

# 경량 빔포밍을 위한 2차원 배열의 RF 체인 개수에 따른 도래각 추정 성능 분석

김호재, 김동규\*, 노혜민, 김형남<sup>©</sup>  
부산대학교, 스마트엠투엠\*

hnkim@pusan.ac.kr<sup>©</sup>

## Analysis of DOA Estimation according to the Number of RF Chains in a Two-Dimensional Array for Lightweight Beamforming

Ho Jae Kim, Dong-Gyu Kim\*, Hea-Min Noh, Hyoung-Nam Kim<sup>©</sup>  
Pusan National Univ., Smart M2M

### 요약

도래각 추정은 레이더, 소나 및 통신과 같은 다양한 응용 분야에서 사용되며, 미래 기술 발전에 따라 고해상도 디지털 빔포밍 방식의 수요가 증가하면서 도래각 추정 알고리즘의 중요성이 부각되고 있다. 고해상도 디지털 빔포밍 방식을 사용하기 위해서는 안테나 개수의 증가가 불가피하며 다수의 RF (radio frequency) 체인이 요구된다. 그러나, 하드웨어 구현 상에서 공간과 복잡도에 제한이 있는 경우는 그러한 요구 사항을 수용하는 데에 어려움이 발생한다. 특히 정보보안 분야에서 도래각 추정 기술을 활용하기 위해서는 다양한 신호가 혼재된 상황에서도 보안상 문제가 발생하지 않는 정도의 하드웨어 크기가 필요하기 때문에, RF 사용이 제한된다. 이 경우에 이러한 제한이 도래각 추정에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 성능 분석이 필요하다. 이에 본 논문에서는 4 X 4 평면 사각 배열에서 RF 체인 개수에 따른 MUSIC (MUltiple Signal Classification) 알고리즘 및 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 도래각 추정 성능을 분석을 진행하였으며, 2개의 신호원을 사용할 경우 3도 이내, 3개의 신호원을 사용할 경우 7도 이내의 인접한 신호원은 구분이 되지 않는 것을 확인하였다.

### I. 서론

도래각 추정은 신호의 입사각을 추정하는 데 필요하며, 레이더, 소나 및 통신과 같은 다양한 응용 분야에서 사용된다. 5G 및 미래 기술 발전에 따라 고해상도 디지털 빔포밍 방식이 사용되면서 도래각 추정 알고리즘의 중요성이 부각되고 있다. 통신 분야에서 빔포밍 기술은 밀리미터파 기반 디지털 빔포밍 기술의 비용 문제 및 하드웨어 측면에서 RF (radio frequency) 체인이 다수 존재해야 하는 단점으로 인해 시스템 하드웨어 구현 측면의 경량화 방법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 국외에서는 최적 RF 체인 설정 및 한정된 RF 체인에 따른 성능 열화를 감소시키기 위한 기술이 상당 부분 진척되었고 [1], 국내에서도 삼성전자를 필두로 빔포밍 기술이 세계적인 수준으로 진행되었으며, 미국 통신사인 Verizon 의 5G 상용화 서비스를 위한 장비를 삼성전자에서 공급하기로 발표하였다 [2].

하지만, 기술적으로 상용화 단계에 근접한 통신 분야와 달리 정보보안 분야에서는 주파수 또는 신호원의 입사각 등의 사전정보가 전무한 상황을 고려해야 하므로 정밀도가 낮아지고 복잡도가 더욱 증가하게 되며 다양한 신호가 혼재되어 있는 상황이 된다. 따라서, 이러한 환경에서도 경량화된 빔포밍 기술을 사용하기 위해서는 한정된 RF 체인에서의 초분해능 기반 정밀 도래각 추정 성능의 분석이 필요하다. 초분해능 기반 정밀 도래각 추정 방식인 MUltiple Signal Classification (MUSIC) 알고리즘의 경우 모든 안테나의 신호 정보가 필요하므로 [3], 안테나 개수만큼 RF 체인이 필요하다. 그러나, 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍을 동시에 사용하는 하이브리드 빔포밍에서는 위상 천이기로 빔형성이 가능하며, 설정한 빔 개수만큼의 RF 체인만 있다면 도래각 추정이 가능하다 [4]. 그러나, 빔 형성 개수에 따른 성능 저하가 발생한다. 이에, 본 논문에서는 4 X 4 평면 사각 배열에서 RF 체인 개수에 따른 디지털

