

효율적인 신호개수 추정을 위한 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘

박희선* · 황석승**

AIC & MDL Algorithm Based on Beamspace, for Efficient Estimation of the Number of Signals

Heui-Seon Park* · Suk-Seung Hwang**

요 약

도래각 추정, 간섭제거, 신호 수신 등을 위해 수신신호에 포함되는 신호의 개수를 정확히 파악하는 것이 필요하다. 대표적인 신호 개수 추정 알고리즘으로 AIC(: Akaike Information Criterion)와 MDL(: Minimum Description Length) 알고리즘이 있는데, 이들 알고리즘은 각 기준이 최소화되는 값을 찾아 신호의 개수를 추정한다. 수신기의 배열 안테나 요소 개수가 증가하면 추정 성능이 향상되지만, 최소값을 찾기 위해 모든 안테나 요소에 대한 기준값을 계산하여야 하므로 복잡도가 크게 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 빔공간 처리를 통해 차원을 축소시켜 계산량을 줄이면서 효율적으로 신호의 개수를 추정할 수 있는 빔공간 기반의 AIC와 MDL 알고리즘을 제안한다. 또한, 다양한 시나리오 기반의 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 성능을 평가하고 분석한다.

ABSTRACT

The accurate estimation of the number of signals included in the received signal is required for the AOA(: Angle-of-Arrival) estimation, the interference suppression, the signal reception, etc. AIC(: Akaike Information Criterion) and MDL(: Minimum Description Length) algorithms, which are known as the typical algorithms to estimate the signal number, estimate the number of signals according to the minimum of each criterion. As the number of antenna elements increased, the estimation performance is enhanced, but the computational complexity is 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 AIC and MDL algorithms based on the beamspace, which efficiently estimate the number of signals while reducing the computational complexity by reducing the dimension of an array antenna through the beamspace processing. In addition, we provide computer simulation results based on various scenarios for evaluating and analysing the estimation performance of the proposed algorithms.

키워드

Signal Number Estimation, Beamspace, AIC, MDL, Uniform Linear Array Antenna
신호 개수 추정, 빔공간, 아카이케 정보 기준, 최소 묘사 길이, 등간격 선형 배열 안테나

* 조선대학교 전자공학과 IT-Bio 융합시스템 전공 • Received : Jun. 30, 2021, Revised : Jul. 24, 2021, Accepted : Aug. 17, 2021
(bang4900@chosun.kr) • Corresponding Author : Suk-Seung Hwang

** 교신저자 : 조선대학교 전자공학부 IT-Bio 융합시스템 전공 Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, School of Electronic Engineering, Chosun University,
• 접수일 : 2021. 06. 30 Email : hwangss@chosun.ac.kr
• 수정완료일 : 2021. 07. 24
• 게재확정일 : 2021. 08. 17

I. 서 론

무선통신 시스템에서 효율적인 신호 수신을 위해 수신신호에 포함된 신호의 개수를 정확히 파악하는 것은 중요한 문제이다. 일례로 대표적인 신호의 도래각 추정 기법인 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘[1]은 수신신호에 포함된 신호의 정확한 개수가 파악된 경우 도래각 추정 성능이 우수하지만, 정확한 신호의 개수가 파악이 되어 있지 않은 경우에는 추정성능이 급격히 열화될 수 있다. 다양한 신호개수 추정 알고리즘[2]들이 있는데, 그 중 대표적인 기법으로 정보 이론적 순서 결정에 기반을 둔 AIC(Akaike Information Criterion), MDL(Minimum Description Length)[3-6], EDC(Efficient Detection Criterion)[7]가 있다. [2]에서 소개된 일반적인 방식들은 요소 공간(element space) 기반 알고리즘으로, 요소 공간에서 비교적 정확한 신호 개수 추정 성능을 보인다. 하지만, 추정을 위한 계산 복잡도는 $O(M^3)$ [8]이므로 (M 은 안테나 요소 개수), 수신기에 사용되는 안테나 요소의 개수가 증가하면 수신신호를 기반으로 하는 공분산 행렬의 차원이 증가하여 신호 개수 추정을 위한 계산 복잡도는 기하급수적으로 증가할 수 있다. 또한, 모든 안테나 요소에 대해 기준값을 계산하여야 하므로, 안테나 요소의 개수에 비해 수신신호에 포함된 신호의 개수가 적은 경우 매우 비효율적으로 신호의 개수를 추정하게 된다.

