

다중 재머 환경에서 DOA 추정 성능 개선을 위한 Root-assisted MUSIC 알고리즘

Root-assisted MUSIC algorithm for the efficient DOA estimation in Multi-Jammer Environments

이주현*, 최현호*, 최윤섭*, 임덕원**, 박찬식***, 이상정*⁰

Ju Hyun Lee*, Heon Ho Choi*, Yun Sub Choi*, Deok Won Lim**, Chansik Park***
and Sang Jeong Lee*⁰

요 약

본 논문에서는 AOA (Angle of Arrival)기반의 재머위치 결정기법에 사용되는 DOA 추정 알고리즘을 대상으로 Root-MUSIC으로 1차 DOA 추정을 수행한 후 MUSIC을 이용한 2차 DOA 추정을 수행하는 성능 개선 알고리즘을 제시하였다. 또한 제안한 알고리즘을 검증하기 위해 소프트웨어 기반의 시뮬레이션 플랫폼을 구성하여 오차환경에 따른 DOA 추정 성능 분석을 수행하고, 본 논문에서 제시한 DOA 추정 알고리즘의 DOA 추정 정확도 및 분해능의 개선 정도를 분석하였다.

Abstract

This paper proposes a root-assisted MUSIC algorithm which uses a combination of the MUSIC and the root-MUSIC algorithm. This algorithm consists of two steps. Firstly, a coarse DOA is computed by the root-MUSIC algorithm. Secondly, a precise DOA estimation is carried out by the MUSIC algorithm in the reduced searching range. This paper analyzes the accuracy and the resolution performance of the proposed DOA estimation method using a software simulation platform.

Key words : MUSIC, Root-MUSIC, Multi-Jamming, DOA estimation

I. 서 론

최근 항공기와 선박의 항법 및 제어를 위해 GPS(Global Positioning system)가 필수적으로 요구되

고 있다. GPS는 낮은 신호 수신 전력을 가지므로 재밍신호에 취약하다. 이 때문에 GPS를 기반으로 하는 우리나라의 인프라를 마비시키기 위한 북한의 고의적인 재밍신호의 위협이 항상 존재하며, 실제로 북방

* 충남대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungnam National University)

** 한국항공우주연구원 위성항법팀(Satellite Navigation Department, Korea Aerospace Research Institute)

*** 충북대학교 제어로봇공학과(Department of Control, Robot Engineering, Chungbuk National University)

· 제1저자 (First Author) : 이주현(Ju Hyun Lee)

0 교신저자 (Corresponding Author) : 이상정(Sang Jeong Lee, tel: +82-042-821-6582, email : eesjl@cnu.ac.kr)

· 접수일자 : 2013년 6월 13일 · 심사(수정)일자 : 2013년 6월 15일 (수정일자 : 2013년 8월 20일) · 게재일자 : 2013년 8월 30일

<http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.4.386>

한계선(NLL) 인근의 선박과 일부 항공기에서 재밍 신호에 의한 GPS 신호교란이 보고되었다. 또한 최근 북한 400km 범위의 GPS 수신 방해 장비의 도입이 예상되면서 국내 전역에 재밍신호에 의한 위협이 고조되고 있다. 따라서 이러한 국가적 차원의 재밍 위협에 대응하기 위해 재머위치결정기법이 연구되고 있으며, 재머위치결정기법은 AOA(Angle of Arrival)혹은 TDOA(Time Difference of Arrival)기법을 사용하여 재머의 위치를 결정하고, 결정된 재머위치정보를 바탕으로 재밍신호원을 직접 타격하거나 수신측에서 널(Null)을 형성하는 방법으로 재밍의 영향을 제거할 수 있도록 한다. 이 중 AOA기반의 항재밍 기법 운용에는 높은 정확도를 가지는 DOA 추정 과정이 필수적이며, 대표적인 DOA(Direction of Arrival) 추정 방법에는 배열안테나를 기반으로 하는 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘과 Root-MUSIC 알고리즘이 존재한다.

MUSIC 알고리즘은 1981년 Schmidt에 의해 개발되었으며, 기계적 구조물에 의존한 고전적인 DOA 추정 기법의 신뢰도 및 정확도를 보완하기 위하여 제안된 DOA 추정 알고리즘이다. MUSIC 알고리즘은 배열안테나 수신신호를 이용하여 공분산을 계산하고 공분산으로부터 모든 입사각에 대한 신호 전력을 계산한 후 이를 기반으로 DOA를 추정한다. MUSIC 알고리즘은 검색 범위 및 검색 분해능에 따라 DOA 추정 성능이 결정되는 특성을 가진다. 그러나 검색범위 내의 모든 입사각에 대해 전력을 산출하는 과정에서 많은 연산을 요구하며 결과적으로 느린 DOA 추정 속도를 가지는 단점이 존재한다. 또한 다수의 인접한 재밍 신호가 존재하는 환경에서 DOA 추정 성능이 악화되는 특성을 가진다. 이러한 MUSIC 알고리즘의 단점을 개선하기 위하여 Root-MUSIC 알고리즘이 제안되었다. Root-MUSIC 알고리즘은 입사각과 전력간의 관계식으로부터 근을 도출하여 DOA를 추정하는 방법이다. Root-MUSIC 알고리즘은 근을 수식으로부터 직접 도출하므로 빠른 DOA 추정 속도를 가지며 다중 재머에 대한 분해능이 MUSIC 알고리즘에 비해 우수한 특징을 가진다. 따라서 다수의 재밍신호가 존재하는 환경에서 MUSIC과 Root-MUSIC 알고리즘의 장점을 결합하여 DOA 추정 성능을 향상 시킬 수 있다.

