



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 2월
석사학위 논문

빔공간 기반 효율적인
신호 개수 추정 알고리즘 연구

조선대학교 대학원

전자공학과

박희선

빔공간 기반 효율적인 신호 개수 추정 알고리즘 연구

A Study on the Efficient Algorithm for Estimating
the Number of Signals Based on Beamspace

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

전자공학과

박희선

빔공간 기반 효율적인 신호 개수 추정 알고리즘 연구

지도교수 황 석 승

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

박 희 선

박희선의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김윤학 (인)

위원 조선대학교 교수 황석승 (인)

위원 조선대학교 교수 이충규 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

목 차

List of Tables	v
List of Figures	vi
ABSTRACT	viii
제1장 서론	1
제1절 연구 배경 및 내용	1
제2장 신호 모델	4
제1절 배열 안테나 모델	4
1. 등간격 선형 배열 안테나	4
2. 등간격 사각 배열 안테나	5
3. 등간격 원형 배열 안테나	6

제2절 수신신호 모델	7
1. 등간격 선형 배열 안테나의 배열 응답 행렬	7
2. 등간격 사각 배열 안테나의 배열 응답 행렬	8
3. 등간격 원형 배열 안테나의 배열 응답 행렬	9
제3절 빔공간 출력신호 모델	10
1. 등간격 선형 배열 안테나 기반 빔공간 가중치 행렬	10
2. 등간격 사각 배열 안테나 기반 빔공간 가중치 행렬	11
3. 등간격 원형 배열 안테나 기반 빔공간 가중치 행렬	12
제3장 신호 개수 추정을 위한 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘	13
제1절 샘플 공분산 행렬	13
제2절 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘	14
1. 빔공간 기반 AIC 알고리즘 기준식	14
2. 빔공간 기반 MDL 알고리즘 기준식	15

제4장 컴퓨터 시뮬레이션	16
제1절 등간격 선형 배열 안테나 기반 시뮬레이션	16
1. 수신신호 파라미터	16
2. 요소공간 및 빔공간 기반 신호 개수 추정	18
제2절 등간격 사각 배열 안테나 기반 시뮬레이션	22
1. 수신신호 파라미터	22
2. 요소공간 및 빔공간 기반 신호 개수 추정	24
제3절 등간격 원형 배열 안테나 기반 시뮬레이션	28
1. 수신신호 파라미터	28
2. 요소공간 및 빔공간 기반 신호 개수 추정	30
제4절 배열 안테나 형상에 따른 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘 성능 비교	34
1. 수신신호 파라미터	34
2. 등간격 선형 및 사각 배열 안테나가 적용된 빔공간 기반 AIC	36
3. 등간격 선형 및 사각 배열 안테나가 적용된 빔공간 기반 MDL	38

제5장 결론 및 향후 연구 41

REFERENCES 42

List of Tables

Table 4.1	Received signal parameters for uniform linear array antenna	17
Table 4.2	For uniform linear array antenna, criteria of element space AIC and MDL, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signals	21
Table 4.3	Received signal parameters for uniform rectangular array antenna	23
Table 4.4	For uniform rectangular array antenna, criteria of element space AIC and MDL, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signals	27
Table 4.5	Received signal parameters for uniform circular array antenna	29
Table 4.6	For uniform circular array antenna, criteria of element space AIC and MDL, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signals	33
Table 4.7	Received signal parameters for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna	35
Table 4.8	Criteria of beamspace AIC and MDL for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna	40

List of Figures

Figure 2.1	Structure of uniform linear array antenna	4
Figure 2.2	Structure of uniform rectangular array antenna	5
Figure 2.3	Structure of uniform circular array antenna	6
Figure 4.1	Spectrum of the received signal for uniform linear array antenna	17
Figure 4.2	For uniform linear array antenna, criteria of element space AIC and MDL versus the number of signal	19
Figure 4.3	Extended version of Figure 4.2	19
Figure 4.4	For uniform linear array antenna, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signal	20
Figure 4.5	Extended version of Figure 4.4	20
Figure 4.6	Spectrum of the received signal for uniform rectangular array antenna	23
Figure 4.7	For uniform rectangular array antenna, criteria of element space AIC and MDL versus the number of signal	25
Figure 4.8	Extended version of Figure 4.7	25
Figure 4.9	For uniform rectangular array antenna, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signal	26
Figure 4.10	Extended version of Figure 4.9	26
Figure 4.11	Spectrum of the received signal for uniform circular array antenna	29

Figure 4.12	For uniform circular array antenna, criteria of element space AIC and MDL versus the number of signal	31
Figure 4.13	Extended version of Figure 4.12	31
Figure 4.14	For uniform circular array antenna, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signal	32
Figure 4.15	Extended version of Figure 4.14	32
Figure 4.16	Spectrum of the received signal for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna	35
Figure 4.17	Criteria of beamspace AIC for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna	37
Figure 4.18	Extended version of Figure 4.17	37
Figure 4.19	Criteria of beamspace MDL for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna	38
Figure 4.20	Extended version of Figure 4.19	39

ABSTRACT

A Study on the Efficient Algorithm for Estimating the Number of Signals Based on Beamspace

Park, Heui Seon

Advisor : Prof. Hwang, Suk-seung

Department of Electronic Engineering,

Graduate School of Chosun University

In a modern wireless communication system such as an array antenna based beamformer or Location Based Service (LBS) composed of a plurality of antenna elements, it is important to accurately estimate the number of signals. As representative signal number estimation algorithms, there are Akaike Information Criterion (AIC) and Minimum Description Length (MDL) which are information theoretic criterion model, and the number of signals is determined using a reference value that minimizes each criterion. Although, as the number of antenna elements is increased, the accuracy of estimating the number of signals is improved, the computational complexity of the signal number counting algorithm is dramatically increased, because values of criteria for entire antenna elements should be calculated for finding their minimum. In order to improve this problem, in this paper, we propose a beamspace based AIC and MDL algorithm that efficiently estimates the number of signals by reducing the dimension of an array antenna. The proposed algorithm reduces the dimension by multiplying a received signal by beamspace weight matrix and then estimates the number of signals included in the received signal using the signal number estimation algorithm AIC and MDL. In addition, the performance of the proposed algorithm is evaluated and analyzed through computer simulation.

제1장 서론

제1절 연구 배경 및 내용

다수개의 안테나 요소로 구성된 배열 안테나 기반의 빔형성기 (Beamformer) [1,2], 또는 위치기반서비스 (Location Based Service, LBS) [3]와 같은 현대 무선 통신 시스템에서 사용자에게 데이터 송수신 등의 효율적인 통신 서비스를 제공하기 위해 정확한 신호의 개수 정보가 필요하다.

신호의 개수를 추정하는 다양한 방법이 존재하는데, 대표적으로 결정 이론적 접근방식과 정보 이론적 접근방식이 있다. 결정 이론적 접근방식의 경우 신호 개수를 추정하는 가장 오래된 방식으로 가설의 통계적 이론에 기반하여 신호의 개수를 추정하므로 추정 정확도가 다소 낮다는 단점이 있다 [4]. 따라서 결정 이론적 접근방식보다 정보 이론적 접근방식을 일반적으로 사용한다. 정보 이론적 접근방식은 최대 가능 추정치 (Maximum Likelihood)를 기반으로 한 방식으로 수신신호의 공분산 행렬 (Covariance Matrix)의 고유치 분해를 통해 얻어지는 각 고유값을 기준식에 적용하여 최소 기준값을 가지는 고유값의 인덱스를 신호의 개수로 결정한다 [5-7]. 정보 이론적 접근방식의 대표적인 알고리즘에는 AIC (Akaike Information Criterion) [8,9]와 MDL (Minimum Description Length) [10-12]이 있으며, 배열 안테나를 구성하는 안테나 요소의 개수가 증가할수록 추정성능이 향상된다 [13,14]. 하지만 사용되는 안테나 요소가 증가할수록 공분산 행렬 및 기준식 계산을 위한 연산량이 기하급수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 또한, 배열 안테나를 구성하는 안테나 요소의 개수에 비해 수신신호에 포함된 신호가 극히 적은 경우 정보 이론적 접근방식 알고리즘은 신호 개수를 추정하기 위한 효율성이 크게 저하된다.

본 논문은 다수의 안테나 요소를 사용할 경우 신호 개수 추정 알고리즘이 지니는 높은 계산 복잡도 문제를 해결하고 효율적으로 수신신호에 포함된 신호의 개수를 추정하기 위한 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘을 제안한다. 또한 기존의 요소공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘과 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘 간 추정성능을 비교한다. 해당 목표를 달성하기 위해 다음과 같이 연구를 수행하였다.

1. 신호 모델링

무선 통신 시스템에 사용되는 다양한 배열 안테나 중 보편적으로 사용되는 등간격 선형 배열 (Uniform Linear Array, ULA) 안테나 [15], 등간격 사각 배열 (Uniform Rectangular Array, URA) 안테나 [16,17], 등간격 원형 배열 (Uniform Circular Array, UCA) 안테나 [18,19]를 고려하고, 이를 적용한 수신신호 모델과 빔공간 처리가 적용된 빔공간 출력 모델을 제시한다.

2. 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘

요소공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘은 배열 안테나를 구성하는 안테나의 요소가 증가하면 추정성능 역시 증가하게 된다. 하지만 알고리즘 수행을 위해 모델링 되는 공분산 행렬의 차원이 증가하게 되고, 모든 안테나 요소에 대한 기준값을 계산하여야 하므로 알고리즘이 갖는 계산 부하가 급격히 증가한다. 추정성능이 크게 저하되지 않는 범위에서 요소공간을 빔공간으로 축소시킨다면 전체적인 배열 안테나의 차원을 줄일 수 있으며 [20,21], 이로 인해 연산량 감소 효과를 얻을 수 있다 [22,23]. 따라서 본 논문에서는 빔공간 처리를 통해 축소된 차원을 갖는 빔공간 출력 모델을 적용한 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 차원 축소를 통해 연산량에 대한 계산 복잡도를 크게 개선하였다.

3. 요소공간과 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘 성능 비교

정보 이론적 접근방식의 신호 개수 추정 알고리즘은 기본적으로 요소공간에서 동작하도록 설정되어 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 요소공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘과 제안한 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘의 신호 개수 추정에 대한 성능평가를 진행하였다. 제안한 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘의 성능을 비교하기 위해 다양한 시나리오를 설정하고, 해당 시나리오를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 신호 개수 추정성능을 비교하였다.

4. 배열 안테나 형상에 따른 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘의 성능평가

제안한 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘은 앞서 고려한 각 배열 안테나를 적용한 경우 정확히 신호 개수를 추정하였다. 이에 본 논문에서는 배열 안테나에 따른 추정성능을 평가하고자 선형 배열 안테나와 사각 배열 안테나를 각각 적용하여 제안한 알고리즘의 배열 안테나 형상에 대한 신호 개수 추정성능을 평가하였다.

제2장 신호 모델

본 장은 보편적으로 사용되는 선형, 평면 배열 안테나 구조를 간략히 설명하고, 신호와 잡음이 포함된 요소공간 수신신호 모델과 각 안테나 배열에 대한 수학적 모델 [24]을 소개한다. 또한, 요소공간 수신신호 모델에 빙공간 가중치 행렬을 곱해 축소된 차원을 갖는 빙공간 출력신호 모델을 제시한다.

제1절 배열 안테나 모델

본 절은 본 연구에서 고려한 세 가지 형태의 배열 안테나 모델을 소개한다. 등간격 선형 배열 안테나, 등간격 사각 배열 안테나, 등간격 원형 배열 안테나가 고려되었고, 해당 안테나의 기본 구조에 관해 설명한다.

