

부공간 기반 도래각 추정을 위한 높은 강건성을 지닌 상관행렬 생성 기법

Correlation Matrix Generation Technique with High Robustness for Subspace-based DoA Estimation

변부근

한화시스템 레이더연구소

BuKeun Byeon

Radar Research and Development Center, Hanhwa Systems, 491-23, Gyeonggidong-Ro, Chang-Li, Namsa-Myun, Cheoin-Gu, Yongin-City, Gyeonggi-do, 17121, Korea

[요 약]

본 논문에서는 선형 배열 균일 안테나에 입사하는 신호들의 상관행렬을 강건하게 생성하여 부공간 기반 기법의 도래각 추정 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 기존의 부공간 기반 도래각 추정 기법은 상관행렬을 구한 후 신호 부공간과 잡음 부공간으로 분리하여 도래각을 추정한다. 그러나, 낮은 SNR, 작은 개수의 스냅샷에서 구해지는 상관행렬의 성분은 안테나의 잡음 성분으로 인하여 신호 부공간을 부정확하게 추정하여 도래각 추정 성능을 저하시킨다. 따라서, 기존의 상관행렬로부터 구해지는 가상의 신호 벡터를 슬라이딩 방식으로 배열함으로써 강건한 상관행렬을 생성한다. 기존의 상관행렬과 제안하는 강건한 상관행렬의 비교 분석을 위하여, 부공간 기반 기법의 대표적 방법인 MUSIC, ESPRIT을 이용하였다. 시뮬레이션 결과, 계산 복잡도는 기존의 상관행렬 대비 2.5% 이내 증가하였으나, 도래각 추정 성능은 RMSE 1° 기준 SNR이 MUSIC, ESPRIT 모두 3dB 이상의 우수한 도래각 추정 성능을 보였다.

[Abstract]

In this paper, we propose an algorithm to improve DoA(direction of arrival) estimation performance of the subspace-based method by generating high robustness correlation matrix of the signals incident on the uniformly linear array antenna. The existing subspace-based DoA estimation method estimates the DoA by obtaining a correlation matrix and dividing it into a signal subspace and a noise subspace. However, the component of the correlation matrix obtained from the low SNR and small number of snapshots inaccurately estimates the signal subspace due to the noise component of the antenna, thereby degrading the DoA estimation performance. Therefore a robust correlation matrix is generated by arranging virtual signal vectors obtained from the existing correlation matrix in a sliding manner. As a result of simulation using MUSIC and ESPRIT, which are representative subspace-based methods, the computational complexity increased by less than 2.5% compared to the existing correlation matrix, but both MUSIC and ESPRIT based on RMSE 1° showed superior DoA estimation performance with an SNR of 3dB or more.

Key word : Correlation matrix, Direction of arrival, Subspace-based algorithm, Multiple signal classification.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.3.166>



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 20 May 2022; Revised 7 June 2022

Accepted (Publication) 21 June 2022 (30 June 2022)

*Corresponding Author; BuKeun Byeon

Tel: +82-31-8020-7436

E-mail: paflow@hanwha.com

I. 서 론

선형 균일 안테나 배열에 입사하는 신호의 도래각 추정 기법은 레이더, 무선 통신, 수중 음파 탐지, 스마트 안테나 등 다양한 분야에 적용이 되는 기법으로 지난 수 십년간 빔형성 기법과 부공간 기법을 중심으로 연구가 진행되어왔다. 이 중 부공간 기법은 빔형성 기법보다는 계산 복잡도가 높으나 높은 분해능을 지녔으며, MUSIC(multiple signal classification)[1], root-MUSIC [2], ESPRIT(estimation of signal parameter via rotational invariance technique)[3] 등 다양한 기법이 제안되어 왔다.

부공간 기법 중 대표적인 기법인 MUSIC은 도래각 추정 성능은 우수하나, 계산 복잡도가 높다는 단점을 지녔다[1]. MUSIC은 스냅샷 시간 만큼 얻어진 안테나에 입사한 신호 벡터들을 이용한 상관행렬 형성, 상관행렬의 신호부공간 및 잡음부공간 형성시 필요한 고유값 분해 수행, 그리고 신호부공간 및 잡음부공간을 이용한 극대값 또는 극소값 탐색으로 도래각 추정의 계산 복잡도가 크게 증가한다.

