

Performance Analysis of MUSIC-Based Jammer DOA Estimation Technique for a Misaligned Antenna Array

Kwansik Park, Jiwon Seo[†]

School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon 21983, Korea

ABSTRACT

As a countermeasure against the threat of jamming which can disrupt operation of the Global Positioning System (GPS) receivers, various kinds of technique to estimate the Direction-Of-Arrivals (DOAs) of incoming jamming signals have been widely studied, and among them, the MULTiple Signal Classification (MUSIC) algorithm is known to provide very high resolution. However, since the previous studies regarding the MUSIC algorithm does not consider the orientation of each antenna element of antenna arrays, there is a possibility that DOA estimation performance degrades in the case of a misaligned antenna array whose antenna elements are not oriented along the same direction. As an effort to solve this problem, there exists a previous work which presents an MUSIC-based method for DOA estimation. However, the error between the real and measured values of each antenna orientation is not taken into consideration. Therefore, in this paper, the effect of the aforementioned error on the DOA estimation performance in the case of a misaligned antenna array is analyzed by simulations.

Keywords: misaligned antenna array, DOA estimation, MUSIC algorithm

1. INTRODUCTION

미국의 Global Positioning System (GPS)으로 대표되는 위성 항법시스템은 지구 주위를 공전하는 30여개의 항법위성을 통해 전지구적으로 위치, 항법 및 시각 정보를 제공하는 시스템으로서 (Kaplan & Hegarty 2006), 현대 사회에서 군사, 통신, 교통 등 매우 다양한 분야에서 핵심적으로 활용되고 있다 (Lee et al. 2009, Blanch et al. 2012, Rhee & Seo 2013, Seo & Walter 2014, Song et al. 2016, Park et al. 2017, Kim & Seo 2017, Lim et al. 2019). 그러나 20,000 km 이상의 매우 높은 위성 고도로 인하여, 위성으로부터 송출된 항법 신호는 지표면 도달시 수신 세기가 일반적인 열잡음(thermal noise)보다 낮을 정도로 매우 약하여 이를 수신하는 항법 수신기는 재밍이라 불리는 의도적인 전파 교란에 취약하다는 단점이 존재한다 (Son et al. 2018, 2019, Rhee & Seo 2019,

Park & Son 2019).

이러한 재밍에 대응하기 위하여 입사하는 재밍 신호를 감쇄하는 항재밍 신호처리와 더불어 (Seo et al. 2011, Park et al. 2018), 재밍 신호의 도래각을 추정하는 신호처리 기법이 활발하게 연구되고 있으며 (McCloud & Scharf 2002, Gao & Gershman 2005, Wang et al. 2006, Yin & Chen 2011, Amin et al. 2016, Wang et al. 2017) 그 중 MULTiple Signal Classification (MUSIC) 알고리즘은 다른 기법들에 비해 비교적 높은 도래각 추정 정확도를 보이는 것으로 알려져 있다 (Schmidt 1981, Porat & Friedlander 1988, Friedlander 1990, Odendaal et al. 1994, Kundu 1996, Le Bihan et al. 2007).

기존의 대부분의 MUSIC 알고리즘 기반 기법들은 배열 안테나의 모든 안테나 소자가 모두 동일한 이득 패턴 및 정렬 방향을 갖는 것을 가정하므로, 도래각 추정을 위한 공간 스펙트럼 함수 (spatial spectrum function) 계산 시 요구되는 scanning 벡터는 설계 과정에서 각 안테나 소자의 수신 신호의 위상만을 고려하여 Eq. (1)과 같이 표현된다 (Farhang-Boroujeny 1998).

$$\tilde{\mathbf{c}}_m(\theta) = [\exp[j\Delta\omega_{1,m}(\theta)] \quad \exp[j\Delta\omega_{2,m}(\theta)] \quad \cdots \quad \exp[j\Delta\omega_{N,m}(\theta)]]^T \quad (1)$$

여기서 $\Delta\omega_{n,m}(\theta)$ 는 m 번째 재밍 신호가 입사각 θ 로 입사한다고 가

Received Dec 05, 2019 Revised Feb 21, 2020 Accepted Feb 24, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: jiwon.seo@yonsei.ac.kr

Tel: +82-32-749-5833 Fax: +82-32-818-5801

Kwansik Park <http://orcid.org/0000-0002-1486-7516>

Jiwon Seo <http://orcid.org/0000-0003-1781-533X>

정했을 때의 n 번째 안테나에 수신된 m 번째 재밍 신호의 원점에 대한 위상을 나타낸다. 동일한 평면 상에 배치된 일반적인 배열 안테나의 경우 Eq. (1)의 scanning 벡터를 통해 도래각 추정이 가능하다. 그러나 평면이 아닌 곡면 상에 배치된 배열 안테나와 같이 각 안테나가 서로 다른 방향으로 정렬되어 배치된 경우, 각 안테나의 정렬 방향 및 입사 신호의 편파에 따라 수신 신호의 진폭 및 위상이 변하므로 scanning 벡터 설계 시 이를 고려하지 않을 경우 도래각 추정 정확도가 감소할 수 있다.

