알고리즘을 수행하는 과정에서  $n$ 번째 도출된  $\bar{\mathbf{s}}$ 의 값을 의미한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\bar{\mathbf{s}}) &\equiv \mathbf{A}^H \mathbf{A} + \alpha \mathbf{A}(\bar{\mathbf{s}}) \\ \mathbf{A}(\bar{\mathbf{s}}) &\equiv \text{diag} \left\{ \frac{p/2}{(|\bar{\mathbf{s}}_i|^2 + \epsilon)^{1-p/2}} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$\text{diag}\{\cdot\}$ 는  $\bar{\mathbf{s}}$ 의  $i$ 번째 성분을 갖는 대각행렬을 나타낸다. 최적화는 식 (8)가  $\frac{\|\hat{\mathbf{s}}^{(n+1)} - \hat{\mathbf{s}}^{(n)}\|_2^2}{\|\hat{\mathbf{s}}^{(n)}\|_2^2} < \delta$  일 때까지 반복한다. 여기서  $\delta$ 는 수렴조건을 나타내는 상수이다. 이러한 형태의 알고리즘의 수렴 특성은 임의의 초기 값으로부터 지역적 최소값으로 수렴하는 것을 보장한다. 그리고 식 (8)의 반복과정에서 파라미터  $\alpha$ 의 변환은 전단계의 신호와 현재의 신호를 비교하여 변환하도록 하였다. 제안한 파라미터  $\alpha$ 의 최적화 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \frac{[\hat{\mathbf{s}}^{(n)}]^H \hat{\mathbf{s}}^{(n+1)}}{[\hat{\mathbf{s}}^{(n+1)}]^H \hat{\mathbf{s}}^{(n+1)}} \quad (11)$$

#### 4. 적응 빔성형 패턴

방향성 추정 알고리즘의 전력 스펙트럼으로부터 얻어진 DOA를 식 (3)과 (5)의 방향성 조정 벡터에 대입하여 가중치를 구한 다음,  $M$ 개의 선형 배열을 갖는 빔성형 (beam-forming) 안테나의 배열인자(array factor) 식에 적용하면 적응 빔성형 패턴을 얻을 수 있다.

$$BF_l = \sum_{n=1}^M \omega_n^l \cdot \exp[j(n-1)\beta d \cos\theta] \quad (12)$$

여기서  $M$ 은 등간격인 배열 소자 수이고,  $\beta$ 는 전파상수,  $d$ 는 배열 소자간 간격이다. 가중치 벡터  $\omega_n^l$ 은 식 (9)에서 구한  $\text{DOA}(\theta_{\text{doa}})$ 를 식 (3)에 대입하여 얻어진 결과로써  $\omega_n^l = I_n \exp[-j(n-1)\beta d \cos\theta_{\text{doa}}]$ 이다. 그리고  $I_n$ 은 배열 안테나 소자로 인가된 전류를 나타낸다.

$M$ 개의 안테나소자로 구성된 원형배열인 경우에도 빔성형 안테나의 배열인자 식에 동일한 방법을 적용하면 적응 빔성형 패턴을 얻을 수 있다.

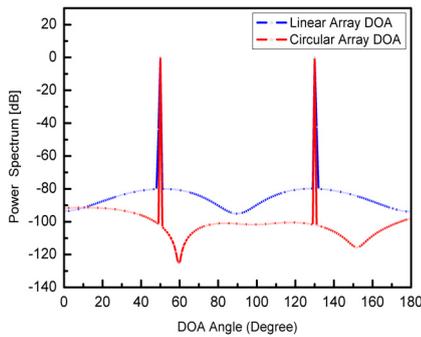
$$BF_c = \sum_{n=1}^M \omega_n^c \cdot \exp[j\beta \rho_n \cos(\theta - \theta_n) \sin\phi] \quad (13)$$

여기서  $\rho_n$ 과  $\theta_n$ 은 각각 배열 안테나 소자가 놓인 반경과 각도이며, 가중치 벡터  $\omega_n^c$ 은 식(9)에서 구한  $\text{DOA}(\theta_{\text{doa}})$ 를 식 (5)에 대입하여 얻어진 결과로써  $\omega_n^c = I_n \exp[-j\beta \rho_n \cos(\theta_{\text{doa}} - \theta_n) \sin\phi]$ 이다.