이러한 고계산량을 줄이는 방안으로 고유값 분해 없이 도래각 추정을 하는 OPM(orthogonal propagator method) 기법[4-6], 신호부공간을 직접 생성하는 기법[7,8] 등 다양한 연구가 진행되어져 왔다. 특히, ESPRIT 은 신호 부공간을 두 개의 신호 부공간으로 나누어 구성함으로써 각각의 신호 부공간간의 상관관계를 이용하여 극대값 또는 극소값 탐색없이 도래각을 추정함으로써 계산량을 개선시켰다. 그러나, MUSIC과 동일하게 작은 개수의 스냅샷 혹은 낮은 SNR(signal to noise ratio)에서는 도래각 추정 능력이 크게 저하되는 문제를 지니고 있다.

본 논문에서는 기존의 상관행렬로부터 구해지는 가상의 신호벡터를 슬라이딩 방식으로 배열하여 강건한 상관행렬을 생성하는 알고리즘을 제안한다. 이러한 강건한 상관행렬 생성 기법은 기존 상관행렬 대비 복잡도 증가율이 매우 낮으며, 작은 개수의 스냅샷과 낮은 SNR에서 도래각 추정 성능이 우수하다. 또한, 부공간 기반 도래각 추정 기법에서의 상관행렬은 도래각 추정시 첫 단계에서 사용하는 행렬이기 때문에 대다수의 부공간 기반의 도래각 추정 기법에 적용이 가능하다. 본 논문에서는 부공간 기반 기법 중 대표적인 MUSIC과 ESPRIT을 활용하여 제안하는 강건한 상관행렬이 기존의 상관행렬보다 우수함을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 고분해능 상관행렬을 생성하고자 기반이 되는 시스템 모델을 설명한다. 그리고 III장에서 제안한 방법을 수식을 이용하여 이론적으로 설명한다. IV장에서는 제안한 상관행렬의 성능을 분석하기 위하여 MUSIC, ESPRIT을 이용하여 시뮬레이션 결과를 기존의 상관행렬과 비교 분석하여 성능을 평가한다. V 절에서는 본 논문에서 제안한 방법의 최종적인 결론을 도출한다.

본 논문에서 사용하는 표기법은, 밑줄(_)과 대문자를 이용하여 각각 열벡터와 행렬을 표기한다. 특히, O_N 과 I_N 은 각각 $N \times N$ 영 행렬, $N \times N$ 단위 행렬을 의미한다. 그리고 $(\cdot)^T, (\cdot)^H$

는 각각 행렬을 전치행렬과 수반행렬, 즉, 전치 후 복소켤레를 취한 행렬을 의미한다. 또한 $(\cdot)^{-1}$ 은 행렬의 역행렬, δ_{ts} 는 디랙 델타 함수를 의미한다.

II. 시스템 모델

이 절에서는 도래각 추정시 높은 강건성을 지닌 상관행렬 생성 기법을 설명하기 위하여 시스템 모델을 소개한다. Far-Filed를 만족하는 K개의 협대역 신호 $s_1(t), \dots, s_K(t)$ 가 λ 의 파장을 지니고 $\theta_1, \dots, \theta_K$ 의 각도로 N개의 선형 균일 안테나 배열에 입사한다고 하자. 안테나 배열 각 소자는 d 만큼 떨어져 있으며, d 는 신호파장 λ 의 절반 $\lambda/2$ 라 가정하자. 각각의 안테나에서 관측되는 신호를 $x_1(t), \dots, x_N(t)$ 라 표기하고, 각 안테나에 존재하는 잡음을 $n_1(t), \dots, n_N(t)$ 라 표기한다.

$$\underline{x}(t) = A(\theta_1, \dots, \theta_K)\underline{s}(t) + \underline{n}(t) \quad (1)$$

여기서, $\underline{s}(t)$ 는 K개의 신호원 $s_1(t), \dots, s_K(t)$ 으로 구성된 $K \times 1$ 크기의 신호원 열벡터이고, $A(\theta_1, \dots, \theta_K)$ 는 (n, k) 성분이 $e^{(n-1)v_k}$, $v_k = -2\pi \cos(\theta_k)d/\lambda$ 를 나타내는 $N \times K$ 크기의 조향행렬로, n 번째 안테나 소자에 k 번째 신호원이 입사하는 각도를 나타낸다. $\underline{n}(t)$ 는 배열 안테나 각각의 소자 잡음 $n_1(t), \dots, n_N(t)$ 로 구성된 $N \times 1$ 크기의 AWGN(additive white gaussian noise) 열벡터이며, $\underline{x}(t)$ 는 N개의 배열 안테나에 입사하는 $N \times 1$ 크기의 열벡터이다.