1. 등간격 선형 배열 안테나

등간격 선형 배열 안테나는 하나의 축에 일정한 간격으로 배치된 안테나 요소로 구성된다. 안테나를 구성하기 위한 구조가 매우 간단하지만, 안테나 요소가 놓인 축의 방향에 따라 고도각 (elevation angle, θ) 혹은 방위각 (azimuth angle, ϕ)만 추정할 수 있는 단점이 있다. M 개의 안테나 요소가 d 만큼의 동일한 간격으로 배치된 등간격 선형 배열 안테나의 구조는 Figure 2.1과 같다.

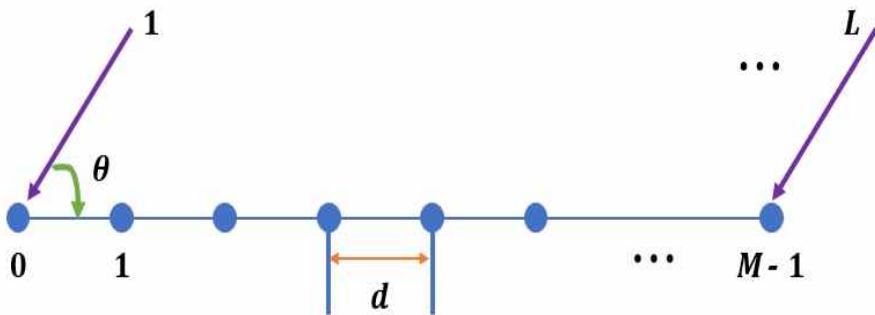


Figure 2.1 Structure of uniform linear array antenna

2. 등간격 사각 배열 안테나

등간격 사각 배열 안테나는 평면 배열 안테나의 한 종류로 등간격 선형 배열 안테나의 1차원 도래각 추정의 단점을 보완하기 위해 제안되었다. 고도각과 방위각 모두 추정이 가능하며, 등간격 선형 배열 안테나에 비해 명확한 도래각 추정 성능을 갖는다 [25,26]. $M(M = M_x \times M_y)$ 개의 안테나 요소가 동일한 d 간격으로 배치된 등간격 사각 배열 안테나의 구조는 Figure 2.2와 같다.

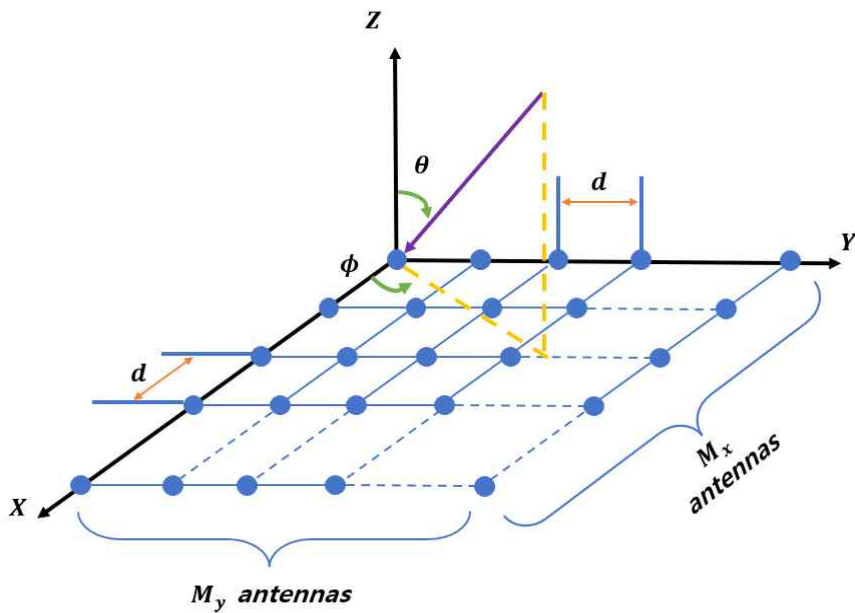


Figure 2.2 Structure of uniform rectangular array antenna

3. 등간격 원형 배열 안테나

등간격 원형 배열 안테나는 등간격 사각 배열 안테나와 마찬가지로 평면 배열 안테나의 한 종류이며, 엣지 요소가 없으므로 빔형성에 있어 빔 모양의 큰 변화 없이 배열 평면의 전 방위각으로 빔을 스캔할 수 있다 [27]. r 의 반경을 가지는 원 주위에 ϕ_m 만큼의 간격으로 균등하게 이격된 M 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 원형 배열 안테나의 구조는 Figure 2.3과 같다.

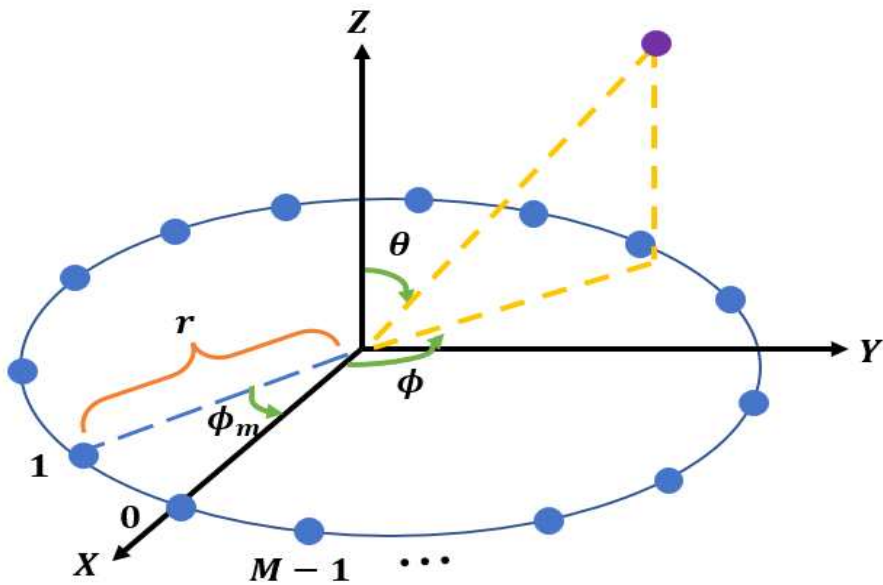


Figure 2.3 Structure of uniform circular array antenna

제2절 수신신호 모델

본 절은 1절에서 소개된 각 배열 안테나로 입사하는 다수의 신호와 잡음이 포함된 수신신호 모델을 제시한다. M 개의 안테나 요소로 구성된 배열 안테나로 신호와 잡음을 포함한 L 개의 신호가 입사한다고 가정하면, 샘플 인덱스 k 에 대한 요소공간 수신신호 모델은 식 (2.1)로 정의된다.

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (2.1)$$

식 (2.1)에서 \mathbf{A} 는 $M \times L$ 크기의 배열 응답 행렬로 배열 안테나의 구조에 따라 다르게 적용되며 다음 항에서 자세히 다루도록 한다. $\mathbf{s}(k)$ 는 $L \times 1$ 크기의 신호 벡터, $\mathbf{n}(k)$ 는 iid (independent and identically distributed) 특성을 가지는 $M \times 1$ 크기의 AWGN (Addictive White Gaussian Noise) 벡터이다.

1. 등간격 선형 배열 안테나의 배열 응답 행렬

Figure 2.1의 구조를 가지는 M 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 선형 배열 안테나에 L 개의 신호가 입사한다고 가정하면 $M \times L$ 크기의 어레이 응답 행렬 \mathbf{A} 는 식 (2.2)와 같이 정의된다 [15].

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin(\theta_1)} & \cdots & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin(\theta_L)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j(M-1)\frac{2\pi}{\lambda}d\sin(\theta_1)} & \cdots & e^{-j(M-1)\frac{2\pi}{\lambda}d\sin(\theta_L)} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 λ 는 파장, d 는 안테나 요소의 간격, θ_l 은 l 번째 신호의 입사각을 나타낸다.

2. 등간격 사각 배열 안테나의 배열 응답 행렬

Figure 2.2의 구조를 가지는 $M(M = M_x \times M_y)$ 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 사각 배열 안테나에 L 개의 신호가 입사한다고 가정하면, $M \times L$ 크기의 배열 응답 행렬 \mathbf{A} 는 식 (2.3)과 같이 정의된다 [16,17].

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 1 & \cdots & 1 \\
 e^{-jx_1} & \cdots & e^{-jx_L} \\
 \vdots & \ddots & \vdots \\
 e^{-j(M_x-1)x_1} & \cdots & e^{-j(M_x-1)x_L} \\
 e^{-j\gamma_1} & \cdots & e^{-j\gamma_L} \\
 e^{-j(x_1+\gamma_1)} & \cdots & e^{-j(x_L+\gamma_L)} \\
 \cdots & \ddots & \vdots \\
 e^{-j((M_x-1)x_1+(M_y-1)\gamma_1)} & \cdots & e^{-j((M_x-1)x_L+(M_y-1)\gamma_L)}
 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

식(2.3)에서 x_i 과 γ_i 은 각각 식 (2.4)와 식 (2.5)와 같이 정의된다.

$$x_i = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \sin\theta_i \cos\phi_i \quad (2.4)$$

$$\gamma_i = 2\pi \left(\frac{d}{\lambda} \right) \sin\theta_i \sin\phi_i \quad (2.5)$$

식 (2.4)와 식 (2.5)에서 θ_i 와 ϕ_i 는 i 번째 신호에 대한 고도각과 방위각을 나타낸다.

3. 등간격 원형 배열 안테나의 배열 응답 행렬

Figure 2.3의 구조를 가지는 M 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 원형 배열 안테나에 L 개의 신호가 입사한다고 가정하면 $M \times L$ 크기의 배열 응답 행렬 \mathbf{A} 는 식 (2.6)과 같이 정의된다 [18,19].

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r \sin\theta_1 \cos(\phi_1 - \gamma_0)} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r \sin\theta_L \cos(\phi_L - \gamma_0)} \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r \sin\theta_1 \cos(\phi_1 - \gamma_1)} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r \sin\theta_L \cos(\phi_L - \gamma_1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r \sin\theta_1 \cos(\phi_1 - \gamma_{(M-1)})} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r \sin\theta_L \cos(\phi_L - \gamma_{(M-1)})} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

식 (2.6)에서 θ_l 과 ϕ_l 는 l 번째 신호에 대한 고도각과 방위각, r 은 배열 안테나의 반지름, $\gamma_m (m = \{0, 1, \dots, M-1\})$ 은 m 번째 안테나 요소의 위치를 나타낸다.

제3절 빔공간 출력신호 모델

본 절은 1절에서 소개한 배열 안테나의 차원을 축소하기 위한 빔공간 출력신호 모델을 제안한다. 배열 안테나의 차원 축소는 요소공간 수신신호 모델에 빔공간 가중치 행렬을 곱해줌으로써 가능하고 신호의 개수(L)보다 크고, 요소공간(M)보다 작은 임의의 $B(M > B > L)$ 차원으로 축소할 수 있다. 축소한 빔공간 출력신호 모델은 식 (2.7)로 정의된다 [28,29].

$$\mathbf{x}_B(k) = \mathbf{W}_B^H \mathbf{x}(k) \quad (2.7)$$

식 (2.7)에서 \mathbf{W}_B 는 $M \times B$ 크기의 빔공간 가중치 행렬로 각 배열 안테나를 기반으로 다르게 모델링되며 다음 항에서 자세히 다루도록 한다. 빔공간 처리를 통해 줄어든 차원은 신호 개수 추정 시 각 알고리즘의 기준값 계산에 영향을 미치며 줄어든 차원만큼 계산량 감소 효과를 갖기 때문에 효율적으로 수신신호에 포함된 신호의 개수를 추정할 수 있다.

1. 등간격 선형 배열 안테나 기반 빔공간 가중치 행렬

M 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 선형 배열 안테나의 빔공간 가중치 행렬은 식 (2.8)로 정의된다 [30].

$$\mathbf{W}_B = \frac{1}{\sqrt{M}} \left[e^{-j \left(m - \frac{M-1}{2} \right) \left(\psi_c - (b - \text{mid}(b)) \frac{2\pi}{M} \right)} \right], \quad (2.8)$$

$$m = [0, \dots, M-1], b = [1, \dots, B]$$

식 (2.8)에서 $\text{mid}(b)$ 는 b 의 중앙값을 의미하고, ψ_c 에 의해 중앙빔 (Center beam)을 조정할 수 있다.

