

혼합 배열 안테나 기반의 적응 빔형성 시스템

김태윤* · 황석승**

Adaptive Beamforming System Based on Combined Array Antenna

Tae-Yun Kim* · Suk-Seung Hwang**

요약

5G 통신은 높은 주파수 대역을 사용하는 밀리미터파 통신이다. 높은 주파수 특성으로 인해 전파의 직진성이 강해지므로, 넓은 범위를 서비스하기 위해서는 다수의 기지국을 기반으로 한 빔형성(beamforming) 기술이 요구된다. 빔형성 기술을 적용하기 위해서는 안테나에 입사되는 신호의 도래각(Angle-of-Arrival : AOA) 정보가 필요한데, 일반적으로 도래각은 고분해능 알고리즘인 MUSIC(: Multiple Signal Classification)이나 ESPRIT(: Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique)을 사용하여 추정된다. 빔형성 기술을 적용하기 위해 다양한 안테나 형태가 사용될 수 있지만, 일반적으로 단일 형상(사각, 원형, 육각)의 안테나 배열이 주로 사용되어 왔다. 본 논문에서는 다양한 주파수에 적합한, 기존의 단일 형상 배열 안테나가 아닌, 사각과 원형 배열이 혼합된 형상의 배열 안테나를 기반으로 한 송/수신 빔형성 시스템을 소개하고 성능을 평가한다. 제안된 혼합 형상 배열 안테나 기반의 빔형성 시스템에 대한 성능평가를 위해 다양한 시나리오를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한다.

ABSTRACT

The 5G communication system employs the millimeter wave with the extremely high frequency. Since the high frequency signal has the strong straightness, the beamforming technology based on the multiple base stations is required for services covering wide range. The beamformer needs the angle-of-arrival(AOA) information of the signal incident to the antenna, and it is generally estimated through the high resolution AOA estimation algorithm such as Multiple Signal Classification (MUSIC) or Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Technique (ESPRIT). Although various antenna array shapes can be employed for the beamformer, a single shape (square, circle, or hexagonal) is typically utilized. In this paper, we introduce a transmitting/receiving beamforming system based on the combined array antenna with square and circular shapes, which is proper to various frequency signals, and evaluate its performance. For evaluating the performance of the proposed beamforming system based on the combined array antenna, we implement the computer simulation employing various scenarios.

키워드

Combined Array Antenna, Beamformer, MVDR, MMSE
혼합 배열 안테나, 빔형성기, 최소 분산 비왜곡 응답, 최소 평균 제곱 오차

* 조선대학교 전자공학과 (skriekd12@chosun.kr)

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부

• 접수일 : 2021. 01. 12

• 수정완료일 : 2021. 01. 30

• 게재확정일 : 2021. 02. 17

• Received : Jan. 12, 2021, Revised : Jan. 30, 2021, Accepted : Feb. 17, 2021

• Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

School of Electronic Engineering, Chosun University,

Email : hwangss@chosun.ac.kr

1. 서론

초고속, 초저지연, 초연결을 목표로 하는 5세대 통신 기술인 5G NR(: New Radio) 통신기술이 개발되고 있다. 5G 통신은 매우 높은 주파수 대역을 가지는 밀리미터파(mmWave)를 사용하므로, 전파의 전달 거리가 짧고, 장애물을 만났을 때 회절 혹은 투과성이 저하된다. 밀리미터파 통신은 기지국의 좁은 통신 범위를 극복하기 위해, 다수개의 기지국을 설치하고 빔형성 기술을 활용하여 상기의 단점을 해결한다[1][2]. 빔형성을 효과적으로 수행하기 위해서는 일반적으로 신호의 도래각(AOA : Angle-of-Arrival) 정보가 필요한데, 도래각 추정을 위해 MUSIC(: Multiple Signal Classification) 이나 ESPRIT(: Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)과 같은 고유치 분해 기반의 고분해능 알고리즘을 주로 사용한다.

