

배열안테나 패턴 측정 거리에 따른 방향탐지, 간섭제거, 빔형성 성능 분석

Analysis of Direction Finding, Interference Cancellation, and Beamforming Performance by Array Antenna Pattern Measurement Distance

고요한^{1*} · 강행익² · 이철수¹ · 김도경¹ · 김갑진³ · 박영범³

¹LIG넥스원 C4I연구소

²LIG넥스원 핵심기술연구소

³국방과학연구소 3-4

Yo-han Ko^{1*} · Haeng-ik Kang² · Chul-soo Lee¹ · Do-kyung Kim¹ · Kap-jin Kim³ · Young-bum Park³

¹C4I R&D Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do, 16911, Korea

²Core Technology R&D Laboratory, LIG Nex1, Gyeonggi-do, 16911, Korea

³The Third R&D Institute - 4, Agency for Defense Development(ADD), Daejeon, 34186, Korea

[요 약]

본 논문에서는 배열안테나의 패턴을 측정하기 위한 배열안테나와 기준 신호원 사이의 거리에 따른 방향탐지, 간섭제거, 빔형성 성능을 분석한다. 배열안테나는 무선통신, 레이더, 소나 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이러한 배열안테나를 사용하기 위해서는 배열안테나의 패턴을 알고 있어야 하며, 배열안테나의 패턴은 무반향 챔버에서 측정을 통해 얻을 수 있다. 하지만 무반향 챔버의 크기는 제한적이기 때문에 거리에 따른 측정 오차가 발생하게 된다. 이는 배열안테나를 사용하는 방향탐지, 간섭제거, 빔형성의 성능 저하를 유발시킨다. 본 논문에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 배열안테나 패턴 측정 거리에 따른 방향탐지, 간섭제거, 빔형성 성능을 분석하여 결과를 제시한다.

[Abstract]

This paper analyzes the performances of direction finding, interference cancellation, and beamforming performance by array antenna pattern measurement distance between the center of array antenna and reference emitter. Array antenna is widely adopted for example as wireless communications, radar, and sonar. In order to use array antenna, array antenna pattern must be known and it can be measured in anechoic chamber. However, the size of anechoic chamber is generally limited. So measurement error of array antenna can be occurred and this could effect performance decrease of direction finding, interference cancellation, and beamforming. It is verified by computer simulation that the performances of direction finding, interference cancellation, and beamforming by array antenna pattern measurement distance.

Key word : Array antenna, Beamforming, Direction finding, Interference Cancellation, Pattern measurement.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.6.593>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 13 October 2017; Revised 20 November 2017

Accepted (Publication) 23 November 2017 (30 December 2017)

*Corresponding Author; Yo-han Ko

Tel: +82-31-8026-4626

E-mail: yohan.ko@lignex1.com

I. 서론

다수의 안테나 소자를 사용하는 배열안테나는 무선 통신, 레이더, 소나 등 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 통신 분야에서는 서비스 커버리지(coverage) 확장, 공간 다이버시티(diversity), 간섭 신호 제거, 수신 신호 대 간섭비(SNR; signal to noise power ratio) 증가 등을 위해 사용된다. 또한 레이더나 소나 분야에서는 미상 물체에 대한 추적, 미상 신호에 대한 방향 및 위치 추정 등을 위해 사용된다. 배열안테나는 다양한 기법에 적용 가능하며, 적용하는 기법에 따라서 크게 방향탐지, 간섭 제거, 빔형성으로 구분할 수 있다[1], [2].

배열안테나를 사용하는 기법은 각 안테나 소자에 수신되는 신호의 공간영역 특성을 이용하여 수행된다. 배열안테나의 공간영역 특성은 각 소자의 배치에 의해 결정되며, 배치에 따라서 다양한 특성을 갖는다. 가장 많이 연구되고 있는 배열안테나 구조는 등간격 선형 배열(ULA; uniform linear array) 안테나와 등간격 사각 배열(URA; uniform rectangular array) 안테나, 등간격 원형 배열(UCA; uniform circular array) 안테나가 있으며, 특히 소자 간 위상 차이가 선형특성을 갖는 등간격 선형 배열 안테나에 대해 다양한 분야에서 수많은 연구가 이루어졌다[1]-[4].

방향탐지, 간섭 제거, 빔형성 기술에서 배열안테나를 적용하는 경우에 일반적으로 각 안테나 소자는 등방성(isotropic)이고, 배열안테나에 수신되는 신호는 평면파(plane wave)를 가정한다[4]. 이를 바탕으로 배열 안테나의 안테나 패턴(어레이 매니폴드(array manifold) 데이터 또는 조향벡터(steering vector) 집합)이 정의되고, 이를 사용하여 방향탐지, 간섭 제거, 빔형성을 수행한다. 하지만 일반적으로 배열안테나를 제작하여 안테나 패턴을 측정하면, 소자 간 상호간섭(mutual coupling), 접지효과(ground effect), 안테나 소자 배치 오차 등 다양한 원인으로 안테나 패턴은 이론적인 안테나 패턴과 상이한 특성을 갖는다[5], [6]. 즉, 각 안테나 소자는 등방성이 아니고, 소자 간 간섭이 존재하며, 접지효과와 안테나 소자 배치오차가 존재할 수밖에 없다. 따라서 배열안테나를 사용하기 위해서는 무반향 챔버에서 이러한 오차 요인들이 포함된 배열안테나의 패턴을 측정하고, 이를 사용해야 한다[5]-[7]. 하지만 무반향 챔버는 제한된 공간에서 안테나 패턴을 측정하기 때문에 원거리(far-field) 특성을 충족하지 못하게 된다. 이로 인해 입사신호는 평면파가 아니고, 구 모양의 파로 배열안테나에 입사되어 거리에 따른 위상 오차가 추가로 발생한다. 안테나 이득을 측정하는 경우에는 일반적으로 알려진 far-field 만큼 이격시켜서 안테나 이득을 측정하면, 1 dB 이하의 오차만을 가지기 때문에 이득에 대한 오차는 매우 작다[6], [7]. 하지만 간섭 제거나 방향탐지와 같이 각 소자의 위상 정보를 이용하는 경우에는 큰 성능 오차를 갖게 된다.