빔포밍 MUSIC 알고리즘 및 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 도래각 추정 성능 분석에 대한 연구를 진행한다.

### II. 2차원 배열의 MUSIC 알고리즘 [3]

MUSIC 알고리즘은 높은 공간 해상도를 가지는 기술로서 신호의 부공간과 잡음의 부공간이 서로 직교하는 성질을 이용한다. 먼저 MUSIC 알고리즘에 사용되는 수신 신호의 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^D \mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}_i) s_i(t) + \mathbf{n}(t). \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{x}$ 는 수신 신호 벡터를 나타내며,  $D$ 는 신호원의 수,  $s_i$  및  $\mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}_i)$ 는  $i$ 번째 신호원의 신호 및 조향 벡터들로 이루어진 행렬,  $\mathbf{n}$ 은 잡음 벡터를 나타낸다.  $\boldsymbol{\varphi}$ 는 방위각 및 고도각의 함수로 나타낼 수 있으며,  $\boldsymbol{\varphi}$  및 조향 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}) = [\mathbf{a}_0(\boldsymbol{\varphi}), \mathbf{a}_1(\boldsymbol{\varphi}), \dots, \mathbf{a}_Q(\boldsymbol{\varphi})]^T. \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_q(\boldsymbol{\varphi}) = e^{j2\pi m \varphi_y} [1, e^{j2\pi \varphi_x}, \dots, e^{j2\pi(P-1)\varphi_x}]. \quad (3)$$

여기서  $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_x, \varphi_y]^T$ ,  $\varphi_x = (d_x/\lambda) \sin \phi \cos \theta$ ,  $\varphi_y = (d_y/\lambda) \sin \phi \sin \theta$ 이며,  $\lambda$ 는 파장을,  $d_x, d_y$ 는 평면 사각 배열에서  $x$ 축의 거리 및  $y$ 축의 거리를 나타낸다.  $P, Q$ 는 평면 사각 배열에서 각 축의 안테나 개수를 나타내며,  $\lambda$ 는 신호의 파장을 나타낸다.

앞서 정의한 수신 신호에서 잡음 행렬  $\mathbf{n}$ 을 AWGN (additive white Gaussian noise)이라고 가정하면, 수신 신호의 공분산 행렬(covariance matrix)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}_X = \mathbf{A}(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{R}_S\mathbf{A}(\boldsymbol{\varphi}) + \sigma_n^2\mathbf{I}. \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{A}(\boldsymbol{\varphi}) = [\mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}_1), \mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}_2), \dots, \mathbf{a}(\boldsymbol{\varphi}_D)]^T$ ,  $\mathbf{R}_S$  는 신호원  $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$  의 공분산 행렬,  $\sigma_n^2$  은 잡음의 전력을 나타낸다. 신호원 공분산 행렬  $\mathbf{R}_S$  의 rank 는 신호 부공간의 차원과 같으며, 이는 수신 신호의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_X$  의 rank 와 동일하다. 이를 이용하여  $\mathbf{R}_X$  를 고유값 분해(eigenvalue decomposition)를 진행하면, 고유벡터  $\mathbf{U} = [\mathbf{U}_S \mathbf{U}_n]$  는  $D$  차원의 신호 부공간  $\mathbf{U}_S$  와  $(PQ - D)$  차원의 잡음 부공간  $\mathbf{U}_n$  으로 분할할 수 있다. 신호 부공간과 잡음 부공간이 직교하는 성질과 조향 벡터가 신호 부공간에 존재하는 성질을 이용하여 2 차원 MUSIC 스펙트럼을 다음과 같이 정의된다.