원하는 신호에 대한 도래각 정보를 기반으로 적절한 빔형성 기법을 사용할 수 있는데, ULA(: Uniform Linear Array), URA(: Uniform Rectangular Array), UCA(: Uniform Circular Array) 및 CRA(: Concentric Ring Array)과 같은 다양한 배열 안테나가 탑재된 수신기에 적용된다. [3]에서 ULA를 기반으로 LMS(: Least Mean Square), SMI(: Sample Matrix Inversion) 및 RLS(: Recursive Least Square) 빔포밍 기법에 대한 비교분석이 수행되었고, [4]에서는 URA를 적용한 MVDR(: Minimum Variance Distortionless Response)과 MMSE(: Minimum Mean Square Error) 빔형성기의 성능평가가 진행되었다. [5]는 다중 노드를 위한 UCA 기반의 빔형성 기법을 제안하였고, 그 성능을 평가하였으며, [6]은 UCA를 기반으로 MVDR과 MMSE 빔포밍의 성능평가를 실시하였다. 또한, [7]에서 저자는 URA, UCA 및 CRA에 LMS와 RLS 빔형성기를 적용하고, 각 배열 안테나에 대한 빔형성기의 성능을 비교 분석하였다.

앞서 기술한 선행연구에 적용된 안테나 배열은 단일 형상을 가지는 형태로, 혼합된 배열 안테나 형상을 적용한 사례는 없다. 본 논문은 다양한 주파수 대역을 고려하여, 중앙에 단일 정방 배열 안테나가 위치하고, 바깥쪽으로 원형 배열 안테나가 위치한 혼합 배열 안테나 기반의 송수신 빔형성 시스템을 소개한다. 제시

된 시스템은 혼합 배열 송수신 안테나, 수신 빔형성기, 송신 빔형성기, 신호처리 및 저장 유닛으로 구성된다. 또한, 다양한 시나리오를 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된 빔형성 시스템의 성능평가를 실시하고 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 URA와 UCA 안테나가 혼합된 혼합 배열 안테나를 소개하고, 3장에서 혼합 배열 안테나를 고려한 수신신호의 수학적 모델을 제시한다. 4장에서 MVDR 수신 빔형성기와 MMSE 송신 빔형성기에 대해 소개하고, 5장에서는 제시된 수신신호 모델을 기반으로 적응 빔형성기의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보인다. 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 혼합 배열 안테나

본 장에서는 그림 1의 구조를 갖는 혼합 배열 안테나를 소개한다. 제시된 혼합 배열 안테나는 총 $M(M=R_m \times R_n + C_c)$ 개의 안테나 요소로 구성되며, URA 안테나와 UCA 안테나가 동일 평면에 혼합된 형상을 갖는다. 그림 1에서 θ 와 ϕ 는 안테나로 입사하는 신호의 고도각과 방위각을 나타낸다. 이 구조는 정방행렬 구조와 원형 배열 구조의 장점을 살릴 수 있으며, 다양한 주파수 대역의 신호를 효율적으로 송수신 할 수 있다는 장점을 가진다.

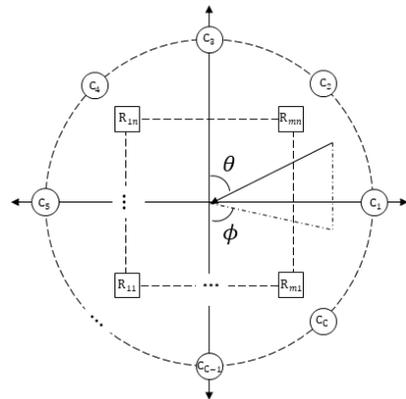


그림 1. URA와 UCA가 혼합된 혼합 배열 안테나 구조

Fig. 1 The combined array antenna structure combining URA and UCA

III. 수신신호 모델

본 장에서는 혼합 배열 안테나를 적용하기 위한 신호 모델을 제시한다. 그림 1의 구조를 갖는 혼합 배열 안테나에 원하는 신호 $s(k)$ 를 포함한 L 개의 간섭신호가 입사한다고 가정할 경우, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{r}(k) = \mathbf{a}_f s(k) + \mathbf{A}\mathbf{i}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\mathbf{r}(k)$ 는 수신신호 벡터($M \times 1$)이고, \mathbf{a}_f 는 원하는 신호 $s(k)$ 에 대한 어레이 응답 벡터($M \times 1$)이며, 식(2)와 같이 주어진다.