본 논문에서는 낮은 계산 복잡도를 가지면서, 효율적으로 수신신호에 포함된 신호의 개수를 파악할 수 있는 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘을 제안한다. 먼저, 요소공간(element space) 기반의 수신신호에 빔공간(beam space) 변환 행렬을 곱하여 공분산 행렬의 차원을 낮추고, 차원이 감소된 공분산 행렬을 AIC 및 MDL에 적용하여 신호의 개수를 추정한다. 추정 성능을 크게 저하시키지 않는 범위 내에서 요소공간을 빔공간으로 변환[9-11]하면, 전체적인 배열 안테나의 차원을 줄일 수 있어, 계산 부하를 낮추면서 효율적으로 신호의 개수를 추정할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 수신신호 모델을 제시하고, 3장에서 빔공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 제안한 빔공간-AIC 및 빔공간-MDL의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 제시하고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 수신신호 모델

본 장에서는 신호와 잡음이 포함된 수신신호 모델과 빔공간 출력신호 모델을 제시한다.

2.1 수신신호 모델

본 논문에서는 배열 안테나로 등간격 선형 배열 안테나(ULA: Uniform Linear Array)를 고려한다. 안테나 요소의 개수가 M 이라고 가정하면, 샘플(sample) 인덱스 k 에 대한 수신신호 벡터는 식(1)로 정의된다[12].

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{s}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (1)$$

식(1)에서 \mathbf{A} 는 $M \times L$ 크기의 어레이 응답 행렬로 식 (2)와 같이 정의된다.

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

식(2)에서 λ 는 파장을 나타내고, d 는 안테나 요소의 간격이며, θ_l 은 l 번째 신호에 대한 입사각을 의미하며, L 은 신호의 개수를 나타낸다. 또한, $\mathbf{s}(k)$ 는 $L \times 1$ 크기의 신호 벡터이고, $\mathbf{n}(k)$ 는 iid(independent and identically distributed) 특성과 평균 '0', 분산 ' σ^2 '을 가지는 $M \times 1$ 크기의 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 잡음벡터이다.

2.2 빔공간 출력신호 모델

안테나 요소의 개수 보다 작은 임의의 B ($M > B > L$) 차원의 빔공간 출력 신호 모델은 식(3)과 같이 정의된다[13].

$$\mathbf{x}_B(k) = \mathbf{W}_B^H \mathbf{x}(k) \quad (3)$$

여기서, \mathbf{W}_B 는 $M \times B$ 크기의 가중치 행렬로 다양한 방법으로 구현될 수 있지만[10], 본 논문에서는 DFT(Discrete Fourier Transform) 방식을 사용한다. DFT 기반 가중치 행렬은 식(4)와 같이 정의된다[11].

$$\mathbf{W}_B = \left[\mathbf{w}\left(m\frac{2}{M}\right), \mathbf{w}\left((m+1)\frac{2}{M}\right), \dots, \mathbf{w}\left((m+B-1)\frac{2}{M}\right) \right] \quad (4)$$

식(4)에서 $\mathbf{w}(u)$ 는 $M \times 1$ 크기의 DFT 빙형성(beamforming) 행렬이고 식(5)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{w}(u) = [1, e^{j\pi u}, \dots, e^{j(M-1)\pi u}]^T \quad (5)$$

여기서, u 는 다음과 같은 범위로 지정할 수 있다.

$$u \in \left\{ m\frac{2}{M}, (m+1)\frac{2}{M}, \dots, (m+B-1)\frac{2}{M} \right\} \quad (6)$$

m 은 M -point DFT 행렬의 첫 번째 열을 나타낸다. 이와 같은 빙공간 프로세스(beamforming)를 통해, 배열 안테나의 차원을 M 에서 B 로 축소하여 수신 신호에 포함된 신호 개수 추정의 효율성을 높일 수 있다.