$$P(\boldsymbol{\varphi}) = \frac{1}{|\mathbf{a}^H(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{U}_n|^2}. \quad (5)$$

### III. 2 차원 배열의 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘 [5]

MUSIC 알고리즘은 안테나 개수만큼 RF 체인이 필요하며, 안테나 개수의 제곱만큼의 연산량이 요구된다.  $\mathbf{x}$  신호를  $K$  샘플만큼 수집할 경우 MUSIC 알고리즘의 연산 복잡도는  $O(P^2Q^2K)$  가 된다. 그러나, 아날로그 빔포밍을 이용하여 안테나 개수  $PQ$  개보다 적은 개수의 빔  $T$  개를 설정하면 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 연산 복잡도는  $O(T^2K)$  가 되며, 수식적으로 디지털 빔포밍의 beamspace MUSIC 알고리즘과 동일하다. 두 알고리즘의 차이는 하이브리드 빔포밍 MUSIC 의 경우 위상 천이기를 통하여 아날로그단에서 가중 벡터가 생성되며, beamspace MUSIC 의 경우 디지털단에서 가중 벡터를 생성하여 빔을 형성하는 것이다. 수신 신호 모델은 식 (1)에서 빔형성 가중치 벡터인  $\mathbf{B}_{hb}$ 와 내적한 결과와 같으며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{hb}(t) = \mathbf{B}_{hb}^H \mathbf{x}(t). \quad (6)$$

MUSIC 알고리즘과 마찬가지로 수신 신호  $\mathbf{x}_{hb}$  의 공분산 행렬  $\mathbf{R}_{X,hb}$  을 고유값 분해를 진행하여 잡음 부공간  $\mathbf{U}_{n,hb}$  계산한 후, 이를 이용하여 최종적인 하이브리드 빔포밍 MUSIC 의 스펙트럼은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{hb}(\boldsymbol{\varphi}) = \frac{1}{|\mathbf{a}^H(\boldsymbol{\varphi})\mathbf{B}_{hb}\mathbf{U}_{n,hb}|^2}. \quad (5)$$

### IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 4 X 4 평면 사각 배열에서 RF 체인 개수에 따른 MUSIC 알고리즘 및 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 도래각 추정 성능 분석을 진행하였다. 신호원의 변조는 QPSK (quadrature phase shift keying)를, 전송 주파수는 1.5 GHz 를 사용하였다. 안테나 간 간격은 공간 엘리어싱이 발생하지 않도록 하기 위해 0.1m 를 사용하였다. 3 차원에서 스펙트럼의 확인을 용이하게 하기 위해 (방위각, 고도각)을 그림 1 과 같이 (수평각, 수직각)으로 변경하여 실험을 진행하였다.