$$\mathbf{a}_f = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\mu_f} \\ e^{-j\nu_f} \\ e^{-j(\mu_f + \nu_f)} \\ e^{-j\alpha r \sin\theta_f \cos\phi_f} \\ e^{-j\alpha r \sin\theta_f \cos(\phi_f - \phi_1)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r \sin\theta_f \cos(\phi_f - \phi_{C_c - 1})} \end{bmatrix} \quad R_m, R_n = 2$$

$$\mathbf{a}_f = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ e^{-j(R_m - 1)\mu_f} \\ \vdots \\ e^{-j r_m \nu_f} \\ e^{-j((R_m - 1)\mu_f + r_m \nu_f)} \\ \vdots \\ e^{-j(R_m - 1)\nu_f} \\ \vdots \\ e^{-j((R_m - 1)\mu_f + (R_m - 1)\nu_f)} \\ e^{-j\alpha r \sin\theta_f \cos\phi_f} \\ e^{-j\alpha r \sin\theta_f \cos(\phi_f - \phi_1)} \\ \vdots \\ e^{-j\alpha r \sin\theta_f \cos(\phi_f - \phi_{C_c - 1})} \end{bmatrix} \quad R_m, R_n > 2 \quad (2)$$

식 (2)에 사용된 각 파라미터는 표1에 요약되어 있다. $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \dots \ \mathbf{a}_L]$ 는 간섭신호에 대한 $M \times L$ 크기의 어레이 응답 행렬이며, $\mathbf{i}(k)$ 는 간섭신호 벡터($L \times 1$)이며, $\mathbf{n}(k)$ 는 iid(independent and identically distributed) 특성을 갖는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인

AWGN(Additive White Gaussian Noise) 잡음 벡터 ($M \times 1$)이다.

표 1. 배열 응답벡터 구성 파라미터
Table 1. Array response vector configuration parameter

Parameter	Explanation
R_m	number of x-axis antenna elements in rectangular array
r_m	$1, 2, \dots, R_m - 2$
R_n	number of y-axis antenna elements in rectangular array
μ_f	$2\pi(d_r/\lambda)\cos\phi_f\sin\theta_f$
ν_f	$2\pi(d_r/\lambda)\sin\phi_f\sin\theta_f$
ϕ_f	azimuth angle for the desired signal($s(k)$)
θ_f	elevation angle for the desired signal($s(k)$)
d_r	interelement space of rectangular array
λ	wave length
α	wavenumber ($2\pi/\lambda$)
r	radius of UCA($C_c d_c/2\pi$)
d_c	interelement space of circular array
C_c	number of circular array element
ϕ_o	index of element location ($2\pi o/C_c, (o = 0, 1, \dots, C_c - 1)$)

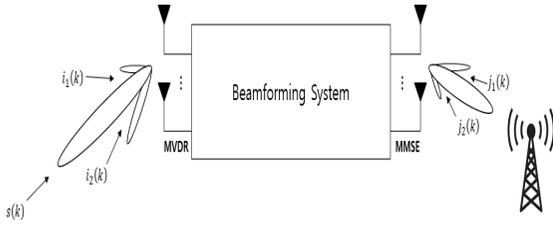


그림 2. 빔포밍 시스템 구조
Fig. 2 Structure of beamforming system

IV. 혼합 배열 안테나 기반의 적응 빔형성 시스템

그림 2는 제안된 적응 빔형성 시스템의 기본 구조를 나타낸다. 제시된 빔형성 시스템은 혼합 배열 안테나 MVDR 기반의 수신 빔형성기, MMSE 기반의 송신 빔형성기, 신호처리 및 저장 유닛으로 구성된다. 시스템의 수신단과 송신단에 적용되는 MVDR과 MMSE 빔형성기의 기본 구조는 그림 3에서 보여진다. 각 빔형성기는 원하는 신호의 방향으로 빔(beam)을 형성하고, 간섭이나 재밍 신호의 방향으로 널(null)을 형성하여, 원하는 신호 수신에 성능을 극대화하도록 설계되어 있다[8][9].

