

# 연산량 감소를 위한 2D MUSIC 알고리즘 설계

최윤섭\*, 진미현\*, 최헌호\*, 이상정\*, 박찬식°

## Design of 2D MUSIC Algorithm to Reduce Computational Burden

Yun Sub Choi\*, Mi Hyun Jin\*, Heon Ho Choi\*, Sang Jeong Lee\*, Chansik Park°

### 요약

GNSS의 재밍에 대응하는 기법은 입사되는 재밍 전력을 억제하는 항재밍 기법과 재밍신호원의 위치를 찾아내는 재머위치결정 기법이 주로 사용된다. 두 방법 모두 재밍신호의 방향을 탐지해야 하며 일반적으로 대표적인 도래각 결정알고리즘인 MUSIC이 사용된다. 그러나 MUSIC은 높은 분해능을 가짐에도 불구하고 모든 후보각에 대한 검색을 수행하므로 검색시간이 길다는 단점이 있다. 본 논문에서는 MUSIC의 목적함수를 Cholesky 분해를 이용하여 제곱 항들의 합 형태로 나타내고, 목적함수 계산 도중 일부의 합이 이미 기존의 최소값 보다 크면 계산을 중단함으로써 검색속도를 향상시키는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 동작은 소프트웨어 기반의 모의실험을 통하여 검증하였으며 기존 MUSIC 알고리즘과 비교하여 도래각 추정 성능은 같으나 검색속도가 최대 1.15배 향상됨을 확인하였다.

**Key Words** : 항재밍 (Anti-Jamming), 도래각 추정 (DOA Estimation), 2D MUSIC, 쉐레스키 분해 (Cholesky Decomposition), 연산량 (Computational Burden)

### ABSTRACT

The jamming countermeasures in GNSS includes anti-jamming technique and jammer localization technique. In both techniques, direction of jamming signal is important and generally the MUSIC algorithm is used to find the direction of jamming signal. The MUSIC is super-resolution algorithm for detecting incident direction of signal. But, the search time of MUSIC algorithm is too long because all candidates of incidence angle are searched. This paper proposes the new method that has less computational burdens and therefore faster than the conventional MUSIC algorithm. The proposed method improves performance speed by reducing unnecessary calculations. In the proposed method, the cost function of conventional MUSIC algorithm is decomposed into the sum of squares and if the partial sum of cost function is larger than the minimum cost function so far, then the candidate is rejected and next candidates are searched. If the computed cost function is less than the minimum cost function so far, the minimum cost function so far is replaced with newly computed value. The performance of the proposed method was compared with the conventional MUSIC algorithm using the simulation. The accuracy of the estimated direction of jamming signal was same as the conventional MUSIC while the search speed of the proposed method was 1.15 times faster than the conventional MUSIC.

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

◆ 주저자 : 충남대학교 전자공학과 제어시스템 연구실, djurit@cnu.ac.kr, 정회원

° 교신저자 : 충북대학교 전자정보대학 전자공학 전공, chansp@cbnu.ac.kr, 정회원

\* 충남대학교 전자공학과

논문번호 : KICS2012-09-415, 접수일자 : 2012년 9월 3일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 13일

## I. 서 론

GPS는 대표적인 위성항법시스템으로 현재 전 세계 여러 나라에서 측위, 측량, 시각동기, 무기체계 등 중요한 국가 인프라에 적용하여 사용하고 있다. 그러나 GPS 신호는 신호 수신 전력이 낮아 재밍신호에 취약한 단점이 있으므로, 이에 따라 적절한 재밍대응방안을 고려해야만 한다. 재밍대응방안에는 배열 안테나를 이용하여 위성 신호의 입사방향에 빔을 형성하여 위성항법 신호를 강화하는 빔포밍 (beamforming) 기법, 원하지 않는 간섭 신호의 입사방향에 널(null)을 형성하는 널링(nulling) 기법, 재밍신호원의 위치를 찾아내는 재머위치결정 (jammer localization) 기법이 있다. 이들 기법은 모두 신호가 입사되는 방향(DOA, direction of arrival)을 찾아내는 것이 필수적이며, 이를 위한 대표적인 알고리즘으로 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘<sup>2,3)</sup>이 있다.