본 논문에서는 배열안테나의 패턴 측정거리에 따른 배열안테나의 패턴 오차와 방향탐지, 간섭 제거, 빔형성 성능을 분석한다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통해서 각 기술의 성능을 분석하여 결과를 제시한다.

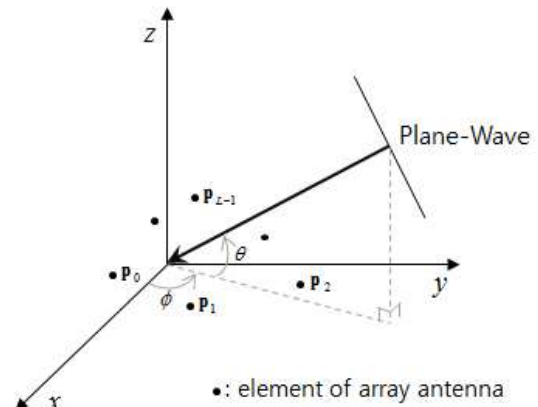


그림 1. 평면파 입사 시 배열안테나 구조
Fig. 1. Array antenna geometry with plan-wave input.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 배열안테나 및 수신 신호 모델을 설명하고, 배열안테나 패턴 측정거리에 따른 방향탐지, 간섭 제거, 빔형성 성능을 분석한다. III장에서는 컴퓨터 모의실험 환경 및 결과를 제시한다. IV장에서는 결론을 맺고 본 논문을 정리한다.

II. 배열안테나 특징 및 패턴 측정거리에 따른 방향탐지, 간섭 제거, 빔형성 분석

본 장에서는 배열안테나의 특징 및 배열안테나의 패턴 측정거리에 따른 방향탐지, 간섭 제거, 빔형성 성능을 분석한다.

2-1 배열안테나 및 수신신호 모델

그림 1은 L개의 안테나 소자로 구성된 배열안테나의 구조를 보여준다. 각 안테나 소자에 수신되는 신호는 각 안테나 소자가 배치된 위치에 따라서 서로 다른 위상지연을 갖고 수신된다. 여기에서 각 안테나 소자는 등방성이고, 수신되는 신호는 평면파임을 가정한다. 즉, 신호원이 배열안테나와 충분히 이격되어 있음을 가정한다. $[\theta, \phi]$ 는 입사각으로 각각 앙각(elevation angle) $\theta \in [0, \pi/2]$ 과 방위각(azimuth angle) $\phi \in [0, 2\pi]$ 을 나타낸다. 배열안테나에 대한 안테나 패턴인 어레이 매니폴드 데이터는 배열안테나의 구조에 따른 공간 특성을 나타내며, 조향벡터의 집합으로 구성된다[1]-[4].

M개의 신호원으로부터 입사되는 신호를 고려하면, 배열안테나의 l번째 안테나 소자에 수신되는 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_l[n] = \sum_{m=0}^{M-1} a_l^m x^m[n] + w_l[n] \quad (1)$$

여기에서 a_l^m 은 l 번째 안테나에 수신된 m 번째 신호원의 조향값이다. 또한 $x^m[n]$ 은 m 번째 신호원의 n 번째 샘플링된 수신 신호를 나타내고, $w_l[n]$ 은 l 번째 안테나의 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 가산백색가우시안잡음(AWGN; additive white gaussian noise)을 나타낸다. 식 (1)을 벡터형태로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}[n] &= \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{a}^m x^m[n] + \mathbf{w}[n] \\ &= [\mathbf{a}^0, \mathbf{a}^1, \dots, \mathbf{a}^{M-1}] [x^0[n], x^1[n], \dots, x^{M-1}[n]]^T \\ &\quad + [w_0[n], w_1[n], \dots, w_{L-1}[n]]^T \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}[n] + \mathbf{w}[n] \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 $\mathbf{x}[n]$, $\mathbf{w}[n]$ 은 n 번째 샘플링된 수신 신호 벡터와 잡음 벡터를 나타낸다. \mathbf{A} 는 M 개의 조향벡터로 구성된 조향행렬이고, \mathbf{a}^m 은 m 번째 신호원의 조향벡터를 나타내며, 식 (3)과 같다.

$$\mathbf{a}^m = [e^{-j\kappa_m^x P_0}, e^{-j\kappa_m^x P_1}, \dots, e^{-j\kappa_m^x P_{L-1}}]^T \quad (3)$$

식 (3)에서 κ_m 과 P_l 은 각각 입사각 정보 $[\theta, \phi]$ 를 갖고 수신되는 평면파에 대한 파벡터(wave vector)와 l 번째 안테나 소자의 위치 벡터(position vector)를 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$\kappa_m = -\frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_m \cos\phi_m, \cos\theta_m \sin\phi_m, \sin\theta_m]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_l = [p_l^x, p_l^y, p_l^z]^T \quad (5)$$

여기에서 $\lambda (= c/f)$ 은 파장(wavelength)을 나타내고, p_l^i 은 l 번째 안테나 소자의 i 축에서의 위치값을 나타낸다.