2. 등간격 사각 배열 안테나 기반 빔공간 가중치 행렬

$M(M = M_x \times M_y)$ 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 사각 배열 안테나의 빔공간 가중치 행렬은 식 (2.9)로 정의된다 [31,32].

$$\mathbf{W}_B = \mathbf{W}_{B_y} \otimes \mathbf{W}_{B_x} \quad (2.9)$$

식(2.9)에서 \mathbf{W}_{B_x} 와 \mathbf{W}_{B_y} 는 각각 x 축과 y 축에 대한 빔공간 가중치 벡터를 의미하며, \otimes 는 크로네커 (Kronecker) 곱을 나타낸다. \mathbf{W}_{B_x} 와 \mathbf{W}_{B_y} 는 각각 식 (2.10)과 식 (2.11)로 정의된다.

$$\mathbf{W}_{B_x} = \frac{1}{\sqrt{(M_x)}} \left[e^{-j \left(m - \frac{M_x - 1}{2} \right) \left(\psi_c - (b - \text{mid}(b)) \frac{2\pi}{M_x} \right)} \right], \quad (2.10)$$

$$m = [0, \dots, M_x - 1], b = [1, \dots, B_x]$$

$$\mathbf{W}_{B_y} = \frac{1}{\sqrt{(M_y)}} \left[e^{-j \left(m - \frac{M_y - 1}{2} \right) \left(\psi_c - (b - \text{mid}(b)) \frac{2\pi}{M_y} \right)} \right], \quad (2.11)$$

$$m = [0, \dots, M_y - 1], b = [1, \dots, B_y]$$

식 (2.10)과 식 (2.11)에서 $\text{mid}(b)$ 는 b 의 중앙값을 의미하고, ψ_c 에 의해 중앙빔을 조정할 수 있다.

3. 등간격 원형 배열 안테나 기반 빔공간 가중치 행렬

M 개의 안테나 요소로 구성된 등간격 원형 배열 안테나의 빔공간 가중치 행렬은 식 (2.12)로 정의된다 [33,34].

$$\mathbf{W}_B^H = \mathbf{C}_v \mathbf{V}^H \quad (2.12)$$

식 (2.12)에서 \mathbf{C}_v 는 빔공간 가중치 행렬의 크기 조정을 위한 대각 스케일 행렬이며, \mathbf{V} 는 가중치 행렬이며 각각 식 (2.13)과 식 (2.14)로 정의할 수 있다.

$$\mathbf{C}_v = \text{diag} \{ j^{-B_m}, \dots, j^{-1}, 1, j^1, \dots, j^{B_m} \} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{V} = \sqrt{M} [\mathbf{w}_{-B_m} \vdots \dots \vdots \mathbf{w}_0 \vdots \dots \vdots \mathbf{w}_{B_m}] \quad (2.14)$$

식(2.14)에서 \mathbf{w}_b 는 위상 모드가 $b \in [-B_m, B_m]$ 인 정규화된 빔공간 가중치 행렬로 식 (2.15)로 정의된다.

$$\mathbf{w}_b^H = \frac{1}{M} \left[1, e^{j \frac{2\pi b}{M}}, \dots, e^{j \frac{2\pi b(M-1)}{M}} \right] \quad (2.15)$$

제3장 신호 개수 추정을 위한 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘

본 장은 2장에서 제시한 빙공간 출력신호 모델을 기반으로 계산 복잡도를 효율적으로 개선하기 위한 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘을 소개한다. 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘 수행을 위해 빙공간 출력신호 모델의 샘플 공분산 행렬을 계산하고, 이를 고유치 분해 (Eigenvalue Decomposition, EVD)하여 신호와 잡음에 대한 B 개의 고유값을 얻을 수 있다. 해당 고유치 값을 AIC 및 MDL 알고리즘의 기준식 계산에 활용하여 수신신호에 포함된 신호의 개수를 추정하게 된다. 다수의 안테나 요소를 사용할 경우, 안테나 요소에 해당하는 M 개의 고유값에 대한 기준식을 계산하기 때문에 알고리즘의 계산 복잡도가 매우 크게 증가하게 된다. 반면 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 경우 B 개의 고유값에 대한 기준식을 계산하기 때문에 요소공간 AIC 및 MDL 알고리즘에 비해 낮은 복잡도를 갖게 된다.

제1절 샘플 공분산 행렬

본 절은 2장에서 소개한 B 차원으로 축소된 빙공간 출력신호 모델을 기반으로 신호 개수 추정 알고리즘을 수행하기 위한 샘플 공분산 행렬을 식 (3.1)로 정의한다.

$$\mathbf{R}_B = E[\mathbf{x}_B(k)\mathbf{x}_B^H(k)] \quad (3.1)$$

샘플 공분산 행렬의 고유치 분해를 통해 총 B 개의 빙공간 고유값 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L, \dots, \lambda_B$)을 얻을 수 있는데, 이는 신호에 대한 L 개의 빙공간 고유값과 잡음에 대한 $B-L$ 개의 빙공간 고유값으로 분류된다. 분류된 고유값을 활용하여 AIC와 MDL 기준식을 계산한다.

제2절 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘

본 절은 효율적으로 신호의 개수를 추정할 수 있는 빙공간 기반 AIC와 MDL 알고리즘을 소개한다. AIC와 MDL 알고리즘은 1절에서 계산된 샘플 공분산 행렬의 고유값을 기준식 계산에 적용하여 수신신호에 포함된 신호의 개수를 결정하는 정보 이론 모델 차수 결정 기술이다 [35-38]. 두 알고리즘 모두 기준식을 최소화하는 고유값의 인덱스를 신호의 개수로 결정한다.

1. 빙공간 기반 AIC 알고리즘 기준식

수신신호에 포함된 신호의 개수를 추정하기 위한 빙공간 기반 AIC 기준식은 식 (3.2)와 같이 정의된다 [37,39].

$$AIC(L) = -2N \ln \left[\frac{\prod_{i=L+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-L} \sum_{i=L+1}^B \alpha_i \right]^{B-L}} \right] + 2L(2B-L) \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 $L = \{0, 1, \dots, B-1\}$ 의 값을 갖고, N 은 샘플 수를 나타내며 α_i 는 i 번째 고유값을 나타낸다. 식 (3.2)를 최소로 하는 L 값을 수신신호에 포함된 신호의 개수(\hat{L})로 추정한다.

2. 빙공간 기반 MDL 알고리즘 기준식

수신신호에 포함된 신호의 개수를 추정하기 위한 빙공간 기반 MDL 기준식은 식 (3.3)과 같이 정의된다 [37,39].

$$MDL(L) = -N \ln \left[\frac{\prod_{i=L+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-L} \sum_{i=L+1}^B \alpha_i \right]^{B-L}} \right] + \frac{1}{2} L(2B-L) \ln N \quad (3.3)$$

빙공간 기반 AIC 알고리즘과 마찬가지로, 식 (3.3)을 최소로 하는 L 값을 수신신호에 포함된 신호의 개수(\hat{L})로 추정한다.

빙공간 기반 AIC와 MDL 알고리즘 모두 수신신호에 포함된 신호의 개수는 각 기준을 최소화하는 L 값(\hat{L})으로 결정한다. 요소공간 기반 AIC와 MDL 알고리즘에서 신호 개수 추정성능은 일반적으로 MDL 알고리즘이 AIC 알고리즘보다 성능이 좋다 [4,40]. 그러나 MDL 알고리즘은 샘플 수가 충분하지 않거나, SNR이 상대적으로 낮은 경우 AIC 알고리즘보다 추정성능이 저하되는 경향을 보인다 [41]. 이는 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘도 동일하게 적용되며, 따라서 SNR과 샘플 개수 등의 조건에 따라 두 알고리즘을 상호 보완적으로 사용해야 한다.

제4장 컴퓨터 시뮬레이션

본 장은 3장에서 제시한 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 신호 개수 추정 성능평가에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제공한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 등간격 선형 배열 안테나, 등간격 사각 배열 안테나, 등간격 원형 배열 안테나를 고려하였으며, 각 배열 안테나에 대해 요소공간과 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 신호 개수 추정성능을 비교하였다.

제1절 등간격 선형 배열 안테나 기반 시뮬레이션

본 절은 등간격 선형 배열 안테나가 적용된 신호 개수 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 수신신호 파라미터와 시나리오를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 등간격 선형 배열 안테나를 구성하는 안테나 요소가 16개일 때, 요소공간 크기는 16, 빙공간 크기는 9라고 가정한다.

1. 수신신호 파라미터

본 항은 수신신호를 모델링 하기 위한 신호 파라미터를 제공한다. 수신신호에 포함된 신호는 각각 2개의 Continuous Wave (CW) 신호, 2개의 Frequency Modulation (FM) 신호, 1개의 Wideband (WB) 잡음신호로 구성되어 있다고 가정한다 [42]. 각 수신신호의 입사각 (Incidence angle), 중심 주파수 (Center frequency), 변조 지수 (Modulation index), 신호 대 잡음 비 (Signal to Noise Ratio, SNR)는 Table 4.1에 요약되어 있으며, 신호의 SNR은 시뮬레이션의 편의를 위해 10dB로 동일하다고 가정하였다. Figure 4.1은 등간격 선형 배열 안테나로 수신된 수신신호 스펙트럼을 나타낸다. Figure 4.1의 수신신호 스펙트럼을 통해 중심 주파수 0.1과 0.25의 CW신호, 중심 주파수 0.2와 0.45의 FM 신호, 중심 주파수 0.35의 WB 잡음신호가 포함된 총 5개의 수신신호를 확인할 수 있다.

Table 4.1 Received signal parameters for uniform linear array antenna

Signal	Incidence Angle($^{\circ}$)	Center Frequency	Modulation Index	SNR(dB)
CW	-50	0.1	-	10
CW	-20	0.25	-	10
FM	0	0.2	0.05	10
FM	20	0.45	0.05	10
WB	50	0.35	-	10

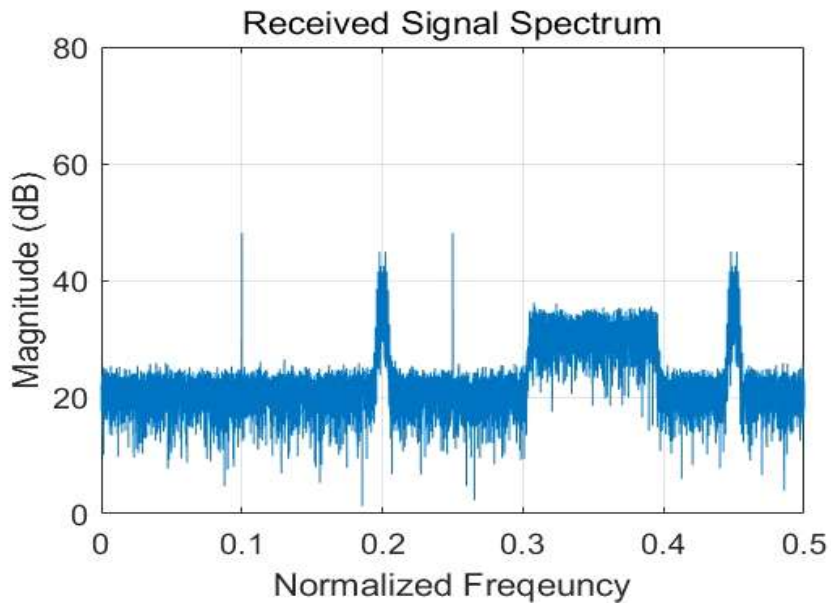


Figure 4.1 Spectrum of the received signal for uniform linear array antenna

2. 요소공간 및 빙공간 기반 신호 개수 추정

본 항은 등간격 선형 배열 안테나가 적용된 요소공간 기반 AIC 및 MDL, 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 신호 개수 추정에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다. 등간격 선형 배열 안테나의 안테나 요소 개수는 16개이고, 요소공간의 크기가 16일 경우 각 신호 개수(L)에 대한 요소공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 Figure 4.2에서 확인할 수 있다. Figure 4.2에서 신호의 개수(L)가 5 미만일 때의 기준값들은 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값을 확인할 수 없다. 따라서, Figure 4.2를 확대한 그래프를 Figure 4.3에 나타낸다. 명확한 확인을 위해 Table 4.2에 추정 신호 개수 대비 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값을 정리하였다. Figure 4.3과 Table 4.2의 결과를 통해 L 이 5일 때 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