고전적인 입사방향 추정 기법에는 Barlett 빔포밍 알고리즘<sup>4)</sup>, Capon 빔포밍 알고리즘<sup>5)</sup>, 선형 예측 알고리즘<sup>6)</sup>이 있다. 이후 Schmidt에 의해 고전적인 방식을 벗어난 초분해능(super-resolution) 알고리즘인 MUSIC 알고리즘이 개발 되었다. MUSIC 알고리즘은 고전적인 입사방향 추정 기법에 비해 높은 정확성을 가지며 임의의 배열에도 적용 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 MUSIC 알고리즘은 모든 후보각에 대하여 검색을 수행하기 때문에 입사각 추정을 위한 검색 속도가 느리다는 단점이 있다. 이에 따라 MUSIC 알고리즘의 목적함수의 근을 직접적으로 이용하여 작은 연산량 및 빠른 검색 속도를 가진 root-MUSIC 알고리즘<sup>7)</sup>이 소개되었다. 하지만 root-MUSIC 알고리즘의 경우에는 ULA(Uniform Linear Array)에만 적용이 가능하고 다수의 재머에 대한 추정 성능이 떨어진다는 단점을 가진다.

본 논문에서는 MUSIC 알고리즘의 검색 속도를 향상시키기 위한 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 기존 MUSIC 알고리즘에서 행렬과 벡터 곱으로 정의된 목적함수를 Cholesky 분해<sup>8,9)</sup>를 통해 다항식으로 변형하고 이를 바탕으로 순차적으로 목적함수를 계산한다. 목적함수 계산 과정에서 계산된 목적함수 값이 지금까지의 목적함수의 최소값 보다 크면 후보에서 제외함으로써 불필요한 계산을 줄여 검색 속도를 향상시킬 수 있다. 제안한 기법은 소프트웨어 기반의 모의실험을 통하여 동작을 검증하고,

기존 MUSIC 알고리즘과 비교를 통해 검색 속도가 향상됨을 확인한다.

## II. MUSIC 알고리즘

MUSIC 알고리즘은 배열 안테나 수신 신호의 공분산 행렬을 고유값 분해(eigenvalue decomposition)를 통해 신호와 잡음의 부공간으로 구분한 후, 수신 신호가 최대 전력을 갖는 방향을 추정하는 신호 방향 탐지 알고리즘이다. 신호원의 개수가  $M$  개, 배열 안테나의 소자 개수가  $L$  개인 환경에서 배열안테나로 수신된 신호는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다<sup>2)</sup>.

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_L(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\theta_{1,1}, \phi_{1,1}) & a(\theta_{1,2}, \phi_{1,2}) & \cdots & a(\theta_{1,M}, \phi_{1,M}) \\ a(\theta_{2,1}, \phi_{2,1}) & a(\theta_{2,2}, \phi_{2,2}) & & \\ \vdots & & \ddots & \\ a(\theta_{L,1}, \phi_{L,1}) & & & a(\theta_{L,M}, \phi_{L,M}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_L \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{W} \tag{1}$$

여기서  $s_m(t)$ 는 각 신호원에서 송출된 신호,  $a(\theta_{l,m}, \phi_{l,m})$ 는 송신된 신호가 배열안테나에 입사할 때 갖는 방향 성분,  $\theta_{l,m}$ 와  $\phi_{l,m}$ 은  $m$  번째 신호원에서 송출된 신호가  $l$  번째 배열 안테나 소자에 수신될 때의 방위각과 양각,  $w_l$ 은 각 배열 안테나 소자의 잡음,  $x_l(t)$ 는 앞서 설명한 요소를 모두 포함하는 각 소자 안테나로 수신된 신호를 의미한다 ( $l=1,2,\dots,L, m=1,2,\dots,M$ ). 또한, 수신된 신호는  $\mathbf{X}$ , 신호의 방향 성분은  $\mathbf{A}$ , 송신된 신호는  $\mathbf{S}$ , 잡음은  $\mathbf{W}$ 의 행렬로 나타낸다. 수신 신호  $\mathbf{X}$ 의 공분산 행렬은 식 (2)와 같이 표현된다<sup>2)</sup>.