이를 위해 비정렬된 배열 안테나에서의 신호 모델 도출을 기반으로 도래각을 추정하는 기법이 연구된 바 있으나, 실제 안테나의 정렬 각도와 scanning 벡터에 사용된 정렬 각도 측정치 간 오차가 없는 이상적인 경우에 대해서만 연구가 이루어졌다 (Park & Seo 2018). 따라서, 본 논문에서는 상기 오차가 반영된 scanning 벡터를 활용하여 시뮬레이션을 수행함으로써 비정렬된 배열 안테나에서 실제 안테나의 정렬 각도와 정렬 각도 측정치 간 오차가 재밍 도래각 추정 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 비정렬된 배열 안테나의 수신 신호 모델

본 논문에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 3차원 좌표계의 yz -평면 상에서 각 안테나 소자들이 각기 다른 방향으로 정렬되어 배치된 N 개 소자 배열 안테나를 고려한다. Fig. 1에서 $\mathbf{p}_n$ 및 δ_n ($-90^\circ \leq \delta_n \leq 90^\circ$)은 각각 n 번째 안테나 소자의 원점에 대한 위치 벡터 및 z 축에 대한 정렬 각도를 나타낸다. 모든 안테나 소자가 동일한 방향으로 정렬되는 경우 $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n$ 이나, 본 논문에서는 각 안테나 소자가 각기 다른 방향으로 정렬된 배열 안테나를 가정하므로 각 δ_n 값은 서로 다른 값을 가지게 되고, 이로 인해 동일한 입사 신호에 대하여 신호 입사각 방향에 대한 각 안테나 소자의 이득 및 편파가 달라지게 된다. 따라서 모든 안테나가 동일한 방향으로 정렬되어 각 안테나 소자에서의 수신 신호 간에 위상차만 고려했던 기존 연구들과는 달리, 비정렬된 배열 안테나에서의 도래각 추정을 위해서는 안테나 정렬 방향 차이로 인해 발생하는 영향을 고려하여 수신 신호를 모델링하고 이를 도래각 추정 알고리즘 설계 시 반영해야 한다.

단순한 분석을 위해 각 안테나 소자는 모두 동일한 Hertzian dipole 안테나라고 가정한다. 상기 배열 안테나를 향해 서로 다른 도래각으로 입사하는 M 개의 협대역 평면파 재밍 신호에 대하여, θ_m ($-90^\circ \leq \theta_m \leq 90^\circ$, $m = 1, 2, \dots, M$) 및 $\mathbf{b}_m$ 은 각각 m 번째 재밍 신호의 도래각 및 도래각 방향에 대한 단위 벡터를 의미한다. 한편, 전자기파의 편파는 전기장의 방향으로 결정되며 m 번째 재밍 신호의 단위 전기장 벡터는 수학적으로 Eq. (2)와 같이 표현될 수 있다 (Stutzman 1992).

$$\mathbf{E}_m = \cos \gamma_m \mathbf{e}_\phi + \sin \gamma_m \exp[j\eta_m] \mathbf{e}_\theta \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{e}_\phi$ 및 $\mathbf{e}_\theta$ 는 3차원 구면 좌표계의 단위 벡터이며, γ_m 및 η_m 은 m 번째 재밍 신호의 편파를 나타내는 매개변수이다. 단위 전기장이 Eq. (2)와 같이 표현된 m 번째 재밍 신호 $s_m(t)$ 가 원점으로 입사하는 경우, n 번째 안테나 소자에 수신된 m 번째 재밍 신

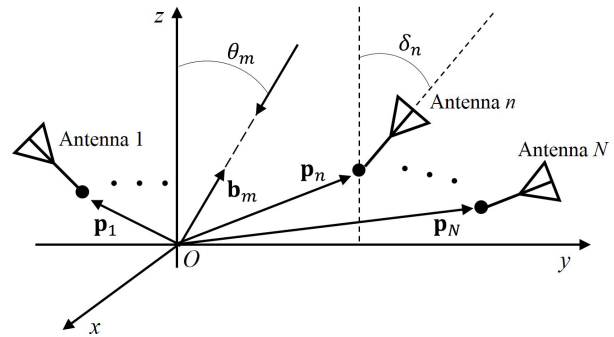


Fig. 1. Coordinate system for the N -element misaligned antenna array.

호 $r_{n,m}(t)$ 는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다 (Goossens & Rogier 2008).

$$r_{n,m}(t) = \{K \mathbf{G}_n(\theta_m) \cdot \mathbf{E}_m\} s_m(t + \Delta\omega_{n,m}) \quad (3)$$

여기서 K 는 재밍 신호의 입사 방향 및 편파와 무관한 비례상수이고, $\mathbf{G}_n(\theta_m)$ 은 m 번째 재밍 신호의 입사 방향에 대한 n 번째 안테나 소자의 이득 및 편파를 나타내는 complex radiation field function이며 (Kildal 1999), $\Delta\omega_{n,m}$ 는 원점에 대한 n 번째 안테나 소자에 수신된 m 번째 재밍 신호의 위상을 나타낸다. Fig. 1과 같이 yz 평면에 배치된 Hertzian dipole 배열 안테나를 가정했을 경우의 $\mathbf{G}_n(\theta_m)$ 및 $\Delta\omega_{n,m}$ 는 Eqs. (4-5)와 같이 표현될 수 있다 (Cox 1983).