II. DOA 추정 알고리즘

2-1 MUSIC 알고리즘

MUSIC 알고리즘은 배열 안테나로부터 얻은 수신 신호의 공분산 행렬을 통해 행렬의 고유값(Eigenvalue)과 고유벡터(Eigenvector)를 계산하고, 이를 잡음과 신호 부공간(Subspace)으로 구분한 후 잡음 부공간과 신호 부공간이 직교인 특성을 이용하여 수신 신호의 최대전력을 추정하고 DOA를 추정하는 알고리즘이다[1][2]. 안테나의 개수가 L개, 신호가 M개인 환경에서 수신한 신호는 식 (1)과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\theta_{1,1}) & a(\theta_{1,2}) & \cdots & a(\theta_{1,M}) \\ a(\theta_{2,1}) & a(\theta_{2,2}) & & \\ \vdots & & \ddots & \\ a(\theta_{L,1}) & & & a(\theta_{L,M}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow X = AS + W$$

식 (1)의 X 는 수신 신호, A 는 신호의 방향 성분, S 는 송신 신호, W 는 잡음이며, 식 (1)에서 X 의 공분산은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C = E[XX^H] = E[ASS^H A^H] + E[WW^H] \quad (2)$$

여기서 $P = E[SS^H]$ 로 정의하고, C 의 고유값을 이용하여 잡음 W 의 공분산을 표현하면 식 (3)과 같다.

$$C = APA^H + \lambda_n C_0 \quad (3)$$

식 (3)에서 λ_n 은 잡음의 고유값 C_0 는 잡음 변수이고, 가우시안 잡음일 때 $\lambda_n S_0$ 는 $\sigma^2 I$ 와 동일한 관계이며, APA^H 는 특이행렬(singular matrix)이므로 APA^H 는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다[1].

$$|APA^H| = |C - \lambda_n C_0| = |(\lambda - \lambda_n) C_0| = 0 \quad (4)$$

식 (4)에서 APA^H 는 비음정치(nonnegative definite)를 만족해야 하므로 $\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_M \geq 0$ 이다. 따라서 식 (3)의 λ_n 이 최소 고유값인 공분산 C 를 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$C = APA^H + \lambda_{\min} C_0 \quad \lambda_{\min} \geq 0 \quad (5)$$

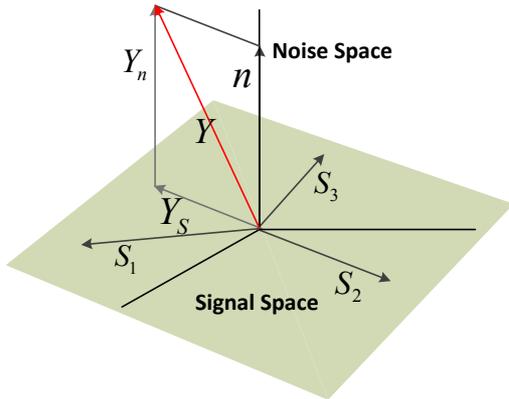


그림. 1. 신호 부공간과 잡음 부공간의 관계
Fig. 1. Relation of signal and noise subspace

식 (5)에서 λ_{\min} 은 N 개가 존재할 수 있으며, 그림 1과 같이 공분산 C 의 고유값 분해(Eigenvalue Decomposition)를 이용하여 잡음의 고유값, 고유벡터를 구하고 신호 부공간과 잡음 부공간을 정의한다. 신호 부공간과 Y 벡터간의 사영(projection)을 이용하여 거리를 구하면 식 (6)과 같다.

$$\|Y_n\|^2 = Y_n^H Y_n = (E_N^H Y) (E_N^H Y)^H = Y^H E_N E_N^H Y \quad (6)$$

식 (6)에서 E_N 은 잡음 고유벡터이며, Y 벡터가 신호 부공간에 근접할수록 수신 신호 전력이 크다. 따라서 수식 (7)과 같이 $\|Y_n\|^2$ 과 수신 신호 전력은 반비례 관계를 가진다.

$$P_{MU}(\theta_i) = \frac{1}{a^H(\theta_i) E_N E_N^H a(\theta_i)} \quad (7)$$

이 때 검색범위에 해당하는 입사각 θ_i 에 따른 $a(\theta_i)$ 를 산출하고 식 (7)을 이용하여 전력 $P_{MU}(\theta_i)$ 를 결정한다. 그리고 검색범위 내에서 최대 전력을 갖는

입사각을 재머의 입사각으로 추정한다.