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = E[\mathbf{A}\mathbf{S}\mathbf{S}^H\mathbf{A}^H] + E[\mathbf{W}\mathbf{W}^H] \\ &= \mathbf{A}E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H]\mathbf{A}^H + E[\mathbf{W}\mathbf{W}^H] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $E[\cdot]$ 는 행렬의 기대값이다. 식 (2)에서  $\mathbf{P} = E[\mathbf{S}\mathbf{S}^H]$ 로 두고,  $\mathbf{C}$ 의 고유값을 이용하여 잡음의 공분산을 표현하면 식 (3)과 같다<sup>2)</sup>.

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H + \lambda_n \mathbf{C}_0 \tag{3}$$

여기서  $\lambda_n$ 는 잡음의 고유값,  $\mathbf{C}_0$ 는 잡음과 관련된 변수이다.  $\mathbf{P}$ 는  $[M \times M]$ 의 크기를 가지며, 송신 신호가 모두 독립인 경우에는  $M$ 의 rank를 갖는다.

마찬가지로  $\text{APA}^H$  역시  $M$ 의 rank를 갖게 되지만,  $[L \times L]$ 의 크기를 가지므로 특이성(singular)을 갖는다. 따라서  $\text{APA}^H$ 는 식 (4)와 같이 쓸 수 있다<sup>2)</sup>.

$$|\text{APA}^H| = |\mathbf{C} - \lambda_n \mathbf{C}_0| = |(\lambda - \lambda_n) \mathbf{C}_0| \quad (4)$$

여기서  $|\cdot|$ 는 행렬식(determinant) 연산이고  $\lambda$ 는  $\mathbf{C}$ 의 고유값의 대각 행렬이다.  $\mathbf{A}$ 가 full-rank이고  $\mathbf{P}$ 가 양의 한정(positive definite)인 경우  $\text{APA}^H$ 는 비음의 한정(nonnegative definite) 특성을 갖는다. 잡음의 고유값  $\lambda_n$ 이  $\mathbf{C}$ 의 고유값  $\lambda_m (m = 1, 2, \dots, M)$ 보다 작아야  $\text{APA}^H$ 의 모든 고유값이 양수가 되어 비음의 한정 조건을 만족한다. 그러므로 식 (3)는 식 (5)로 다시 쓸 수 있다<sup>2)</sup>.

$$\mathbf{C} = \text{APA}^H + \lambda_{\min} \mathbf{C}_0, \quad \lambda_{\min} \geq 0 \quad (5)$$

위와 같은 고유값 분해를 통해 신호의 부공간(signal subspace)과 잡음의 부공간(noise subspace)을 분리할 수 있으며 이들은 서로 직교하는 특성을 가진다. 이제 임의의 벡터  $\mathbf{Y}$ 를 정의하여 잡음의 부공간에 사영(projection)시켜 신호의 부공간과의 거리를 구하면 식 (6)과 같다<sup>2)</sup>.

$$\|\mathbf{Y}_n\|^2 = \mathbf{Y}_n^H \mathbf{Y}_n = (\mathbf{E}_n^H \mathbf{Y})(\mathbf{E}_n^H \mathbf{Y})^H = \mathbf{Y}^H \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{Y} \quad (6)$$

여기서,  $\mathbf{Y}_n$ 은 잡음의 부공간에 사영된 벡터,  $\mathbf{E}_n$ 는 잡음의 고유 벡터이다.  $\mathbf{Y}$ 와 신호의 부공간 사이의 거리  $\|\mathbf{Y}_n\|^2$ 는 수신 신호의 전력과 반비례한다. 따라서,  $\mathbf{Y}$ 에 포함된 신호의 방향 성분을  $\mathbf{a}(\theta, \phi)$ 로 정의하면 수신 신호의 전력을 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (7)$$

위 식은  $\mathbf{Y}$ 가 신호의 부공간과 가장 근접할 때 최대 값을 가진다. 따라서, MUSIC 알고리즘은  $\mathbf{Y}$ 의 모든 방향 성분들에 대해 수신 신호 전력  $P(\theta, \phi)$ 을 계산하고 가장 큰 값을 갖는 방향을 통해 신호의 입사각을 추정한다. 모든 입사각에 대한 검색을 수행하기 때문에 MUSIC 알고리즘의 연산 속도는 입사각의 분해능에 영향을 받는다. 분해능이 높아 검색 범위가 커지면 연산 속도는 느려지지만 입사각을 보다 세밀하게 추정할 수 있고, 분해능이 낮아

검색 범위가 작아지면 연산 속도는 빠르지만 입사각을 세밀하게 추정할 수 없고, 인접한 2개의 신호원을 구분하지 못할 수 있다.