$$\mathbf{G}_n(\theta_m) = \mathbf{e}_\theta (\sin \theta_m \cos \delta_n - \cos \theta_m \sin \delta_n) \quad (4)$$

$$\Delta\omega_{n,m} = \frac{2\pi(\mathbf{p}_n \cdot \mathbf{b}_m)}{\lambda_m} \quad (5)$$

여기서 λ_m 는 m 번째 재밍 신호의 파장이다. Eqs. (2,4)를 Eq. (3)에 대입하면 $r_{n,m}(t)$ 는 Eq. (6)과 같이 표현된다.

$$r_{n,m}(t) = K \sin \gamma_m \exp[j\eta_m] \sin(\theta_m - \delta_n) s_m(t + \Delta\omega_{n,m}) \quad (6)$$

여기서 $F_{n,m} = \sin \gamma_m \exp[j\eta_m] \sin(\theta_m - \delta_n)$ 라고 정의하고, Eq. (6)의 $r_{n,m}(t)$ 가 각 안테나 소자에 연결된 RF chain에서의 주파수 천이 및 샘플링을 거친 후 디지털화된 재밍 신호를 $r_{n,m}[k]$ 라고 하면, $r_{n,m}[k]$ 는 Eq. (7)과 같이 표현된다 (Park & Seo 2018).

$$r_{n,m}[k] = (KF_{n,m}) s_m[k] \exp[j\Delta\omega_{n,m}] \quad (7)$$

결과적으로, n 번째 안테나 소자에 수신되어 디지털화된 m 번째 재밍 신호 $r_{n,m}[k]$ 는 Eq. (7)로 나타낼 수 있다. n 번째 안테나 소자에서 수신되어 디지털화된 총 M 개의 재밍 신호 및 n 번째 안테나 소자의 디지털화된 잡음의 총합을 $u_n[k]$ 라 하고, $\mathbf{u}[k]$ 를 $u_1[k], u_2[k], \dots, u_n[k]$ 를 원소로 갖는 벡터로 정의하면, Eq. (7)을 이용하여 $\mathbf{u}[k]$ 를 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{u}[k] &= \mathbf{K}\mathbf{A}\mathbf{s}[k] + \mathbf{\vartheta}[k] \\ \mathbf{u}[k] &= [u_1[k] \quad u_2[k] \quad \cdots \quad u_N[k]]^T \\ \mathbf{\vartheta}[k] &= [\vartheta_1[k] \quad \vartheta_2[k] \quad \cdots \quad \vartheta_N[k]]^T\end{aligned}\quad (8)$$

여기서 $\mathbf{\vartheta}[k]$ 는 잡음 벡터이고, $\mathbf{\vartheta}[k]$ 의 각 원소 $\vartheta_n[k]$ 는 n 번째 안테나 소자에서의 잡음이다. 또한, Eq. (8)에서 $\mathbf{A}$ 및 $\mathbf{s}[k]$ 은 각각 조향 행렬(steering matrix) 및 재밍 신호 벡터로서 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다 (Park & Seo 2018).

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= [\mathbf{a}_1 \quad \mathbf{a}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{a}_M] \\ \mathbf{a}_m &= [F_{1,m}[j\Delta\omega_{1,m}] \quad F_{2,m} \exp[j\Delta\omega_{2,m}] \quad \cdots \quad F_{N,m} \exp[j\Delta\omega_{N,m}]]^T \\ \mathbf{s}[k] &= [s_1[k] \quad s_2[k] \quad \cdots \quad s_M[k]]^T\end{aligned}\quad (9)$$

여기서 $\mathbf{a}_m$ 은 비정렬된 배열안테나에서의 m 번째 재밍 신호에 대한 조향 벡터(steering vector)로서 각 안테나의 정렬 방향 정보가 반영되었음을 볼 수 있다. Eq. (9)에서 도출된 수신 신호 모델을 바탕으로 비정렬된 배열 안테나에서의 MUSIC 알고리즘 기반 재머 도래각 추정 기법이 설계된다.

3. 비정렬된 배열 안테나에서의 MUSIC 알고리즘 기반 재머 도래각 추정 기법

본 논문의 도래각 추정 기법의 기반이 되는 MUSIC 알고리즘은 수신 신호의 공분산 행렬에 대한 고유값 분해를 통해 신호 부분 공간과 잡음 부분 공간을 분리하고, 두 부분 공간에 상응하는 고유벡터들 간의 직교성을 활용하여 입사 신호의 도래각을 추정한다. 먼저, 수신 신호 공분산 행렬은 Eq. (10)과 같다.