MUSIC 알고리즘의 최대 전력 검색 과정은 그림 2와 같다. 일정 검색 분해능을 단위로 하여 모든 입사각에 대해 순차적으로 전력 계산을 수행하며 최대 전력을 가지는 각도를 추정하여 DOA를 산출한다. 따라서 MUSIC 알고리즘은 검색 범위 및 검색 분해능에 따라 DOA 추정 성능이 결정되며 모든 입사각에 대해 전력을 계산하여야 하므로 많은 연산을 필요로 하는 특성을 가진다[3][4].

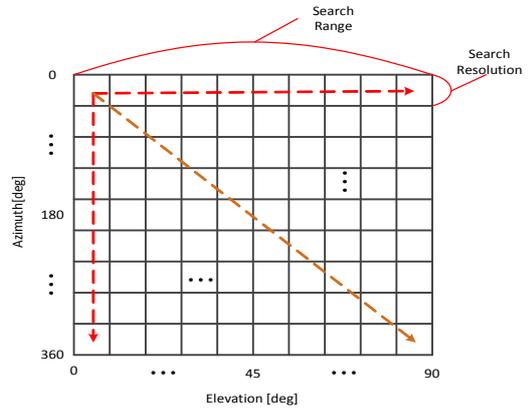


그림. 2. MUSIC 알고리즘의 DOA 추정 검색 과정
Fig. 2. DOA search process in MUSIC Algorithm

2-2 Root MUSIC 알고리즘

Root-MUSIC 알고리즘은 식 (7)의 전력식을 이용하여 근을 도출하고 그 결과를 바탕으로 입사각을 추정하는 방법으로 기본적으로 그림 3과 같은 ULA(Uniform Linear Array)를 사용한다. 안테나의 간격이 d , 입사각이 θ 인 경우 l 번째 안테나에 대한 방향성분 $a_l(\theta)$ 는 식 (8)과 같다[5].

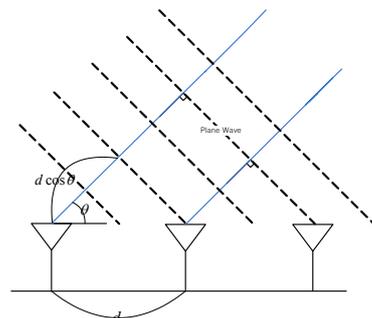


그림. 3. 등 간격 선형 안테나 배치
Fig. 3. ULA(Uniform Linear Array)

$$a_l(\theta) = e^{j2\pi l(d/\lambda)\cos\theta} \quad l=1,2,\dots,L \quad (8)$$

수신 신호 X 를 이산(Discrete) 신호로 정의하고, 공분산의 고유값과 고유벡터를 이용하여 신호전력을 표현하면 식 (9)와 같다.

$$P_{MU}(\theta) = \frac{1}{\|\hat{E}_N^H a(\theta)\|^2} = \frac{1}{a^H(\theta) \hat{E}_N \hat{E}_N^H a(\theta)} \quad (9)$$

$P_{MU}(\theta)$ 의 근을 구하기 위해 $G = \hat{E}_N \hat{E}_N^H$ 로 정의하고 여기에 식 (9)에 대입한 결과는 식 (10)과 같으며, 식 (10)의 $P_{MU}^{-1}(\theta)$ 에 Z-변환 수행하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} P_{MU}^{-1}(\theta) &= \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^L e^{-j2\pi l(d/\lambda)\cos\theta} G_{ln} e^{j2\pi n(d/\lambda)\cos\theta} \\ &= \sum_{h=-L+1}^{L-1} g_h e^{-j2\pi h(d/\lambda)\cos\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

$$D(z) = \sum_{h=-L+1}^{L-1} g_h z^{-h} \quad (11)$$

식 (11)로부터 구한 최대전력에 해당하는 근은 Z영역상의 단위원에 가장 근접하고 단위원 내에 위치하는 근이다. 이러한 근으로부터 입사각을 계산하기 위해 $P_M^{-1}(\theta)$ 와 다항식 $D(z)$ 가 식 (12)와 같이 등가관계임을 활용한다[5],[6],[7],[8].

$$\begin{aligned} z_1^{-l} &= |z_1| e^{-jl \arg(z_1)} = e^{-j2\pi l(d/\lambda)\cos\theta} \\ \cos\theta &= \left(\frac{\lambda}{2\pi d} \right) \arg(z_1) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)를 통해 최대 전력에 해당하는 입사각을 관계식의 근을 통해 추정할 수 있으며 이에 따라 DOA 추정 속도가 MUSIC 알고리즘에 비해 매우 빠른 장점을 가진다. 또한 MUSIC 알고리즘은 인접한 재밍 입사환경에서 전력 스펙트럼의 최대값 추정에 어려움이 있는 반면 Root-MUSIC 알고리즘의 경우 근으로 직접 재밍신호 입사각을 추정하므로 상대적으로 다중 재밍신호의 분해능이 우수한 특성을 가진다. 그

러나 Root-MUSIC 알고리즘은 고분해능으로 추정한 MUSIC 알고리즘 보다 추정 정확도가 떨어진다[9].