### III. 제안 기법

본 논문에서 제안하는 기법은 MUSIC 알고리즘에서 연산 속도 개선을 위하여 벡터 곱으로 정의된 목적함수를 Cholesky 분해를 통해 다항식으로 변형하고, 이를 바탕으로 순차적으로 목적함수를 계산한다. Cholesky 분해를 통해  $\mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H$ 를 Cholesky 인자  $\mathbf{G}$ 로 표현하면 식 (8)과 같다<sup>8,9)</sup>.

$$\mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H = \mathbf{G} \mathbf{G}^H \quad (8)$$

여기서  $\mathbf{G}$ 는 상삼각 행렬,  $\mathbf{G}^H$ 는 하삼각 행렬이므로 위 방정식은 전방치환(forward substitution)과 후방치환(backward substitution)을 번갈아 행하여 풀 수 있다<sup>8,9)</sup>. Cholesky 인자  $\mathbf{G}$ 를 이용한 수신 신호 전력은 식 (9)와 같다.

$$P_{Cholesky}(\theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{G} \mathbf{G}^H \mathbf{a}(\theta, \phi)} \quad (9)$$

식 (9)의 분모를 다항식으로 표현하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}^H(\theta, \phi) \mathbf{G} \mathbf{G}^H \mathbf{a}(\theta, \phi) \\ &= \begin{bmatrix} a_1^* & a_2^* & \dots & a_M^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & \dots & 0 \\ g_{12} & g_{22} & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ g_{1M} & g_{2M} & & g_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{11}^* & g_{12}^* & \dots & g_{1M}^* \\ 0 & g_{22}^* & & g_{2M}^* \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & 0 & & g_{MM}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} \\ &= (a_1 g_{11}^* + a_2 g_{12}^* + \dots + a_M g_{1M}^*)^2 + \dots + (a_{M-1} g_{M-1M-1}^* + a_M g_{M-1M}^*)^2 + (a_M g_{MM}^*)^2 \\ &= b_1^2 + \dots + b_{M-1}^2 + b_M^2 \end{aligned} \quad (10)$$

위와 같이 정리된 다항식 제곱의 합은 신호 입사각에 해당하는 방위각, 양각에서 최소값을 갖는다. Cholesky 분해를 이용한 MUSIC 알고리즘도 모든 입사각에 대한 검색을 수행해야 한다는 점에서 기존의 MUSIC 알고리즘과 동일하다. 하지만, Cholesky 분해를 통해 수신 신호 전력을 다항식으로 표현했기 때문에 신호 전력을 계산하기 위해서는 각 항을 차례로 더해야 한다. 이 때, 각 항을 모두 더한 값은 수신 신호 전력의 역수이므로 식 (10)가 최소값이 되는 입사각에서 신호 전력은 최대가

된다. 따라서 각 항을 더할 때마다 임의의 임계값과 비교하여 모든 항을 더하기 전에 임계값 보다 크면 계산을 중지하고 다른 입사각에 대한 계산으로 넘어가게 하여 불필요한 연산을 줄일 수 있다. 만약 모든 항을 더한 값이 임계값보다 작은 경우에는 기존의 임계값을 모든 항을 더한 값으로 교체한다. Cholesky 분해를 이용한 MUSIC 알고리즘의 의사 코드를 그림 1에 나타냈다.

```
Gather measurements X
Compute En
Compute G using Cholesky decomposition
VTh = ∞
for (θ = 0 : Δθ : 360)
    for (φ = 0 : Δφ : 90)
        Pinv = 0
        for (m = 1 : 1 : M)
            Pinv = Pinv + bm2
            if Pinv ≥ VTh ; break; endif
        end
        if Pinv < VTh; VTh = Pinv; endif
    end
end
end
```