식 (3)은 각 안테나 소자는 등방성이고, 수신되는 신호는 평면파임을 가정하고 있다. 안테나에 수신되는 신호가 평면파임을 가정하는 것은 배열안테나와 신호원 사이의 거리가 상당히 이격되어 있는 경우에 성립되며, 일반적으로 far-field 거리만큼 이격되어 있으면 평면파라고 가정한다. 다음의 식 (6)은 far-field 거리를 나타낸다.

$$R_{ff} = 2D^2/\lambda \quad (6)$$

여기에서 R_{ff} 는 far-field 거리이고, D 는 배열안테나의 지름을 나타내며, 배열안테나의 지름이 반파장보다 큰 경우를 far-field 거리라고 하기도 한다[6],[7].

배열안테나를 제작하면, 소자 간 상호간섭, 접지 효과, 안테나 소자 배치 오차 등 다양한 원인으로 식 (1)은 위상변화 및 전력 변화를 갖는다. 배열안테나의 상호 간섭은 물리적 특성으로 인해 항상 존재하며, 이를 줄이기 위한 방법들이 연구되고 있다 [8],[9]. 식 (7)은 배열안테나에 위상변화 및 전력 변화를 갖는 경우 수신신호를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}[n] &= \mathbf{C}\mathbf{G}\mathbf{A}\mathbf{x}[n] + \mathbf{w}[n] \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ \begin{bmatrix} C_{0,0} & C_{0,1} & \dots & C_{0,L-1} \\ C_{1,0} & C_{1,1} & \dots & C_{1,L-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{L-1,0} & C_{L-1,1} & \dots & C_{L-1,L-1} \end{bmatrix} \mathbf{G} \begin{bmatrix} e^{-j\kappa_m^x P_0} \\ e^{-j\kappa_m^x P_1} \\ \vdots \\ e^{-j\kappa_m^x P_{L-1}} \end{bmatrix} x^m[n] \right\} \\ &\quad + \mathbf{w}[n] \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 \mathbf{C} 는 배열안테나에서 발생하는 상호간섭 행렬이고, $C_{a,b}$ 는 a 번째 안테나 소자와 b 번째 안테나 소자 간 간섭으로 인해 발생하는 크기 및 위상 변화 값을 나타내며, $C_{a,b} = C_{b,a}$ 의 특징을 갖는다. $\mathbf{G} = \text{diag}\{g_0, g_1, \dots, g_{L-1}\}$ 는 배열안테나의 전력변화 행렬이고, 각 대각 성분의 요소 g_l 은 l 번째 안테나 소자에서의 전력 감쇠를 나타낸다.

2-2 배열안테나 패턴 측정거리에 따른 성능 분석

배열안테나를 제작하여 배열안테나를 사용하기 위해서는 배열안테나의 패턴을 측정해야하며, 패턴 측정은 무반향 챔버에서 수행된다. 하지만 무반향 챔버는 제한된 공간을 갖기 때문에, 배열안테나와 신호원 간에 far-field 거리 조건 및 평면파 조건을 만족하기 어려운 문제점이 있다. 결국 무반향 챔버 내에서 배열안테나에 입사되는 신호는 평면파가 아니고, 구 모양의 파로 배열안테나에 입사된다. 따라서 배열안테나의 구조에 의해 발생하는 공간특성 외에 추가의 위상오차를 갖게 된다. 그림 2는 배열안테나와 신호원 사이의 거리가 r 인 경우의 배열안테나 구조를 나타낸다.

그림 2에 나타난 바와 같이 배열안테나와 신호원이 거리 r 만큼 떨어져 있는 경우를 가정하면, 식 (3)의 조향벡터의 위상값은 입사방향, 배열안테나 소자의 위치 정보, 거리에 따른 함수로 변경하여 나타낼 수 있으며, 다음의 식 (8)과 같다.

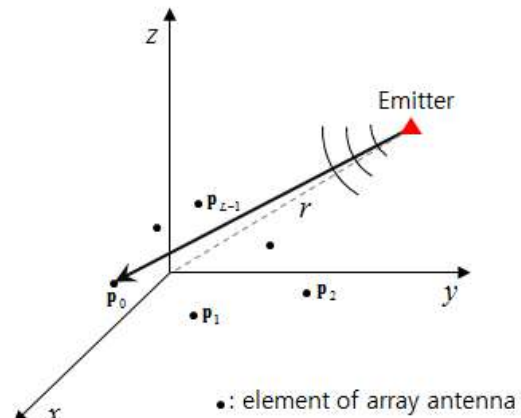


그림 2. 배열안테나와 신호원 사이 거리가 r 인 경우 배열안테나 구조

Fig. 2. Array antenna structure when the distance between the origin and an emitter is r .

$$\text{Phase}(a_l) = -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{r^2 - 2r\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l + \mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l} - r \right) \quad (8)$$