III. Root-Assisted MUSIC 알고리즘

제안한 Root-assisted MUSIC DOA 추정 기법은 MUSIC 알고리즘이 높은 검색 분해능을 사용하였을 경우 얻을 수 있는 우수한 DOA 추정 정확도와 Root-MUSIC 알고리즘이 가지는 높은 분해능 및 빠른 연산속도를 결합하여 DOA 추정 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 앞에서 언급한 2개의 DOA 추정 알고리즘의 장점을 결합하여 DOA 추정 성능 향상을 위한 방안을 제시한다. Root-assisted MUSIC 알고리즘의 전체적인 흐름은 그림 4와 같다.

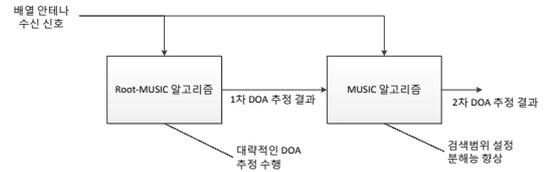


그림. 4. Root-assisted MUSIC 알고리즘의 흐름
Fig. 4. Flow of Root-assisted MUSIC algorithm

제안한 알고리즘은 배열안테나 수신 신호에 대하여 Root-MUSIC과 MUSIC 알고리즘을 순차적으로 사용하여 향상된 성능의 DOA 추정 결과를 얻는다. Root-assisted MUSIC 알고리즘은 크게 다음과 같은 2개의 과정을 거쳐 최종적인 DOA를 추정한다.

1차 DOA 추정: 배열안테나의 수신신호를 활용하여 Root-MUSIC 알고리즘으로 대략적인 1차 DOA 추정을 수행한다.

2차 DOA 추정: 1차 DOA 추정 결과를 기준으로 축소된 검색범위와 이에 따른 분해능을 결정하여 최종적인 DOA를 추정한다.

방위각만을 고려한 DOA 추정 시 일반적인 MUSIC 알고리즘의 경우 검색범위가 방위각 전체인 360 도인 것에 비해 제안한 DOA 추정 알고리즘은 상대적으로 좁은 검색범위를 가질 수 있다. 이렇게 좁은 검색범위의 MUSIC 알고리즘은 같은 연산량 환경

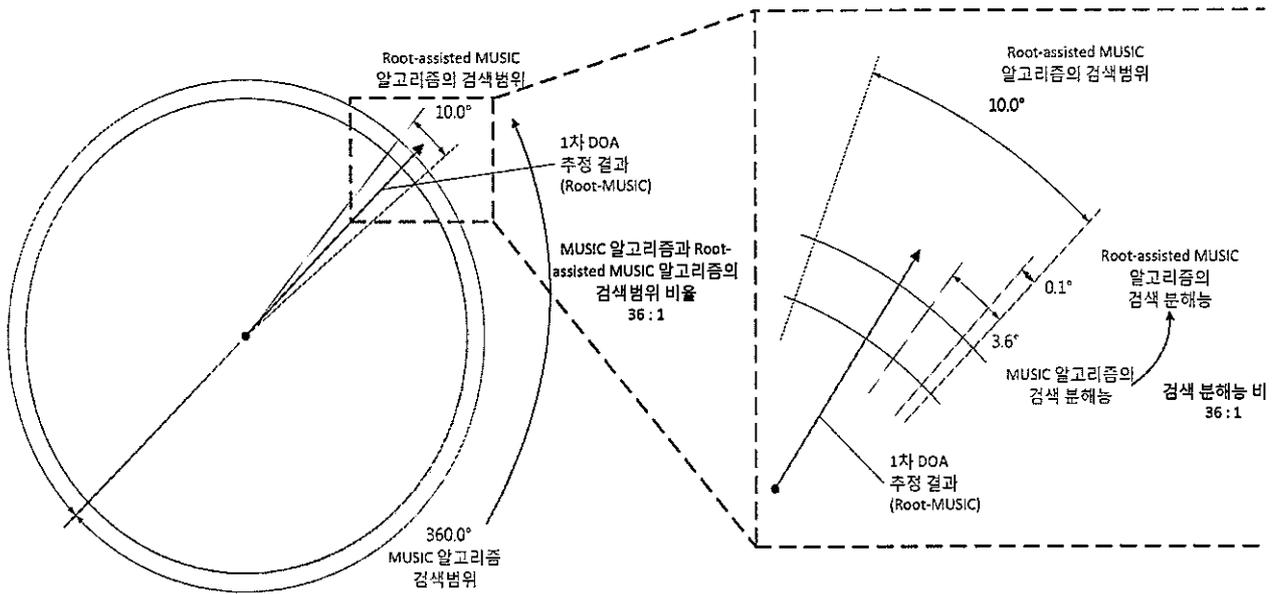


그림 5. 2차 DOA 추정: 검색 범위 및 검색 분해능 비교
 Fig. 5. Second DOA estimation: compare search range with search resolution