그림 1. Cholesky 분해를 이용한 MUSIC 알고리즘의 의사코  
Fig. 1. Pseudo-code of the proposed MUSIC algorithm using Cholesky decomposition

여기에서  $b_m^2$ 은 식 (10)의  $m$ 번째 다항식 제곱 ( $m = 1, 2, \dots, M$ )을 의미한다. 그리고  $V_{Th}$ 는 임계값,  $P_{inv}$ 는  $b_m^2$ 를 순차적으로 더하여 완성되는 값으로 모든  $b_m^2$ 를 더하면 식 (9)의 역수와 같다.  $\Delta\theta$ 와  $\Delta\phi$ 는 각각 방위각 검색 분해능, 양각 검색 분해능이다.

#### IV. 성능 검증

##### 4.1. 시뮬레이션 환경

제안하는 기법의 성능은 소프트웨어 기반의 시뮬레이션을 통해 기존의 MUSIC 알고리즘과 비교, 분석하여 검증하였다. 재머의 입사각 변화에 따른 연산 속도 및 추정 성능을 분석하였으며, 각 입사각에서 100회 수행한 결과의 평균치를 이용하였다. 자세한 시뮬레이션 환경은 다음과 같다.

##### 4.1.1 수신기 관련 파라미터

GPS L1 대역인 1575.42MHz에 대한 재밍 신호

를 고려하였으며, 수신기의 중간 주파수는 4.58MHz, 샘플링 주파수는 8MHz로 설정하였다. 안테나는 Rectangular 형태의 4소자 배열 안테나로 안테나 간 간격은 약 9.52cm ( $\lambda/2$ )로 설정하였으며, 소자 안테나 간 위상 차이는 Plane wave로 가정하였다. 수신기 관련 파라미터 설정을 표 1에 나타냈다.

표 1. 수신기 관련 파라미터 설정  
Table 1. Configurations of Receiver Parameter

Receiver Parameters		
RF	1575.42MHz (GPS L1)	
Intermediate Frequency	4.58MHz	
Sampling Frequency	8MHz	
Array Ant.	Type	Rectangular
	Element Number	4 ea
	Element Spacing	9.52 cm ( $\lambda/2$ )

##### 4.1.2. 재머 관련 파라미터

재밍 신호는 주파수가 1575.42MHz이고 JNR이 0dB인 CW 신호 1개를 인가하였다. 재머의 위치는 양각은 45°로 고정된 채 방위각을 0°에서 315°로 45° 간격으로 변화시키며 시뮬레이션을 수행하였다. 재머 관련 파라미터 설정을 표 2에 나타냈다.

표 2. 재밍 신호 파라미터 설정  
Table 2. Configurations of Jammer Parameter

Jammer Parameters		
Num. of Jammer	1 ea	
Type	CW	
JNR	0 dB	
Location	Azimuth	0°-315° (45° interval)
	Elevation	45°

##### 4.1.3. MUSIC 알고리즘 관련 파라미터

2차원의 입사각을 추정할 때, MUSIC 알고리즘에서는 그림과 같이 방위각과 양각을 변화시키면서 이에 따른 전력을 계산하여 최대 전력을 갖는 입사각을 검색한다.

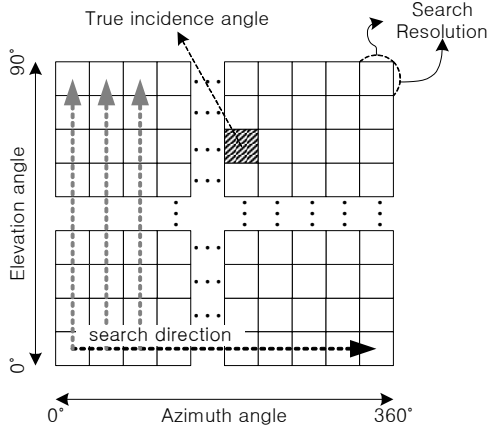


그림 2. MUSIC 알고리즘 입사각 검색 과정  
Fig. 2. DOA search process of MUSIC algorithm

방위각과 양각은 각각 0°에서 360°까지, 0°에서 90°까지 0.5° 간격으로 순차적으로 변화시켜 검색을 수행하였다. 이 때, 0.5°는 MUSIC 알고리즘의 검색 분해능으로서 MUSIC 알고리즘의 연산 속도와 입사각 추정 성능에 영향을 미친다. 검색 분해능을 높게 한 경우에는 세밀한 입사각 추정이 가능하지만, 검색 범위가 증가하여 연산속도가 감소하게 된다.