여기에서 \mathbf{k} 는 방향에 대한 함수로써, $[\cos\theta\cos\phi, \cos\theta\sin\phi, \sin\theta]^T$ 이다. 식 (8)은 테일러 확장(Taylor expansion)을 적용하여 변형할 수 있으며, k 차 테일러 확장은 식 (9)와 같다[2].

$$f(x) = f(0) + \sum_{i=1}^I \frac{f^{(i)}(0)}{i!} x^i + \frac{f^{(I+1)}(x^*)}{(I+1)!} x^{I+1} \quad (9)$$

여기에서 $f^{(i)}(x)$ 는 $f(x)$ 의 i 차 미분을 나타내고, x 는 양수이며, $x^* \in [0, x]$ 를 나타낸다.

식 (8)에 테일러 확장을 적용하면, 다음과 같이 확장하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Phase}(a_l) &= -\frac{2\pi r}{\lambda} \left(\sqrt{1 - \frac{2}{r}\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l + \frac{\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l}{r^2}} - 1 \right) \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l - \frac{\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l - (\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l)^2}{2r} - \frac{\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l + (\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l)^2}{8r^3} \dots \right) \end{aligned} \quad (10)$$

만약 r 이 매우 크다면, 식 (10)은 식 (3)의 위상값과 같아짐을 알 수 있다. 반면에 r 이 작아지면, 위상 오차가 커지게 된다. 즉, 배열안테나 패턴을 측정하기 위한 무반향 챔버 내에서 배열안테나와 측정용 기준 신호원 사이의 거리에 따른 위상오차가 발생하게 된다. 따라서 배열안테나의 위상정보를 이용하는 방향탐지, 간섭제거, 빔형성의 성능 저하를 유발하게 된다.

식 (10)으로부터 배열안테나와 신호원 사이의 거리에 따른 조향벡터 오차는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= [q_0, q_1, \dots, q_{L-1}]^T \\ q_l &= e^{j\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l - (\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l)^2}{r} - \frac{\mathbf{k}^T\mathbf{P}_l\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l + (\mathbf{P}_l^T\mathbf{P}_l)^2}{r^3} \dots \right)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 배열안테나의 l 번째 소자의 조향값 오차 q_l 은 수신신호의 입사방향(θ, ϕ)에 대한 함수임을 알 수 있다. 그림 3은 무반향 챔버 내에서 배열안테나와 기준 신호원 사이의 거리가 far-field 거리의 40배 되는 경우에 배열안테나의 첫 번째 소자에서의 조향값 오차의 크기를 나타낸다. 이를 통해서 조향벡터 오차 성분은 방위각과 양각에 대해 서로 다른 값을 갖는 것을 알 수 있다. 특히 양각이 낮을수록 방위각에 대한 변화 폭이 양각이 높은 경우에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

조향벡터의 선형 위상 차이를 이용하여 방향추정을 수행하는 Root-MUSIC(multiple signal classification)이나 인접 안테나 소자 간 선형불변 특성을 이용하여 방향추정을 수행하는 ESPRIT(estimation of signal parameters via rotational invariance)과 같은 기법은 이상적인 조향벡터를 갖는 경우에만 적용할 수 있다[1], [2], [4], [10]. 실제로 배열안테나를 제작하면, 위상변화 및 이득변화를 갖기 때문에 Root-MUSIC이나 ESPRIT과 같

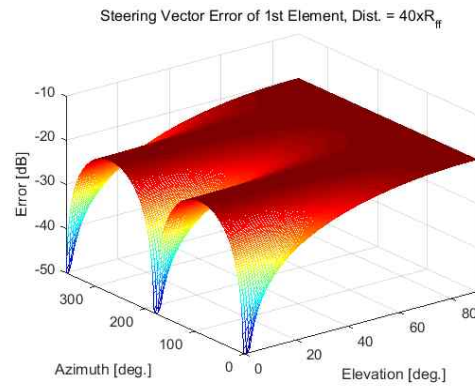


그림 3. 첫 번째 소자의 조향벡터 오차 ($r = 40 \times R_{ff}$)
Fig. 3. Steering vector error of 1st element ($r = 40 \times R_{ff}$).

은 기법은 사용할 수 없다. 하지만, 공간 스펙트럼 탐색 기법이나 시신방향(look direction)을 정해주는 빔형성 기법 및 간섭제거 기법은 사전 방향정보가 필요하지 않기 때문에 무반향 챔버에서 측정된 조향벡터를 사용할 수 있다.

다음의 식 (12)는 무반향 챔버에서 측정된 조향벡터를 사용한 경우의 MUSIC 기반 방향탐지 기법을 나타낸다.

$$P_{\text{MUSIC}} = \frac{1}{\hat{\mathbf{a}}^H \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H \hat{\mathbf{a}}} \quad (12)$$