마찬가지로 등간격 선형 배열 안테나의 안테나 요소 개수 16개이고, 빙공간의 크기가 9일 때, 각 신호 개수(L)에 대한 빙공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 Figure 4.4에서 확인할 수 있다. Figure 4.4에서 신호의 개수(L)가 5 미만일 때의 기준값들은 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값을 확인할 수 없다. 따라서, Figure 4.4를 확대한 그래프를 Figure 4.5에 나타낸다. 명확한 확인을 위해 Table 4.2에 추정 신호 개수 대비 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값을 정리하였다. Figure 4.5와 Table 4.2의 결과를 통해 L 이 5일 때 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

위의 결과로부터, 등간격 선형 배열 안테나가 적용된 요소공간과 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘이 기준값은 차이 나지만 동일한 신호 개수를 추정하였다. 그러나 동일한 추정성능을 가지면서 배열 안테나 및 공분산 행렬의 차원은 M 차원에서 B 차원으로 줄어들어 제안된 빙공간 기반 AIC 및 MDL 신호 개수 추정 알고리즘이 효율적이라고 할 수 있다.

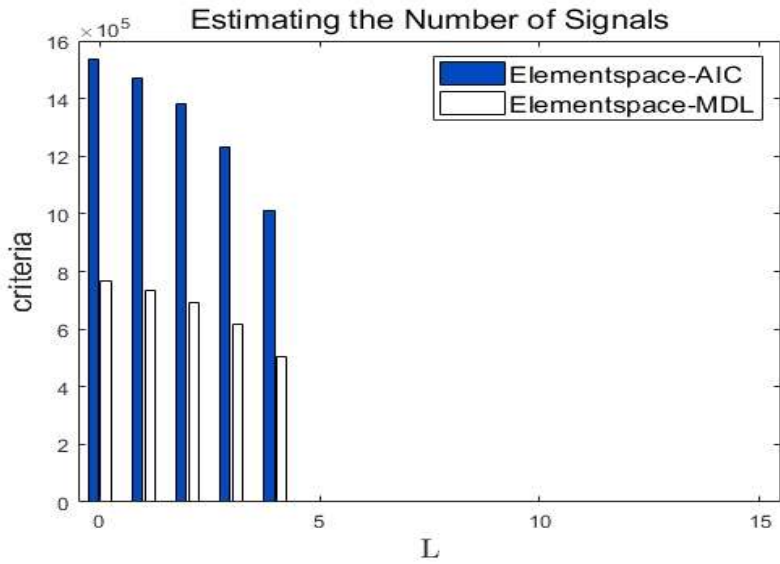


Figure 4.2 For uniform linear array antenna, criteria of element space AIC and MDL versus the number of signal

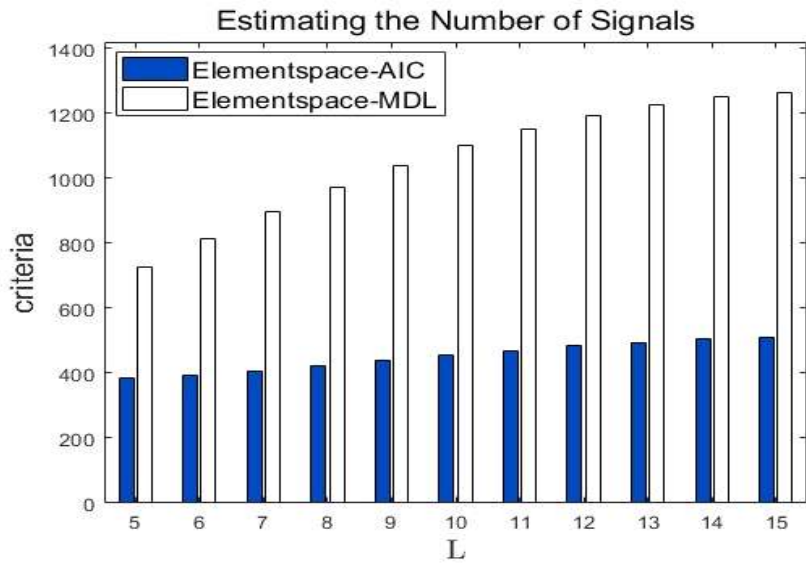


Figure 4.3 Extended version of Figure 4.2

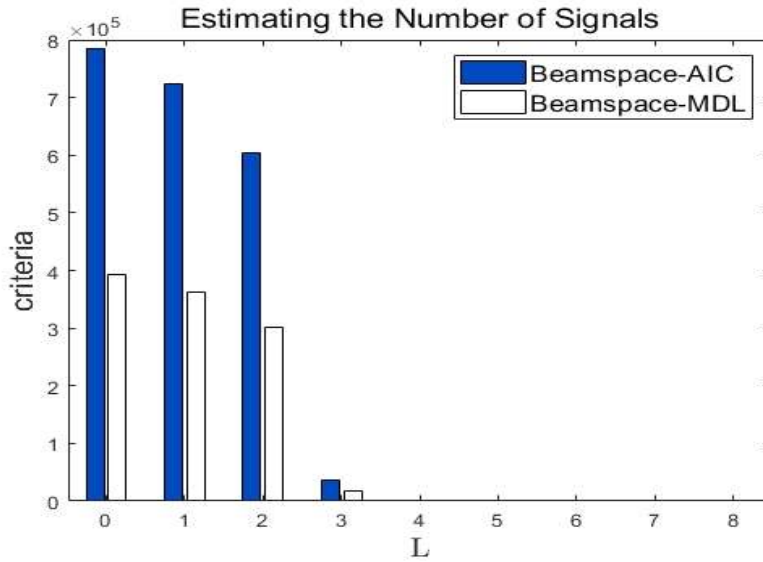


Figure 4.4 For uniform linear array antenna, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signal

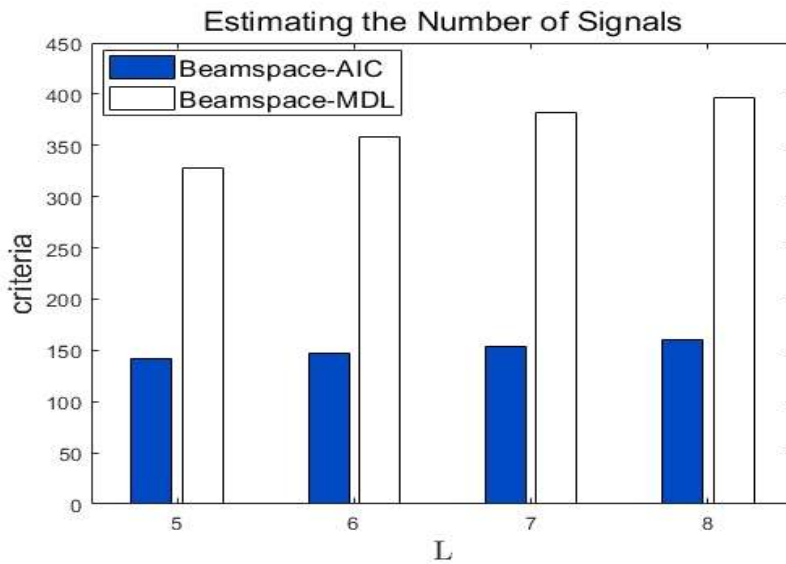


Figure 4.5 Extended version of Figure 4.4

Table 4.2 For uniform linear array antenna, criteria of element space AIC and MDL, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signals

L	Element space based AIC	Element space based MDL	Beamspace based AIC	Beamspace based MDL
0	1.5360×10^6	7.6802×10^5	7.8525×10^5	3.9263×10^5
1	1.4717×10^6	7.3597×10^5	7.2379×10^5	3.6196×10^5
2	1.3808×10^6	6.9066×10^5	6.034×10^5	3.0185×10^5
3	1.2321×10^6	6.1638×10^5	3.6941×10^4	1.8649×10^4
4	1.0119×10^6	5.0638×10^5	526.4553	485.1620
5	400.6093	735.3250	149.8778	332.5413
6	407.6980	822.0947	156.0590	363.3737
7	419.0843	903.0870	158.9507	384.6351
8	435.1344	978.4850	160	397.0491
9	450.1195	1.0454×10^3		
10	458.5458	1.1012×10^3		
11	473.4353	1.1522×10^3		
12	487.1778	1.1947×10^3		
13	493.4283	1.2276×10^3		
14	505.0162	1.2512×10^3		
15	510	1.2656×10^3		

제2절 등간격 사각 배열 안테나 기반 시뮬레이션

본 절은 등간격 사각 배열 안테나가 적용된 신호 개수 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 수신신호 파라미터와 시나리오를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 등간격 사각 배열 안테나를 구성하는 안테나 요소가 16개일 때, 요소공간의 크기는 16 (4×4), 빔공간 크기는 $9(3 \times 3)$ 라고 가정한다.

1. 수신신호 파라미터

본 항은 수신신호를 모델링 하기 위한 신호 파라미터를 제공한다. 수신신호에 포함된 신호는 각각 2개의 CW 신호, 1개의 FM 신호, 1개의 WB 잡음신호로 구성되어 있다고 가정한다. 각 수신신호의 고도각, 방위각, 중심 주파수, 변조 지수, 신호 대 잡음 비는 Table 4.3에 요약되어 있으며, 신호의 SNR은 시뮬레이션의 편의를 위해 10dB로 동일하다고 가정하였다. Figure 4.6의 수신신호 스펙트럼을 통해 중심 주파수 0.2와 0.45의 CW 신호, 중심 주파수 0.3의 FM 신호, 중심 주파수 0.1의 WB 잡음신호가 포함된 총 4개의 수신신호를 확인할 수 있다.