신호원 열벡터 $\underline{s}(t)$ 와 잡음 신호원 열벡터 $\underline{n}(t)$ 는 다음의 수식을 만족하는 독립적인 복소수 랜덤프로세스라 하자.

$$E[\underline{s}(t)\underline{s}(s)^H] = P\delta_{ts} \quad (2)$$

$$E[\underline{s}(t)\underline{s}(s)^T] = O_{K \times K} \quad (3)$$

$$E[\underline{n}(t)\underline{n}(s)^H] = N_0\delta_{ts}I_N \quad (4)$$

$$E[\underline{n}(t)\underline{n}(s)^T] = O_{N \times N} \quad (5)$$

여기서 N_0 는 잡음 파워 스펙트럼 밀도이다. P는 $K \times K$ 크기의 대각행렬이며, 각각의 대각성분이 각 신호원의 파워 성분 p_1, \dots, p_K 로 구성되어 있다고 가정한다. 본 논문에서는 N_0 을 도래각 추정 전에 충분히 긴 시간 동안 관측으로 추정할 수 있는 값으로 가정한다.

III. 강건한 상관행렬 생성 기법

MUSIC, ESPRIT과 같은 부공간 기반의 도래각 추정 기법은 크게 3단계의 과정으로 나누어진다. 첫 번째 과정은 안테나에 입사하는 신호들의 상관행렬을 구하는 과정이며, 두 번째 과정

은 이를 신호 부공간과 잡음 부공간으로 분리하는 과정이며, 세 번째 과정은 신호 부공간에 속하는 도래각을 찾는 과정이다. 본 논문에서 제안하는 기법은 첫 번째 과정에 속하는 기존의 상관행렬로부터 구해지는 가상의 신호 벡터를 슬라이딩 방식으로 배열함으로써 보다 강건한 상관행렬을 생성한다.

일반적으로, 기존의 상관행렬 R_{xx} 은 관측시간에 해당하는 스냅샷 수 T 시간동안 안테나에 입사하는 신호 $\underline{x}(t)$ 를 이용하여 구한다.

$$R_{xx} = E[\underline{x}(t)\underline{x}(t)^H] = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \underline{x}(t)\underline{x}(t)^H \quad (6)$$

II 절의 시스템 모델 수식 (1)~(5)로 인하여 기존의 상관행렬 R_{xx} 은 아래와 같다.

$$R_{xx} = A(\theta_1, \dots, \theta_K) P A^H(\theta_1, \dots, \theta_K) + N_0 I_N \quad (7)$$

여기서, 기존의 상관행렬 R_{xx} 의 성분 중 잡음 파워 스펙트럼 밀도 N_0 는 II 절의 시스템 모델에서 가정한 것과 같이 도래각 추정을 하기 전 장시간 관측으로 추정이 가능하기 때문에 이를 제거함으로써 무잡음파워 상관행렬 \bar{R}_{xx} 을 구한다.

$$\bar{R}_{xx} = R_{xx} - N_0 I_N = A(\theta_1, \dots, \theta_K) P A^H(\theta_1, \dots, \theta_K) \quad (8)$$

\bar{R}_{xx} 의 성분을 이용하여 $(2N-1) \times 1$ 크기의 열벡터 \underline{r} 를 아래와 같이 정의한다.

$$\underline{r} = [r_{-N+1}, r_{-N+2}, \dots, r_0, \dots, r_{N-2}, r_{N-1}]^T \quad (9)$$

여기서, 각각의 성분 r_k 는 식 (10)에서와 같이 무잡음파워 상관행렬 \bar{R}_{xx} 의 대각성분의 평균을 이용하여 구한다.