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{u}[k]\mathbf{u}^H[k]\} \quad (10)$$

행렬 $\mathbf{R}$ 의 내림차순으로 정렬된 고유값들을 $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \cdots \geq \rho_N$ 라고 하고, ρ_n 에 대응되는 고유 벡터를 $\mathbf{v}_n$ 라 하면, $\mathbf{R}$ 은 고유값 분해를 통해 Eq. (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}\mathbf{R} &= \mathbf{Q}\mathbf{\Lambda}\mathbf{Q}^H \\ \mathbf{Q} &= [\mathbf{Q}_J \quad \mathbf{Q}_\vartheta] \\ \mathbf{Q}_J &= [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{v}_M], \quad \mathbf{Q}_\vartheta = [\mathbf{v}_{M+1} \quad \mathbf{v}_{M+2} \quad \cdots \quad \mathbf{v}_N] \\ \mathbf{\Lambda} &= \begin{bmatrix} \rho_1 & & & 0 \\ & \rho_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \rho_N\end{bmatrix}\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 $\mathbf{Q}$ 는 $\mathbf{R}$ 의 고유벡터를 열 벡터로 갖는 행렬이다. 간단한 분석을 위해 모든 재밍 신호 및 잡음이 서로 독립이고 모든 잡음은 평균이 0이고 분산이 동일한 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN, Additive White Gaussian Noise)이라고 가정한다.

총 M 개의 재밍 신호가 입사하는 경우 $\mathbf{R}$ 의 고유값 및 고유 벡터 중 $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \cdots \geq \rho_M$ 및 $\{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \cdots, \mathbf{v}_M\}$ 은 M 개의 재밍 신호와 대응되며 나머지 고유값 및 고유벡터는 잡음에 대응된다. 행렬 $\mathbf{R} = \mathbf{R}^H$ 이므로 고유값 분해 시 모든 고유값이 양의 실수이고, 모든 고유벡터들이 서로 직교하는 성질을 가지므로, $\mathbf{Q}_J$ 의 열 공간

(column space)은 $\mathbf{Q}_\vartheta$ 의 열 공간과 서로 직교한다. 또한, Farhang-Boroujeny (1998)에서 보인 바와 같이, 입사 신호들에 대한 조향 벡터들의 집합은 $\mathbf{Q}_J$ 의 열 공간과 동일한 공간을 생성(span)하므로, Eq. (12)와 같이 직교성을 도출할 수 있다 (Park & Seo 2018).

$$\mathbf{A}^H \mathbf{Q}_\vartheta = \mathbf{0} \quad (12)$$

위 성질을 활용하여, 본 논문에서 고려하는 비정렬된 배열 안테나에서의 m 번째 재머의 도래각 추정을 위한 공간 스펙트럼 함수는 Eq. (13)과 같다 (Park & Seo 2018).

$$f_m(\theta) = \frac{1}{\mathbf{c}_m^H(\theta) \mathbf{Q}_\vartheta \mathbf{Q}_\vartheta^H \mathbf{c}_m(\theta)} \quad \mathbf{Q}_\vartheta = [\mathbf{v}_{M+1} \quad \mathbf{v}_{M+2} \quad \cdots \quad \mathbf{v}_N] \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{c}_m(\theta)$ ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)는 m 번째 재밍 신호의 도래각 추정을 위한 scanning 벡터로서 Eq. (14)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{c}_m(\theta) = [\tilde{F}_{1,m}(\theta) \exp[j\Delta\omega_{1,m}(\theta)] \quad \cdots \quad \tilde{F}_{N,m}(\theta) \exp[j\Delta\omega_{N,m}(\theta)]]^T \quad (14)$$

여기서 $\Delta\omega_{n,m}(\theta)$ 는 m 번째 재밍 신호가 입사각 θ 로 입사한다고 가정했을 때의 원점에 대한 위상을 나타내며, $\tilde{F}_{n,m}(\theta)$ 는 Eq. (15)와 같다.

$$\tilde{F}_{n,m}(\theta) = \sin \gamma_m \exp[j\eta_m] \sin(\theta - (\delta_n + \Delta\delta_n)) \quad (15)$$

여기서 $\Delta\delta_n$ 은 실제 δ_n 에 대한 측정 오차를 의미한다. Eq. (14)에서 $\theta \cong \theta_m$ 이면 $\mathbf{c}_m(\theta) \cong \mathbf{a}_m$ 이므로, Eqs. (12-13)에 의하여 $f_m(\theta)$ 은 매우 큰 값을 갖게 된다. 따라서, m 번째 재머의 도래각은 $f_m(\theta)$ 의 최대값에 해당하는 θ 값으로서 Eq. (16)과 같이 추정된다 (Schmidt 1981).

$$\tilde{\theta}_m = \arg \max_{\theta} f_m(\theta) \quad (16)$$

한편, Eqs. (14-15)에서 보인 바와 같이 도래각 추정을 위한 공간 스펙트럼 함수는 scanning 벡터 설계 시 사용되는 안테나 소자 정렬 각도의 측정 정확도에 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는, 안테나 소자 정렬 각도의 측정 정확도에 따른 도래각 추정 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

4. 시뮬레이션을 통한 성능 분석

평면 상에 배치된 배열 안테나는 일반적으로 모든 안테나 소자가 동일한 방향으로 정렬되어 있다. 그러나 평면이 아닌 곡면 상에 배열 안테나를 배치할 경우, Fig. 2와 같이 각 안테나 소자가 각기 다른 방향으로 정렬될 수 있다. 기존 MUSIC 관련 연구들과 유사한 시나리오에서의 성능 분석을 위하여 (Farrier et al. 1988, Swindlehurst & Kailath 1992, Friedlander & Weiss 1994, Ren & Willis 1997), 10개의 안테나 소자로 구성된 배열 안테나를 가정하였고 GPS 신호와 편파가 동일한 3개의 우회전 원편파 재머가 서