Table 4.3 Received signal parameters for uniform rectangular array antenna

Signal	Azimuth Angle(°)	Elevation Angle(°)	Center Frequency	Modulation Index	SNR(dB)
CW	30	-58	0.2	-	10
CW	-60	-58	0.45	-	10
FM	60	-58	0.3	0.05	10
WB	10	-58	0.1	-	10

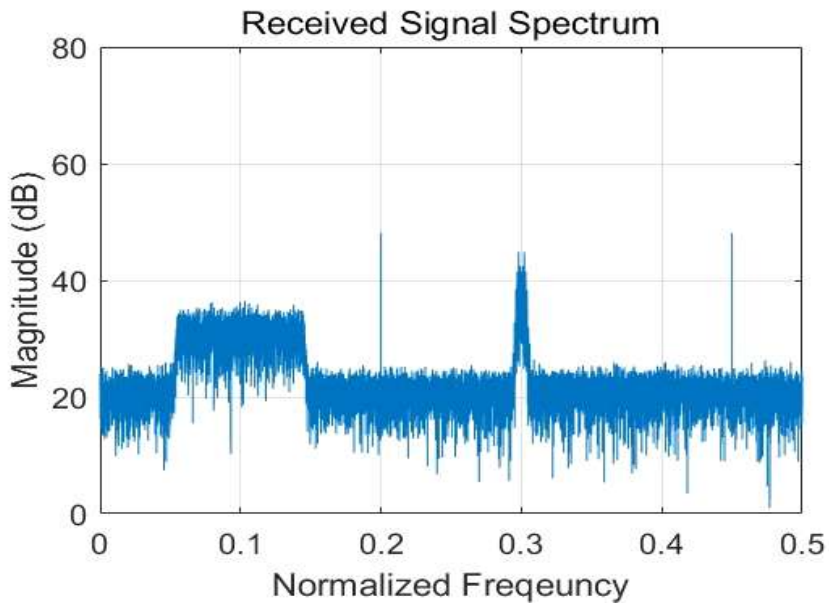


Figure 4.6 Spectrum of the received signal for uniform rectangular array antenna

2. 요소공간 및 빙공간 기반 신호 개수 추정

본 항은 등간격 사각 배열 안테나가 적용된 요소공간 기반 AIC 및 MDL, 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 신호 개수 추정에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다. 등간격 사각 배열 안테나의 안테나 요소 개수는 $16(4 \times 4)$ 개이고, 요소공간의 크기가 16일 경우 각 신호 개수(L)에 대한 요소공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 Figure 4.7에서 확인할 수 있다. Figure 4.7에서 신호의 개수(L)가 4 미만일 때의 기준값들은 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값을 확인할 수 없다. 따라서, Figure 4.7을 확대한 그래프를 Figure 4.8에 나타낸다. 명확한 확인을 위해 Table 4.4에 추정 신호 개수 대비 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값을 정리하였다. Figure 4.8과 Table 4.4의 결과를 통해 L 이 4일 때 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

마찬가지로 등간격 사각 배열 안테나의 안테나 요소 개수 16개이고, 빙공간의 크기가 $9(3 \times 3)$ 일 때, 각 신호 개수(L)에 대한 빙공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 Figure 4.9에서 확인할 수 있다. Figure 4.9에서 신호 개수(L)가 4 미만일 때의 기준값들은 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값을 확인할 수 없다. 따라서, Figure 4.9를 확대한 그래프를 Figure 4.10에 나타낸다. 명확한 확인을 위해 Table 4.4에 추정 신호 개수 대비 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값을 정리하였다. Figure 4.10과 Table 4.4의 결과를 통해 L 이 4일 때 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

위의 결과로부터, 등간격 사각 배열 안테나가 적용된 요소공간과 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘이 기준값은 차이 나지만 동일한 신호 개수를 추정하였다. 그러나 동일한 추정성능을 가지면서 배열 안테나 및 공분산 행렬의 차원은 $M(M_x \times M_y)$ 차원에서 $B(B_x \times B_y)$ 차원으로 줄어들어 제한된 빙공간 기반 AIC 및 MDL 신호 개수 추정 알고리즘이 효율적이라고 할 수 있다.

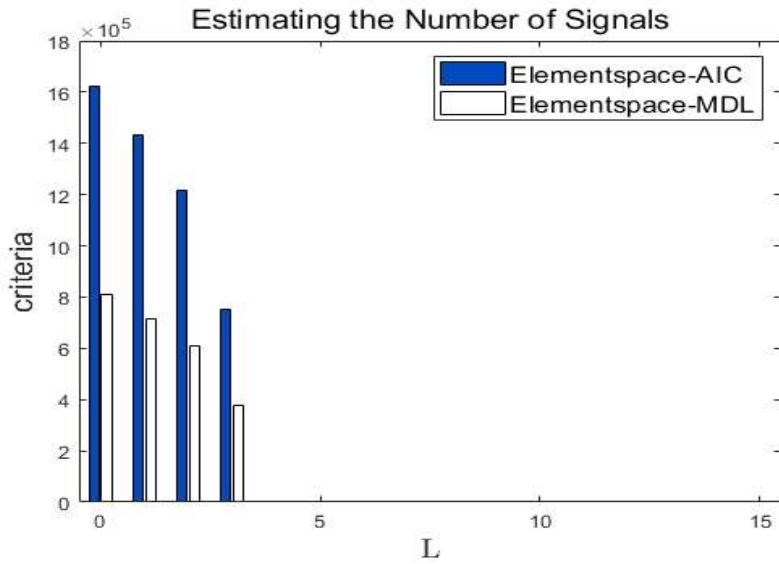


Figure 4.7 For uniform rectangular array antenna, criteria of element space AIC and MDL versus the number of signal

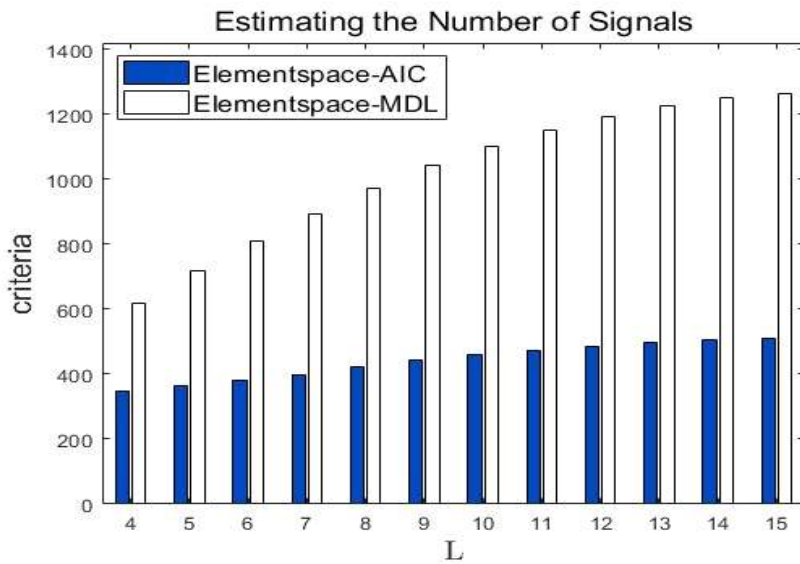


Figure 4.8 Extended version of Figure 4.7

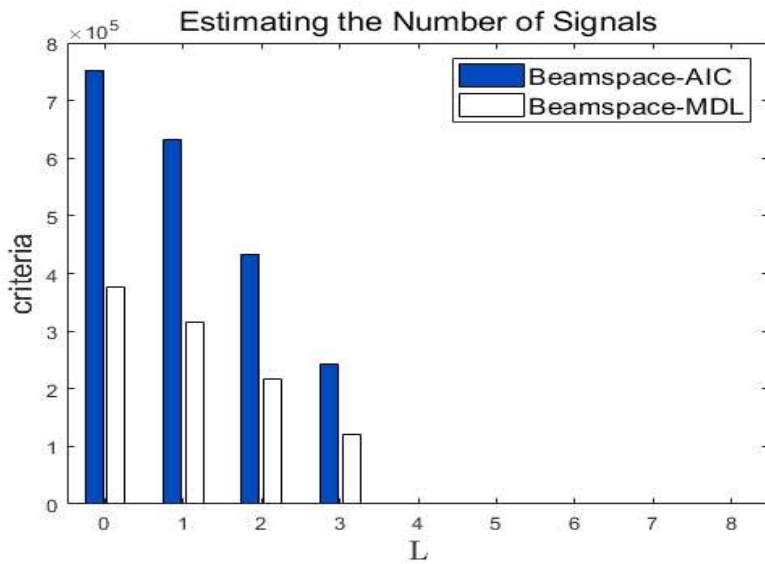


Figure 4.9 For uniform rectangular array antenna, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signal

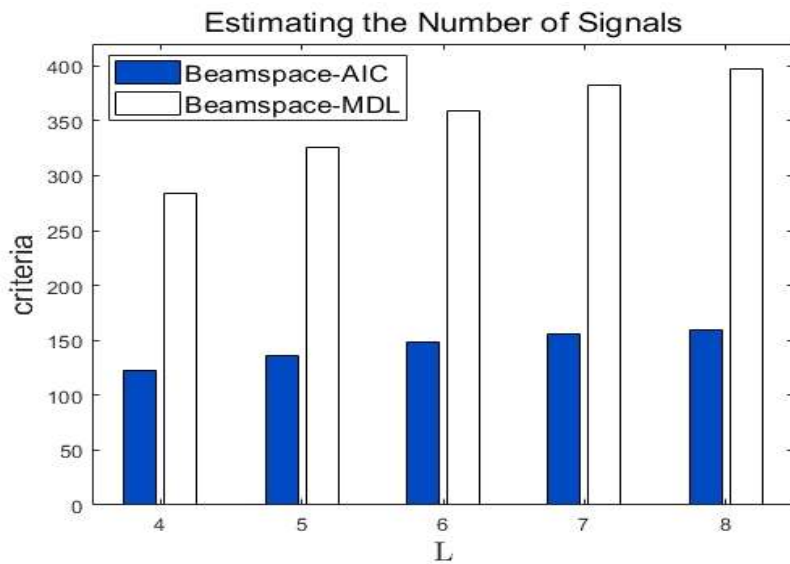


Figure 4.10 Extended version of Figure 4.9

Table 4.4 For uniform rectangular array antenna, criteria of element space AIC and MDL, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signals

L	Element space based AIC	Element space based MDL	Beamspace based AIC	Beamspace based MDL
0	$1.6211 * 10^6$	$8.1057 * 10^5$	$7.5271 * 10^5$	$3.7636 * 10^5$
1	$1.4313 * 10^6$	$7.1578 * 10^5$	$6.3226 * 10^5$	$3.1620 * 10^5$
2	$1.2157 * 10^6$	$6.0811 * 10^5$	$4.3400 * 10^5$	$2.1713 * 10^5$
3	$7.5048 * 10^5$	$3.7558 * 10^5$	$2.4350 * 10^5$	$1.2193 * 10^5$
4	346.2978	617.0176	122.9812	283.4250
5	365.4227	717.7317	136.2941	325.7494
6	382.9841	809.7378	148.1284	359.4084
7	399.3721	893.2309	155.6106	382.9651
8	421.6411	971.7384	160	397.0491
9	442.7623	$1.0417 * 10^3$		
10	460.7459	$1.1023 * 10^3$		
11	474.4328	$1.1527 * 10^3$		
12	486.7410	$1.1945 * 10^3$		
13	497.7064	$1.2277 * 10^3$		
14	504.2393	$1.2508 * 10^3$		
15	510	$1.2656 * 10^3$		

제3절 등간격 원형 배열 안테나 기반 시뮬레이션

본 절은 등간격 원형 배열 안테나가 적용된 신호 개수 추정 알고리즘의 성능평가를 위한 수신신호 파라미터와 시나리오를 제시한다. 시뮬레이션을 위해 등간격 원형 배열 안테나를 구성하는 안테나 요소가 16개일 때, 요소공간 크기는 16, 빔공간 크기는 $9(b \in [-4, 4])$ 라고 가정한다.

1. 수신신호 파라미터

본 항은 수신신호를 모델링 하기 위한 신호 파라미터를 제공한다. 수신신호에 포함된 신호는 각각 2개의 CW 신호, 2개의 FM 신호, 1개의 WB 잡음신호로 구성되어 있다고 가정한다. 각 수신신호의 고도각, 방위각, 중심 주파수, 변조 지수, 신호 대 잡음 비는 Table 4.5에 요약되어 있으며, 신호의 SNR은 시뮬레이션의 편의를 위해 10dB로 동일하다고 가정하였다. Figure 4.11의 수신신호 스펙트럼을 통해 중심 주파수 0.05와 0.35의 CW 신호, 중심 주파수 0.1과 0.45의 FM 신호, 중심 주파수 0.25의 WB 잡음신호가 포함된 총 5개의 수신신호를 확인할 수 있다.