$$r_k = \begin{cases} \frac{1}{N+k} \sum_{i=-k+1}^N \bar{R}_{xx}^{(i+k,i)}, & k = -N+1, \dots, -1 \\ \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N \bar{R}_{xx}^{(i,i-k)}, & k = 0, \dots, N-1 \end{cases} \quad (10)$$

수식 (8)~(10)에 의하여 \underline{r} 의 각각의 성분을 살펴보면, $r_{-N+1} = p_1 e^{j(1-N)v_1} + \dots + p_k e^{j(1-N)v_k}, \dots, r_0 = p_1 + \dots + p_k, \dots, r_{N-1} = p_1 e^{j(N-1)v_1} + \dots + p_k e^{j(N-1)v_k}$ 이다. 따라서, \underline{r} 는 수식 (11)과 같이 $(2N-1) \times 1$ 크기의 가상의 신호 열벡터의 특징을 지닌다.

$$\underline{r} = \bar{A}(\theta_1, \dots, \theta_K) \underline{p} \quad (11)$$

여기서, $\bar{A}(\theta_1, \dots, \theta_K)$ 는 (n, k) 성분이 $e^{j(n-N)v_k}, n = 1, \dots,$

$2N-1, k = 1, \dots, K$ 를 나타내는 $(2N-1) \times K$ 크기의 조향행렬이고, \underline{p} 는 각각의 신호 파워 성분 p_1, \dots, p_K 로 구성된 $K \times 1$ 크기의 열벡터이다.

다음으로 $(2N-1) \times 1$ 크기의 열벡터 \underline{r} 를 $N \times 1$ 크기의 열벡터, $\underline{l}_k = [r_{1-k}, \dots, r_{N-k}]^T, k = 1, \dots, N$ 들로 나눈 후 이를 순방향의 슬라이딩 방식으로 배열하여 강건한 상관행렬 \tilde{R} 을 생성한다.

$$\tilde{R} = [\underline{l}_1, \dots, \underline{l}_N] \quad (12)$$

여기서, \underline{l}_k 는 다음과 같음을 확인할 수 있다.

$$\underline{l}_k = A(\theta_1, \dots, \theta_K) P [e^{-j(k-1)v_1}, \dots, e^{-j(k-1)v_K}]^T \quad (13)$$

따라서, 수식 (12), (13)으로 인하여 수식 (14)를 만족한다.

$$\tilde{R} = [\underline{l}_1, \dots, \underline{l}_N] = A(\theta_1, \dots, \theta_K) P A^H(\theta_1, \dots, \theta_K) \quad (14)$$

결과적으로, 본 논문에서 제안하는 강건한 상관행렬 \tilde{R} 은 실제 환경 및 시뮬레이션 과정에서 존재하는 무잡음파워 상관행렬 \bar{R}_{xx} 의 각 성분들의 잡음을 \bar{R}_{xx} 의 대각성분들의 평균을 이용하여 감소시키며, 이를 가상의 신호 열벡터 \underline{r} 를 이용하여 슬라이딩 방식으로 생성한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 잡음에 강건한 상관행렬을 비교 및 분석하기 위하여 부공간 기법 중 대표적 기법인 MUSIC, ESPRIT을 이용한다. 선형 배열 균일 안테나의 개수 N 은 20개이며, 신호원 개수 K 는 3개로, 5도 간격으로 입사하는 $(80^\circ, 85^\circ, 90^\circ)$ 의 신호원을 고려한다. 여기서 작은 개수의 스냅샷 수에서도 동작함을 보이기 위하여 스냅샷 수 T 는 10개, 100개를 고려하였다. 이 때, 시뮬레이션 횟수는 10^6 번을 수행하였으며, 안테나 사이의 간격은 반파장이라 가정하였다.

4-1 계산 복잡도

제안하는 방법은 강건한 상관행렬을 생성하기 위하여 기존의 상관행렬을 재구성하는 기법으로 계산량이 증가한다. 상관행렬을 구하는 과정에서 보다 정확하게 계산량의 차이를 보이기 위하여 실수의 덧셈과 곱셈의 연산횟수 단위를 rflops (real floating operations)라 표현하기로 하자.