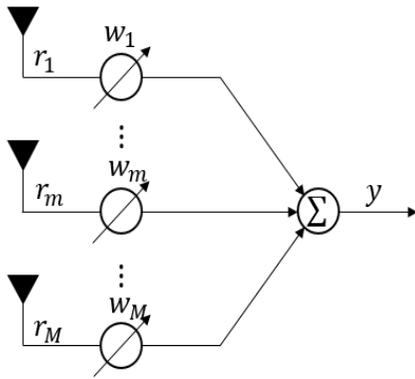


그림 3. 빔포머 구조
Fig. 3 Basic architecture of beamformer

4.1 MVDR

MVDR 빔형성기는 원하는 신호에 대한 고정응답

을 유지하면서 어레이 출력을 최소화하도록 설계된다. 이를 위해 최적의 가중치가 선택되어야 하는데 이를 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\min\{\mathbf{w}^H\mathbf{R}\mathbf{w}\} \text{ subject to } \mathbf{w}^H\mathbf{a}(\theta,\phi)=1$$

여기서 \mathbf{w} 는 가중치 벡터를 나타내고, \mathbf{w}^H 는 켈레진치를 나타내며, $\mathbf{R}=E[\mathbf{r}(k)\mathbf{r}(k)^H]$ 는 수신신호의 공분산 행렬을 의미한다. $\mathbf{a}(\theta,\phi)$ 는 원하는 신호의 특정 고도각 및 방위각에 대한 조향 벡터를 나타낸다. MVDR 빔형성기의 최적 가중치 벡터는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\mathbf{w}_{MVDR} = \frac{\mathbf{a}(\theta,\phi)\mathbf{R}^{-1}}{\mathbf{a}(\theta,\phi)^H\mathbf{R}^{-1}\mathbf{a}(\theta,\phi)} \quad (3)$$

수신 MVDR 빔형성기에 대한 출력 벡터는 식(4)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{y}_{MVDR} = \mathbf{w}_{MVDR}^H\mathbf{r}(k) \quad (4)$$

4.2 MMSE

MMSE 빔형성기는 위너 방정식(Wiener-Hopf equation)에 기반을 둔 빔형성기로, 수신된 신호와 기준 신호와의 오차가 최소가 되도록 설계된다[10][11]. 최소자승오차(Mean Square Error : MSE)는 식 (5)와 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} MSE &= E[e^2(k)] \\ &= E[ref^2(k)] - 2\mathbf{p}^H\mathbf{w} + \mathbf{w}^H\mathbf{R}\mathbf{w} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $ref(k)$ 는 기준 신호이고, \mathbf{p} 는 입력신호와 기준 신호의 교차상관 벡터로 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= E[ref(k)\mathbf{r}(k)] \\ &= E \begin{bmatrix} ref(k)r_1(k) \\ ref(k)r_2(k) \\ \vdots \\ ref(k)r_M(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

가중치 벡터의 최적의 해는 위너 해를 구함으로써 식 (7)과 같이 계산된다.

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p} \quad (7)$$

식(6)에서 기준 신호를 원하는 신호로 설정하면, 식(8)과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$\mathbf{p} = \sigma_i^2 \mathbf{a}_i(\theta, \phi) \quad (8)$$

여기서 σ_i^2 은 원하는 신호의 전력(power)을 의미하고, $\mathbf{a}_i(\theta, \phi)$ 는 송신하고자 하는 대상으로의 특정 고도각 및 방위각에 대한 조향 벡터이다. 식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면 최적의 MMSE 가중치 벡터는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{w}_{MMSE} = \sigma_i^2 \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_i(\theta, \phi) \quad (9)$$

최적의 MMSE 가중치 벡터가 적용된 수신 MMSE 빔형성기 출력 벡터는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y}_{MMSE} = \mathbf{w}_{MMSE}^H \mathbf{r}(k) \quad (10)$$

식(4)와 (10)의 빔형성기 출력 벡터를 이용해 원하는 방향으로 빔을 형성하고 간섭신호의 방향으로는 널을 형성함으로써, 효율적으로 간섭 및 제밍 신호를 제거하고 원하는 신호를 송수신 할 수 있다. 신호처리 및 저장 유닛은 수신된 데이터를 가공하고 저장하는 장치로써, 본 논문에서는 이에 대한 자세한 설명은 생략한다.

V. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 정방 배열 안테나와 등간격 원형 배열 안테나로 구성된 혼합 배열 안테나를 적용한 적응 빔형성 시스템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 바탕으로 평가하고 분석한다. 시뮬레이션을 위해 수신 시나리오와 송신 시나리오를 아래와 같이 설정하였으며, 수신신호에 포함되는 신호들은 [12]에서 제시된

모델을 사용하였다.