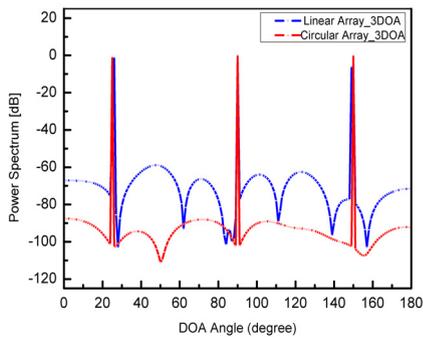
#### 5. DOA 추정 시뮬레이션과 적응 빔성형

본 논문에서 가정한 다중입력 신호원은 이동통신환경에서의 DOA 추정능력을 확인하기 위해 방향성과 페이딩을 포함하는 CDMA 신호를 사용하였다. 안테나로 들어오는 입사신호의 입사각을 추정하기 위하여 배열 소자의 수는 각각  $M=4, 8, 12$ 개의 배열구조를 가지며, 배열간격은 선형배열인 경우는 일직선상에 반파장이고, 원형배열인 경우는 반경이 일정한 원주를 따라 반파장이다. 그리고 모든 배열 소자는 등 간격으로 배열된 경우를 가정하였다. 또한 방향성 조정(steering) 벡터는  $0^\circ$ 에서  $180^\circ$ 까지  $1^\circ$ 씩 분할하여 구성하였으며, 중심 주파수가 1.95GHz인 다중 입사신호의 수는 2~5개로 가정하여 DOA 추정 결과 값을 산출하였다.

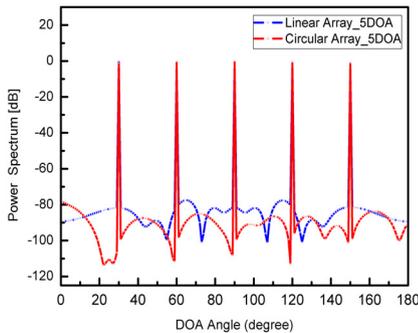
DOA 추정 비변수 알고리즘인 비이차놈결정 알고리즘을 시뮬레이션하는 과정에서는 수렴조건을  $\delta = 10^{-3}$  이하로 놓고, 고분해능과 잡음억제의 목적을 달성할 수 있도록 놈결정 파라미터  $p$ 와  $\alpha$ 를 가변시켜 가면서 방향성 추정능력을 산출한 결과,  $p=0.1, \alpha=1$  값에서 최적의 성능을 나타내었다.



a) M=4, incidence angles (50°,130°)



b) M=8, incidence angles (25°,90°,150°)

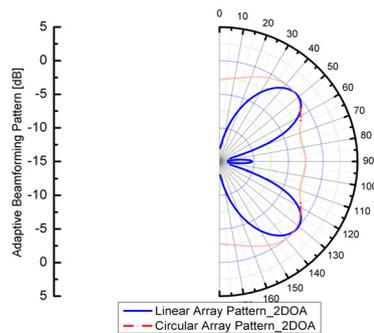


c) M=12, incidence angles (30°,60°,90°,120°,150°)

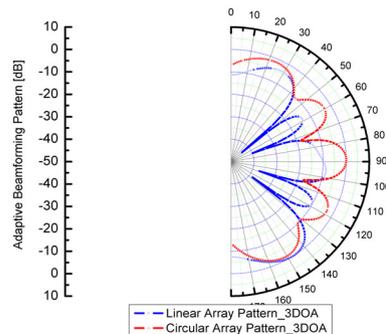
[그림 2] 입사각에 따른 다중신호의 DOA 추정 결과  
[Fig. 2] DOA estimation results according to multiple signals