기존 상관행렬을 생성하기 위한 계산량은 식 (6)에서와 같이 안테나 개수 N , 스냅샷의 개수 T 일 때, $8N^2 T$ rflops이다. 본 논문에서 제안하는 강건한 상관행렬은 기존의 상관행렬의 성

표 1. 시뮬레이션 조건과 계산 복잡도 증가율

Table 1. Simulation conditions and computational complexity increase rate

	#1 Simulation	#2 Simulation
K (number of signal sources)	3 (80°, 85°, 90°)	3 (80°, 85°, 90°)
N (number of antennas)	20	20
T (number of snapshots)	10	100
Complexity increase ratio	2.5 %	0.25 %

분을 이용하여 식 (10), (12)와 같이 구하므로, 기존 상관행렬의 계산량 대비 $2N^2$ rflops 가 증가한다. 따라서, 기존의 상관행렬 형성에서 필요한 계산량 대비 강건한 상관행렬을 형성하기 위한 계산량의 증가율은 $1/(4T)$ 이 된다. 시뮬레이션에 따라 계산 복잡도의 증가율을 수치적으로 비교 분석하기 위하여 시뮬레이션 조건과 계산량 증가율을 표 1에 나타내었다. 표 1에서와 같이 $T = 10$ 일 때, 2.5%, $T=100$ 일 때, 0.25%의 낮은 증가율을 보임을 확인할 수 있다.

4-2 도래각 추정 성능

기존의 상관행렬과 제안하는 강건한 상관행렬 (HRCM; high robustness correlation matrix)의 도래각 추정 성능 비교 분석을 위하여 수식 (15)와 같은 RMSE(root mean square error)를 이용한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E[\hat{\theta}_k - \theta_k]^2} \tag{15}$$

여기서, $\hat{\theta}_k$ 는 k번째 도래각 추정값이며 θ_k 는 k번째 도래각 실제값이다.

그림 1, 그림 2, 각각의 그림에 스냅샷 10개, 스냅샷 100개일 경우 SNR에 따른 도래각 추정성능 RMSE를 보인다. 그림 1에서와 같이, 본 논문에서 제안한 강건성을 지니는 상관행렬을 사용한 경우 RMSE 1° 기준으로 기존 방법 대비 MUSIC은 7.8dB 낮은 SNR에서 추정 가능, ESPRIT은 약 4.5dB 낮은 SNR에서 도래각 추정이 가능함을 확인할 수 있다. 그러나, SNR이 약 3dB에서부터는 RMSE가 기존의 상관행렬을 이용한 알고리즘이 0.5°이하로 도래각을 추정함으로써 추정 정확도 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

그림 2에서와 같이 스냅샷 수가 100개 일 때 또한, 본 논문에서 제안한 강건성을 지니는 상관행렬, HRCM을 사용한 경우 RMSE 1° 기준으로 기존 방법 대비 MUSIC은 약 4.6dB 낮은 SNR에서 추정 가능, ESPRIT은 약 3.0dB 낮은 SNR에서 도래각 추정이 가능함을 확인할 수 있다. 하지만 이 또한 SNR이 약 1dB에서 부터는 기존의 상관행렬을 이용한 알고리즘이 RMSE 0.2°이하로 추정하여 제안한 알고리즘보다 좋은 도래

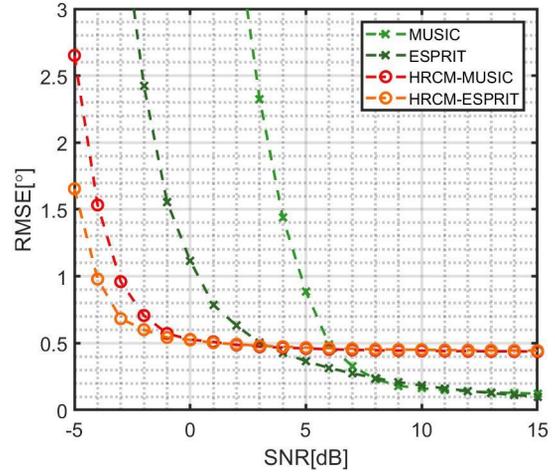


그림 1. SNR에 따른 RMSE (T=10)
Fig. 1. The curves of RMSE versus SNR (T=10)