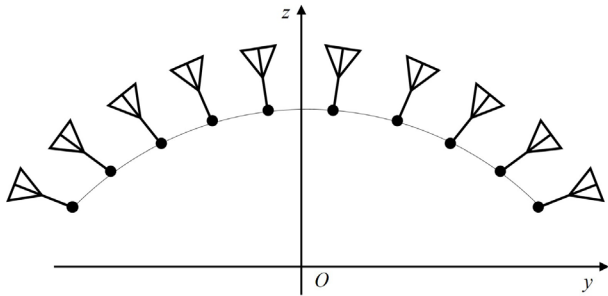


Fig. 2. 10-element misaligned antenna array for the simulation.

로 다른 임의의 주파수를 가지고 입사하는 시나리오를 상정하였으며 안테나 소자의 정렬각도 측정 오차 $\Delta\delta_n$ 의 영향을 보다 명료하게 보이기 위하여 두 재머는 의도적으로 인접한 도래각으로 입사하도록 설정하였다. Fig. 2의 배열 안테나 각 소자의 y, z 좌표 및 z 축에 대한 n 번째 안테나 소자의 정렬 각도 δ_n 은 Table 1과 같고, 각 재밍 신호의 parameter들은 Table 2와 같다.

성능 분석을 위하여 재밍 신호의 재머 대 잡음 비(JNR: Jammer to Noise Ratio)를 5 dB부터 30 dB까지 5 dB 단위로 증가시키며 시뮬레이션을 수행하였으며, 각 재머 대 잡음 비에 대하여 안테나 소자의 정렬각도 측정 오차 $\Delta\delta_n$ 을 평균이 0° 이고 표준편차가 σ 로 동일한 가우시안 랜덤 변수로 가정하고 표준편차 σ 를 0° 부터 2° 까지 0.2° 단위로 증가시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 표준편차가 0° 인 경우는 측정 오차가 없는 이상적인 경우를 의미한다. 각 재머 대 잡음 비 및 표준편차 마다 매 20회의 시뮬레이션을 반복 수행하였고, 각 경우에서의 실제 재밍 신호의 도래각 및 Eq. (16)에 의해 추정된 도래각 간 평균 제곱근 오차(RMSE: Root Mean Square Error)를 성능 분석 결과로서 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3ab를 통해 비교적 낮은 0 dB 및 5 dB의 재머 대 잡음 비에 대하여 안테나 정렬 각도의 측정 오차가 없는 경우에도 5° 이상의 도래각 추정 오차가 존재함을 확인 할 수 있다. 이는 본 시뮬레이션에서 의도적으로 두 재밍 신호가 인접한 도래각으로 입사하는 시나리오를 상정했기 때문이며, 낮은 신호 세기에서의 공간 스펙트럼 함수는 인접한 도래각의 두 재밍 신호의 도래각에 대한 구별된 두 개의 peak이 아닌 두 도래각 사이의 방향에 대하여 한 개의 peak을 형성하게 되기 때문이다.

반면, Fig. 3cd를 통해 10 dB 이상의 비교적 높은 재머 대 잡음 비에서는 σ 가 0° 인 경우 오차 없이 모든 재머의 도래각을 정상적으로 추정하였음을 확인할 수 있으며, Fig. 3ef를 통해 재머 대 잡음 비가 증가할수록 보다 높은 σ 에서도 도래각을 정확하게 추정함을 확인할 수 있다. 그러나 그 이상의 σ 에 대해서는 σ 가 증가할수록 도래각 추정 성능이 감소하여 각 재머 대 잡음 비마다 최대 6° 이상의 RMSE 값을 보이는 것을 확인할 수 있는데, 이는 0 ~ 30 dB의 재머 대 잡음 비에서 일반적으로 1° 미만의 RMSE 값을 보이는 기존의 MUSIC 알고리즘 관련 연구 결과에 비해 상당히 큰 값이다 (Li et al. 1993). 이 결과를 토대로 비정렬된 배열 안테나에서의 도래각 추정 시 MUSIC 알고리즘의 scanning 벡터에 반영되는 안테나 정렬 각도 정보의 정확도가 민감하게 영향을 끼치는 것으로 볼 수 있다.

Table 1. Positions and orientations of the 10 antenna elements used for the simulation.

Antenna	y	z	($^\circ$)
1	-0.3854	0.3854	-45
2	-0.3126	0.4464	-35
3	-0.2303	0.4939	-25
4	-0.1411	0.5264	-15
5	-0.0475	0.5429	-5
6	0.0475	0.5429	5
7	0.1411	0.5264	15
8	0.2303	0.4939	25
9	0.3126	0.4464	35
10	0.3854	0.3854	45

Table 2. Parameters of injected three jammers.

