



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](#)

工學碩士 學位論文

빔 영역 처리에 기반한 근접장 음원 거리
추정

Near-field acoustic source localization based on
beam space processing

指導教授 金基萬



2018年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

權 宅 益

本 論 文 을 權 宅 益 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

委 員 長 : 工 學 博 士 鄭 智 元



委 員 : 工 學 博 士 尹 榮



委 員 : 工 學 博 士 金 基 萬



2018年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	v
제 1 장 서론	1
제 2 장 근접장 표적 거리 추정	
2.1 근접장 신호 모델	4
2.2 도달 시간차 추정 기반 방법	5
2.3 초점 지연-합 빔 형성	7
2.4 초점 MVDR 빔 형성	10
2.5 초점 MUSIC 방법	11
제 3 장 빔 영역 근접장 표적 거리 추정	
3.1 문제점	14
3.2 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성	15
3.3 빔 영역 초점 MUSIC 방법	19
3.4 계산량 비교	22
제 4 장 모의실험 및 결과 분석	
4.1 단일 표적 위치 추정 성능	24
4.2 근접 표적 위치 추정 성능	28
제 5 장 결론	33



List of Tables

Table 3.1 The computational complexity	23
Table 4.1 Resolution performance of the proposed method according to the number of subarray	32



List of Figures

Fig. 2.1 Signal modelling in near-field	5
Fig. 2.2 Source localization based on time difference-of-arrival	6
Fig. 2.3 The range between focal point and sensor	8
Fig. 2.4 Focused delay-and-sum beamformer	8
Fig. 3.1 Focused array beamforming to the focal point	16
Fig. 3.2 The Block diagram of a beamspace focused MVDR beamformer	19
Fig. 3.3 The Block diagram of a beamspace focused MUSIC beamformer	22
Fig. 4.1 Spatial spectra by	25
Fig. 4.2 Spatial spectra according to the number of subarray	27
Fig. 4.3 Average positioning error according to the target range ..	28
Fig. 4.4 Spatial spectra by,	29
Fig. 4.5 Spatial spectra according to the number of subarray	31

Near-field acoustic source localization based on beam space processing

Taek-Ik Kwon

Department of Radio Communication Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



Abstract

The passive sonar systems estimate the target position using the radiated noise from ship such as machinery noise, cavitation noise, etc. In passive localization problem, various approaches have been investigated such as time difference of arrival (TDoA), the triangulation method and focused beamforming. However, when multiple targets exist, it can create problems with localization based on TDoA. It is difficult to obtain an accurate cross-correlation when other interference signals are present at the same time. Focused beamforming estimates the positions by measuring the spatial spectrum. Unlike localization based on TDoA and triangulation, this method has no classification problems.

In this thesis, a focused array algorithm is proposed to reduce

the computational complexity. The focused MVDR(minimum variance distortionless response) and MUSIC(multiple signal classification) algorithm is typically used to estimate location. It has high spatial resolution but it also has a high computational complexity. The main complexity load of the focused MVDR algorithm is in inverse matrix. And for the focused MUSIC algorithm it is in eigen-decomposition. The computational complexity of those depends on the dimensions of the correlation matrix. To reduce computational complexity, the dimensions of the correlation matrix using beam-space transformation are reduced. The beam-space signals are transformed from the originally received signal using the fact that the far-field beamformers have different direction. Simulation results are presented to evaluate the performance of the proposed method compared to the previous method. The computational complexity of the proposed method is lower than that of the previous focused beamforming, but it has a similar range resolution

KEY WORDS: MVDR(minimum variance distortionless response), MUSIC(multiple signal classification), Source localization, Near-field source, beamspace, Focused beamforming

빔 영역 처리에 기반한 근접장 음원 거리 추정

권택익

Department of Radio Communication Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

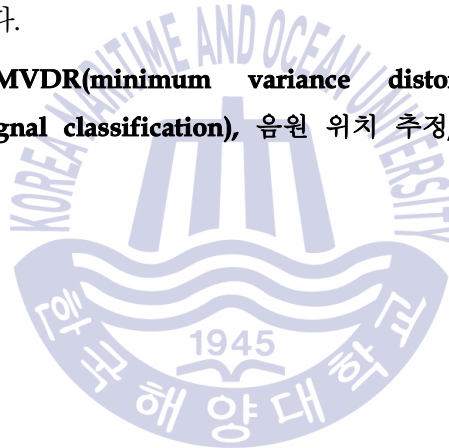
요약

수동형 소나는 선박의 기계 소음, 캐비테이션 소음 등의 방사 소음을 이용하여 표적의 위치를 추정한다. 수동형 위치 추정에는 도달 시간차, 삼각기법, 초점 빔 형성기 등을 이용한 다양한 연구가 있어 왔다. 그 중, 도달 시간차와 삼각기법 기반의 위치 추정은 수신된 신호들 사이의 상호 상관을 이용하여 추정한다. 이때 다수의 표적이 존재 한다면 관심 있는 표적 신호 이외의 표적 신호는 간섭 신호가 된다. 이 경우, 상호 상관을 이용하여 정확한 위치 정보를 구할 수 없게 된다. 또한 추정된 상호 상관 중 관심 표적 신호와 비 관심 표적 신호의 도달 시간차를 분류해야 한다. 초점 빔 형성기는 공간 스펙트럼을 추정하여 표적의 위치 추정을 하는 방법이다. 이때 초점 빔 형성기는 도달 시간차 및 삼각기법과 같은 분류 문제가 발생하지 않는다.

본 학위 논문에서는 초점 빔 형성 알고리즘의 계산량을 줄이는 방법

을 제안한다. 초점 MVDR(minimum variance distortionless response) 빔 형성과 MUSIC(multiple signal classification) 방법은 대표적인 위치 추정 알고리즘이다. 초점 MVDR 빔 형성과 MUSIC 방법은 높은 공간 분해능을 가지고 있으며, 많은 계산량을 가진다. 초점 MVDR 빔 형성 알고리즘에서 역행렬은 많은 계산량을 가지고, 초점 MUSIC 방법은 고유치 분해 과정이 많은 계산량을 가진다. 역행렬과 고유치 분해는 상관 행렬의 계산량은 행렬의 크기에 따라 달라지며, 계산량을 줄이기 위해 상관 행렬의 크기를 빔 영역으로 변환하여 줄인다. 이때 빔 영역 변환은 다른 방향으로 지향하는 원 거리 빔 형성기를 이용한다. 본 학위 논문에서 모의실험을 통해 제안된 방법을 비교 분석을 수행하였다. 제안된 방법은 기존의 방법보다 적은 계산량을 가지고 있으며 비슷한 위치 추정 성능을 가진다.