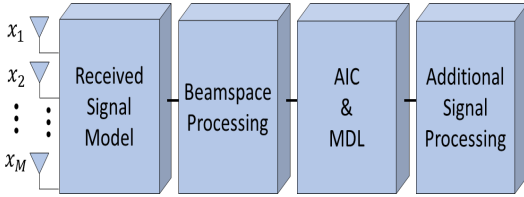


그림 1. 제안된 빙공간 기반 신호 개수 추정 알고리즘에 대한 블록다이어그램
Fig. 1 Block diagram for the proposed signal number estimation based on beamforming

III. 빙공간 기반 신호 개수 추정 기법

본 장에서는 기존의 방식에 비해 복잡도가 낮으면서, 효율적으로 수신신호에 포함된 신호의 개수를 추정하는 빙공간 기반의 AIC 및 MDL 알고리즘을 소개한다. 그림 1은 제안된 기술에 대한 기본적인 블록다이어그램이다.

먼저, 2.2절에서 소개된 빙공간 프로세스를 통해 배열 안테나의 차원을 낮추고, 그 결과를 AIC 및 MDL 알고리즘에 적용한다.

3.1 샘플 공분산 행렬

빙공간 프로세스가 적용된 정보 이론 모델 기반의 신호 개수 추정 알고리즘을 수행하기 위해 먼저 수신신호의 샘플 공분산 행렬을 식(7)과 같이 정의한다.

$$\mathbf{R}_B = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{x}_B(i) \mathbf{x}_B^H(i) \quad (7)$$

샘플 공분산 행렬의 고유치 분해를 수행하면, 식(8)과 같이 B 개의 고유값(BEV : BeamSpace Eigen Value)을 얻을 수 있는데, 신호에 대한 L 개의 고유값과 잡음에 대한 $B-L$ 개의 빙공간 고유값으로 나뉘게 된다.

$$BEV = \alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_L > \dots \geq \alpha_B \quad (8)$$

식(8)의 고유값을 기반으로 AIC와 MDL 기준을 계산한다.

3.2 빙공간-AIC

신호의 개수를 추정하기 위한 정보 이론 기준을 적용한 빙공간-AIC 기준식은 식(9)와 같이 정의된다.

$$AIC(\hat{L}) = -2N \ln \left[\frac{\prod_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-\hat{L}} \sum_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i \right]^{B-\hat{L}}} \right] + 2\hat{L}(2B-\hat{L}) \quad (9)$$

식(9)에서, \hat{L} 은 추정된 신호의 개수이고, N 은 샘플 개수를 나타낸다. 식(9)의 값을 최소화하는 $\hat{L} \in \{0, 1, \dots, B-1\}$ 값이, AIC를 사용하여 추정된 신호의 개수가 된다.

3.3 빙공간-MDL

신호의 개수를 추정하기 위한 정보 이론 기준을 적용한 빙공간-MDL 기준식은 식(10)과 같이 정의된다.

$$MDL(\hat{L}) = -N \ln \left[\frac{\prod_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i}{\left[\frac{1}{B-\hat{L}} \sum_{i=\hat{L}+1}^B \alpha_i \right]^{B-\hat{L}}} \right] + \frac{1}{2} \hat{L} (2B - \hat{L}) \ln N \quad (10)$$

식(10)의 값을 최소화하는 $\hat{L} \in \{0, 1, \dots, B-1\}$ 값이, MDL를 사용하여 추정된 신호의 개수가 된다.

빔공간 프로세스를 사용하여 배열 안테나의 차원을 낮추었으므로, 샘플 공분산 행렬을 구하는 과정과 고유치 분해 계산 과정의 복잡도를 대폭 낮추어 신호 개수를 추정하는 전체 알고리즘에 대한 복잡도가 기존의 방식에 비해 대폭 개선되었다. 또한, AIC 또는 MDL을 단독으로 사용할 시 추정 오류가 발생할 수 있어, 두 방식을 상호 보완적으로 사용한다[14].