#### 4.2. 시뮬레이션 결과분석

##### 4.2.1. 연산 속도

재머의 방위각 변화에 따른 기존 MUSIC 알고리즘과 제안한 기법의 연산 시간을 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 고려한 여덟 개의 재머 위치는 표 2에서 설명한 바와 같이 방위각을 0°에서 315°로 45° 간격으로 변화시킨 위치이다. 제안한 기법에서 각 입사각에 대한 검색 과정을 수행할 때, 계산한 전력의 역수가 임계값보다 큰 경우에 불필요한 연산을 생략하므로 제안한 기법의 연산 속도는 가능한 한 검색 초기 단계에서 임계값을 작은 값으로 갱신할수록 빨라진다. 이에 따라, 설계한 MUSIC 알고리즘의 입사각 검색은 0°에서부터 순차적으로 증가시키며 검색하기 때문에 재머의 입사각이 0°에 가까울수록 연산 속도 향상 효과가 클 것이라는 예상과 일치함을 볼 수 있다. 가정된 환경 내에서 최악의 경우인 방위각 315°에서도 제안한 방법이 성능향상을 나타냄을 확인할 수 있다.

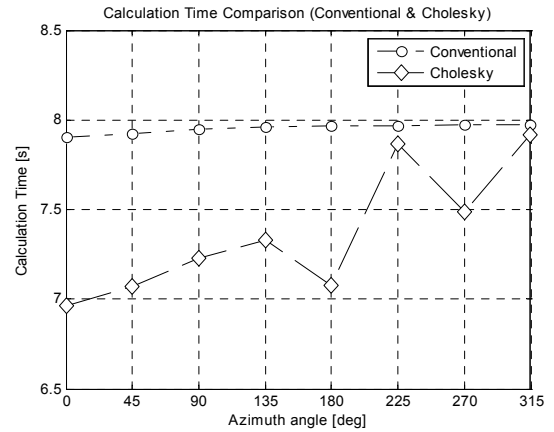


그림 3. 방위각 변화에 따른 수행시간 비교  
Fig. 3. Calculation time comparison upon jammer's azimuth angle

그림 3에서 기존 MUSIC 알고리즘의 연산 시간은 재머의 방위각 변화에도 일정한 값을 유지하는 반면, 제안한 기법의 수행 시간은 재머의 방위각이 증가함에 따라 연산 시간도 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 방위각의 변화에 따라 연산 시간이 증가하더라도, 제안한 기법의 연산 시간은 기존 MUSIC 알고리즘 보다 작아 연산 속도 향상 효과가 있다는 것을 확인할 수 있다. 4개의 소자를 고려한 시뮬레이션 환경에서 식 (10)은  $l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2$ 와 같이 표현되므로 각 입사각에서 전력을 계산할 때 생략할 수 있는 덧셈 연산의 최대 개수는 3개이다. 그림 4에 재머의 방위각이 90°, 135°, 180°, 225°인 경우, 생략되는 덧셈 연산의 개수를 나타내었다.