KEY WORDS: MVDR(minimum variance distortionless response), MUSIC(multiple signal classification), 음원 위치 추정, 근거리 음원, 빔 영역, 초점 빔 형성기



제 1 장 서 론

연안 해역은 해상 무역의 발달과 어로 활동에 따라서 해상 교통량이 많고 군사적으로 중요한 거점에 해당한다. 지금까지 수중에서 기동하는 음원을 탐지하기 위한 방법으로 소나가 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 표적으로부터 방사된 신호를 이용하여 위치를 추정하는 소나는 크게 능동형과 수동형 소나로 분류된다. 능동소나의 경우, 음파를 송신하여 표적에서 반사되는 신호를 탐지하여 위치를 추정한다. 이 경우, 능동소나의 구조상 수 kHz의 주파수를 사용하기 때문에 탐지거리에 제한이 있다. 이에 비해 수동소나의 경우 표적에서 방사되는 기계 소음, 캐비테이션 소음 등을 탐지하여 위치를 추정한다. 수동소나는 두 개 이상의 공간적으로 분리된 센서들을 이용하여 도달 시간차, 도래 각, 공간영역 상관도 등을 이용하여 표적의 위치를 추정한다 [1-11].

수동형 소나에서 근거리 표적의 위치 추정을 위한 방법은 여러 연구가 진행된 바 있다. 대표적인 방법을 소개하자면 첫 번째, 센서에 수신된 신호의 상호 상관을 이용하여 표적에서 방사된 신호의 도달 시간차를 추정하고 이를 이용하여 파면의 곡률을 이용한 위치 추정 기법이 있다[3]. 이 방법은 정확한 도달 시간차를 추정하기 위해 높은 샘플링 주파수가 필요하며, 다중경로 전달과 해수면의 큰 시변동성 등의 문제로 정확한 도달 시간차를 추정하기 어렵다[3-6]. 또한, 다수의 표적이 존재 할 때, 추정된 도달 시간차를 표적 별로 분류를 해야 하는 단점이 있다. 두 번째 방법은 공간적으로 떨어진 배열의 각각의 위치에서 도래 각을 추정하고, 삼각측량법을 이용하여 표적의 위치를 추정한다[7-8]. 이 방법 또한 다수의 표적이 혼재해 있는 경우 이들을 구분하기 어렵고, 배열들의 위치가 근접해

있을 경우 오차가 증가하는 단점을 가지고 있다[8]. 세 번째 방법은 공간 스펙트럼을 이용한 방법으로 공간영역 상관도를 이용하여 높은 에너지를 가지는 곳을 표적의 위치로 추정한다. 근거리에서 공간영역 상관은 초점 빔 형성기를 이용하여 구현한다. 초점 빔 형성에는 고전적인 지연 합 방법(delay-and-sum)[12,13], MVDR(minimum variance distortionless response)[14-16], MUSIC (multiple signal classification)[17-20] 방법 등이 대표적이다. 초점 지연 합 방법은 각 센서로 입사되는 신호와 가정된 표적의 위치로부터 생성되는 방향 벡터 사이의 상호 상관도를 구하는 것으로써 다른 방법들에 비해 간단하지만 간섭 신호가 존재하는 환경 등에서는 성능이 좋지 않다. 초점 MVDR 빔 형성은 정해진 위치에서 들어오는 신호의 이득을 1로 하면서 빔 출력을 최소로 하는 기법으로 간섭 신호 제거가 용이하다. 하지만 처리 과정에서 공분산(covariance) 행렬의 역행렬을 구하는 과정이 있어 지연 합 방법 보다 상대적으로 계산량이 많다. 초점 MUSIC 방법은 도래하는 신호의 방향 벡터와 신호의 잡음 부공간의 고유 벡터가 서로 직교하는 성질을 이용한 기법이다. 이 방법 또한 공분산 행렬의 고유치 분해(eigenvalue decomposition) 과정이 필요하므로 지연 합 방법보다 많은 계산량을 필요로 한다.

본 논문에서는 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MUSIC 방법의 문제점인 계산량 감소를 위하여 빔 영역 처리 방법을 제안한다. 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MUSIC 방법의 처리 과정에서 공분산 행렬을 필요로 한다. 공분산 행렬의 차원은 센서 수와 같으며, 결국 센서 수가 증가하면 계산량도 크게 증가한다. 이 공분산 행렬의 차원을 줄이기 위해 전 처리로써 센서를 부 배열로 나눈 후, 원거리 빔 형성기를 통과하여 빔 공간 신호를 생성한다. 이렇게 생성된 신호로 공분산 행렬을 구성하여 처리함으로써 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MUSIC 방법의 계산량이 감소하도록 하였다.

본 논문에서는 먼저 근접장 표적의 위치를 추정하기 위한 기존의 방법인 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MUSIC 방법을 소개한다. 그리고 계산량을 감소시키기 위해 빔 영역에서의 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MUSIC 방법

을 제안한다. 기존의 방법들과 제안한 빔 영역 처리 방법의 성능을 비교하기 위해 모의실험을 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

제 2 장에서는 근접장 표적의 신호 전달 모델과 함께 기존의 도래 시간차, 초점 지연 합, 초점 MVDR 빔 형성 및 초점 MSUIC 방법을 기술한다.

제 3 장에서는 기존의 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MSUIC 방법의 문제점과 함께 제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성 및 초점 MSUIC 방법을 기술한다.

제 4 장에서는 제안한 방법의 성능을 분석하기 위해 모의실험을 수행한 결과를 기술한다.

마지막으로 제 5 장에서는 결론 및 향후 연구 방향에 대하여 기술한다.



제 2 장 근접장에서의 표적 거리 추정

2.1 근접장 신호 모델

대부분의 배열 신호처리 분야에서 표적의 위치를 원거리로 가정하고 있다. 표적이 원거리에 있으므로 센서 배열에 도달하는 신호의 파면은 평면파로 가정한다. 하지만 표적이 근거리에 존재한다면 파면은 구면파가 된다. 원거리와 근거리를 구분하는 절대적인 기준은 모호하나, 대체적으로 다음 식을 기준으로 원거리와 근거리를 구분한다[21-23].

$$r = 2L^2/\lambda \quad (2.1)$$

여기서 L 은 전체 배열 길이이며, λ 는 파장이다. 평면파 모델링을 사용하는 원거리 신호 모델을 구면파 모델링을 사용하는 근거리 신호에 적용할 수 없다. 따라서 신호원의 거리와 방향에 따라 곡면률이 달라지는 새로운 근접장 신호에 대한 모델링이 필요하다.