여기에서 P_{MUSIC} 는 MUSIC 방향탐지의 공간스펙트럼을 나타내고, $\mathbf{E}_{\text{noise}}$ 는 수신 신호의 잡음 부공간을 나타낸다. $\hat{\mathbf{a}}$ 은 무반향 챔버 내에서 배열안테나와 기준 신호원 사이의 거리가 r 인 경우에 측정된 조향벡터를 나타낸다. MUSIC 방향탐지 기법은 잡음 부공간 $\mathbf{E}_{\text{noise}}$ 와 신호 부공간 $\mathbf{E}_{\text{signal}}$ 사이의 직교 특성을 이용하여 공간 스펙트럼을 탐색하고, 입사 신호의 방향을 탐지한다. 하지만 무반향 챔버에서 측정된 조향벡터 $\hat{\mathbf{a}}$ 과 평면파로 입사된 수신신호의 잡음 부공간은 서로 직교하지 않고, 방향탐지 오차를 유발한다. 이를 나타내면 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{\text{MUSIC}} &= \frac{1}{(\mathbf{a} + \tilde{\mathbf{a}})^H \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H (\mathbf{a} + \tilde{\mathbf{a}})} \\ &= \frac{1}{\mathbf{a}^H \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H \mathbf{a} + \beta} \end{aligned} \quad (13)$$

여기에서 $\hat{\mathbf{a}} = \mathbf{a} + \tilde{\mathbf{a}}$ 이고, β 는 무반향 챔버에서 측정된 조향벡터와 far-field에서 수신되는 신호의 조향벡터 사이의 차이로 인해 발생하는 오차 성분으로 식 (14)와 같다.

$$\beta = \tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H \mathbf{a} + \mathbf{a}^H \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H \tilde{\mathbf{a}} + \tilde{\mathbf{a}}^H \mathbf{E}_{\text{noise}} \mathbf{E}_{\text{noise}}^H \tilde{\mathbf{a}} \quad (14)$$

공간 스펙트럼 탐색 시 오차 성분 β 로 인해 수신 신호의 입사방

향 스펙트럼이 뭉개지고, 이로 인해 방향탐지 성능이 저하된다. 다음의 식 (15)는 챔버에서 측정된 조향벡터를 사용한 경우의 MVDR(minimum variance distortionless response) 기반 간섭제거 기법의 가중치를 나타낸다.

$$\mathbf{W}_{MVDR} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_r}{\hat{\mathbf{a}}_r^H \mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{a}}_r} \quad (15)$$

MVDR 간섭제거 기법은 최적화 조건을 통해 시선 방향으로 전력을 유지하고, 간섭 신호의 전력을 최소화 한다[1], [2], [4]. 식 (16)은 MVDR 간섭제거 기법의 최적화 조건을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \min & \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \\ \text{subject to} & \mathbf{W} \mathbf{a}_{LD} = 1 \end{aligned} \quad (16)$$

MVDR 간섭제거 기법의 최적화 조건에서 시선방향의 조향벡터 $\mathbf{a}_{LD}(=\hat{\mathbf{a}}_r)$ 와 실제 수신신호 방향의 조향벡터 \mathbf{a} 사이의 특성 불일치로 성능저하가 발생할 수 있다. 다음은 MVDR 간섭제거 기법의 수신 전력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_{Output} &= \mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{R}_S \mathbf{W}_{MVDR} + \mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{R}_I \mathbf{W}_{MVDR} \\ &+ \mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{R}_w \mathbf{W}_{MVDR} \\ &= \sigma_s^2 |\mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{a}^S|^2 + \sigma_I^2 |\mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{a}^I|^2 + \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (17)$$

여기에서 $\mathbf{R}_S, \mathbf{R}_I, \mathbf{R}_w$ 는 각각 시선방향에서 입사되는 신호의 공분산 행렬, 간섭 신호의 공분산 행렬, 잡음 신호의 공분산 행렬을 나타내며, $\sigma_s^2, \sigma_I^2, \sigma_w^2$ 는 각 신호의 전력을 나타낸다.

식 (17)로부터 MVDR 간섭제거 기법의 SINR(signal-to-interference-plus-noise power ratio)은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SINR = \frac{P_{Signal}}{P_{Interference} + P_{Noise}} = \frac{\sigma_s^2 |\mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{a}^S|^2}{\sigma_I^2 |\mathbf{W}_{MVDR}^H \mathbf{a}^I|^2 + \sigma_w^2} \quad (18)$$

식 (18)에서 조향벡터 오차로 인해, MVDR 가중치가 시선방향 \mathbf{a}^S 으로 빔을 제대로 형성할 수 없고, 시선방향 신호를 간섭으로 간주하여 이를 최소화하기 위해 자유도를 사용하기 때문에 시선방향 신호의 전력을 감소시킨다. 그리고 MVDR 가중치가 간섭 신호의 방향 \mathbf{a}^I 으로 널빔(null beam)을 형성할 수 없기 때문에 간섭신호가 제거되지 않아 빔형성 성능을 저하시키게 된다.

다음은 챔버에서 측정된 조향벡터를 사용한 경우의 위상조정 빔형성 기법의 가중치를 나타낸다.

$$\mathbf{W}_{BF} = \frac{1}{L} \mathbf{a}_{LD} \quad (19)$$

빔형성의 경우 시선방향의 위상오차가 빔형성 이득을 크게 저하시키지 않으며, 식 (20)은 빔형성의 수신 전력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_{Output} &= \mathbf{W}_{BF}^H \mathbf{R}_S \mathbf{W}_{BF} + \mathbf{W}_{BF}^H \mathbf{R}_w \mathbf{W}_{BF} \\ &= \sigma_s^2 |\mathbf{W}_{BF}^H \mathbf{a}^S|^2 + \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)으로부터 빔형성의 SNR은 다음과 같이 계산된다.

$$SNR = \frac{P_{Signal}}{P_{Noise}} = \frac{\sigma_s^2 |\mathbf{W}_{BF}^H \mathbf{a}^S|^2}{\sigma_w^2} \quad (21)$$

식 (21)로부터 안테나 패턴오차가 존재하면 $1 - |\mathbf{W}_{BF}^H \mathbf{a}^S|^2$ 만큼의 이득 감소가 발생한다.