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제안된 빔공간 기반 AIC 및 MDL의 성능평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 다음 2가지 경우의 시나리오를 고려하였다.

표 1. 첫 번째 시나리오의 수신신호 파라미터
Table 1. Received signal parameters of the first scenario

Signal	Center Frequency	Modulation Index	SNR(dB)
CW	0.1, 0.25	-	20
FM	0.2, 0.45	0.05	20
WB	0.35	-	20

표 2. 두 번째 시나리오의 수신신호 파라미터
Table 2. Received signal parameters of the second scenario

Signal	Center Frequency	Modulation Index	SNR(dB)
CW	0.25, 0.35, 0.4	-	20
FM	0.05, 0.3	0.05	20
WB	0.15	-	20

1. 안테나 개수 : 20개, 사용한 빔(Beam) 개수 : 10개, 사용된 신호 : 두 개의 CW(: Continuous Wave) 신호, 한 개의 WB(: Wideband) 신호, 두 개의 FM(: Frequency Modulation) 신호
2. 안테나 개수 : 16개, 사용한 빔(Beam) 개수 : 10개, 사용된 신호 : 세 개의 CW 신호, 한 개의 WB 신호, 두 개의 FM 신호

각 시나리오에 대한 수신신호의 파라미터들은 표 1과 2에 요약되어 있다.

그림 2는 첫 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼으로 총 5개의 신호를 확인할 수 있다. 그림 3은 첫 번째 시나리오에 대한 요소공간($M=20$) 기반 AIC와 MDL의 각 신호개수에 대한 기준값들의 그래프이다. 그림에서 신호의 개수가 4개일 때 까지 기준값들을 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값들을 확인할 수 없다. 이 값들을 확인하기 위해 그림 3을 확대한 그래프를 그림 4에 나타내었다. 그림 4로부터, 신호의 개수(\hat{L})가 5일 때 AIC와 MDL이 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이 값을 수신신호에 포함되는 신호의 개수로 결정한다. 표 3은 빔공간에서의 추정 신호 개수 대비 AIC와 MDL 기준값을 정리한 것으로, 신호의 개수가 5개일 때 양 기준값들이 최소값을 갖는다. 그림 5는 첫 번째 시나리오에 대한 빔공간($B=10$) 기반 AIC와 MDL의 각 신호개수에 대한 기준값들의 그래프이다. 그림에서 신호의 개수가 4개일 때 까지 기준값들을 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값들을 확인할 수 없어, 그림 5를 확대한 그래프를 그림 6에 나타내었다. 그림 6으로부터, 신호의 개수(\hat{L})가 5일 때 AIC와 MDL이 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이 값을 수신신호에 포함되는 신호의 개수로 결정한다.

그림 7은 두 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼으로 총 6개의 신호를 확인할 수 있다. 그림 8은 두 번째 시나리오에 대한 요소공간($M=16$) 기반 AIC와 MDL의 각 신호개수에 대한 기준값들의 그래프이다. 그림에서 신호의 개수가 5개일 때 까지 기준값들을 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값들을 확인할 수 없어, 그림 8을 확대한 그래프를 그림 9에 나타내었다. 그림 9로부터, 신호의 개수(\hat{L})가 6일 때 AIC와 MDL이 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이 값을 수신신호에 포함되는 신호의 개수로 결정한다. 표 4는 빔공간에서의 추정 신

호 개수 대비 AIC와 MDL 기준값을 정리한 것으로, 신호의 개수가 6개일 때 양 기준값들이 최소값을 갖는다. 그림 10은 첫 번째 시나리오에 대한 빙공간($B=10$) 기반 AIC와 MDL의 각 신호개수에 대한 기준값들의 그래프이다. 그림에서 신호의 개수가 5개일 때 까지 기준값들을 확인할 수 있지만, 그 이상일 경우 기준값들이 작아 해당 값들을 확인할 수 없어, 그림 10을 확대한 그래프를 그림 11에 나타내었다. 그림 11으로부터, 신호의 개수(\hat{L})가 6일 때 AIC와 MDL이 최소값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 이 값을 수신신호에 포함되는 신호의 개수로 결정한다.