근접장에서 입사 신호의 모델링을 그림 2.1에 나타내었다. 신호원과 기준 센서가 이루고 있는 거리 및 방위각을 R 및 θ 로 가정한다면, N 개의 센서에 입력되는 신호는 식 (2.2)와 같이 나타낼 수 있다[10].

$$x_i(t) = s(t + \tau_i) + n_i(t) \quad (2.2)$$

여기서 $s(t)$ 는 신호원에서 방사되는 신호이고, n_i 는 i 번째 센서에 더해지는 백색 가우시안 잡음이다. τ_i 는 i 번째 센서와 기준 센서 사이의 도달 시간 차이이며 식 (2.3)과 같이 구해진다.

$$\tau_i = (\sqrt{d_i^2 + 2d_i R \cos(\theta) + R^2} - R) / c \quad (2.3)$$

여기서 d_i 는 기준 센서와 i 번째 센서 사이의 거리이며 c 는 음속이다.

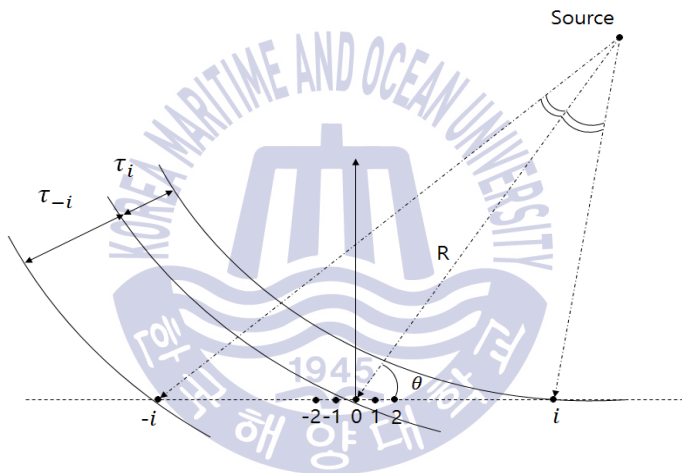


그림 2.1 근접장에서 입사 신호 모델링

Fig. 2.1 Signal modelling in near-field

2.2 도달 시간차 추정 기반 방법

파면 곡면률 기반의 위치 추정 방법은 공간적으로 분리된 3개 이상의 센서 또는 부 배열을 사용한다. 3개 이상의 센서를 사용할 때는 센서의 신호 출력을 이용하여 상호 상관을 통해 도달 시간차를 추정하며, 센서

부 배열을 사용 할 때는 각각 원거리 빔 형성을 한 후 빔 출력 신호를 이용하여 상호 상관을 추정하여 신호 도달 시간차를 추정한다. 그림 2.2와 같이 부 배열을 형성 한다면 가운데 부 배열과 남은 두 부 배열 사이의 거리를 L_1, L_2 이라고 할 때, 가운데 부 배열과 나머지 부 배열 사이에 발생하는 도달 시간차는 ΔT_1 과 ΔT_2 이다. ΔT_1 과 ΔT_2 는 다음 식으로 나타낼 수 있다[3].

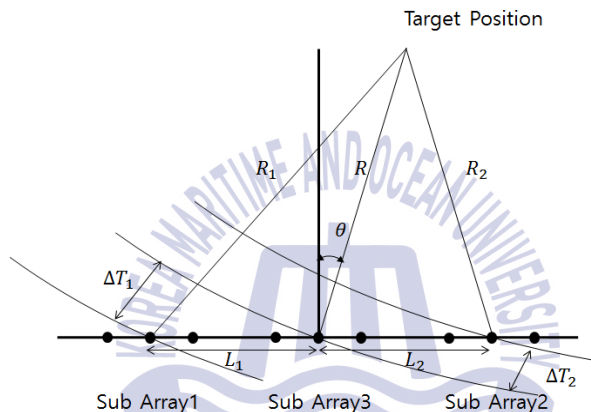


그림 3.2 도달 시간차 기반의 위치 추정
Fig. 2.2 Source localization based on time difference-of-arrival

$$\Delta T_1 = \frac{-R + (R^2 + L_1^2 - 2RL_1 \cos(\theta))^{1/2}}{c}, \quad (2.4)$$

$$\Delta T_2 = \frac{R - (R^2 + L_2^2 + 2RL_2 \cos(\theta))^{1/2}}{c} \quad (2.5)$$

식 (2.4) 와 (2.5)는 비선형 방정식이므로 풀기 위하여 다음 과 같이 나타낼 수 있다.

$$c\Delta T_1 = -R + R \left(1 + \frac{L_1^2}{R^2} - \frac{2L_1}{R} \cos(\theta) \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

$$c\Delta T_2 = R - R \left(1 + \frac{L_2^2}{R^2} + \frac{2L_2}{R} \cos(\theta) \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

식 (2.6) 와 (2.7)을 연립하면 R 과 θ 로 정리할 수 있다.

$$R = \frac{L_1 L_2 (L_1 + L_2) \sin^2(\theta)}{2c(L_2 \Delta T_1 - L_1 \Delta T_2)} \quad (2.8)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{c(L_2^2 \Delta T_1 + L_1^2 \Delta T_2)}{-L_1 L_2 (L_1 + L_2)} \right] \quad (2.9)$$

2.3 초점 지연-합 빔 형성

2차원 평면에서 센서들이 등 간격, 선형으로 배치되어 있으며, 같은 평면상에 표적이 위한 경우를 가정한다면 초점 지연-합 빔 형성기는 그림 2.3과 같이 탐색 구역을 정한 뒤 일정한 구간으로 나누어 셀을 형성한다. 각각의 셀에 맞는 지연-합 빔 형성기를 설계한 뒤 출력의 파워를 계산하여 표적의 위치를 찾는다.