	DOA ($^\circ$)	Polarization (γ, η) ($^\circ$)	Intermediate frequency (MHz)
Jammer 1	-35	(45, -90)	-1.11
Jammer 2	40	(45, -90)	2.05
Jammer 3	50	(45, -90)	0.57

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 비정렬된 배열 안테나를 위한 MUSIC 알고리즘 기반의 재머 도래각 추정 기법의 성능을 분석하였다. 이를 위하여 기존에 제안된 재머 도래각 추정 기법에 사용되는 scanning 벡터 설계 시 설계 시 각 안테나 소자의 실제 정렬 각도에 대한 측정 오차를 반영하였다. 비정렬된 배열 안테나에서의 재머 도래각 추정 성능에 대한 안테나 정렬 각도 측정 오차의 영향을 정량적으로 분석하기 위하여, 10개의 안테나 소자가 각기 다른 방향으로 정렬된 배열 안테나에 3개의 재밍 신호가 입사하는 시나리오를 상정하고 재머 대 잡음 비를 증가시키면서 실제 안테나 정렬 각도 및 정렬 각도 측정치 간 오차에 따른 도래각 추정 성능 추이를 관찰하였다. 시뮬레이션 결과 전반적으로 안테나 정렬 각도 측정 오차가 증가함에 따라 도래각 추정 성능이 빠르게 감소하였으며 이를 토대로 비정렬된 배열 안테나에서의 도래각 추정 성능이 안테나 정렬 각도의 정확도에 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

현대 사회의 각 분야에서 하드웨어 플랫폼의 무인화 및 소형화가 이루어지고 있으며, 이러한 추세에 따라 소형 플랫폼에서의 도래각 추정을 위한 배열 안테나 배치 시 필연적으로 각 안테나 소자는 모두 동일한 방향으로 정렬되기 어려우므로 본 연구는 기존 MUSIC 관련 연구에 비해 보다 실제적인 운용 환경을 상정하였다고 볼 수 있다. 이와 더불어 본 연구 결과는 실제 하드웨어 플랫폼에 적용 시 각 안테나에 대하여 매우 정밀한 정렬 각도 측정이 요구되는 것을 의미하므로 후 일정 범위 내의 안테나 정렬 각도 측정 오차에도 충분한 도래각 추정 성능의 달성을 위하여, 강인성(robustness) 확보를 위한 응용 연구가 요구된다.