위의 결과들로부터, 빙공간 기반의 AIC 및 MDL 알고리즘도 일반적인 AIC 및 MDL 알고리즘과 비슷한 추정성능을 가짐을 확인할 수 있다. 비슷한 추정성능을 보유했으면서, 배열 안테나 및 공분산 행렬의 차원은 M 에서 B 로 줄어들어 제안된 빙공간 기반의 AIC 및 MDL 신호개수 추정 알고리즘이 효율적이라고 할 수 있다.

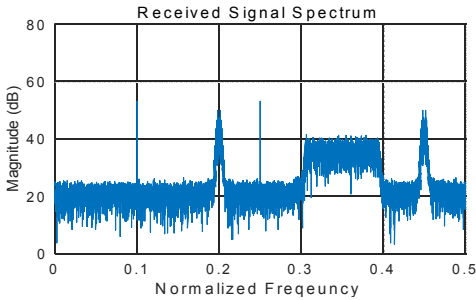


그림 2. 첫 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼
Fig. 2 Spectrum of the received signal for the first scenario

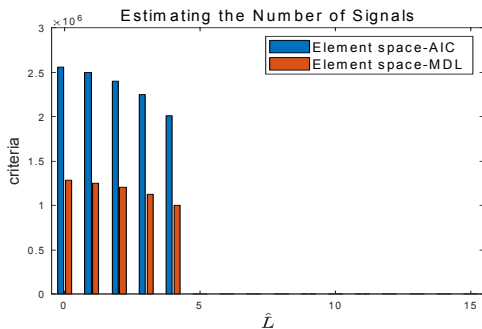


그림 3. 첫 번째 시나리오에 대한 신호 개수에 대한 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값
Fig. 3 Criteria of element space AIC and MDL, versus the number of signal, for the first scenario

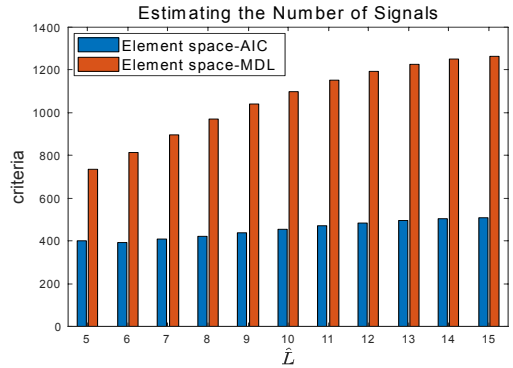


그림 4. 그림 3의 확대 버전
Fig. 4 Extended version of Fig. 3

표 3. 첫 번째 시나리오의 신호 개수 대비 빙공간 AIC 와 MDL 기준값

Table 3. Criteria of beamspace AIC and MDL, versus the number of signals, for the first scenario

\hat{L}	AIC	MDL
0	1508490	754245
1	1428740	714445
2	1288903	644594
3	319913	160158
4	13936	72216
5	168	381
6	174	420
7	184	452
8	192	476
9	198	491

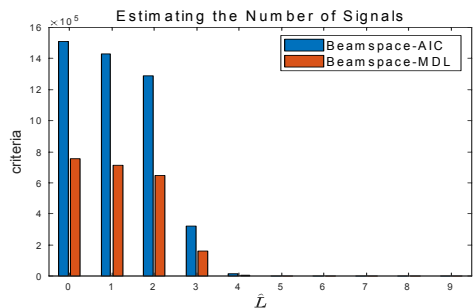


그림 5. 첫 번째 시나리오에 대한 신호 개수에 대한 빙공간 기반 AIC와 MDL 기준값
Fig. 5 Criteria of beamspace AIC and MDL, versus the number of signal, for the first scenario