각 셀에 해당 하는 초점 지연-합 빔 형성기는 그림 2.4와 같이 구성된다. 센서에 수신된 신호는 셀 위치에 따라 발생 되는 시간 지연차를 보정하고, 다시 합성하는 과정을 통해 빔 출력을 얻을 수 있다. 각 수신된 신호는 식(2.2)로 구할 수 있고, 초점 지연-합 빔 형성기의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다[12,13].

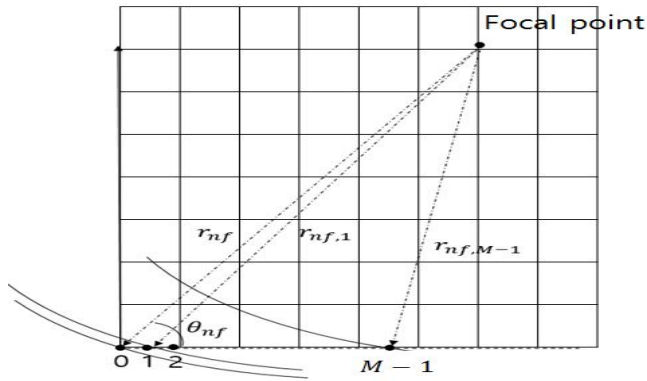


그림 2.3 초점과 센서 사이의 거리

Fig. 2.3 The range between focal point and sensor

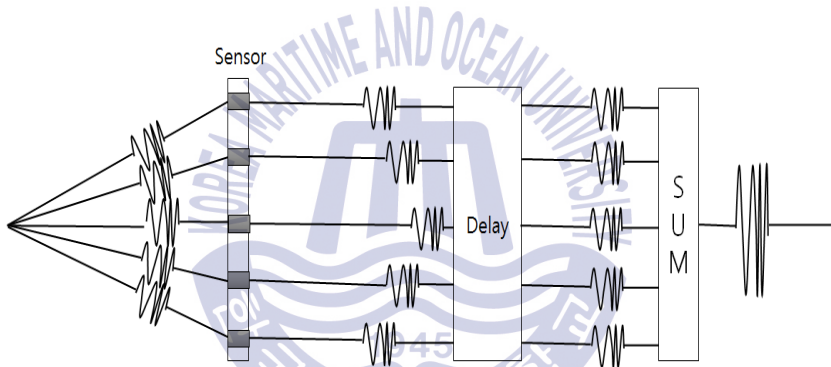


그림 2.4 초점 지연-합 빔 형성 개념

Fig. 2.4 Concept of the focused delay-and-sum beamformer

$$\begin{aligned}
 y_{DAS}(r_{nf}, \theta_{nf}) &= \sum_{i=0}^{N-1} w_i s_i(t - T_i) \\
 &= W^H S(t).
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

여기서 r_{nf} 와 θ_{nf} 는 초점 빔을 형성하는 셀의 극좌표계이며 w_i 는 가중치이다. T_i 는 초점 빔을 형성하는 위치와 센서 사이의 시간 지연으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_i = (r_{nf} - r_{nf,i})/c \quad (2.11)$$

$$r_{nf,i} = \sqrt{(dm_i - x)^2 + y^2}. \quad (2.12)$$

여기서 d 는 센서 사이의 거리이고, m_i 는 센서 인덱스에 해당한다. x 와 y 는 초점 빔을 형성하는 셀의 극좌표를 직교좌표로 변환 한 것이다. 각 셀의 빔 형성기의 출력 파워는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{DAS} &= E\{|y_{DAS}|^2\} \\ &= E\{W^H S(t) S(t)^H W\} \\ &= W^H R W \end{aligned} \quad (2.13)$$

여기서 $E\{\cdot\}$ 는 기댓값(expected value)이고, R 는 공분산 행렬이다. 행렬 R 은 다음과 같이 정의 된다.

$$R = E\{S(t) S(t)^H\}. \quad (2.14)$$

실제로는 다음과 같이 센서들에 수신된 신호 벡터로부터 구성된 샘플 공분산 행렬들의 평균으로 추정한다.

$$\hat{R} = \frac{1}{u} \sum_{t=0}^{u-1} S(t) S(t)^H \quad (2.15)$$

2.4 초점 MVDR 빔 형성

초점 빔 형성기는 빔 폭에 따라 표적 위치 추정에서 모호성이 발생할 수 있다. 또한 간섭 신호가 동시에 존재하는 환경에서는 빔 패턴 상에서 사이드 로브에 위치한 간섭 신호의 영향으로 인하여 성능이 저하될 수 있다. 이를 보완하기 위해 초점 MVDR 빔 형성을 사용할 수 있다. 초점 MVDR 빔 형성의 성능은 초점 지연-합 빔 형성기과 달리 수신된 신호의 특성에 의존한다. 조향하는 위치에서 방사하는 신호의 이득을 1로 하면서 빔 형성기의 출력 전력을 최소화 한다. 빔 패턴 상으로는 간섭 신호의 위치에 널(null)을 생성한다. 이런 효과로 공간 스펙트럼에서 표적 위치의 모호성을 줄일 수 있다. 초점 MVDR 빔 형성기의 출력과 그 파워는 다음과 같다[14-16].

$$\begin{aligned}
 y_{mvd\text{r}}(r_{nf}, \theta_{nf}) &= \sum_{i=0}^{M-1} w_i s_i(t - T_i) \\
 &= W^H S(t)
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
 P_{mvd\text{r}} &= E\{|y_{mvd\text{r}}|^2\} \\
 &= W^H R W,
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

원하는 위치에서 신호의 이득을 1로 유지하면서 센서 배열의 출력 파워를 최소화시키기 위한 W 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\min W^H R W, \quad \text{subject to } W^H e = 1 \tag{2.18}$$

여기서 조향 벡터에 해당 하는 e 는 오직 1로 이루어진 $N \times 1$ 벡터이다. 조향 벡터는 이미 T_i 로 보상해 주었기 때문에 중복을 피하기 위함이다. 식 (2.18)에 Lagrangian multiplier를 적용하면 W 는 다음과 같이 유도된다 [14-16].

$$W = \frac{R^{-1}e}{e^H R^{-1}e}. \quad (2.19)$$

2.5 초점 MUSIC 방법

고분해능 방법 가운데 하나인 MUSIC 방법은 도래하는 신호의 방향벡터와 신호의 잡음 부공간의 고유벡터가 직교하는 성질을 이용하여 거리와 방향을 추정한다. 초점 MUSIC 방법은 신호의 잡음 부공간을 분리하기 위해 공분산 행렬의 고유치 분해를 이용한다. 일반적으로 공분산 행렬은 다음 식으로 표현될 수 있다[17-20].