III. 모의실험 환경 및 시험결과

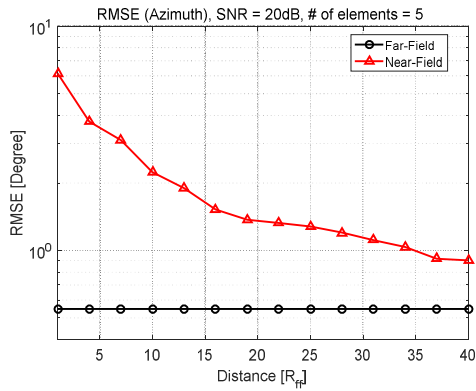
본 장에서는 배열안테나 패턴 측정거리에 따른 방향탐지 성능 및 간섭제거 기법 성능, 빔형성의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석한다. 표 1은 모의실험을 위한 파라미터를 나타내며, 모의실험에서는 5소자로 구성된 등간격 원형 배열 안테나를 사용하였다. 그림 4는 조향벡터에 패턴 측정거리에 의한 오차가 없는 이상적인 경우(far-field)와 패턴 측정거리에 의한 오차가 존재하는 경우에 방향탐지 RMSE(root mean square error) 성능을 비교하여 나타낸다. 그림 4와 같이 배열안테나와 신호원 사이의 거리가 식 (6)에서 정의된 far-field 거리(R_{ff})만큼 이격되어 있는 경우에 방향탐지 RMSE 성능이 매우 열화되는 것을 알 수 있다. 하지만, 배열안테나 패턴 측정거리 r 이 점차 커질수록 방위각과 앙각에 대한 방향탐지 RMSE 성능이 점차 향상되는 것을 알 수 있다. R_{ff} 의 40배 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하더라도 이상적인 조향벡터를 사용한 경우에 비해 방위각은 약 60%, 앙각은 약 63%의 성능저하가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 배열안테나의 패턴 측정은 R_{ff} 보다 충분히 이격된 거리에서 측정해야 하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 조향벡터에 패턴 측정거리에 의한 오차가 없는 이상적인 경우(far-field)와 패턴 측정거리에 의한 오차가 존재하는 경우에 방향탐지 분해능 성능을 PAPR(peak to average

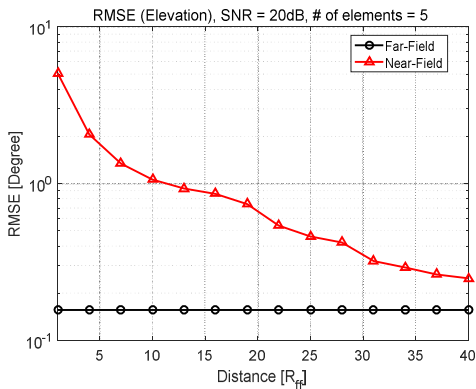
표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

Parameters	Values
Array antenna	Uniform Circular Array
Element spacing	0.5λ
Number of elements	5
Number of emitters	2
DOA of 1st emitter ([θ, ϕ])	[20°, 70°]
DOA of 2nd emitter ([θ, ϕ])	[20°, 80°]
SNR	20dB



(a) RMSE of azimuth



(b) RMSE of elevation

그림 4. 방향탐지 RMSE 성능

Fig. 4. RMSE performance of direction finding.

power ratio)을 통해서 나타낸다. 방향탐지의 PAPR은 방향탐지 시 입사신호들을 얼마만큼 잘 구분하는지를 나타내는 기준이 되며, PAPR이 클수록 인접한 방향에서 들어오는 신호를 분해하는 능력이 우수함을 의미한다. 그림 5와 같이 배열안테나로부터 R_{ff} 의 25배 이상 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하는 경우의 PAPR이 이상적인 조향벡터를 사용한 경우에 비해 5dB 이하의 열화만 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 배열안테나 패턴측정 거리 r 이 커질수록 입사 신호에 대한 분해 능력이 향상되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 배열안테나와 기준 신호원 사이의 거리가 far-field 거리의 40배 만큼 이격되어 배열안테나 패턴이 측정된 조향벡터를 사용한 경우의 방향탐지 공간 스펙트럼을 나타내며, 분석의 편의를 위해서 양각이 20도인 경우에 대한 방위각 스펙트럼을 도시하였다. 여기에서 방향탐지는 MUSIC 기법을 사용하였다. 그림 6과 같이 R_{ff} 의 40배 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하면, 이상적인 조향벡터를 사용한 경우에 비해서 스펙트럼의 예각이 더 크게 형성되는 것을 나타낸다.