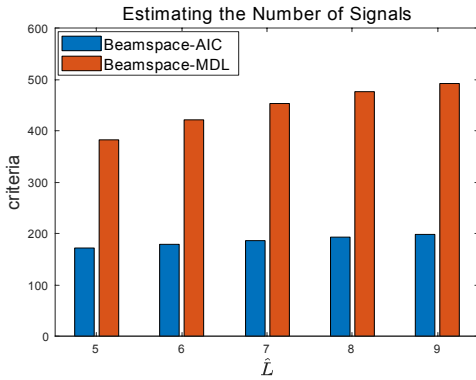


그림 6. 그림 5의 확대 버전
Fig. 6 Extended version of Fig. 5

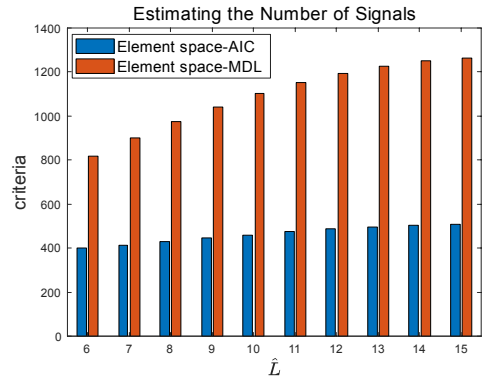


그림 9. 그림 8의 확대 버전
Fig. 9 Extended version of Fig. 8

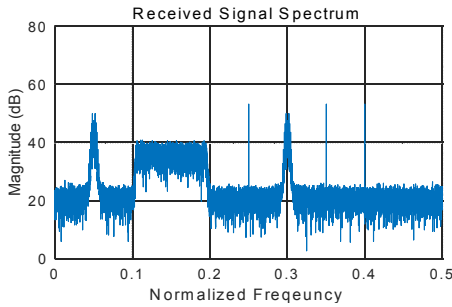


그림 7. 두 번째 시나리오에 대한 수신신호 스펙트럼
Fig. 7 Spectrum of the received signal for the second scenario

표 4. 두 번째 시나리오의 신호 개수 대비 빔공간 AIC 와 MDL 기준값
Table 4. Criteria of beamspace AIC and MDL, versus the number of signals, for the second scenario

\hat{L}	AIC	MDL
0	1102689	551344
1	1042168	521159
2	966954	483622
3	877490	438947
4	545592	273049
5	236733	118664
6	182	424
7	188	454
8	192	476
9	198	491

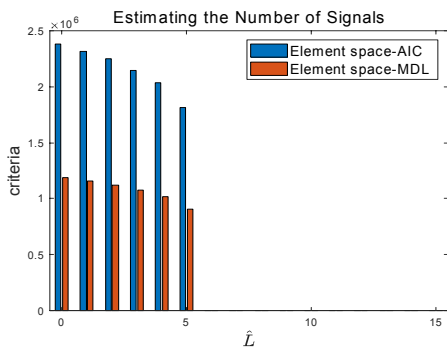


그림 8. 두 번째 시나리오에 대한 신호 개수에 대한 요소공간 기반 AIC와 MDL 기준값
Fig. 8 Criteria of element space AIC and MDL, versus the number of signal, for the second scenario

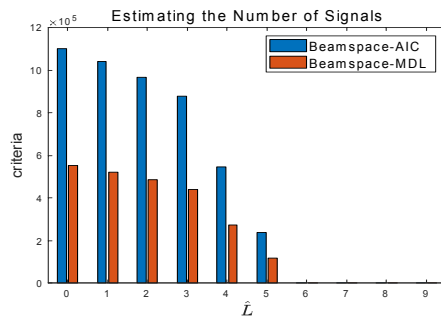


그림 10. 두 번째 시나리오에 대한 신호 개수에 대한 빔공간 기반 AIC와 MDL 기준값
Fig. 10 Criteria of beamspace AIC and MDL, versus the number of signal, for the second scenario