$$R = AR_s A^H + \sigma^2 I \quad (2.20)$$

여기서 R_s 는 신호원의 공분산 행렬이고 A 는 신호의 방향 벡터이다. $\sigma^2 I$ 는 잡음 성분의 상관 행렬이고 σ^2 은 잡음의 파워, I 는 단위행렬이다. 공분산 행렬 R 은 N 개의 고유벡터 v_1, v_2, \dots, v_N 에 해당하는 고유값 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 들을 갖게 된다. 고유값을 내림차순으로 정리하면, 첫 번째부터 D 까지 신호

성분에 해당하며 나머지 $N-D$ 의 고유값은 잡음에 해당한다. 여기서 D 는 배열에 입사하는 신호원의 수이다. 따라서 고유값과 고유벡터는 신호원과 잡음 성분으로 분리할 수 있다. 잡음에 해당하는 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N > 0 \quad (2.21)$$

$$Rv_j = \sigma^2 v_j \quad j = D+1, D+2, \dots, N \quad (2.22)$$

식 (2.20)을 식 (2.22)에 대입 하면 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma^2 v_j = (AR_s A^H + \sigma^2 I)v_j \quad (2.23)$$

$$AS_s A^H v_j = 0 \quad (2.24)$$

식 (2.24)에 $R_s^{-1}(A^H A)^{-1}A^H$ 을 양변에 곱하면 다음과 같이 나타난다.

$$R_s^{-1}(A^H A)^{-1}A^H AR_s A^H v_j = 0 \quad (2.25)$$

$$A^H v_j = 0, \quad j = D+1, D+2, \dots, N \quad (2.26)$$

식 (2.26)는 신호 벡터와 잡음 부공간이 서로 직교한다는 것을 보여준다. 이러한 성질을 이용하여 잡음 부공간 행렬 E_n 을 재구성 할 수 있다.

$$E_n = [v_{D+1}, v_{D+2}, \dots, v_N] \quad (2.27)$$

식 (2.27)을 이용하면 초점 MUSIC 방법의 출력 파워 P_{MUSIC} 을 다음과 같이 구할 수 있다[17-20].

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{e E_n E_n^H e} \quad (2.28)$$

여기서 e 는 조향 벡터에 해당 한다. 초점 MVDR 빔 형성과 같이 이미 T_i 로 보상하였기 때문에 중복을 피하기 위해 1 값으로만 이루어진 벡터이다.



제 3 장 빔 영역 근접장 표적 거리 추정

3.1 문제점 도출

도달 시간차 추정 기반의 위치 추정 방법은 다수의 표적이 존재할 때, 센서 출력의 상호 상관에서 각 표적에 해당하는 도달 시간차를 구별해야 한다. 표적의 수가 증가 한다면, 상호 상관에서 표적에 해당하는 도달 시간차를 구별하는 것은 어렵다. 또한, 다중경로 전달과 해수면의 큰 시변동성 등의 문제로 정확한 도달 시간차를 구하기 어렵다. 센서 또는 부 배열들의 위치가 근접해 있는 경우, 오류가 증가하는 단점이 있다[4-5].

공간 스펙트럼 기반의 방법은 공간 스펙트럼 상에서 표적을 구분하기 때문에 도달 시간차 추정 기반의 위치 추정 방법과 다르게 상호 상관에서 표적에 해당하는 도달 시간차를 구별 할 필요가 없다. 하지만 공간 스펙트럼 상에서 구분해야 하므로 높은 분해능이 필요하다. 분해능은 공간 스펙트럼의 셀 간격과 빔 형성기의 성능에 달려 있다. 셀 간격이 좁더라도 빔 형성기의 분해능이 셀 간격 보다 넓다면 인접해 있는 표적을 구분할 수 없다. 또한 빔 형성기의 성능이 좋더라도 셀 간격이 넓다면 인접해 있는 표적을 구분할 수 없다. 공간 스펙트럼 기반의 위치 추정 방법은 같은 탐색 구역을 갖더라도 셀의 수와 센서 수에 따라서 계산량과 성능 차이가 발생한다. 센서의 수가 증가할수록 빔 형성기의 빔 폭이 좁아져 분해능이 높아지지만 계산량은 늘어나게 된다. 분해능을 높이기 위한 다른 방법으로는 상대적으로 높은 분해능을 갖는 초점 MVDR 빔 형성기나 MUSIC 방법을 적용하는 것이다. 하지만 초점 MVDR 빔 형성과 MUSIC의

경우, 공분산 행렬의 역행렬을 구하거나 고유치 분해 과정이 필요하다. 이는 공분산 행렬의 차원이 증가하면 계산량이 크게 증가하는 문제점을 유발하는데 이 때 행렬의 차원은 센서 수와 같다.

천해에서 다수의 표적이 근거리 존재할 때, 표적 위치를 추정하기 위해서는 다수의 표적 위치를 추정할 수 있는 공간 스펙트럼 방법이 필요하고, 그 성능을 높이기 위해서는 고분해능의 초점 MVDR 빔 형성 또는 MUSIC 방법이 필요하다. 하지만 계산량이 많아 실제 시스템이 적용시키기 어렵다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 원거리 빔 형성기를 사용하여 빔 영역의 신호를 만들고 이를 이용하여 초점 빔 형성기를 수행하여 공분산 행렬의 차원을 줄여 계산량을 줄이는 방법을 제안하였다.

3.2 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성

기존의 빔 형성기는 다수의 센서들의 출력을 결합하여 빔 출력을 얻는다. 하지만 제안하는 빔 영역 빔 형성기의 경우 다수의 부 배열을 구성하고 이들의 다중 빔 형성기의 출력을 결합하여 빔 영역에서 출력을 얻는다. 먼저 N 개의 센서를 M 개의 부 배열로 나눈다. 이때 각 부 배열내의 센서 개수는 K 개이다. M 개의 부 배열을 이용한 원거리 빔 형성기의 출력은 다음과 같다.

$$B_{f,i} = \sum_{j=0}^{K-1} w_{ij}(t) s_{iK+j}(t - T_{f,ij}).$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, M-1. \tag{3.1}$$

$$T_{f,ij} = (d \times m_{iK+j} \times \cos(\theta_{f,i})) / c$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, K-1, \tag{3.2}$$

여기서 $T_{f,ij}$ 는 부 배열에서 원거리 빔 형성기의 지연 시간이고 $\theta_{f,i}$ 는 각 부 배열의 조향 방향이다. 표적이 근접장에 존재할 때 각 부 배열에 입사 되는 신호의 방향은 그림 3.1과 같이 달라진다. 따라서 각 부 배열의 조향 방향은 달라져야 한다.