그림 7은 빔형성 기법의 SNR을 비교하여 나타내며, 2장에서 나타난 바와 같이 빔형성 이득은 배열안테나 패턴 측정거리에 크게 영향이 없는 것을 알 수 있다. 배열안테나로부터 far-field 거리 R_{ff} 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하여

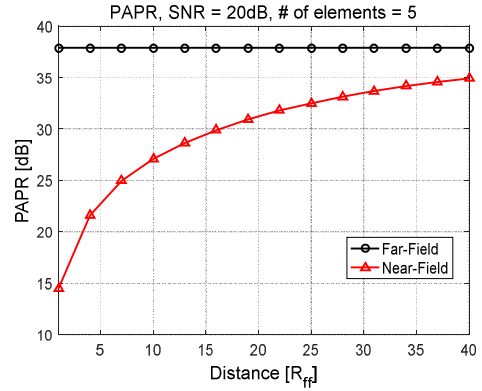


그림 5. 방향탐지 PAPR

Fig. 5. PAPR of direction finding.

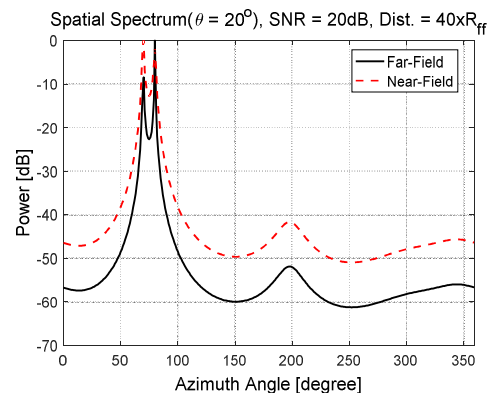


그림 6. 공간 스펙트럼(양각 = 20도)

Fig. 6. Spatial spectrum(elevation angle = 20deg.).

빔형성을 하더라도, 약 0.016 dB의 빔형성 이득 감소만 발생한다. 그리고 배열안테나 패턴 측정 거리가 커질수록 빔형성 이득 감소는 점차 줄어들어 이상적인 경우의 조향벡터를 사용한 경우와 같아지는 것을 알 수 있다.

그림 8은 조향벡터에 패턴 측정거리에 의한 오차가 없는 이상적인 경우(far-field)와 패턴 측정거리 오차가 존재하는 경우(near-field)에 간섭제거 기법의 성능을 나타내며, 간섭제거 성능은 SINR 비교를 통해 확인한다. 간섭제거를 위해서 MVDR 기반 간섭제거 기법을 사용하였다. 배열안테나로부터 R_{ff} 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하여 간섭제거를 하는 경우, 이상적인 조향벡터를 사용한 경우에 비해서 약 23 dB의 SINR 감소가 있는 것을 알 수 있으며, 패턴 측정거리에 의한 오차가 큰 경우 간섭제거 성능이 매우 저하되는 것을 알 수 있다. 하지만, 조향벡터 측정거리 r 이 커질수록 간섭제거 성능이 향상되어, SINR이 증가하는 것을 알 수 있다. 조향벡터 측정거리가 R_{ff} 의 20배 이상이 되면, SINR 성능 저하가 2 dB 이내로 발생하여 간섭제거 성능저하가 매우 작다. 따라서 간섭제거 기법을 사용하기 위해서는 배열안테나 패턴 측정 시 R_{ff} 의 20배 이상에서 측정된 조향벡터를 사용해야 하는 것을 알 수 있다.

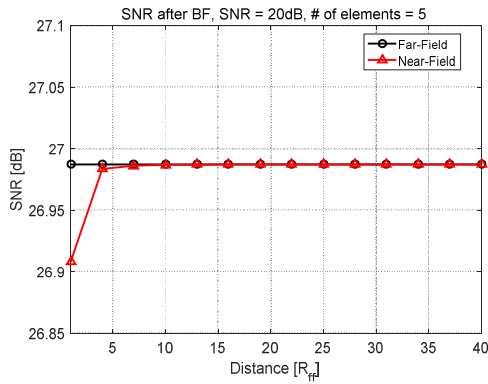


그림 7. 빔형성 기법의 SNR 성능
Fig. 7. SNR performance of beamforming.

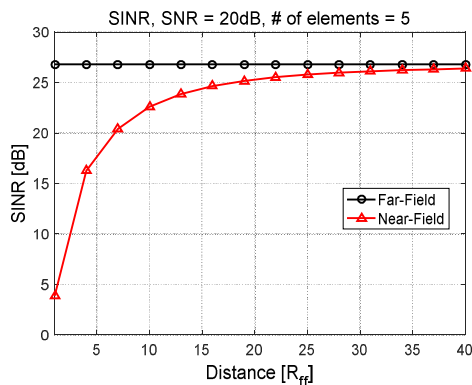


그림 8. 간섭제거 기법의 SINR 성능
Fig. 8. SINR performance of interference cancellation.