1. 수신 시나리오: 원하는 신호 1개 (Continuous Wave (CW)), 간섭신호 2개 (Amplitude Modulation (AM) 1개, Wideband(WB) noise 1개)
2. 송신 시나리오: 원하는 신호 1개 (CW), 간섭신호 3개 (AM 2개, Frequency Modulation (FM) 1개)

시뮬레이션의 편의를 위해, 모든 신호의 고도각은 수신 시나리오에서는 80°로, 송신 시나리오에서는 50°로 고정하였고, 모든 신호의 신호 대 잡음비 (Signal to Noise Ratio : SNR)는 20dB로 가정하였다. 각 시나리오 수신신호의 주요 파라미터는 표 2와 표3에 요약되어 있다.

빔형성 성능평가를 위해 안쪽에 2×2정방 배열 안테나와 바깥쪽에 4개의 안테나 요소를 가지는 원형 배열 안테나를 고려하였다. 그림 4는 수신신호의 주파수 영역 스펙트럼으로 표2와 대조하여 각 신호가 해당 중심주파수에 위치함을 확인할 수 있다. 그림 5는 MVDR 빔형성기의 출력 신호 스펙트럼으로 원하는 CW신호를 제외하고 나머지 간섭신호가 제거되었음을 보여 준다. 그림 6과 7은 MVDR 수신 빔형성기의 극좌표와 평면좌표 빔패턴을 각각 나타낸다. 그림들로 부터 70° 방향으로 원하는 빔이 형성되어 있고, 간섭신호의 방위각인 0°와 -60° 방향으로는 널이 형성됨을 확인할 수 있다. 그림 8은 송신신호의 주파수 영역 스펙트럼으로 표3과 대조하여 각 신호가 해당 중심주파수에 위치함을 확인할 수 있다. 그림 9는 MMSE 송신 빔형성기의 출력 신호 스펙트럼으로 원하는 CW1신호를 제외하고 나머지 간섭신호가 제거되었음을 보여 준다. 그림 10과 11은 MMSE 송신 빔형성기의 극좌표와 평면좌표 빔패턴을 각각 나타낸다. 그림들로 부터 -47° 방향으로 원하는 빔이 형성되어 있고, 간섭신호의 방위각인 -140°와 44°, 127° 방향으로는 널이 형성됨을 확인할 수 있다.

다음으로 위 시나리오에 다양한 안테나 배열 요소의 개수를 고려한 입력 SNR 대비 출력 신호-대-간섭과 잡음 비(Signal-to-Interference & Noise Ratio : SINR)에 대한 시뮬레이션 결과를 제시한다. 그림 12는 고려된 3가지 복합 안테나 배열을 보인다. Type1은 8개, Type2는 12개, Type3은 16개의 총 안테나 요

소를 사용하였으며, 입력 SNR을 0부터 20dB까지 증가시켜 가면서 출력 SINR을 비교하였다. 그림 13과 14는 각 안테나 구성 요소에 따른 MVDR 수신 빔형성기와 MMSE 송신 빔형성기에 대한 입력 SNR 대 출력 SINR을 각각 보인다. 그림을 통해 모든 경우에 간섭 신호들이 효율적으로 제거되었고, 안테나 요소 개수가 증가함에 따라 보다 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

표 2. 수신 시나리오 신호 모델링 파라미터 ($\theta = 80^\circ$)

Table 2. Received scenario signal modeling parameters ($\theta = 80^\circ$)

Signal	Center frequency	Modulation index	Azimuth angle ($^\circ$)
AM	0.38	0.03	0
CW (desired)	0.1	-	70
WB	0.2	-	-60

표 3. 송신 시나리오 신호 모델링 파라미터 ($\theta = 50^\circ$)

Table 3. Transmitted scenario signal modeling parameters ($\theta = 50^\circ$)

Signal	Center frequency	Modulation index	Azimuth angle ($^\circ$)
AM1	0.23	0.03	-140
AM2	0.46	0.03	44
CW1 (desired)	0.3	-	-47
FM1	0.1	0.001	127