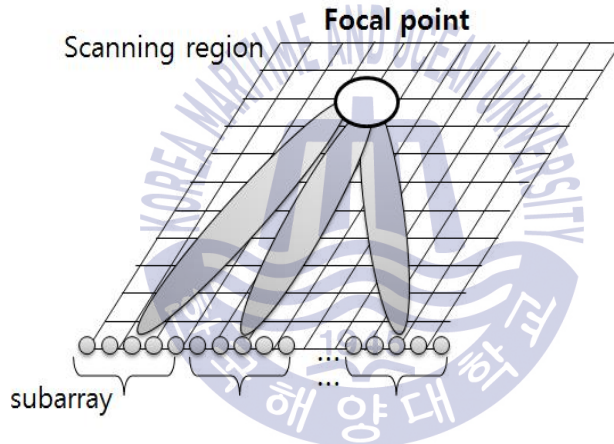


그림 3.1 초점에서 부 배열에 입사하는 신호의 방향

Fig. 3.1 Focused array beamforming to the focal point

각 부 배열에서 원거리 빔 형성기의 조향 방향을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{f,i} = \arctan\left(\frac{y_s}{x_s - x_i}\right)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (3.3)$$

여기서 x_i 는 부 배열이 형성하는 가상 배열의 x 축 상의 좌표이다. 수신된 신호를 빔 영역으로 변환하면서 가상 배열이 생성된다. 가상 배열은 각 부배열 내에서 같은 위치의 센서 좌표이며, 서로 간격은 같다. 또한 같은 공간 스펙트럼의 모든 셀에서 같은 가상 배열을 설정해야 한다. 다음으로 식 (3.1)로 생성된 빔 영역 신호를 이용하여 초점 MVDR 빔 형성을 수행하게 되는데 빔 공간 초점 MVDR 빔 형성기의 출력 B_{BS_MVDR} 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B_{BS_MVDR} &= \sum_{i=0}^{M-1} w_{BS_MVDR,j}(t) B_{f,i}(t - T_{N,i}) \\ &= W_{BS_MVDR}(t)^H B_f(t - T_N). \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$T_{N,i} = (r - r_{N,i})/c. \quad (3.5)$$

여기서 $T_{N,i}$ 는 빔 영역에서 만들어지는 M 개의 가상 배열 기준의 신호의 시간 지연이다. 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성기의 출력 파워는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{BS_MVDR} &= E\{|B_{BS_MVDR}|^2\} = E\{|B_f(t)B_f(t)^H|^2\} \\ &= E\{|W_{BS_MVDR}(t)^H B_f(t)B_f(t)^H W_{BS_MVDR}(t)|\} \\ &= W_{BS_MVDR}(t)^H R_{BS_MVDR}(t) W_{BS_MVDR}(t), \end{aligned} \quad (3.6)$$

여기서 R_{BS_MVDR} 은 식 (2.14)과 같이 B_f 의 기댓값으로 구할 수 있다. 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성기의 W_{BS_MVDR} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min W_{BS_MVDR}^H R_{BS_MVDR} W_{BS_MVDR} , \\ \text{subject to } W_{BS_MVDR}^H e = 1. \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$W_{BS_MVDR} = \frac{R_{BS_MVDR}^{-1} e}{e^H R_{BS_MVDR}^{-1} e}. \quad (3.8)$$

빔 영역에서 초점 MVDR 빔 형성기의 블록 다이어그램을 그림 3.2에 나타내었다. 먼저 센서에 입력된 신호는 설계 주파수 대역에 맞춰 대역통과 필터를 통과한다. 잡음이 제거된 신호를 적절하게 부배열로 나눈 뒤, 식 (3.1)을 이용하여 빔 영역의 신호로 변환한다. 이때 각 부배열에 각 부배열에 사용되는 원거리 빔 형성기의 조향 방향은 식 (3.3)으로 계산할 수 있다. 이후 가상 배열에 맞춰 식 (3.8)을 이용하여 W_{BS_MVDR} 를 구한다. 계산된 W_{BS_MVDR} 을 이용하여 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성을 수행하며, 공간 스펙트럼을 구하기 위해 관심 영역 내의 모든 셀로 지향하여 신호의 파워를 구하게 된다.

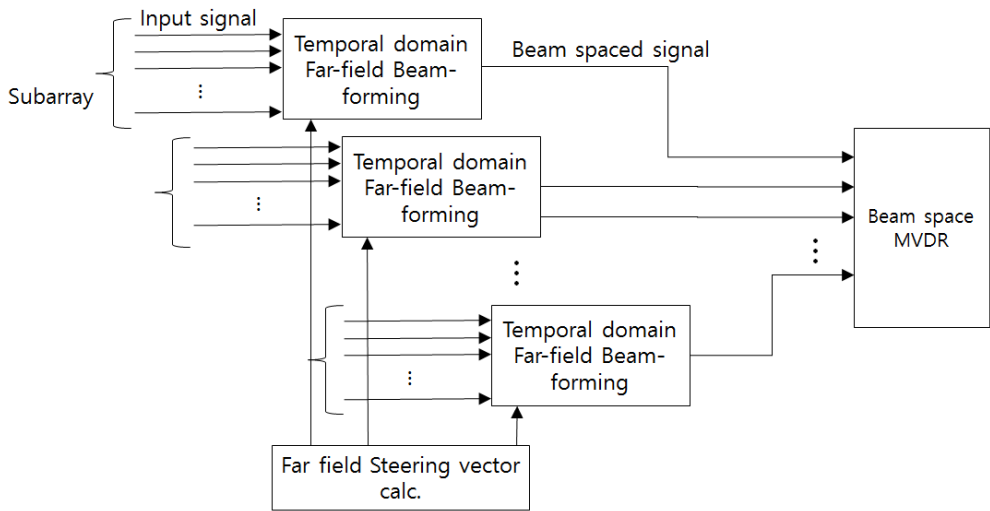


그림 3.2 초점 MVDR 빔 형성기의 블록 다이어그램

Fig. 3.2 Block diagram of a beamspace focused MVDR beamformer

3.3 빔 영역 초점 MUSIC 방법

앞서 제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성 과정과 마찬가지로 빔 영역 초점 MUSIC 방법을 제안하였다. 이를 수행하기 위하여 신호를 식 (3.1)과 (3.2)를 사용하여 빔 영역으로 변환한다. 변환된 신호를 가상 배열을 기준으로 지연 시간을 보정한 결과는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
 B_{BS_MUSIC} &= \sum_{i=0}^{M-1} w_{BS_MUSIC,j}(t) B_{f,i}(t - T_{N,i}) \\
 &= W_{BS_MUSIC}(t)^H B_f(t - T_N).
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