그림 4에는 생략되는 덧셈 연산의 개수에 따라 네 가지 색상을 이용하여 표시하였다. 명도가 낮은 색일수록 생략된 덧셈 연산의 개수가 많다는 것을 의미한다. 흰색으로 표시한 영역은 0개의 덧셈 연산을 생략하였으므로 연산량 감소가 없다는 것을 의미하며 흰색과 검은색 사이의 색상은 명도가 낮아짐에 따라 각각 1개, 2개의 덧셈 연산을 생략했음을 나타낸다. 검은색으로 표시한 영역은 3개의 덧셈 연산을 생략하였으므로 연산량 감소량이 최대치임을 나타낸다. 따라서 검은색으로 표시한 영역이 넓을수록 연산량 감소효과가 크다. 또한 그림 4의 (a), (b), (d)를 보면 검은색으로 표시된 영역이 점차 좁게 나타나 방위각 증가에 따라 연산량 감소효과가 감소한다는 사실을 다시 확인할 수 있다. (c)의 경우에는 검색 초기단계부터 상대적으로 높은 전력을 갖는 구간이 존재하여 낮은 방위각을 갖는 (a)나 (b)보다도 빠른 연산 속도를 나타냈다.

V. 결 론

본 논문에서는 Cholesky 분해를 이용하여 연산량을 감소 시켜 검색 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 MUSIC 알고리즘을 제안하고 그 성능을 기존 MUSIC 알고리즘의 성능과 비교하여 검증하였다. 제안한 기법은 기존 MUSIC 알고리즘에서 전력 계산을 위한 목적함수의 벡터 연산을 Cholesky 분해를 통해 다항식 연산으로 변경하고 이들 다항식을 순차적으로 더하여 임계값과 비교한다. 다항식을 순차적으로 더한 값이 임계값 보다 큰 경우에는 남아있는 연산을 생략할 수 있으므로 연산량을 감소시킬 수 있다. 다항식을 모두 더해도 임계값 보다 작은 경우에는 이를 새로운 임계값으로 교체하여 연산량을 더 줄일 수 있다.

제안한 기법의 성능을 기존의 MUSIC 알고리즘과 비교하여, 제안한 기법과 기존 MUSIC 알고리즘의 입사각 추정 성능은 동일하지만, 1.15배의 연산 속도 향상을 얻을 수 있었다. 제안한 방법은 적은 연산량으로 기존의 MUSIC 알고리즘과 동일한 성능을 얻을 수 있는 효율적인 방법이다. 또한 기존 MUSIC 알고리즘의 연산 속도를 개선한 root-MUSIC 알고리즘의 경우에는 적용할 수 있는 배열 안테나의 형태가 ULA로 제한되었으나, 제안한 방법은 배열 안테나의 형태에 관계없이 적용이 가능하다. 따라서 제안한 기법을 이용하면 기존의 MUSIC에 비하여 저가의 하드웨어로 시스템을 구현할 수 있다.

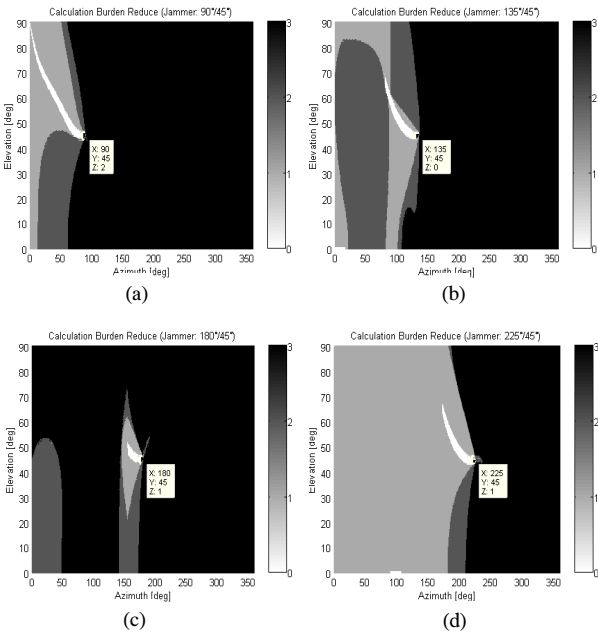


그림 4. 제안한 기법의 연산 감소량 (a) 방위각 90°, (b) 방위각 135°, (c) 방위각 180°, (d) 방위각 225°  
 Fig. 4. Calculation burden decrement of proposed method (a) azimuth 90° (b) azimuth 135° (c) azimuth 180° (d) azimuth 225°

4.2.2. 입사각 추정 성능

재머의 입사각에 따른 두 알고리즘의 추정 성능을 RMSE(Root Mean Squares Error)로 그림 5에 나타냈다. 두 알고리즘의 입사각 RMSE는 동일한 값을 가진다. 이로부터 기존 MUSIC 알고리즘의 입사각 추정 성능과 제안한 기법의 입사각 추정 성능은 동일하다는 사실을 알 수 있다.