Table 4.5 Received signal parameters for uniform circular array antenna

Signal	Azimuth Angle(°)	Elevation Angle(°)	Center Frequency	Modulation Index	SNR(dB)
CW	30	-58	0.05	-	10
CW	-45	-58	0.35	-	10
FM	60	-58	0.1	0.05	10
FM	20	-58	0.45	0.05	10
WB	-60	-58	0.25	-	10

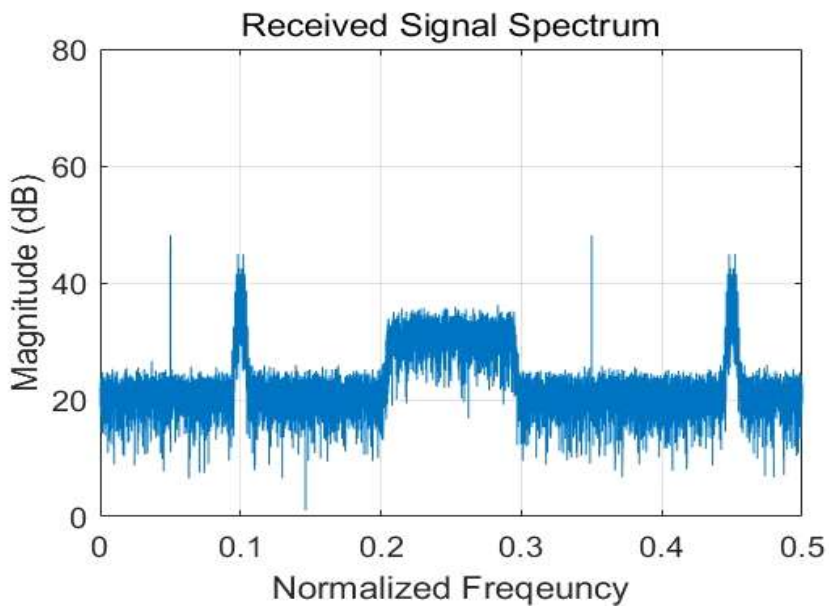


Figure 4.11 Spectrum of the received signal for uniform circular array antenna

2. 요소공간 및 빙공간 기반 신호 개수 추정

본 항은 등간격 원형 배열 안테나가 적용된 요소공간 기반 AIC 및 MDL, 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 신호 개수 추정에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고 분석한다. 등간격 원형 배열 안테나의 안테나 요소 개수는 16개이고, 요소공간의 크기가 16일 경우 각 신호 개수(L)에 대한 요소공간 기반 AIC 및 MDL 기준값을 Figure 4.12에서 확인할 수 있다. Figure 4.12에서 신호의 개수(L)가 5 미만일 때의 기준값들은 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값을 확인할 수 없다. 따라서, Figure 4.12를 확대한 그래프를 Figure 4.13에 나타낸다. 명확한 확인을 위해 Table 4.6에 추정 신호 개수 대비 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값을 정리하였다. Figure 4.13과 Table 4.6의 결과를 통해 L 이 5일 때 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

마찬가지로 등간격 원형 배열 안테나의 안테나 요소 개수 16개이고, 빙공간의 크기가 $9(b \in [-4, 4])$ 일 때, 각 신호 개수(L)에 대한 AIC 및 MDL 기준값을 Figure 4.14에서 확인할 수 있다. Figure 4.14에서 신호 개수(L)가 5 미만일 때의 기준값들은 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값을 확인할 수 없다. 따라서, Figure 4.14를 확대한 그래프를 Figure 4.15에 나타낸다. 명확한 확인을 위해 Table 4.6에 추정 신호 개수 대비 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값을 정리하였다. Figure 4.15와 Table 4.6의 결과를 통해 L 이 5일 때 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

위의 결과로부터, 등간격 원형 배열 안테나가 적용된 요소공간과 빙공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘이 기준값은 차이 나지만 동일한 신호 개수를 추정하였다. 그러나 동일한 추정성능을 가지면서 배열 안테나 및 공분산 행렬의 차원은 M 차원에서 $B(2B_m + 1)$ 차원으로 줄어들어 제안된 빙공간 기반 AIC 및 MDL 신호 개수 추정 알고리즘이 효율적이라고 할 수 있다.

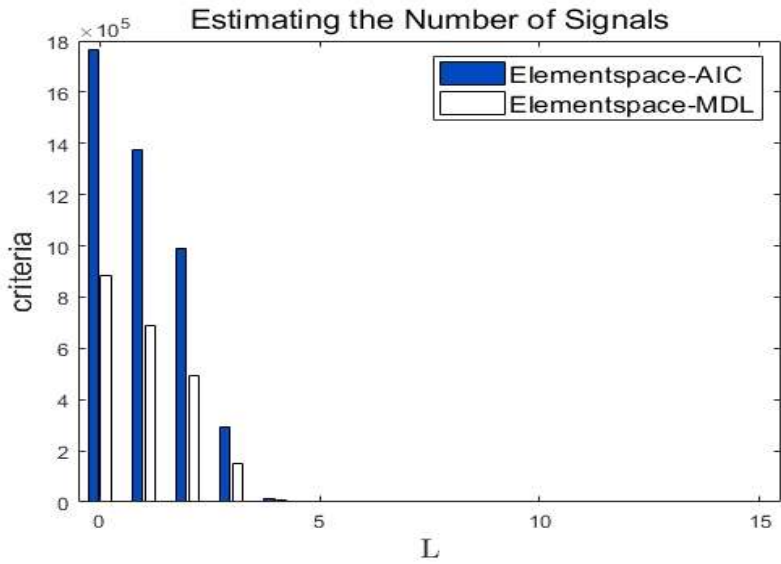


Figure 4.12 For uniform circular array antenna, criteria of element space AIC and MDL versus the number of signal

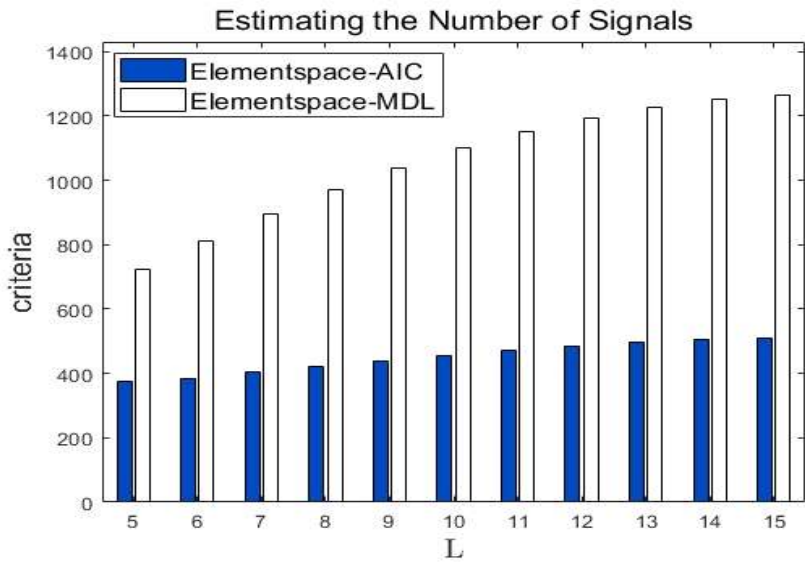


Figure 4.13 Extended version of Figure 4.12

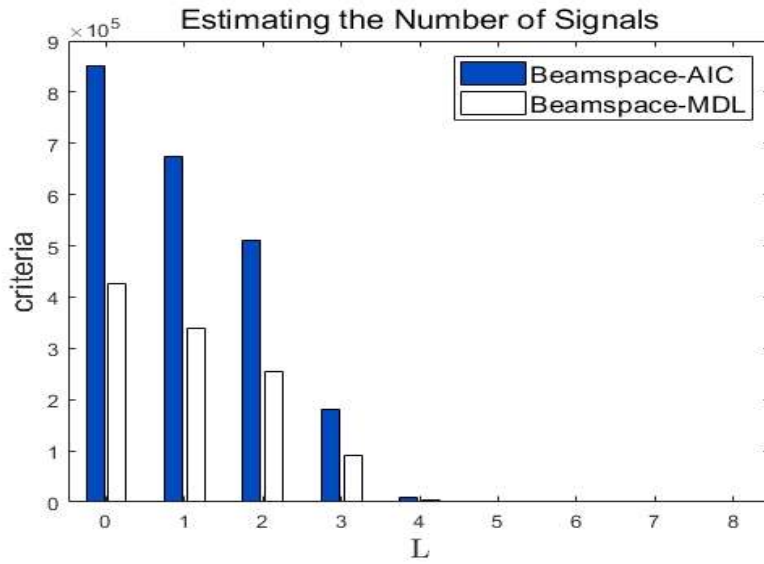


Figure 4.14 For uniform circular array antenna, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signal

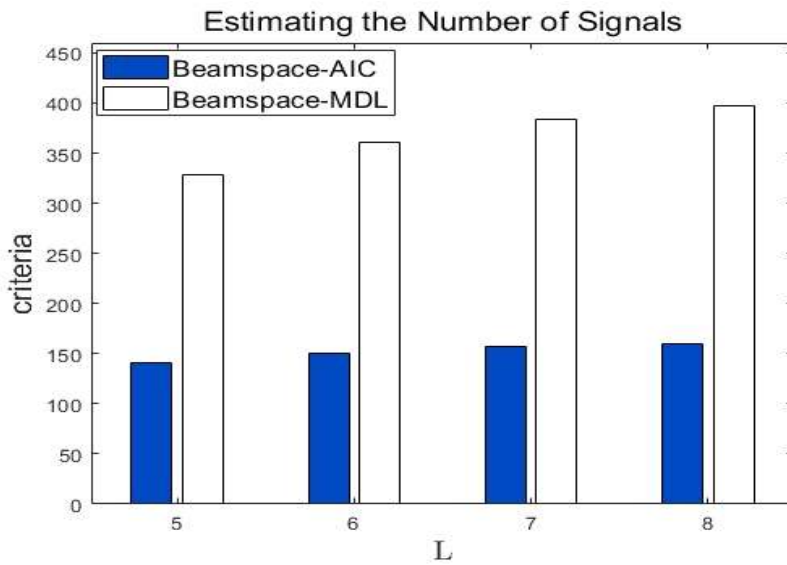


Figure 4.15 Extended version of Figure 4.14

Table 4.6 For uniform circular array antenna, criteria of element space AIC and MDL, criteria of beamspace AIC and MDL versus the number of signals

L	Element space based AIC	Element space based MDL	Beamspace based AIC	Beamspace based MDL
0	$1.7676 \cdot 10^6$	$8.8380 \cdot 10^5$	$8.5145 \cdot 10^5$	$4.2573 \cdot 10^5$
1	$1.3774 \cdot 10^6$	$6.8884 \cdot 10^5$	$6.7561 \cdot 10^5$	$3.3787 \cdot 10^5$
2	$9.9060 \cdot 10^5$	$4.9554 \cdot 10^5$	$5.1161 \cdot 10^5$	$2.5593 \cdot 10^5$
3	$2.9493 \cdot 10^5$	$1.4781 \cdot 10^5$	$1.8200 \cdot 10^5$	$9.1177 \cdot 10^4$
4	$1.2884 \cdot 10^4$	$6.8856 \cdot 10^3$	$8.3565 \cdot 10^3$	$4.4002 \cdot 10^3$
5	374.0691	722.0549	141.1721	328.1885
6	385.1965	810.8439	150.4789	360.5836
7	405.0122	896.0510	156.5399	383.4297
8	422.2088	972.0222	160	397.0419
9	438.9201	$1.0398 \cdot 10^3$		
10	456.3430	$1.1001 \cdot 10^3$		
11	471.8666	$1.1514 \cdot 10^3$		
12	485.4943	$1.1939 \cdot 10^3$		
13	495.9533	$1.2269 \cdot 10^3$		
14	504.7183	$1.2511 \cdot 10^3$		
15	510	$1.2656 \cdot 10^3$		

제4절 배열 안테나 형상에 따른 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘 성능 비교

본 절은 배열 안테나 형상에 따른 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘의 신호 개수 추정성능에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제공하고 이를 분석한다. 이를 위해 고려된 배열 안테나 형상은 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나가 고려되었으며, 이때 각 배열 안테나를 구성하는 안테나 요소의 개수는 25 개이며, 요소공간의 크기는 25, 빔공간 크기는 9로 가정하였다.