빔 영역 신호를 식 (2.14)를 사용하여 추정된 공분산 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_{BS_MSIC} = A_{BS}R_{BS_s}A_{BS}^H + \sigma^2I \quad (3.10)$$

여기서 R_{BS_s} 는 빔 영역에서 신호원의 공분산 행렬이고 A_{BS} 는 부배열에서 입사되는 신호의 방향 벡터이다. σ^2I 는 잡음의 공분산 행렬이다. 빔 영역의 공분산 행렬은 M 개의 고유 벡터 $v_{BS,1}, v_{BS,2}, \dots, v_{BS,M}$ 에 해당하는 고유값 $\lambda_{BS,1}, \lambda_{BS,2}, \dots, \lambda_{BS,M}$ 을 갖게 된다. 공분산 행렬을 고유치 분해를 수행하고 내림차순으로 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_{BS,1} \geq \lambda_{BS,2} \geq \dots \geq \lambda_{BS,M} > 0 \quad (3.11)$$

$$R_{BS_MSIC}v_{BS,j} = \sigma^2v_{BS,j} \quad j = D+1, D+2, \dots, M \quad (3.12)$$

식 (3.10)을 식 (3.12)에 대입하면 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma^2v_{BS,j} = (A_{BS}R_{BS_s}A_{BS}^H + \sigma^2I)v_{BS,j} \quad (3.13)$$

$$A_{BS}R_{BS_s}A_{BS}^Hv_{BS,j} = 0 \quad (3.14)$$

식 (3.14)에 $R_{BS_s}^{-1}(A_{BS}^H A_{BS})^{-1}A_{BS}^H$ 을 양변에 곱하면 다음과 같이 나타난다.

$$R_{BS_s}^{-1}(A_{BS}^H A_{BS})^{-1}A_{BS}^H A_{BS}R_{BS_s}A_{BS}^Hv_{BS,j} = 0 \quad (3.15)$$

$$A_{BS}^H v_{BS,j} = 0, \quad j = D+1, D+2, \dots, M \quad (3.16)$$

따라서 식 (3.16)은 초점 MUSIC 방법과 같이 신호 벡터와 잡음 부공간이 서로 직교한다는 것을 보여준다. 여기서 잡음 부공간은 다음과 같이 얻어진다.

$$E_{BS,n} = [v_{BS,D+1}, v_{BS,D+2}, \dots, v_{BS,M}] \quad (3.17)$$

빔 영역 초점 MUSIC의 출력 파워는 다음과 같이 나타난다.

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{e E_{BS,n} E_{BS,n}^H e} \quad (3.18)$$

그림 3.3은 빔 영역 초점 MUSIC 방법의 블록 다이어그램이다. 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성과 같이 입력 신호를 적절한 크기의 부 배열로 나눈 후, 빔 영역 신호로 변환한다. 이때 식(3.9)와 같이 원거리 빔 형성기를 사용하고 $T_{f,i}$ 는 빔 영역 초점 MVDR과 같이 식 (3.2)와 (3.3)을 사용하여 구할 수 있다. 그 후 초점 MUSIC을 수행하기 위해 고유치 분해를 통해 잡음 부 공간을 분리한다. 분리된 잡음 부공간과 식 (3.18)을 이용하여 빔 영역 초점 MUSIC 방법을 수행한다. 빔 영역 초점 MUSIC 방법 또한 모든 관심 영역의 셀에서 출력 파워를 계산한 후, 공간 스펙트럼을 추정한다.

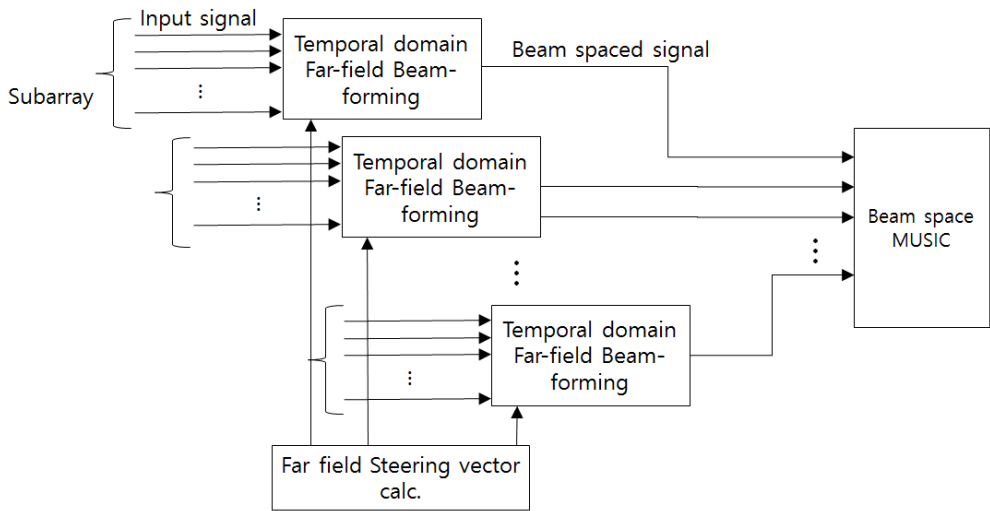


그림 3.3 초점 MUSIC 방법의 블록 다이어그램
 Fig. 3.3 Block diagram of a beamspace focused MUSIC method

3.4 계산량 비교

제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성 및 빔 영역 초점 MUSIC 방법을 기존의 방법과 계산량을 비교하기 위해 빅 오 표기법[24]으로 표 3.1로 나타내었다. 여기서 J 는 전체 셀의 수이다. 공분산 행렬의 계산량은 다른 것에 비해 작기 때문에 표기하지 않았다. N^3 과 M^3 는 초점 MVDR 빔 형성과 제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성의 역행렬 계산량에 해당하며, N^2D 과 M^2D 은 초점 MUSIC 방법과 제안한 빔 영역 초점 MUSIC 방법의 고속 고유치 분해 계산량이다[25].