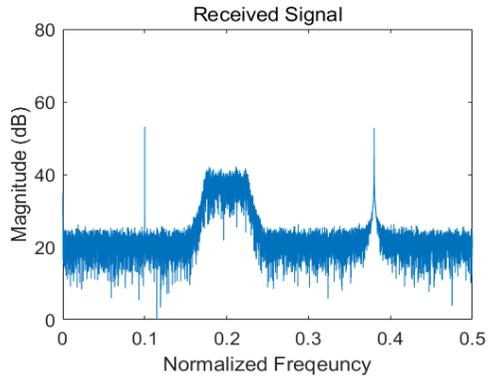


그림 4. 수신신호 스펙트럼
Fig. 4 Received signal spectrum

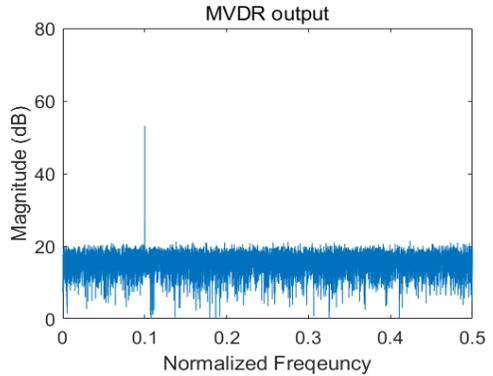


그림 5. MVDR 수신 빔형성기의 출력 스펙트럼
Fig. 5 Output spectrum for MVDR receiving beamformer

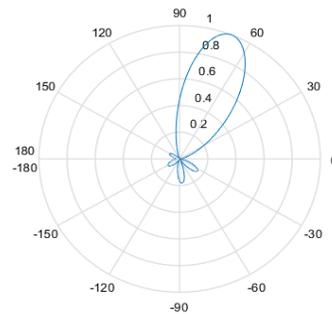


그림 6. MVDR 수신 빔형성기의 극좌표 빔패턴
Fig. 6 Polar beam pattern for MVDR receiving beamformer

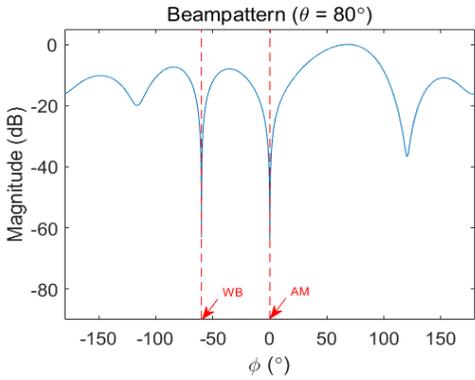


그림 7. MVDR 수신 빔형성기의 평면 빔패턴
Fig. 7 Planar beampattern for MVDR receiving beamformer

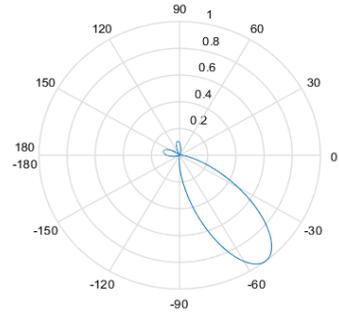


그림 10. MMSE 송신 빔형성기의 극좌표 빔패턴
Fig. 10 Polar beampattern for MMSE transmitting beamformer

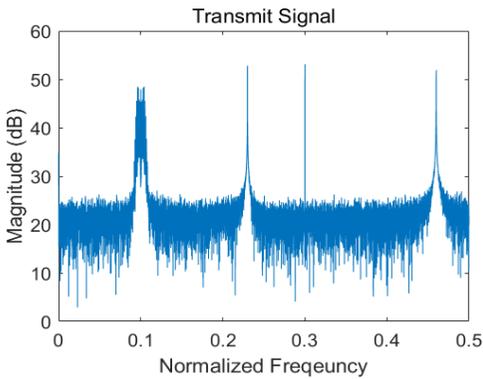


그림 8. 송신신호 스펙트럼
Fig. 8 Transmitted signal spectrum

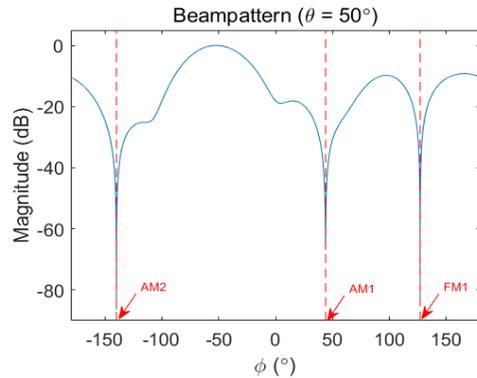


그림 11. MMSE 송신 빔형성기의 평면 빔패턴
Fig. 11 Planar beampattern for MMSE transmitting beamformer