IV. 결 론

본 논문에서는 무반향 챔버에서 배열안테나의 패턴 측정 시 배열안테나와 기준 신호원 사이의 거리에 따른 방향탐지, 간섭제거, 빔형성 기법에 대한 성능을 비교하였다. 본 논문에서는 5 소자로 구성된 등간격 원형 배열안테나를 고려하였다. MUSIC 기반 방향탐지에 대한 성능을 분석하였으며, 방위각과 양각에 대한 RMSE 성능과 PAPR 성능을 비교 분석하였다. 모의실험 결과를 통해서 방향탐지 정확도를 나타내는 RMSE 성능은 패턴 측정거리가 멀어질수록 성능이 향상되는 것을 확인하였고, far-field 거리의 40배 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하더라도, 이상적인 경우의 성능보다 약 60%의 성능저하가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 방향탐지 분해능을 나타내는 PAPR 성능은 far-field 거리의 25배 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하는 경우에 이상적인 경우에 비해 5dB 이하의 성능저하만 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 빔형성 성능은 배열안테나의 패턴 측정 거리에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다. 빔형성의 경우 far-field 거리만큼 이격

된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하더라도 약 0.016 dB의 성능저하만 발생하였다. 하지만 빔형성과 달리 MVDR 기반의 간섭제거 기법은 배열안테나 패턴 측정 거리에 따른 조향벡터 오차로 인해 간섭제거 성능이 저하되는 것을 확인하였다. 특히 far-field 거리만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하는 경우에는 간섭제거 성능이 크게 저하되고, 원하는 신호원을 간섭신호로 간주하여 이를 제거하는 것을 확인하였다. 그러나 far-field 거리의 20배 만큼 이격된 거리에서 측정된 조향벡터를 사용하여 간섭제거를 하는 경우에는 간섭제거 성능이 약 2 dB 이내의 저하만 발생하는 것을 알 수 있었다.

이론적으로 배열안테나의 패턴측정 시 충분히 이격된 거리에서 측정하면, 거리에 따른 측정오차를 줄일 수 있지만, 무반향 챔버의 크기는 제약적이므로, 거리에 따른 측정 오차를 없앨 수는 없다. 따라서 배열안테나의 패턴 측정은 배열안테나를 적용하고자 하는 시스템 및 기술에서 요구하는 성능을 만족할 수 있도록 배열안테나 패턴 측정거리를 결정해야 한다.

Acknowledgments

본 연구는 2014년도 핵심기술과제인 GPS 복합재밍 능동대응 장치에 관련된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] L. C. Godara, *Smart Antennas*, CRC Press, 2004.
- [2] J. C. Liberti and R. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall PTR, 1999.
- [3] Y. H. Ko, Y. J. Kim, H. I. Yoo, W. Y. Yang, and Y. S. Cho, "2-D DoA Estimation with Cell Searching for a Mobile Relay Station with Uniform Circular Array," *IEEE Tran. on Communications*, Vol. 58, No. 10, pp. 2805-2809, Oct. 2010.
- [4] H. L. V. Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Wiley-Interscience, 2002.
- [5] B. R. Jackson, S. Rajan, B. J. Liao, and S. Wang, "Direction of Arrival Estimation Using Directive Antennas in Uniform Circular Arrays," in *IEEE Tran. on Antennas and Prop.*, Vol. 63, No. 2, pp. 736-747, Feb. 2015.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, WILEY, 2005.
- [7] A. D. Yaghjian, "An Overview of Near-Field Antenna Measurements," in *IEEE Tran. on Antennas and Prop.*, Vol. AP-34, No. 1, pp. 30-45, Jan. 1986.

[8] B. Liao, Z. Zhang, and S. Chan, "DOA Estimation and Tracking of ULAs with Mutual Coupling," *IEEE Tran. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 48, No. 1, pp. 891-905, Jan. 2012.

[9] Z. Huang, C. A. Balanis, and C. R. Birtcher, "Mutual Coupling Compensation in UCAs: Simulations and

Experiment," in *IEEE Tran. on Antennas and Prop.*, Vol. 54, No. 11, pp. 3082-3086, Nov. 2015.

[10] R. Roy, and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal paramters via rotational invariance techniques," in *IEEE Tran. on Acoust. Speech Signal Process.*, Vol. 37, No. 7, pp. 984-995, July 1989.



고요한 (Yo-han Ko)

2005년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부, 공학사
 2007년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부, 공학석사
 2011년 2월 : 중앙대학교 전자전기공학부, 공학박사
 2011년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
 ※관심분야 : MIMO-OFDM 시스템, 항법 시스템, 디지털 신호처리, 능동 배열 안테나



강행익 (Haeng-ik Kang)

1996년 2월 : 연세대학교 전기공학과, 공학사
 1998년 2월 : 연세대학교 전기공학과, 공학석사
 2008년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
 ※관심분야 : 위성항법, 디지털 빔포밍, 항재밍, 유무선 통신 시스템



이철수 (Chul-soo Lee)

2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과, 공학사
 2002년 8월 : KAIST 전기및전자공학과, 공학석사
 2002년 ~ 2007년 : ETRI, 연구원
 2010년 8월 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과, 공학박사
 2010년 9월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
 ※관심분야 : 통신시스템 및 신호처리, 위성항법, 보정항법



김도경 (Do-kyoung Kim)

1996년 2월 : 한국항공대학교 통신정보공학과, 공학사
 2016년 2월 : 고려대학교 국방기술경영, 석사
 2009년 3월 ~ 현재 : LIG넥스원, 수석연구원
 ※관심분야 : 통신공학, 무선 이동통신



김갑진 (Kap-jin Kim)

1995년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과, 공학사
 1997년 7월 : 한양대학교 제어계측공학과, 공학석사
 2001년 7월 ~ 현재 : 국방과학연구소, 책임연구원
 ※관심분야 : 위성항법, Navigation Warfare



박영범 (Young-bum Park)

1999년 2월 : 경북대학교 전자전기공학부, 공학사
 2001년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 공학석사
 2017년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부, 공학박사
 2001년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소, 선임연구원
 ※관심분야 : 위성항법, 복합항법