에서 더 높은 검색분해능을 확보할 수 있는 이점을 얻는다. 예를 들어 MUSIC 알고리즘의 경우 신호 입사각을 초기에 알 수 없으므로 360 도의 검색범위와 검색 3.6 도의 검색분해능을 가지도록 설정한 경우 입사각 추정을 위해 총 100 회의 연산이 필요하다. 그러나 그림5와 같이 Root-assisted MUSIC의 경우 1차 추정된 결과를 바탕으로 검색 범위를 줄여 10 도의 검색범위와 0.1 도의 검색 분해능을 가지도록 설정할 수 있으며 이 경우에도 총 100 회의 연산이 요구된다. 따라서 Root-assisted MUSIC 알고리즘이 동일한 연산량을 가지고 높은 검색 분해능을 확보할 수 있다. 제안한 DOA 추정 알고리즘은 다음과 같은 이점을 갖는다.

1. MUSIC과 제안한 DOA 추정 기법이 같은 연산량을 가질 경우, MUSIC 및 Root-MUSIC에 비해 상대적으로 우수한 DOA 추정 정확도와 다중재머에 대해 우수한 분해능을 얻을 수 있다.
2. MUSIC과 제안한 DOA 추정 기법이 같은 검색 분해능을 가질 경우, 상대적으로 적은 연산량으로 DOA를 추정할 수 있다.

IV. 제안한 DOA 추정 기법 성능분석

4-1 시뮬레이션 플랫폼

시뮬레이션 플랫폼은 신호 생성부, DOA 추정 알고리즘부 및 성능 분석부로 구성되어 있다. 신호 생성부는 배열안테나 배치에 따른 재밍, GPS, 잡음신호를 생성한다. 그리고 DOA 추정 알고리즘 부를 통해 재밍신호의 입사각을 추정한다. 마지막으로 성능분석부에서 DOA 추정 결과의 RMSE 및 분해확률 (Resolution Probability)을 계산한다.

신호 생성부의 구조는 그림 7과 같으며, 배열안테나 소자 배치에 따른 위상 차이를 고려하여 신호를 생성한다. 먼저 재머 위치와 배열안테나 소자의 위치를 이용하여 소자간 지연시간 및 위상지연을 계산한 뒤 재머의 종류와 크기에 따라 재밍 신호를 생성한다. 그리고 생성한 재밍신호에 GPS신호와 잡음신호를 추가하여 최종 신호를 생성한다. 그림 8은 CW 재밍신호가 포함된 신호생성결과의 PSD(Power Spectrum Density)이다.

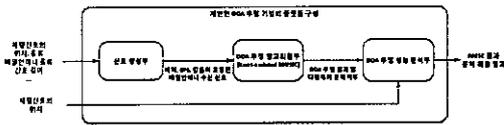


그림. 6. 개선된 DOA 추정 기법의 시뮬레이션 플랫폼
Fig. 6. Platform of efficient DOA estimation method