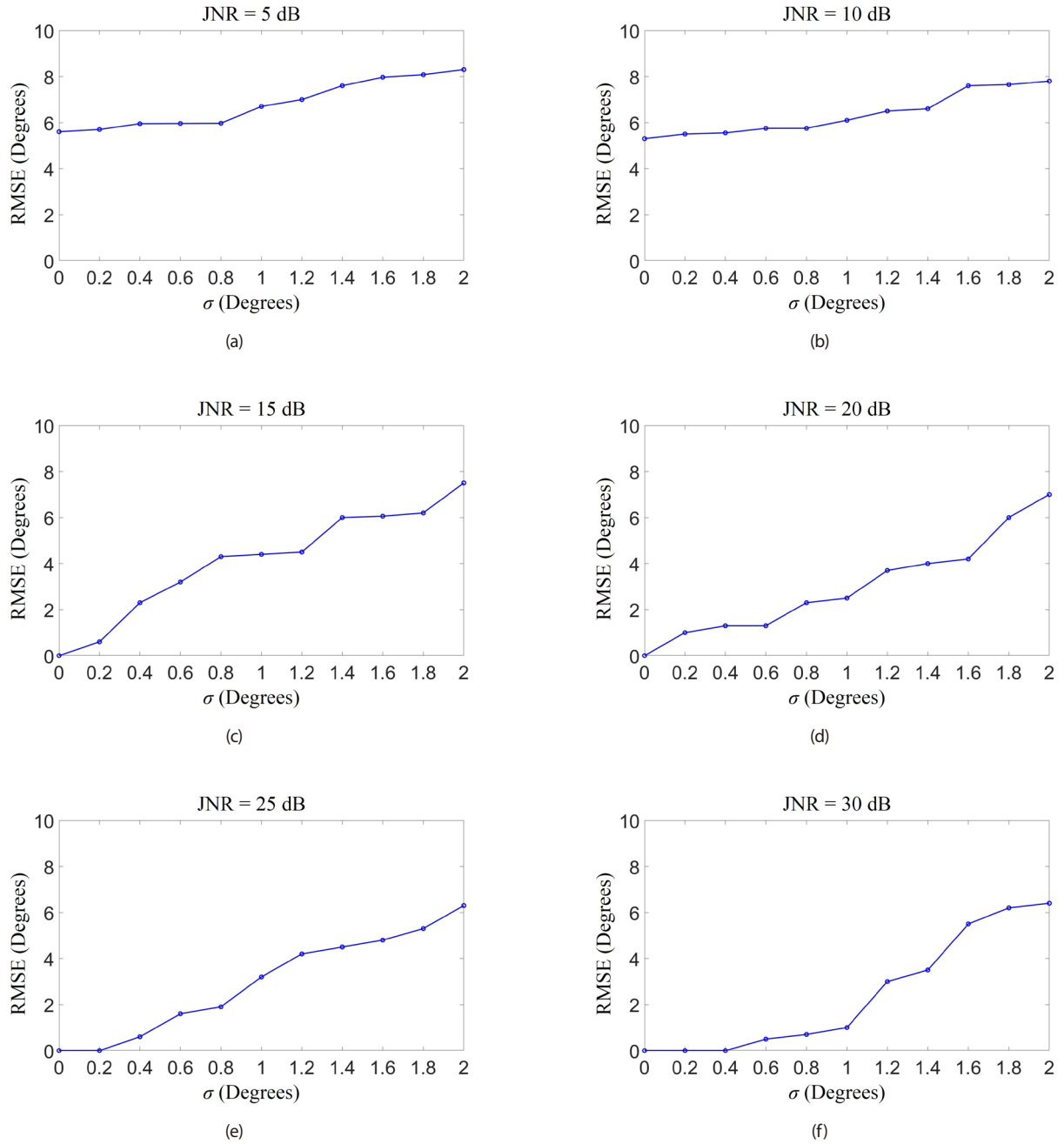


Fig. 3. The RMSE versus σ for the given jamming scenario. (a) JNR = 5 dB; (b) JNR = 10 dB; (c) JNR = 15 dB; (d) JNR = 20 dB; (e) JNR = 25 dB; (f) JNR = 30 dB.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2019-2017-0-01015).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K. Park and J. Seo; methodology, K. Park and J. Seo; software, K. Park; validation, K. Park; formal analysis, K. Park; investigation, K. Park; writing—original draft preparation, K. Park; writing—review and editing, J. Seo.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Amin, M. G., Wang, X., Zhang, Y. D., Ahmad, F., & Aboutanios, E. 2016, Sparse Arrays and Sampling for Interference Mitigation and DOA Estimation in GNSS, *Proceedings of the IEEE*, 104, 1302-1317. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2531582>
- Blanch, J., Walter, T., & Enge, P. 2012, Satellite navigation for aviation in 2025, *Proceedings of the IEEE*, 100, 1821-1830. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2190154>
- Cox, D. C. 1983, Antenna Diversity Performance in Mitigating the Effects of Portable Radiotelephone Orientation and Multipath Propagation, *IEEE Transactions on Communications*, 31, 620-628. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1983.1095860>
- Farhang-Boroujeny, B. 1998, *Adaptive Filters: Theory and Applications* (New York: John Wiley & Sons)
- Farrier, D. R., Jeffries, D. J., & Mardani, R. 1988, Theoretical performance prediction of the MUSIC algorithm, *IEEE Proceedings F (Communications, Radar and Signal Processing)*, 135, 216-224. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1:19880029>
- Friedlander, B. 1990, A sensitivity analysis of the MUSIC algorithm, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 38, 1740-1751. <https://doi.org/10.1109/29.60105>
- Friedlander, B. & Weiss, A. J. 1994, Effects of Model Errors on Waveform Estimation Using the MUSIC Algorithm, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42, 147-155. <https://doi.org/10.1109/78.258129>
- Gao, F. & Gershman, A. B. 2005, A generalized ESPRIT approach to direction-of-arrival estimation, *IEEE Signal Processing Letters*, 12, 254-257. <https://doi.org/10.1109/LSP.2004.842276>
- Goossens, R. & Rogier, H. 2008, Direction-of-arrival and polarization estimation with uniform circular arrays in the presence of mutual coupling, *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 62, 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2007.03.018>
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. J. 2006, *Understanding GPS: Principles and Applications*, 2nd ed. (Boston: Artech House Inc.)
- Kildal, P.-S. 1999, Equivalent circuits of receive antennas in signal processing arrays, *Microwave and Optical Technology Letters*, 21, 244-246. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2760\(19990520\)21:4<244::AID-MOP3>3.3.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2760(19990520)21:4<244::AID-MOP3>3.3.CO;2-J)
- Kim, E. & Seo, J. 2017, SFOL pulse: a high accuracy DME pulse for alternative aircraft position and navigation, *Sensors*, 17, Article number: 2183. <https://doi.org/10.3390/s17102183>
- Kundu, D. 1996, Modified MUSIC algorithm for estimating DOA of signals, *Signal Processing*, 48, 85-90. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(95\)00126-3](https://doi.org/10.1016/0165-1684(95)00126-3)
- Le Bihan, N., Miron, S., & Mars, J. I. 2007, MUSIC Algorithm for Vector-Sensors Array Using Biquaternions, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55, 4523-4533. <https://doi.org/10.1109/TSP.2007.896067>
- Lee, J., Pullen, S., & Enge, P. 2009, Sigma Overbounding using a Position Domain Method for the Local Area Augmentation of GPS, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45, 1262-1274. <https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5310297>
- Li, F., Liu, H., & Vaccaro, R. J. 1993, Performance analysis for DOA estimation algorithms: unification, simplification, and observations, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 29, 1170-1184. <https://doi.org/10.1109/7.259520>
- Lim, C., Yoon, H., Cho, A., Yoo, C.-S., & Park, B. 2019, Dynamic Performance Evaluation of Various GNSS Receivers and Positioning Modes with Only One Flight Test, *Electronics*, 8, Article number: 1518. <https://doi.org/10.3390/electronics8121518>
- McCloud, M. L. & Scharf, L. L. 2002, A new subspace identification algorithm for high-resolution DOA estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50, 1382-1390. <https://doi.org/10.1109/TAP.2002.805244>
- Odendaal, J. W., Barnard, E., & Pistorius, C. W. I. 1994, Two-dimensional superresolution radar imaging using the MUSIC algorithm, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 42, 1386-1391. <https://doi.org/10.1109/8.320744>
- Park, B., Lim, C., Yun, Y., Kim, E., & Kee, C. 2017, Optimal Divergence-Free Hatch Filter for GNSS Single-Frequency Measurement, *Sensors*, 17, Article number: 448. <https://doi.org/10.3390/s17030448>
- Park, K., Lee, D., & Seo, J. 2018, Dual-Polarized GPS Antenna Array Algorithm to Adaptively Mitigate a Large Number of Interference Signals, *Aerospace Science and Technology*, 78, 387-396. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.04.029>
- Park, K. & Seo, J. 2018, A Signal Processing Method using the MUSIC Algorithm to Estimate AOAs of Jammers for a