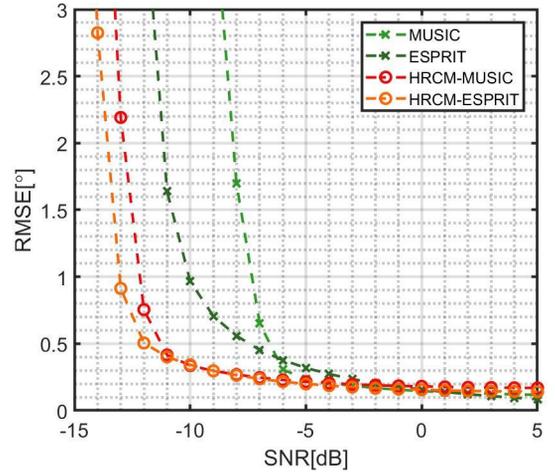


그림 2. SNR에 따른 RMSE (T=100)
Fig. 2. The curves of RMSE versus SNR (T=100)

각 추정 성능을 보인다.

보다 구체적으로, 제안한 알고리즘의 상관행렬을 분석하고 자 MUSIC에서 사용되는 비용함수 $f(\theta)$ 를 이용하여 기존의 상관행렬과 제안한 상관행렬을 비교 및 분석한다[1].

$$f(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(\theta) \tag{16}$$

여기서, $\mathbf{a}(\theta)$ 는 각각의 성분이 $e^{(n-1)v_k}$, $n = 1, \dots, N$ 으로 구성된 $N \times 1$ 열벡터이다. 그리고 \mathbf{V}_n 은 잡음 부공간으로, 상관행렬을 고유값 분해하여 고유값이 작은 $(N-K)$ 개의 고유벡터들로 구성된 $(N-K) \times N$ 크기의 행렬이다. 이와 같이 잡음 부공간은 신호부공간과 직교함을 이용하여, $f(\theta)$ 의 값이 극소값을 지닐때의 θ 값이 도래각임을 확인할 수 있다.

각각의 그림 3,4에 그림 1,2에 사용된 MUSIC, HRCM-MUSIC

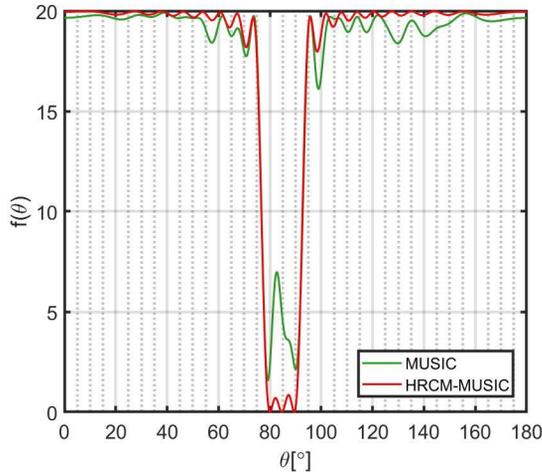


그림 3. 비용함수 $f(\theta)$ 비교 (T=10, SNR=0dB)
 Fig. 3. Comparison of cost function $f(\theta)$ (T=10, SNR=0dB)

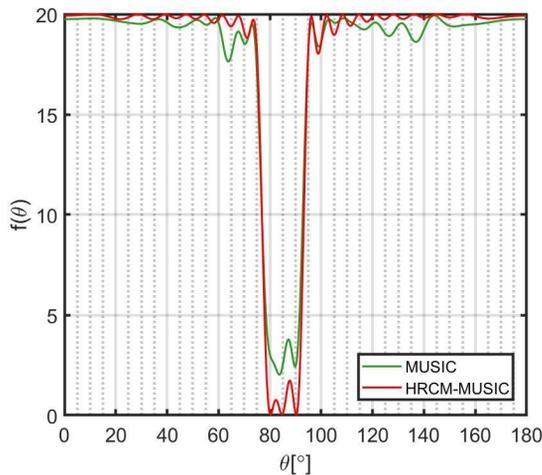


그림 4. 비용함수 $f(\theta)$ 비교 (T=100, SNR=-10dB)
 Fig. 4. Comparison of cost function $f(\theta)$ (T=100, SNR=-10dB)