1. 수신신호 파라미터

본 항은 수신신호를 모델링 하기 위한 신호 파라미터를 제공한다. 수신신호에 포함된 신호는 각각 1개의 CW 신호, 1개의 FM 신호, 1개의 WB 잡음신호로 구성되어 있다고 가정한다. 각 수신신호의 고도각, 방위각, 중심 주파수, 변조 지수, 신호 대 잡음 비는 Table 4.7에 요약되어 있으며, 신호의 SNR은 시뮬레이션의 편의를 위해 10dB로 동일하다고 가정하였다. Figure 4.16의 수신신호 스펙트럼을 통해 중심 주파수 0.4의 CW 신호, 중심 주파수 0.1의 FM 신호, 중심 주파수 0.2의 WB 잡음신호가 포함된 총 3개의 수신신호를 확인할 수 있다.

Table 4.7 Received signal parameters for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna

Signal	Azimuth Angle($^{\circ}$)	Elevation Angle($^{\circ}$)	Center Frequency	Modulation Index	SNR(dB)
CW	30	-58	0.4	-	10
FM	60	-58	0.1	0.05	10
WB	-60	-58	0.2	-	10

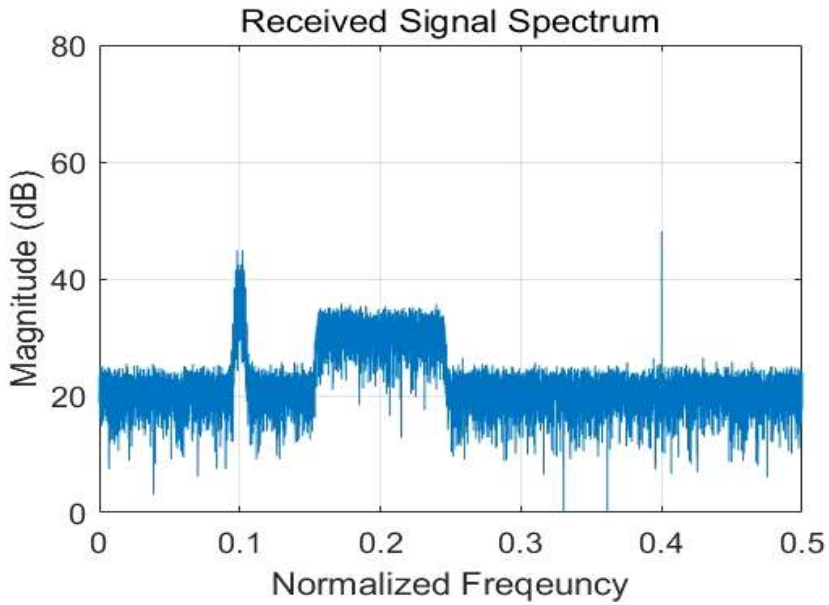


Figure 4.16 Spectrum of the received signal for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna

2. 등간격 선형 및 사각 배열 안테나가 적용된 빔공간 기반 AIC

본 항은 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나가 적용된 빔공간 기반 AIC 알고리즘의 기준값을 제시하고 비교한다. Figure 4.17은 신호 개수 (L) 대비 등간격 선형 배열 안테나에 대한 빔공간 기반 AIC 기준값과 등간격 사각 배열 안테나에 대한 빔공간 기반 AIC 기준값을 나타낸다. L 이 3 이상일 때의 기준값은 3 미만일 때의 기준값보다 매우 작아 한 그래프에서 기준값들을 확인하기 어렵다. 따라서 Figure 4.17을 확대하여 Figure 4.18에 나타내었다. Figure 4.18에서 L 이 3일 때, 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나에서의 빔공간 기반 AIC 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있다. Table 4.8은 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나의 빔공간 기반 AIC 기준값들을 정리한 것으로, Figure 4.18과 Table 4.8에서 L 이 3일 때, AIC 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

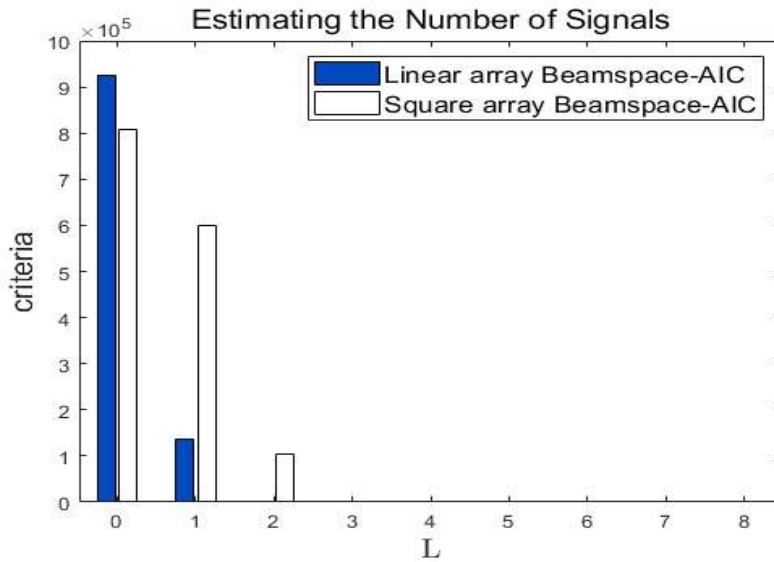


Figure 4.17 Criteria of beamspace AIC for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna

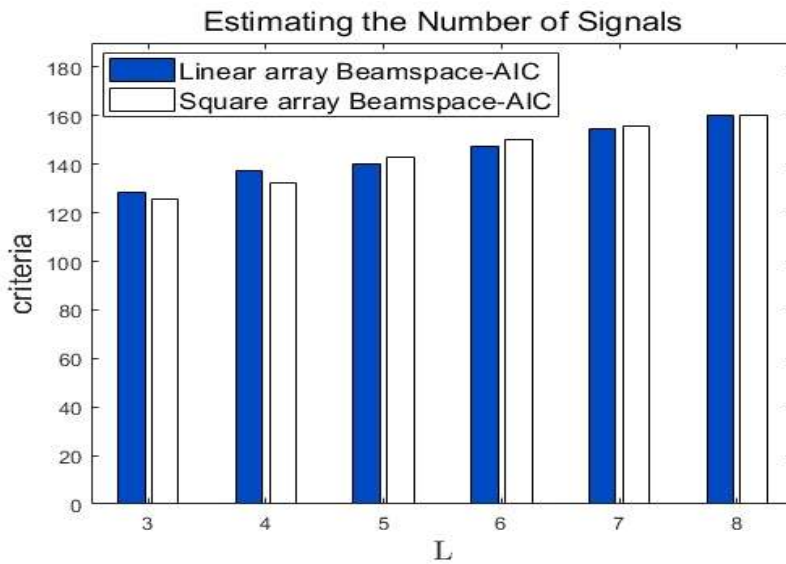


Figure 4.18 Extended version of Figure 4.17

3. 등간격 선형 및 사각 배열 안테나가 적용된 빔공간 기반 MDL

본 항은 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나가 적용된 빔공간 기반 MDL 알고리즘의 기준값을 제시하고 비교한다. Figure 4.19는 신호 개수 (L) 대비 등간격 선형 배열 안테나에 대한 빔공간 기반 MDL 기준값과 등간격 사각 배열 안테나에 대한 빔공간 기반 MDL 기준값을 나타낸다. L 이 3 이상일 때의 기준값은 3 미만일 때의 기준값보다 매우 작아 한 그래프에서 기준값들을 확인하기 어렵다. 따라서 Figure 4.19를 확대하여 Figure 4.20에 나타내었다. Figure 4.20에서 L 이 3일 때, 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나에서의 빔공간 기반 MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있다. Table 4.8은 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나의 빔공간 기반 MDL 기준값들을 정리한 것으로, Figure 4.20과 Table 4.8에서 L 이 3일 때, MDL 기준값이 모두 최소값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 이를 추정된 신호의 개수(\hat{L})로 결정한다.

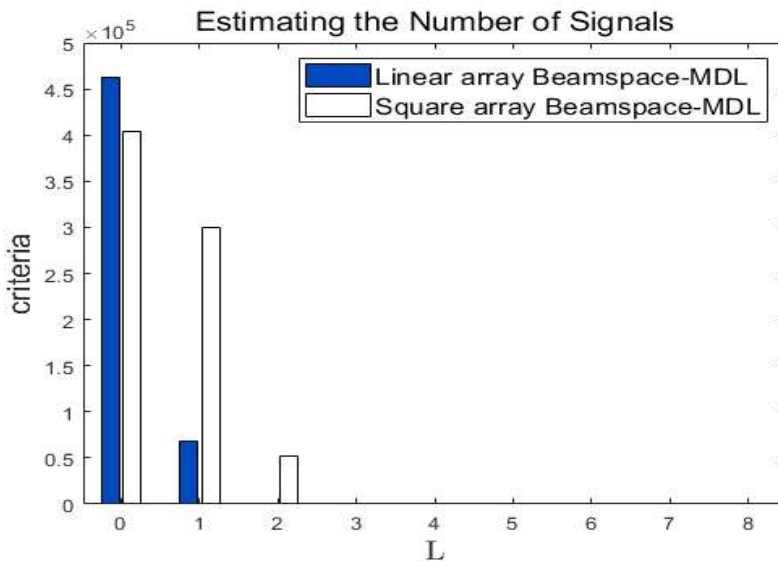


Figure 4.19 Criteria of beamspace MDL for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna

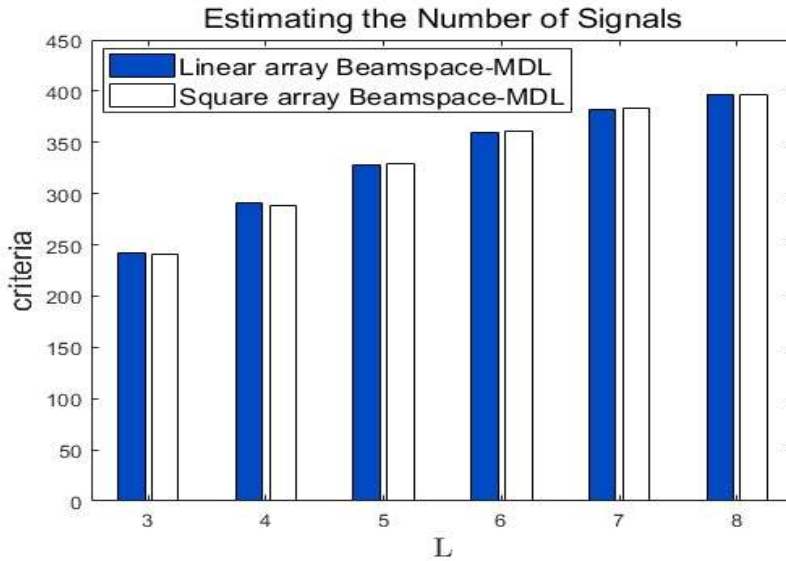


Figure 4.20 Extended version of Figure 4.19

위의 시뮬레이션 결과로부터, 빔공간 기반 AIC와 MDL 알고리즘 모두 수신된 신호에 3개의 신호가 존재한다고 추정하였으며, 각 알고리즘에 등간격 선형 배열 안테나와 등간격 사각 배열 안테나를 적용하였을 때도 역시 같은 결과를 도출하였다. 또한, 그래프들로부터 등간격 선형 배열 안테나에 비해 등간격 사각 배열 안테나의 기준값이 보다 명확히 구분되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘에 평면 배열 안테나가 적용되었을 경우 신호 개수 추정성능이 우수함을 의미한다.