그림 2는 입사각에 따른 선형배열과 원형배열인 경우에 대한 DOA의 추정 결과이다. 그림 2-a는 입사각이 50°, 130°인 2개의 입사 신호가 4개의 선형배열 소자와 원형배열 소자를 갖는 안테나로 입사될 때, 식 (9)의 DOA 추정 알고리즘에 의해 DOA 추정각을 찾아낸 결과이다. 그림에 나타난 것처럼, 2개의 입사 신호에 대한 DOA 추정 능력은 두 알고리즘 모두 입사된 각도에서 정확히 방향성 추정을 잘하고 있음을 알 수 있다. 그러나 선형배열인

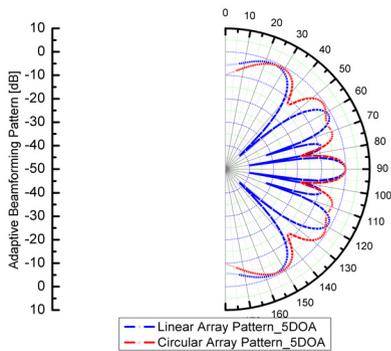
경우는 DOA 추정 각에서 신호를 분별하고 난 이외의 각에서는 -80dB 정도의 신호 분해능을 나타내고 있는 반면에, 원형배열인 경우는 -100dB 이하의 분해능을 보이고 있어서 선형배열인 경우 보다 우수한 신호분별 능력을 갖는다. 따라서 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 신호분해능이 20dB 정도 우수하게 나타난다. 그림 2-b는 입사각이 25°, 90°, 150°인 3개의 입사 신호가 8개의 선형배열 소자와 원형배열 소자를 갖는 안테나로 입사될 때 DOA 추정 알고리즘에 의해 DOA를 추정한 결과이다. 그림에 나타난 것처럼, 3개의 입사 신호에 대한 DOA 추정 능력은 두 알고리즘 모두 입사된 각도에서 정확히 방향성 추정을 잘하고 있지만, 원형배열인 경우보다 신호분해능이 30dB 정도 우수하다. 그림 2-c는 입사각이 30°, 60°, 90°, 120°, 150°인 5개의 입사 신호가 12개의 선형배열 소자와 원형배열 소자를 갖는 안테나로 입사될 때 DOA 추정 알고리즘에 의해 DOA를 추정한 결과이다. 그림에 나타난 것처럼, 5개의 입사 신호에 대한 DOA 추정 능력을 비교하면 두 배열방법 모두 입사된 각도에서 정확히 방향성 추정을 잘하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 신호분해능이 10dB 정도 우수함을 알 수 있다. 따라서 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 동시에 입사되는 다중신호에 대한 DOA 판별능력이 우수함을 알 수 있다.



a) M=4, adaptive beamforming(50°,130°)



b) M=8, adaptive beamforming angles (25°,90°,150°)



c) M=12, adaptive beamforming angles (30°, 60°, 90°, 120°, 150°)

[그림 3] DOA에 따른 적응 빔성형 패턴  
[Fig. 3] Adaptive beamforming patterns according to DOAs