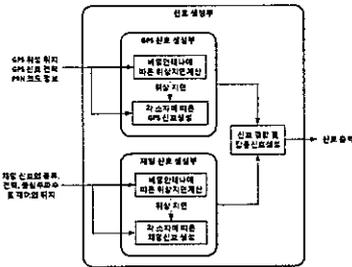


그림. 7. 신호 생성부
Fig. 7. Signal Generator

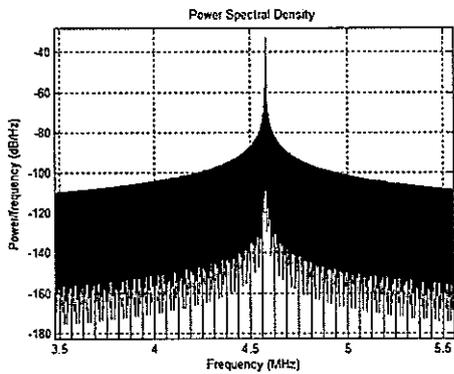


그림. 8. 생성 신호의 PSD
Fig. 8. Signal PSD of Signal Generator

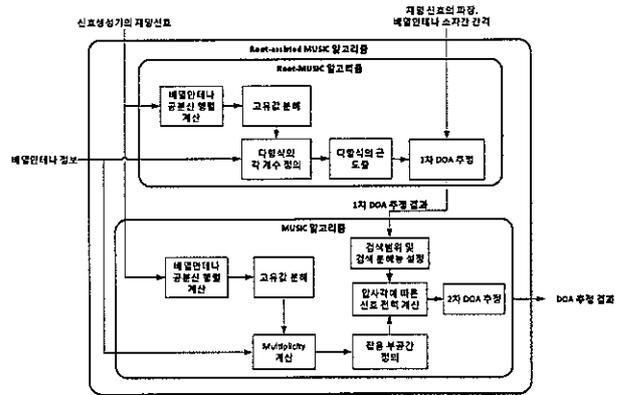


그림. 9. DOA 추정 알고리즘부
Fig. 9. DOA estimation algorithm processor

DOA 추정 알고리즘 부는 그림 9와 같으며, 신호 생성부의 신호 생성 결과를 이용하여 재밍 신호의 DOA를 추정하며 Root-MUSIC과 MUSIC 알고리즘을 순차적으로 수행한다. 재밍 신호의 파장, 안테나 소자 간격, 안테나의 수신 신호, 안테나 소자의 수를 사용하여 Root-MUSIC 알고리즘으로 1차 추정을 수행한다. Root-MUSIC 알고리즘은 입사 신호 데이터의 공분산 행렬을 계산하고 그림 10과 같이 전력 식에 해당하는 다항식의 근을 산출하여 DOA를 추정한다. 1차 DOA 추정이 완료되면 그림 11과 같이 MUSIC 알고리즘을 이용한 2차 DOA 추정을 수행하며, 1차 추정의 결과를 기준으로 MUSIC 알고리즘의 축소된 검색범위 및 검색분해능을 설정하고, 기존 MUSIC 알고리즘에 비해 상대적으로 높은 분해능으로 DOA를 추정한다.

표 1. 시뮬레이션 시나리오
Table 1. Simulation Scenario

시뮬레이션 종류	재머 종류	재밍신호의 입사각 (방위각)	배열안테나 수	배열안테나 종류	샘플 수	JNR[dB]	샘플링 주파수	1검색 분해능 (36:1비율)	
								MUSIC	0.36 deg
DOA 추정 정확도 시뮬레이션	CW	151 deg	9	ULA	10000	0~10	6 MHz	Root-assisted MUSIC	0.01 deg
								MUSIC	3.6 deg
다중 재머 분해확률 시뮬레이션	CW	81, 86 deg	6	ULA	10000	30~40	6 MHz	Root-assisted MUSIC	0.1 deg
								MUSIC	3.6 deg

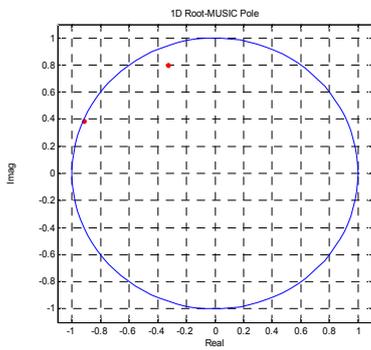


그림. 10. Root-MUSIC 알고리즘의 근 도시
Fig. 10. Root-MUSIC Algorithm Root Plot

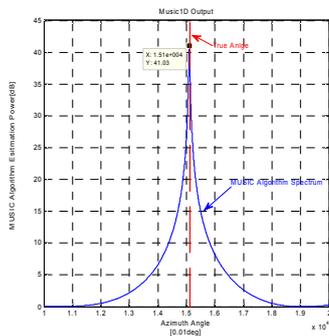


그림. 11. MUSIC 알고리즘의 전력 스펙트럼
Fig. 11. MUSIC Algorithm Power Spectrum

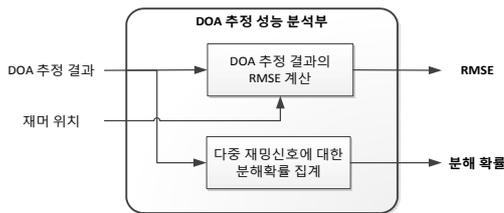


그림. 12. DOA 추정 성능 분석부
Fig. 12. Analyzer of DOA estimation performance

성능 분석부의 구조는 그림 12와 같으며, 알고리즘 수행부에서 수행한 DOA 추정 결과를 이용하여 DOA 추정 정확도를 평가하기 위한 RMSE 및 재밍신호간의 분해능 평가를 위한 분해확률을 산출한다. RMSE 계산에는 재밍신호의 입사각과 차이를 이용하므로 생성기에서 설정한 재머의 신호 입사각이 사용되며, 다수의 DOA 추정 결과로 RMSE를 계산한다. 다중 재밍신호 환경에서의 재밍신호간 분해확률의 경우 MUSIC 알고리즘의 전력 스펙트럼에 대해 침두치

결정 알고리즘으로 재밍신호의 분해 성공 횟수를 집계하여 산출한다.