Misaligned Antenna Array, in 2018 IPNT Conference, Jeju, South Korea, 7-9 Nov 2018

- Park, S. G. & Son, P. W. 2019, Design for Back-up of Ship's Navigation System using UAV in Radio Frequency Interference Environment, *The Journal of Advanced Navigation Technology*, 23, 289-295. <https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.4.289>
- Porat, B. & Friedlander, B. 1988, Analysis of the asymptotic relative efficiency of the MUSIC algorithm, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 36, 532-544. <https://doi.org/10.1109/29.1557>
- Ren, Q. S. & Willis, A. J. 1997, Fast root MUSIC algorithm, *Electronics Letters*, 33, 450-451. <https://doi.org/10.1049/el:19970272>
- Rhee, J. H. & Seo, J. 2013, eLoran Signal Strength and Atmospheric Noise Simulation over Korea, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 2, 101-108. <https://doi.org/10.11003/JKGS.2013.2.2.101>
- Rhee, J. H. & Seo, J. 2019, Low-Cost Curb Detection and Localization System Using Multiple Ultrasonic Sensors, *Sensors*, 19, Article number: 1389
- Schmidt, R. 1981, A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation, PhD Dissertation, Stanford University.
- Seo, J., Chen, Y.-H., De Lorenzo, D. S., Lo, S., Enge, P., et al. 2011, A Real-Time Capable Software-Defined Receiver Using GPU for Adaptive Anti-Jam GPS Sensors, *Sensors*, 11, 8966-8991. <https://doi.org/10.3390/s110908966>
- Seo, J. & Walter, T. 2014, Future Dual-Frequency GPS Navigation System for Intelligent Air Transportation Under Strong Ionospheric Scintillation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15, 2224-2236. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2311590>
- Son, P. W., Rhee, J. H., Hwang, J., & Seo, J. 2019, Universal Kriging for Loran ASF Map Generation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 55, 1828-1842. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876587>
- Son, P. W., Rhee, J. H., & Seo, J. 2018, Novel Multichain-Based Loran Positioning Algorithm for Resilient Navigation, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54, 666-679. <https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2762438>
- Song, J., Park, B., & Kee, C. 2016, Comparative Analysis of Height-Related Multiple Correction Interpolation Methods with Constraints for Network RTK in Mountainous Areas, *Journal of Navigation*, 69, 991-1010. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000011>
- Stutzman, W. L. 1992, *Polarization in Electromagnetic Systems* (Norwood: Artech House)
- Swindlehurst, A. L. & Kailath, T. 1992, A Performance Analysis of Subspace-Based Methods in the Presence of Model Errors, Part I: The MUSIC Algorithm, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 40, 1758-1774. <https://doi.org/10.1109/78.143447>
- Wang, N., Agathoklis, P., & Antoniou, A. 2006, A new DOA estimation technique based on subarray beamforming, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54, 3279-3290. <https://doi.org/10.1109/TSP.2006.877653>
- Wang, X., Amin, M., Ahmad, F., & Aboutanios, E. 2017, Interference DOA estimation and suppression for GNSS receivers using fully augmentable arrays, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 11, 474-480. <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0296>
- Yin, J. & Chen, T. 2011, Direction-of-Arrival Estimation Using a Sparse Representation of Array Covariance Vectors, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59, 4489-4493. <https://doi.org/10.1109/TSP.2011.2158425>



Kwansik Park is a Ph.D. candidate with the School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon, Korea. He received his B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University in 2012. His current research mainly focuses on GPS anti-interference technologies.



Jiwon Seo received the B.S. degree in mechanical engineering (division of aerospace engineering) from Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea, and the M.S. degrees in aeronautics/astronautics and electrical engineering and the Ph.D. degree in aeronautics/astronautics from Stanford University, Stanford, CA, USA. He is currently an Associate Professor with the School of Integrated Technology, Yonsei University, Incheon, Korea. His research interests include GPS anti-jamming technologies; alternative positioning, navigation, and timing technologies including eLoran; and intelligent unmanned systems.