그림 3은 배열안테나의 배열구조가 그림 2와 동일한 조건에서 다중신호가 수신안테나로 입사될 때 신호의 입사각과 빔성형 각을 도시한 그림이다. 그림 3-a는 그림 2-a에서 추정된 DOA를 토대로 식 (12)와 식 (13)에 적용하여 구한 적응 빔성형 패턴이다. 배열안테나 소자 수가 M=4로 비교적 작다보니 빔성형 패턴이 예리하지 못하다. 특히 원형배열인 경우는 DOA 각 50°, 130°에서 최대의 빔이 형성되기는 하지만 선형배열의 경우처럼 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그 이유는 배열소자의 수가 적기 때문에 배열 원주의 반경이 작아서 신호의 입사각을 분별하기가 쉽지 않기 때문이다. 그림 3-b는 그림 2-b에서 추정된 DOA를 토대로 그림 3-a와 동일한 식에 적용하여 구한 적응 빔성형 패턴이다. 배열안테나 소자 수가 M=8로 비교적 배열소자 수가 증가하다 보니 빔성형 패턴이 M=4보다 예리하게 나타난다. 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 DOA 각 25°, 90°, 150°에서 최대의 적응 성형빔이 잘 형성된다. 선형배열인 경우는 부엽 특성이 원형배열보다 우수하지만 주엽 특성이 DOA 각에서 5° 정도 천이된 각에서 나타난다. 그림 3-c는 그림 2-c에서 추정된 DOA를 토대로 동일한 빔성형 패턴식을 적용하여 구한 그림이다. 배열안테나 소자 수가 M=12로 배열소자 수가 증가하다 보니 거의 DOA각 30°, 60°, 90°, 120°, 150°에 적응빔이 집중되어 형성된다. 특히 원형배열인 경우는 부엽이 없고 주엽에 적응빔이 집중되는 현상이 나타난다. 따라서 배열소자수가 작을 경우에는 선형배열인 경우가 원형배열인 경우보다 적응 성형빔이 우수하게 나타나지만, 소자수가 증가하면 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 적응 성형빔이 잘 형성됨을 알 수 있다.

표 1은 그림 2에서 얻어진 DOA 각을 식 (12)와 식(13)의  $\omega_n^l$ 와  $\omega_n^c$ 에 대입하여 가중치를 산출하여 나타낸 도표이다. 표에 나타낸 가중치는 M=12, 다중신호의 입사각이 30°, 60°, 90°, 120°, 150°인 경우에 대하여 DOA를 구하고, 추정된 DOA로부터 안테나 소자 간의 간격을 반과장 씩 등 간격으로 배열하여 얻어진 결과이다. 다중신호의 입사각이 90°를 중심으로 대칭적인 각을 이루고 있기 때문에 선형배열과 원형배열 모두에서 가중치 벡터는 대칭성을 갖는다.

[표 1] 배열방법과 DOA 입사각에따라 계산된 가중치  
[Table 1] Calculated weights according to array methods and DOA incidence angles

소자	가중치 벡터			
	선형배열 DOA (30°, 60°, 90°, 120°, 150°)		원형배열 DOA (30°, 60°, 90°, 120°, 150°)	
	크기	각	크기	각
1	0.2432	0.0	0.4276	0.0
2	3.9752	0.0	2.4436	144.94
3	0.1139	0.0	1.2076	10.91
4	1.3013	0.0	3.4116	139.35
5	1.7248	-180.0	0.3107	153.73
6	3.0258	0.0	1.810	133.25
7	3.0258	0.0	1.810	133.25
8	1.7248	180.0	0.3107	153.73
9	1.3013	0.0	3.4116	139.35
10	0.1139	0.0	1.2076	10.91
11	3.9752	0.0	2.4436	144.94
12	0.2432	0.0	0.4276	0.0

## 6. 결론

본 논문에서는 다중신호를 처리하는 MIMO 시스템에서 원하는 방향으로 빔을 효율적으로 성형할 수 있는 DOA 추정 알고리즘과 안테나의 배열방법을 분석하고, 제반 특성들을 연구하였다. DOA 추정은 비변수 추정 알고리즘인 비이차놈추정 알고리즘을 사용하였으며, 최적화시킨 놈인자  $\beta$ 와  $\alpha$ 를 다중신호의 방향성 추정에 적용하여 분해능을 더욱 향상시켰다. 그리고 추정된 DOA를 적용하여 선형배열 안테나 소자와 원형배열 안테나 소자로 인가되는 가중치를 구함으로써 원하는 방향으로 빔성형을 효과적으로 형성할 수 있었다. 다중입사 신호에 대한 DOA 추정 능력을 비교하면 두 배열방법 모두 입사된

각도에서 정확히 방향성을 추정할 수 있지만, 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 10dB 이상 신호분해능이 우수함을 알 수 있었다. 그리고 배열소자수가 적을 경우에는 선형배열인 경우가 원형배열인 경우보다 적응 성형빔이 우수하게 나타나고, 소자수가 증가하면 원형배열인 경우가 선형배열인 경우보다 성형빔이 효과적으로 형성됨을 알 수 있었다.