4-2 시뮬레이션 환경

DOA 추정 알고리즘의 성능 분석을 위한 시나리오는 표 1과 같으며 JNR(Jammer to Noise Ratio)의 크기, 안테나 배치 및 수, 샘플 수 및 샘플링 주파수에 따라 시나리오를 구성하였다. 시뮬레이션 시나리오의 종류는 크게 2 가지로 RMSE 결과로 DOA 추정 정확도를 비교하기 위한 실험과 2 개의 재머가 존재하는 신호 환경에서 분해확률로 분해능을 평가하는 실험을 수행하였다. 그리고 배열 안테나 배치는 사각 배치와 ULA 배치를 사용하였으며 각 안테나 소자간의 간격은 $\lambda/2$ 로 설정하였다. 또한 MUSIC 알고리즘과 제안한 DOA 추정 기법을 같은 연산량 환경에서 비교하기 위해 두 알고리즘간의 검색범위 비율과 검색 분해능 비율을 36 배로 동일하게 설정하였으며, 각 시뮬레이션은 100 회 반복 수행하여 성능을 평가하였다.

4-3 DOA 추정 알고리즘 성능 분석

표 1의 DOA 추정 정확도 시뮬레이션 결과는 그림 13과 같으며 MUSIC 알고리즘과 Root-MUSIC 그리고 본 논문에서 Root-assisted MUSIC 알고리즘을 대상으로 하였다. 시뮬레이션 결과 모든 알고리즘이 신호 전력이 증가할수록 RMSE가 감소하는 경향을 보였다. 또한 제안한 DOA 추정 기법이 가장 우수한 DOA 추정 성능을 보였으며 Root-MUSIC의 경우 가장 낮은 DOA 추정 결과를 보였다. MUSIC 알고리즘의 경우 Root-MUSIC보다 우수한 추정 성능을 보였으나 검색 분해능의 한계에 의해 JNR의 증가함에 따라 RMSE가 수렴하였다. 반면에 제안한 DOA 추정 기법은 JNR의 증가에 따라 DOA 추정 정확도가 일정 비율로 계속 증가하였다. 결과적으로 Root-assisted MUSIC이 기존 알고리즘에 비해 우수한 DOA 추정 정확도를 보였다.

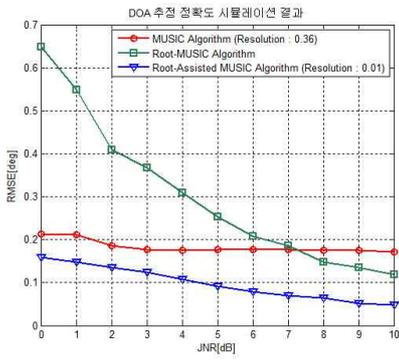


그림. 13. DOA 추정 정확도 시뮬레이션 결과
Fig. 13. RMSE Performance Simulation

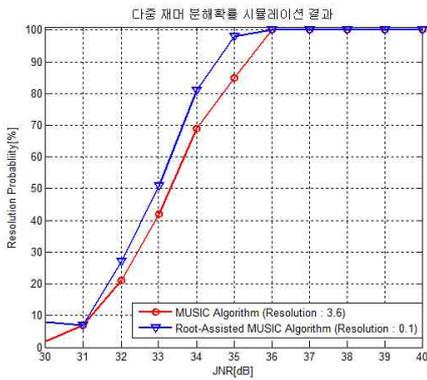


그림. 14. 다중 재머 분해확률 시뮬레이션 결과
Fig. 14. Multi-Jammer Resolution Probability Simulation

다중 재머 분해확률 시뮬레이션 결과는 그림 14와 같으며, MUSIC 알고리즘과 Root-assisted MUSIC 알고리즘을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 5도 간격으로 재머를 배치해 두 알고리즘의 분해확률을 산출하였으며, 시뮬레이션 결과 JNR이 증가함에 따라 분해확률이 증가하였고 36 dB 이상에서는 100%로 수렴하는 결과를 보였다. 또한 전체적으로 Root-assisted MUSIC이 기존 MUSIC 알고리즘에 비해 우수한 분해확률을 가짐을 확인하였다. 그리고 Root-assisted MUSIC 알고리즘은 MUSIC 알고리즘과 Root-MUSIC 알고리즘을 결합하는 구조를 가지므로, MUSIC 알고리즘과 검색분해능이 같을 경우, Root-MUSIC 알고리즘에 비해서는 느리지만 MUSIC 알고리즘 보다는 빠른 DOA 추정 결과를 산출할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존의 DOA 추정 기법인 MUSIC, Root-MUSIC 알고리즘에 대해 간략히 설명하였다. 그리고 각 알고리즘의 단점을 보완하기 위해 MUSIC과 Root-MUSIC 알고리즘을 결합하는 DOA 추정 기법을 제안하였으며, 시뮬레이션 수행을 위한 소프트웨어 기반의 시뮬레이션 플랫폼의 구조를 설명하였다. 또한 Root-assisted MUSIC 알고리즘과 기존 DOA 추정 알고리즘의 성능평가 및 비교를 위해 시뮬레이션 시나리오를 설정하고 이에 따른 실험을 수행하였다. 그 결과 Root-MUSIC 알고리즘이 가장 낮은 DOA 추정 정확도를 보였으며, Root-assisted MUSIC 알고리즘이 가장 우수한 DOA 추정 정확도를 보였다. 따라서 시뮬레이션 결과를 통해 Root-assisted MUSIC 알고리즘에서 DOA 추정 정확도가 개선됨을 확인할 수 있다. 그리고 밀집한 다중 재머 환경의 분해확률을 평가한 시뮬레이션 결과, Root-assisted MUSIC 알고리즘이 MUSIC 알고리즘에 비해 우수한 분해확률을 가지며 결과적으로 Root-assisted MUSIC 알고리즘에 의해 다중 재머의 분해능이 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 Root-assisted MUSIC 알고리즘은 연산량의 제한이 필요한 하드웨어를 구현할 경우나 우수한 DOA 추정과 빠른 연산속도 그리고 높은 분해확률을 모두를 만족해야 하는 경우에 적용이 용이할 것으로 기대된다. 또한 기존의 알고리즘을 활용 및 혼합하는 방법으로 기존의 DOA 추정과정이 요구되는 시스템의 성능 개선에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기초기술연구회의 “재난예방 및 국민안전체고를 위한 위성기반 위치추적기술 연구” 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