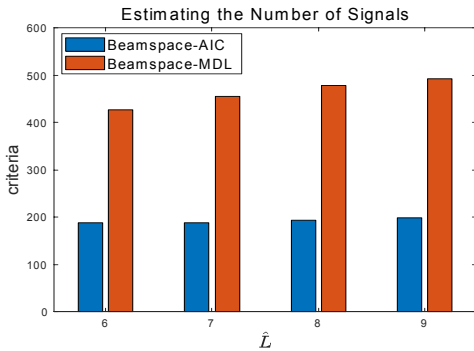


그림 11. 그림 10의 확대 버전
Fig. 11 Extended version of Fig. 10

V. 결 론

본 논문은 수신신호에 포함된 신호의 개수를 효율적으로 추정하기 위한 빔공간 기반의 AIC 및 MDL 신호 개수 추정 알고리즘을 제안하였다. 먼저, 빔공간 프로세스를 통해 배열 안테나 및 공분산 행렬의 차원을 낮추고, 그 결과를 AIC 및 MDL에 적용한다. 빔공간 기반 AIC 및 MDL 알고리즘은, 축소된 차원의 공분산 행렬을 사용하므로, 복잡도 면에서 기존의 신호 개수 추정 알고리즘에 비해 우수하다. 추정성능 또한, 기존 알고리즘과 비슷함을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.

이 논문은 2020년도 조선대학교 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, 1986, pp. 276-280.
- [2] S. Tu and L. Xu, "A study of several model selection criteria for determining the number of signals," In *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing*, Dallas, TX, USA, Mar. 2010, pp. 1966-1969.
- [3] D. B. Williams, *Digit. Signal Process. Handbook*. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [4] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals by information theoretic criteria," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 33, no. 2, 1985, pp. 387-392.
- [5] A. S. Sekmen and Z. Bingul, "Comparison of algorithms for detection of the number of signal sources," *Proc. IEEE Southeastcon'99. Technology on the Brink of 2000 (Cat. No.99CH36300)*, 1999, pp. 70-73.
- [6] 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.
- [7] L. C. Zhao, P. R. Krishnaiah, and Z. D. Bai, "On detection of the number of signals in presence of white noise," *J. Multivariate Analysis*, vol. 20, no. 1, 1986, pp. 1-25.
- [8] P.-C. Chen and P. P. Vaidyanathan, "Convolutional Beamspace for Linear Arrays," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 68, 2020, pp. 5395-5410.
- [9] H.-M. Noh, H. J. Kim, and H.-N. Kim, "DOA Estimation of Combining Time Modulated Arrays with Beamspace MUSIC Algorithm," *J. of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 45, no. 6, 2020, pp. 951-960.
- [10] Y. Yuan, B. Zhang, D. Fan, and G. Tong, "DFT and PSD for estimating DOA with an active

acoustic array," *Proc. IEEE Int. Conf. Automation and Logistics*, Qingdao, China, Sept. 2008, pp. 694-699.

- [11] J. Steinwandt, "Advanced Array Signal Processing Techniques for Beamforming and Direction Finding," Master's Thesis, *Ilmenau University of Technology*, 2011.
- [12] T. Kim and S. Hwang, "Performance Evaluation of Cascade AOA Estimation Algorithm Based on Square Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 6, 2019, pp. 1053-1060.
- [13] T. Kim and S. Hwang, "Performance Analysis of Cascade AOA Estimator with Concentric Ring Array Antenna," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 5, 2020, pp. 849-956.
- [14] I. Rhee, "Comparisons of AIC and MDL on Estimation Reliability of NUMBER OF Sources in Direction Finding Problem," *J. of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 15, no. 10, 1990, pp. 842-849.

저자 소개



박희선(Heui-Seon Park)

2021년 조선대학교 전자공학과 졸업(공학사)
2021년 ~ 현재 조선대학교 대학원 전자공학과 석사과정

※ 관심분야 : 적응신호처리, 빔형성 기법, 무선통신, 신호 추정 알고리즘



황석승(Suk-Seung Hwang)

1997년 광운대학교 제어계측공학과 졸업
2001년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업 (공학석사)

2006년 University of California, Santa Barbara, Electrical & Computer Engineering Department 대학원 졸업 (공학박사)
2006. 5~2008. 3 삼성전자 통신연구소 책임연구원
2008. 3~2014. 1 조선대학교 메카트로닉스공학과 교수

2014. 2~ 조선대학교 전자공학부 교수
※ 관심분야 : 적응신호처리, 위치추정, 채널추정, 이동로봇용 위치추정, 간섭제거, RFID