본 논문에서 분석한 DOA 방향성 추정과 배열방법에 따른 적응 빔성형 알고리즘은 제한된 주파수 환경하에서 통신용량을 증가시키고 통화품질을 향상시킬 수 있는 MIMO 시스템의 안테나 기술에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

### References

[1] D. H. Shim, et al., "Technical Review for 3GPP Downlink Multiple Antenna Concepts - Part I: Transmit Diversity and Beamforming", SK Telecommunications Review, Vol. 12, No. 2, pp. 139-149, 2002.

[2] S. J. Kim, et al., "Technical Review for 3GPP Downlink Multiple Antenna Concepts - Part II: MIMO", SK Telecommunications Review, Vol. 12, No. 2, pp. 152-168, 2002.

[3] Minseok Kim, "A Study of Implementation of Digital Signal Processing for Adaptive Array Antenna", Thesis, Division of Electrical And Computer Engineering Yokohama National University Japan, pp. 45-49, 2002.

[4] J. H. Winters, "Smart Antennas for Wireless Systems", IEEE Personal Communications, Vol.5, No.1, pp. 23-27, 1998.

[5] R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.34, No.3, pp. 276-278, 1986.

[6] B. D. Rao, "Effect of Spatial Smoothing on the Performance of MUSIC and the Minimum-norm Method", IEEE Proceedings, Vol.137, No.6, pp. 449-450, 1990

[7] R. M. Shubair, M. A. Al-Qutayri and J. M. Samhan, "A Setup for the Evaluation of MUSIC and LMS Algorithms for a Smart Antenna System", Journal of Communications, Vol.2, No. 4, pp. 71-77, 2007.

[8] Donald Geman, "Constrained Restoration and the Recovery of Discontinuities", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.3, 1992.

[9] A. H. Delaney, "Globally Convergent Edge-preserving Regularized Reconstruction: an Application to

Limited-angle Tomography", IEEE Trans. Image Processing, Vol.7, No.2, pp. 204-221, 1998.

[10] D. M. Malioutov and A. S. Willsky, "A Variational Technique for Source Localization based on a Sparse Signal Reconstruction Perspective", IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 3, pp. 2965-2968, 2002.

[11] C. Y. Chen and P. P. Vaidyanathan, "Quadratically Constrained Beamforming Robust Against Direction-of-Arrival Mismatch", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.55, No8, pp. 4139-4150, 2007.

[12] D. Y. Yang and M .S. Lee, "DOA Estimation of Multiple Signal and Adaptive Beam-forming for Mobile Communication Environments", Journal of KCA, Vol.10, No.12, pp. 34-42, 2010.

[13] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications, Prentice Hall PTR, 1999.

[14] Y. J. Hong, "Impact of Multipath Fading on the Performance of the DDLMS Based Spatio Temporal Smart Antenna", Journal of Korea Information and Communication Society, Vol. 34, No. 9, pp. 871-879, 2009.

[15] K. M. Jeyanthi and A. P. Kabilan, "A Simple Adaptive Beamforming Algorithm with Interference Suppression", International Journal of Engineering and Technology, Vol.1, No.1, pp. 67-70, 2009.

[16] S. H. Park and B. T. Yoon, "A Study on 2x2 MIMO Propagation Channel Characteristics for Receiving Antenna Spacings", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 10, No. 4, pp.747-752, 2009.

### 양 두 영(Doo-Yeong Yang)

[정회원]



- 1984년 2월 : 제주대학교 통신공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학석사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)
- 1992년 ~ 현재 : 제주대학교 통신공학과 교수
- 2001년 1월 ~ 2002년 8월 : 유타주립대학교 연구교수

<관심분야>

RF회로 및 무선통신시스템

이 민 수(Min-Soo Lee)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
- 1987년2월 : 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
- 1994년2월 : 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)
- 1995년 ~ 현재 :대진대학교 통신공학과 교수

<관심분야>

위성통신시스템, RFID, RF 회로설계