그림 2 는 RF 체인을 16 개 사용하여 수집한 신호의 MUSIC 스펙트럼을, 그림 3, 4 는 RF 체인을 각 9 개,

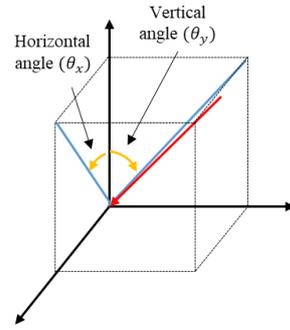


그림 1. 수평각 및 수직각

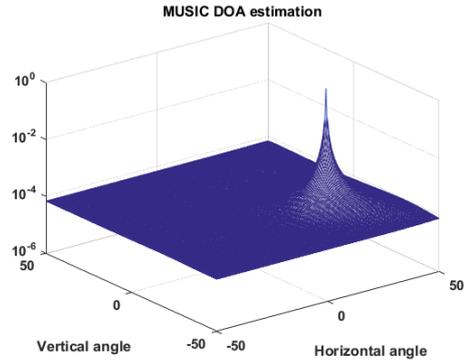


그림 2. MUSIC 알고리즘의 스펙트럼 결과: RF 체인 16 개

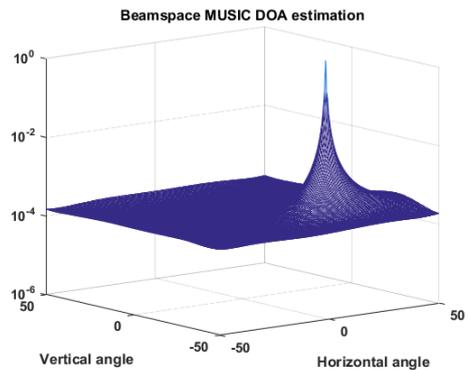


그림 3. 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 스펙트럼 결과: RF 체인 9 개

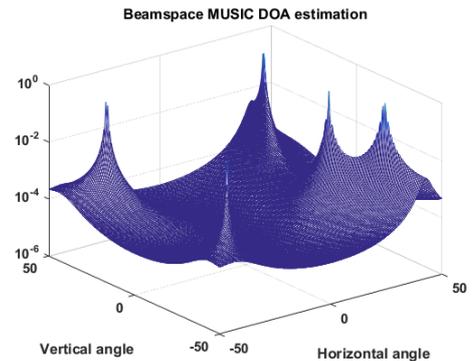


그림 4. 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 스펙트럼 결과: RF 체인 5 개

5 개를 사용하여 수집한 신호의 beamspace MUSIC 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 신호의 입사각은 (26, -15)로 설정하였으며, SNR 은 10 dB 로 설정하고 모의 실험을 진행하였다. 그림 2 의 MUSIC 스펙트럼의 경우 신호가 존재하지 않는 구간에서  $10^{-4}$  이하의 스펙트럼 값을 가지며, 그림 3 의 beamspace MUSIC 스펙트럼의 경우 신호가 존재하지 않는 구간에서  $10^{-4}$  이상의 스펙트럼 값을 가진다. 이는 RF 체인의 개수가 줄어들면서 수집 신호의 양이 줄어들기 때문에 성능 저하가 발생하나, 도래각 추정은 가능한 것을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 4 의 경우 도래각 추정이 되지 않는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 4 X 4 평면 사각 배열에서 신호원 수에 따른 RF 체인 개수에 따른 MUSIC 알고리즘 및 하이브리드 빔포밍 MUSIC 알고리즘의 도래각 추정 성능 분석에 대한 연구를 진행하였다. RF 체인 개수에 따라서 도래각 추정 결과가 다르게 나왔으며, 5 개 이하의 RF 체인을 사용한 경우 도래각 추정이 되지 않는 것을 확인하였다. RF 체인의 개수를 줄이더라도 도래각 추정이 가능한 것을 확인하였으며, 신호원 개수에 따른 성능 차이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## ACKNOWLEDGMENT

“이 논문은 2017 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B04035230)”

## 참 고 문 헌

- [1] S. Kuttly, and D. Sen. “Beamforming for millimeter wave communications: an inclusive survey,” IEEE Communications surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 949-973, second quarter 2016.
- [2] 장승현, 김명돈, “5G 핵심 부품 개발 동향,” TTA Journal, 175 권, pp. 77-83, 2018 년 1 월.
- [3] R. O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” IEEE Trans. AP, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [4] 이주용, 이종원, 유종호, 금승원, 홍성철, “B5G 이동통신을 위한 전디지털 빔포밍 기술,” 주간기술동향 1847 호, pp. 1-15, 2018 년 5 월
- [5] Odachi, Noriaki, Hiroki Shoki, and Yasuo Suzuki. "High-speed DOA estimation using beamspace MUSIC." VTC2000-Spring. 2000 IEEE 51st Vehicular Technology Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37026). Vol. 2. IEEE, May. 2000.