Reference

[1] Chi-Tsong Chen, Linear System Theory and Design Third Edition, New York Oxford OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1999.

- [2] A. Ferreol, P.Larzabal and M.Viberg, "Statistical analysis of the MUSIC algorithm in the presence of modeling errors, taking into account the resolution probability," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 8, pp. 4156-4166, Aug 2010.
- [3] T. Lobos, Z. Leonowicz, J. Rezmer and P. Schegner, "High-resolution spectrum-estimation methods for signal analysis in power systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 1, pp. 219-225, Feb 2006.
- [4] M. Jalali, M. N. Moghaddasi and A. Habibzadeh, "Comparing accuracy for ML, MUSIC, ROOT-MUSIC and spatially smoothed algorithms for 2 users," *IEEE Mediterranean Microwave Symposium*, pp. 1-5, Nov 2009.
- [5] Peter Stoica and Randolph L. Moses, Introduction to Spectral Analysis, *Prentice Hall*, pp. 155-163, 1997.
- [6] Fabio Belloni, Andreas Richter and Visa Koivunen, "Performance of Root-MUSIC algorithm using real-world arrays," *14th European Signal Processing Conference*, pp. 1050-1054, Sep 2006.
- [7] Xiong Jing and Zi Cheng Du, "An Improved Fast Root-MUSIC algorithm," *Image Analysis and Signal Processing 2012 International Conference*, pp. 1-3, Nov 2012.
- [8] J. Barabell, "Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms," *ICASSP '83*, vol. 8, pp. 336-339, 1983.
- [9] Noriaki Odachi, Hiroki Shoki and Yasuo Suzuki, "High-speed DOA Estimation using Beam-space MUSIC," *Vehicular Technology Conference Proceedings 2000*, vol. 2, pp. 1050-1054, 2000.

이 주 현 (Ju Hyun Lee)



2011년 2월 : 충남대학교 전기정보
통신공학부(공학사)
2011년 3월~현재 : 충남대학교
전자공학과 석박통합과정
관심분야 : GNSS, 실내항법,
Anti-Jamming

최 현 호 (Heon Ho Choi)



2008년 2월 : 충남대학교 전기정보
통신공학부(공학사)
2010년 2월 : 충남대학교 전자
공학과(공학석사)
2010년 3월~현재 : 충남대학교
전자공학과 박사과정
관심분야 : GNSS, CDGPS,

Anti-Jamming

최 윤 섭 (Yun Sub Choi)



2010년 2월 : 충남대학교 전기
정보통신공학부(공학사)
2010년 3월~현재 : 충남대학교
전자공학과 석박통합과정
관심분야 : GNSS, CRPA,
Anti-Jamming

임 덕 원 (Deok Won Lim)



2004년 2월 : 충남대학교 전자
공학과(공학사)
2011년 2월 : 충남대학교 전자
공학과(공학박사)
2011년 3월~현재 : 한국항공우주
연구원 선임연구원

관심분야 : GNSS, 수신기 설계, Anti-Jamming

박 찬 식 (Chansik Park)



1984년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과(공학사)
1986년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과(공학석사)
1997년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과(공학박사)
1997년 3월~현재 : 충북대학교

전자정보대학 교수

관심분야 : GNSS, SDR, AJ, ITS and WSN

이 상 정 (Sang Jeong Lee)



1979년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과(공학사)
1981년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과(공학석사)
1987년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과(공학박사)
1987년 3월~현재 : 충남대학교

전기정보통신공학부 교수

관심분야 : 강인제어, GNSS, 항법 및 산업제어