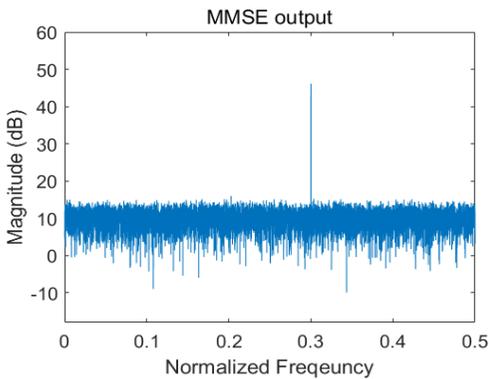


그림 9. MMSE 송신 빔형성기의 출력 스펙트럼
Fig. 9 Output spectrum for MMSE transmitting beamformer

VI. 결 론

본 논문에서는 등간격 정방 배열 안테나와 등간격 원형 배열 안테나가 혼합된 배열 안테나 기반의 빔형성 송수신 시스템을 소개하였다. 제시된 혼합 배열 안테나는 다양한 주파수 대역을 가지는 신호의 송수신에 적합하게 설계되었다. 제시된 빔형성 시스템은 혼합 배열 수신 안테나, 수신 MVDR 빔형성기, 신호처리 및 데이터 저장 유닛, 송신 MMSE 빔형성기, 혼합 배열 송신 안테나로 구성된다. 또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해, 제시된 혼합 배열 안테나 기반의 송수신 빔형성 시스템의 성능을 평가하고 분석하였다.

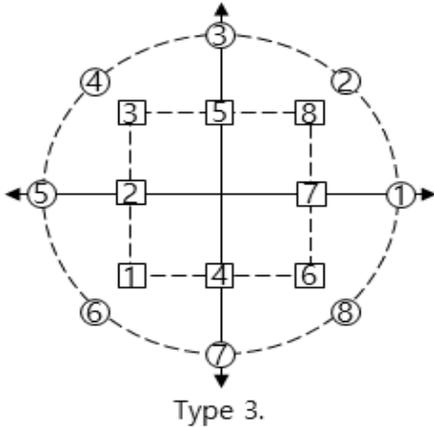
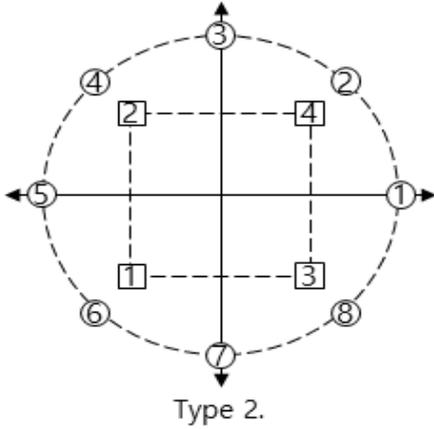
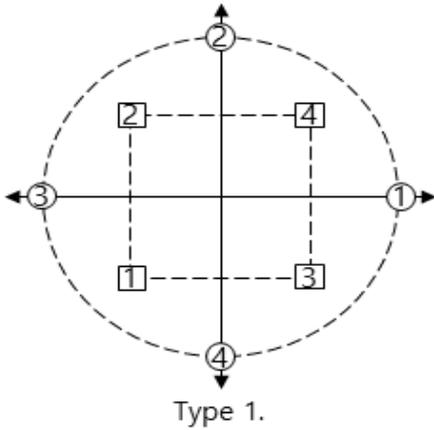


그림 12. 출력 SINR 시뮬레이션을 위해 고려된 안테나 타입들
 Fig. 12 The considered antenna types for output SINR simulation