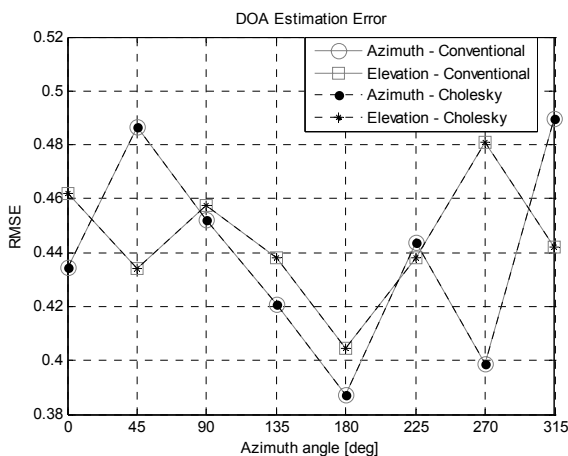


그림 5. 방위각에 따른 입사각 추정 성능 비교  
 Fig. 5. DOA Estimation Error comparison upon jammer's azimuth angle

References

- [1] I. K. Rhee, I. K. Choi, Y. J. Kim, C. S. Kang, "A Study on Performance Analysis of High Resolution DOA Method based on MUSIC", *Journal of Korea Information and Communications Society*, vol. 19, no. 2, pp. 345-353, Feb. 1994.
- [2] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *IEEE Trans. AP*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar 1986.
- [3] Peter Stoica, Randolph L. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, Prentice Hall, pp. 155-163, 1997.
- [4] T. Lee, "Efficient wideband source

localization using beamforming invariance technique”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 6, pp. 1376-1387, June 1994.

- [5] J. Capon, “High-resolution frequency-wave number spectrum analysis”, *Proceeding of the IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.
- [6] D. H. Johnson, “The application of spectral estimation method to bearing estimation problem”, *Proceeding of the IEEE*, vol. 70, no. 9, pp. 1018-1028, Sept. 1982.
- [7] Arthur J. Barabell, “Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms”, *ICASSP '83*, vol. 8, pp. 336-339, Apr. 1983.
- [8] Gibson, J., “On reflection coefficients and the Cholesky decomposition”, *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 25, no. 1, pp. 93-96, Feb. 1977.
- [9] Changsoon Choi, “Optimized Implementation of Multiuser Detector based on Cholesky Approximation”, M. S. Dissertation, Sogang University, Aug. 2005.

**최 윤 섭 (Yun Sub Choi)**



2010년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업  
 2010년 3월~현재 충남대학교 전자공학과 석박통합과정  
 <관심분야> GNSS, CRPA, Anti-Jamming

**진 미 현 (Mi Hyun Jin)**



2010년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업  
 2010년 3월~현재 충남대학교 전자공학과 석박통합과정  
 <관심분야> GNSS, Anti-Jamming

**최 현 호 (Heon Ho Choi)**



2008년 2월 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업  
 2010년 2월 충남대학교 전자공학과 석사  
 2010년 3월~현재 충남대학교 전자공학과 박사과정  
 <관심분야> GNSS, CDGPS,

Anti-Jamming

**이 상 정 (Sang Jeong Lee)**



1979년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업  
 1981년 2월 서울대학교 제어계측공학과 석사  
 1987년 2월 서울대학교 제어계측공학과 박사  
 1987년 3월~현재 충남대학교

전기정보통신공학부 교수  
 <관심분야> 강인제어, GNSS, 항법 및 산업제어

**박 찬 식 (Chansik Park)**



1984년 2월 서울대학교 제어계측공학과 졸업  
 1986년 2월 서울대학교 제어계측공학과 석사  
 1997년 2월 서울대학교 제어계측공학과 박사  
 1997년 3월~현재 충북대학교

전자정보대학 교수  
 <관심분야> GNSS, SDR, AJ, ITS and WSN