Table 4.8 Criteria of beamspace AIC and MDL for uniform linear array antenna and uniform rectangular array antenna

L	Uniform linear array based beamspace AIC	Uniform rectangular array based beamspace AIC	Uniform linear array based beamspace MDL	Uniform rectangular array based beamspace MDL
0	9.2599×10^5	8.0701×10^5	4.6299×10^5	4.0350×10^5
1	1.3756×10^5	6.0086×10^5	6.8849×10^4	3.0050×10^5
2	682.6389	1.0366×10^4	468.1391	5.1959×10^4
3	128.5209	125.8784	242.6005	241.2793
4	137.3158	132.3305	290.5922	288.0996
5	139.9110	143.0223	327.5579	329.1135
6	147.6146	149.9174	359.1515	360.3029
7	154.8125	155.6586	182.5660	382.9890
8	160	160	397.0491	397.0491

제5장 결론 및 향후 연구

기존의 요소공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘은 배열 안테나에 사용되는 안테나 요소의 개수가 증가하면 정밀한 신호 개수 파악이 가능해진다. 그러나, 늘어난 안테나 요소의 개수와 비례하여 요소공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘의 계산 부하 또한 증가하게 된다. 따라서 본 논문은 기존 신호 개수 추정 알고리즘의 계산 복잡도 문제를 해결하기 위해 배열 안테나의 차원을 줄여 효율적으로 신호의 개수를 추정하는 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 연구로 현재 무선 통신 시스템에서 가장 보편적으로 사용되는 등간격 선형 배열 안테나, 등간격 사각 배열 안테나, 등간격 원형 배열 안테나의 기본 구조를 살펴보고, 배열 응답 행렬을 포함한 신호 모델의 수학적 모델을 제시하였다. 또한, 모델링된 신호 모델에 빙공간 처리를 통해 M 차원의 요소공간에서 B 차원의 빙공간으로 차원을 축소시키고, 축소된 차원이 적용된 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘을 통해 신호 개수 추정 성능은 유지하면서 기존 신호 개수 추정 알고리즘이 지니는 높은 계산 복잡도 문제를 해결하였다. 이는 다양한 시나리오를 가정한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 신호 개수 추정 성능은 선형 배열 안테나에 비해 평면 배열 안테나가 명확한 추정 결과를 갖는 것을 확인하였다. 추후 다양한 2차원, 3차원 배열 안테나를 적용한 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘의 성능평가 및 빙공간 처리를 통해 특정 각도 범위 내에 존재하는 신호 개수 추정 등 알고리즘의 확장을 위한 연구를 지속할 예정이다.

REFERENCES

- [1] M. Zhu, T. Chang, and M. Hong, “Learning to Beamform in Heterogeneous Massive MIMO Networks,” [Online]. Available : <https://arxiv.org/abs/2011.03971>.
- [2] A. B. Gershman, N. D. Sidiropoulos, S. Shahbazpanahi, M. Bengtsson, and B. Ottersten, “Convex optimization-based beamforming,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 27, no. 3, pp. 62–75, 2010.
- [3] N. Vukmirović, M. T. Janjic, P. M. Djuric and M. Eric, “Position estimation with a millimeter-wave massive MIMO system based on distributed steerable phased antenna arrays,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2018, no. 33, 2018.
- [4] D. B. Williams and V. Madisetti, *The digital signal processing handbook*. CRC press, 1997.
- [5] Y. Jing, Q. Wang, L. T. Wang, and W. Zhu, “Research on Compressed Sencing DOA Estimation Based on Priori Space Sparsity of Information Theory,” In *Proceedings of 2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics(EEI)*, Nanjing, China, Nov, 2019, pp. 83-87.
- [6] Jong-Shiann Jiang and M. A. Ingram, “Robust detection of number of sources using the transformed rotational matrix,” In *2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE Cat. No.04TH8733)*, Atlanta, GA, USA, Mar. 2004, pp. 501-506.
- [7] S. Valaee and P. Kabal, “An information theoretic approach to source enumeration in array signal processing,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 5, may, 2004, pp. 1171-1178.

- [8] H. Akaike, “Information theory and an extension of the maximum likelihood principle,” In Parzen E, Tanabe K, Kitagawa G, *editors. Selected papers of Hirotugu Akaike, Springer Series in Statistics*, New York, Springer; 1998, p. 199–213.
- [9] J. E. Cavanaugh, “Unifying the derivations for the Akaike and corrected Akaike information criteria,” *Statistics & Probability Letters*, Vol. 32, No. 2, 1997, pp. 201-208.
- [10] J. Rissanen, “Modeling by shortest data description,” *Autometica*, vol. 14, no. 5, 1978, pp. 465-471.
- [11] M. Wax and I. Ziskind, “Detection of the number of coherent signals by the MDL principle,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no.8, 1989, pp. 1190-1196.
- [12] A. Baron, J. Rissanen, and B. Bin Yu, “The minimum description length principle in coding and modeling,” *IEEE Transaction on Information Theory*, vol. 44, 1998, pp. 2743-2760.
- [13] S. S. Moghaddam, and S. jalaei, “Determining the Number of Coherent/Correlated Sources Using FBSS-based Methods,” *Frontiers in Science*, vol. 2, no. 6, pp. 203-208, 2013.
- [14] S. Shirvani Moghaddam, S. Almasi Monfared, “A Comprehensive Performance Study of Narrowband DOA Estimation Algorithms,” *International Journal on Communications Antenna and Propagation (IRECAP)*, Vol. 1, No. 4, pp. 396-405, August, 2011.
- [15] S. Shirvani-Moghaddam and F. Akbari, “A novel ULA-based geometry for improving AOA estimation,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2011, no. 1, 2011, pp. 1-11.
- [16] S. Ren, X. Ma, S. Yan, and C. Hao, “2-D unitary ESPRIT-like direction-of-arrival (DOA) estimation for coherent signals with a uniform rectangular array,” *Sensors*, vol. 13, no. 4, 2013, pp. 4272-4288.

- [17] Yih-Min Chen, "On spatial smoothing for two-dimensional direction-of-arrival estimation of coherent signals," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 45, no.7, July, 1997, pp. 1689-1696.
- [18] N. H. Noordin, V. Zuniga, A. O. El-Rayis, N. Haridas, A. T. Erdogan and T. Arslan, "Uniform Circular Arrays for Phased Array Antenna," *2011 Loughborough Antennas & Propagation Conference*, Loughborough, UK, 2011, pp. 1-4.
- [19] P. Ioannides and C. A. Balanis, "Uniform circular arrays for smart antennas," In *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 26, no. 4, Aug, 2005, pp. 192-206.
- [20] H. L. Van Trees, *Optimum array processing: Part IV of detection, estimation, and modulation theory*. John Wiley & Sons, 2004.
- [21] J. Steinwandt, "Advanced Array Signal Processing Techniques for Beamforming and Direction Finding," Master's Thesis, *Ilmenau University of Technology*, 2011.
- [22] G. Bienvenu and L. Kopp, "Decreasing high resolution method sensitivity by conventional beamformer processing," *ICASSP '84. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1984, pp. 714-717.
- [23] N. Yuri and P. Ilia, "Performance study of beamspace processing DOA estimation by MUSIC and Capon methods," *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, 2015, pp. 1-6.
- [24] H. J. Visser, *Array and Phased Array Antenna Basics*. John Wiley & Sons, 2006.
- [25] H. S. Park and S. S. Hwang, "Beamspace Based Signal Number Estimation Algorithm Applying Square Array Antenna," *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 32, no. 1, 2022, pp. 61-67.
- [26] X. He, Z. Zhang and W. Wang, "DOA estimation with uniform rectangular array in the presence of mutual coupling," *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2016, pp. 1854-1859.

- [27] P. Ioannides, and C. A. Balanis, "Uniform circular and rectangular arrays for adaptive beamforming applications," In *IEEE Antennas and Wireless Propagation Magazine*, 2005, pp, 192-206.
- [28] X. L. Xu and K. M. Buckley, "Reduced-dimension beam-space board-band source localization: preprocessor design and evaluation," *Fourth Annual ASSP Workshop on Spectrum Estimation and Modeling*, 1988, pp. 22-27.
- [29] J. Steinwandt, R.C. de Lamare, M. Haardt, "Beamspace direction finding based on the conjugate gradient and the auxiliary vector filtering algorithms," *Signal Processing*, vol. 93, no. 4, 2013, pp. 641-651.
- [30] P.-C. Chen and P. P. Vaidyanathan, "Convolutional Beamspace for Linear Arrays," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, 2020, pp. 5395-5410.
- [31] C. P. Mathews, M. Haardt, and M. D. Zoltowski, "Implementation and performance analysis of 2D DFT beamspace ESPRIT," In *Conference Record of The Twenty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 1996, pp. 726-730.
- [32] A. Hassanien, M. W. Morency, A. Khabbazibasmenj, S. A. Vorobyov, J. Y. Park and S. J. Kim, "Two-dimensional transmit beamforming for MIMO radar with sparse symmetric arrays," *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)*, 2013, pp. 1-6.
- [33] F. Belloni and V. Koivunen, "Analysis of Beamspace Transform on Uniform Circular Array," In *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2004., Vol.2, pp. 1963-1967, 2004.
- [34] C. P. Mathews and M. D. Zoltowski, "Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular array," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.42, no.9, sept, 1994, pp. 2395-2407.
- [35] S. Tu and L. Xu, "A study of several model selection criteria for determining the number of signals," In *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, USA, Mar. 2010, pp. 1966-1969.

- [36] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 33, no. 2, 1985, pp. 387-392.
- [37] A. S. Sekmen and Z. Bingul, "Comparison of algorithms for detection of the number of signal sources," *Proceedings IEEE Southeastcon'99. Technology on the Brink of 2000 (Cat. No.99CH36300)*, Lexington, USA, 1999, pp. 70-73.
- [38] L. C. Zhao, P. R. Krishnaiah, and Z. D. Bai, "On detection of the number of signals in presence of white noise," *Journal of Multivariate Analysis*, vol. 20, no. 1, 1986, pp. 1-25.
- [39] H. S. Park and S. S. Hwang, "AIC & MDL Algorithm Based on BeamSpace, for Efficient Estimation of the Number of Signals," *Journal of the Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 617-624.
- [40] J. Lee, "A New Mix Criterion Based on the AIC and MDL Criteria in the Estimation of the Number of Noncoherent Signals," Master's Thesis, *KAIST*, 1998.
- [41] Q. T. Zhang, K. M. Wong, P. C. Yip and J. P. Reilly, "Statistical analysis of the performance of information theoretic criteria in the detection of the number of signals in array processing," *IEEE Transactions of Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 10, 1989, pp. 1557-1567.
- [42] J. Y. Mun and S. S. Hwang, "Input Signal Model Analysis for Adaptive Beamformer," *Journal of the Korea institute of electronic communication sciences*, vol. 12, no. 3, 2017, pp. 433-438.

감사의 글

논문을 완성할 수 있게 여러 면에서 조언과 아낌없는 지원을 해주신 주변 분들께 감사의 인사를 올립니다.

가장 먼저 지도 교수님이신 황석승 교수님께 감사의 인사를 올립니다. 학위 과정 동안 부족한 저에게 많은 가르침을 주시고, 항상 발전할 수 있도록 도움 주신 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다.

또한 완성도 있는 학위 논문을 위해 바쁘신 와중에도 논문 심사를 맡아주시고, 아낌없는 조언을 해주신 김윤학 교수님, 이충규 교수님께 감사의 인사를 올립니다.

학위 과정 동안 연구에 어려움이 있을 때마다 옆에서 도와준 적응 신호처리 실험실의 모든 구성원에게 감사의 인사를 올립니다.

마지막으로, 저를 전적으로 믿어주시고 아낌없는 지원을 해주신 부모님께 감사의 인사를 올립니다. 가족들의 조건 없는 사랑과 응원 속에서 무사히 석사과정을 마칠 수 있었습니다. 진심으로 감사드립니다.