IC을 비교한다. 그림 3,4는 그림 1,2에서 SNR이 0dB, -10dB일 때 총 시뮬레이션 횟수 10^6 번 중 특정 시점의 $f(\theta)$ 를 나타내었다. MUSIC 기법은 그림 3에서는 80°, 85°, 90° 중 85°를, 그림 4에서는 80°를 분해하지 못하여 도래각을 추정하지 못하는 경우가 발생한다. 하지만, HRCM-MUSIC은 그림 3,4에서와 같이 80°, 85°, 90°를 모두 분해하여 그림 1, 그림 2에서와 같이 RMSE가 각각 0.5°, 0.35°의 성능을 보임을 확인할 수 있다. 또한 HRCM-MUSIC의 $f(\theta)$ 가 MUSIC 보다 0에 보다 근접함을 통하여 잡음 부공간 V_n 을 보다 정확하게 생성하고 있음을 관찰할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 선형 배열 어레이에서 부공간 기반 기법으로 도래각 추정시 사용되는 상관행렬을 재생성함으로써 도래각 추정 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안하였다. 기존 부공간 기반의 도래각 추정 알고리즘은 낮은 SNR과 작은 개수의 스냅샷에서 도래각 추정 성능이 크게 저하된다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 상관행렬로부터 구해지는 가상의 신호벡터를 슬라이딩 방식으로 배열함으로써 강건한 상관행렬을 생성하는 알고리즘을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 강건한 상관행렬 생성 기법을 검증하고자 기존의 대표적 기법인 MUSIC과 ESPRIT을 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 기존의 상관행렬 생성에 비하여 제안하는 기법은 계산 복잡도가 2.5% 이내 증가하였으나, 스냅샷수가 10개일 때 RMSE 1° 기준 MUSIC은 SNR이 7.8dB 향상, ESPRIT은 SNR이 4.5dB 향상되었다. 또한 스냅샷수가 100개일 때, RMSE 1° 기준 MUSIC은 SNR이 4.6dB 향상, ESPRIT은 SNR이 3.0dB 향상되었다. 이 논문에서 제안한 기법은 원거리 표적의 위치 추정, 빠르게 처리해야 하는 고속의 표적 추적과 같은 상황에서 유용할 것으로 판단된다.

References

- [1] Schmidt, Ralph. "Multiple emitter location and signal parameter estimation." *IEEE transactions on antennas and propagation*, Vol. 34, No.3, pp.276-280, Mar. 1986.
- [2] Barabell, Arthur. "Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms." *ICASSP'83. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. Vol. 8, pp. 336-339, April. 1983.
- [3] Roy, Richard, and Thomas Kailath. "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques." *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, Vol.37, No.7, pp. 984-995, Jul. 1989.
- [4] Marcos, Sylvie, Alain Marsal, and Messaoud Benidir. "The propagator method for source bearing estimation." *Signal processing*, Vol. 42, No. 2 pp. 121-138, 1995.
- [5] B.G, Byun and D.S, Yoo. "Computationally Efficient Propagator Method for DoA with Coprime Array." *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 20, No. 3, pp. 258-264, Jun. 2016.
- [6] B.G. Byun and D.S. Yoo. "Improved Direction of Arrival Estimation Based on Coprime Array and Propagator Method by Noise Power Spectral Density Estimation" *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 20, No. 4, pp. 367-373,

Aug. 2016.

- [7] D.S. Yoo, "Subspace-based DOA estimation with sliding signal-vector construction for ULA." *Electronics Letters* Vol. 51, No. 17, pp. 1361-1363, Aug. 2015
- [8] B.K. Byeon, H.K. Lee, D.S. Yoo, "Direct Signal Space

Construction Luenberger Tracker with Quadratic Least Square Regression for Computationally Efficient DoA Tracking." *Mathematical Problems in Engineering*, Vol(2020), Jun, 2020.



변 부 근 (Bu-Keun Byeon)

2011년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2013년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학부 (공학석사)

2019년 9월 ~ 현재 : 한화시스템 레이더연구소 선임연구원

※관심분야 : 통신 및 신호처리, 레이더 신호처리