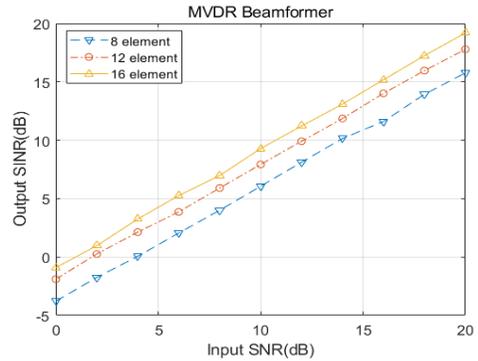


그림 13. MVDR 수신 빔형성기의 입력 SNR 대 출력 SINR
 Fig. 13 Input SNR versus output SINR curves of the received MVDR beamformer

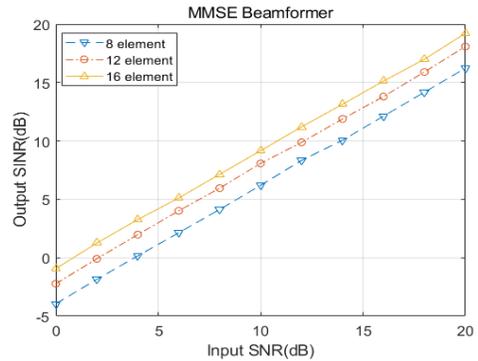


그림 14. MMSE 송신 빔형성기의 입력 SNR 대 출력 SINR
 Fig. 14 Input SNR versus output SINR curves of the transmitted MMSE beamformer

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1D1A1B07041644).

이 논문은 2020년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond, M.2083-0, Sept. 2015.
- [2] C. Seker, M. T. Guner, and T. Ozturk, "A Review of Millimeter Wave Communication for 5G," *2018 2nd Int. Symp. Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, Oct. 2018, pp. 19-21.
- [3] D. N. Pater, B. j. Makwana, and P. B. Parmar, "Comparative analysis of adaptive beamforming algorithm LMS, SMI and RLS for ULA smart antenna," *2016 Int. Conf. Communication and Signal Processing (ICCSP)*, Melmaruvathur, India, Apr. 2016, pp. 1029-1033.
- [4] J. Mun and S. Hwang, "Performance Analysis of Adaptive Beamforming System Based on Planar Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, 2018, pp. 1207-1212.
- [5] S. Park, C. Park, H. Kim, and J. Chung, "Beamforming Power Allocation Method of Multiple Nodes with UCA for Increasing SIR," *The J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 40, no. 1, 2015, pp. 16-22.
- [6] T. Kim and S. Hwang, "Performance Analysis of Beamforming Satellite System Applying Circular Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 845-852.
- [7] S. Ioannides and C. A. Balanis, "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, 2005, pp. 351-354.
- [8] R. Gaokar and A. Cheeran, "Performance Analysis of Beamforming Algorithms," *Int. J. of Electronics & Communication Technology*, vol. 2, issue 1, 2011, pp. 43-48.
- [9] Y. C. Eldar, A. Nehorai, and P. S. La Rosa, "A competitive mean-squared error approach to beamforming," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 55, no. 11. 2007, pp. 5143-5154.
- [10] H. Ju, "A Design of Multi-channel Speech Pickup Embedded System for Hands-free Communication," Master's Thesis, Graduate School, Korea Maritime & Ocean University, 2006.
- [11] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. NJ.: Prentice-Hall, 1985.
- [12] J. Mun and S. Hwang, "PInput Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 3, 2017, pp. 433-438.

저자 소개



김태윤(Tae-Yun Kim)

2014년 조선대학교 메카트로닉스 공학과 졸업(공학사)
2016년 조선대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2016년 ~ 현재 조선대학교 대학원 전자공학과 박사과정

※ 관심분야 : 적응신호처리, 신호 위치추정, 위치 추정 알고리즘



황석승(Suk-Seung Hwang)

1997년 광운대학교 제어계측공학과 졸업
2001년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department

대학원 졸업 (공학석사)

2006년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업 (공학박사)

2006. 5~2008. 3 삼성전자 통신연구소 책임연구원
2008. 3~2014. 1 조선대학교 메카트로닉스공학과 교수

2014. 2~ 조선대학교 전자공학부 교수

※ 관심분야 : 적응신호처리, 위치추정, 채널추정, 이동로봇용 위치추정, 간섭제거, RFID