Table 3.1 computational complexity

Primary real-valued computations	
Focused delay-and-sum	$O(JM)$
Focused MVDR	$4 \times O[J(N^2 + N) + N^3]$
Focused MUSIC	$4 \times O[J(N+1)(N-D) + N^2D]$
Beam-space focused MVDR	$4 \times O[J(M^2 + M) + M^3]$
Beam-space focused MUSIC	$4 \times O[J(M+1)(M-D) + M^2D]$

J 가 같을 때, 계산량을 결정하는 주요 파라미터는 공분산 행렬의 차원인 N , M 이다. 부 배열 수가 1보다 크다면, 기존의 초점 빔 형성기는 $O(JM)$ 으로 가장 작은 계산량을 가진다. 기존의 초점 MUSIC과 MVDR 비교하면 $O[J(N^2 + N)]$ 가 공통적으로 존재한다. 나머지 항을 비교하면 초점 MUSIC은 $O[J(-ND - D) + N^2D]$, 초점 MVDR은 $O[N^3]$ 을 가진다. 여기서 $J \gg N$ 이기 때문에 초점 MVDR에서 $O[N^3]$ 은 $O[J(-ND - D) + N^2D]$ 에 비해 크다. 따라서 기존의 초점 MVDR 빔 형성은 초점 MUSIC 방법보다 큰 계산량을 가진다. 기존의 초점 MVDR 빔 형성과 제안한 빔 영역 MVDR 빔 형성을 비교하면 $N > M$ 이기 때문에 기존의 방법 보다 제안한 방법이 작은 계산량을 가진다. 또한 기존의 초점 MUSIC 방법과 제안한 빔 영역 초점 MUSIC 방법도 같은 이유로 제안한 방법이 작은 계산량을 가진다. 정리하면 가장 큰 계산량을 가지는 방법은 기존의 초점 MVDR 방법이고 다음으로 초점 MUSIC 방법이다. 세 번째는 제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성이고 다음으로 제안한 빔 영역 초점 MUSIC 빔 형성이다. 가장 작은 계산량은 가지는 방법은 기존의 초점 지연-합 방법이다. 계산량은 센서 수 N 이 커질수록, 부 배열이 적을수록 차이가 커진다.

제 4 장 모의실험 및 결과 분석

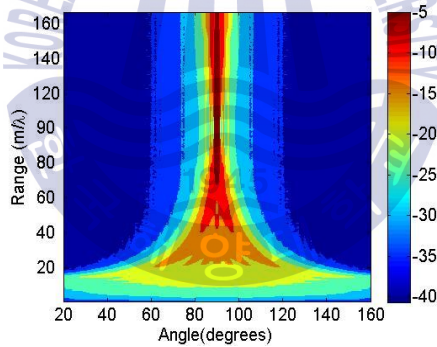
제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성 및 빔 영역 MUSIC 방법과 기존의 초점 지연-합, MVDR 빔 형성 그리고 MUSIC 방법의 성능을 비교 분석하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 기존의 초점 MUSIC 방법과 제안한 빔 영역 초점 MUSIC 방법은 표적의 개수 정보가 필요한데 본 논문에서 표적의 수는 알고 있다고 가정하였다. 1개의 표적만 있을 경우와 2개의 표적이 근접해 있는 경우를 가정하였다. 표적이 1개 존재할 때, 공간 스펙트럼 상에서 모호성을 비교하였다. 또한 부 배열의 수에 따라 모호성의 변화를 비교하였다. 2개의 표적이 근접할 때, 표적을 분리할 수 있는 성능을 비교하였고, 부 배열 수에 따른 성능 변화를 비교하였다. 각 모의실험에 사용된 센서의 수는 64개, 각 센서 사이의 거리는 $0.75 m$ 의 선 배열을 사용하였다. 표적 거리는 기준 센서로부터 $90 m/\lambda$ 떨어져 있다고 가정하였다. 또한 신호 대 잡음비는 $0 dB$ 를 사용하였다. 여기서 m/λ 는 거리를 파장으로 정규화한 길이를 나타내는 무차원수를 표현 하는 기호로 사용되었다.

4.1 단일 표적 위치추정 성능

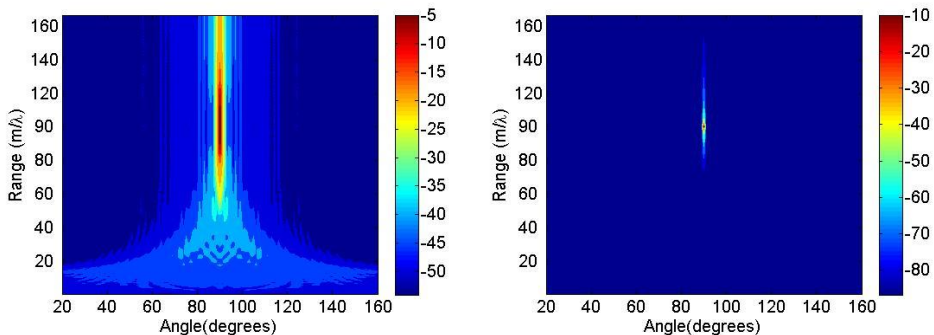
제안한 빔 영역 초점 MVDR, MUSIC과 기존의 초점 지연-합, MVDR 그리고 MUSIC에서 표적이 1개 존재할 때, 모호성을 비교하였다. 표적의 방향은 90° 로 하였다. 제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성, MUSIC 방법, 기존의 초점 지연 합, MVDR 그리고 MUSIC의 2차원 공간 스펙트럼을 그

림 4.1에 나타내었다. 부 배열의 수는 16개이며 부 배열 내의 센서 수는 4개를 사용하였다.

모의실험 결과로부터 모든 방법에서 정확하게 위치를 추정하였다. 하지만 초점 지연-합 방법이 가장 큰 모호성을 가지고 있어 성능이 낮고, 사이드 로브의 평균 레벨은 가장 높았다. 초점 MUSIC 방법이 가장 작은 모호성을 가지고 있고, 사이드 로브의 평균이 약 -83 dB로 가장 낮아 높은 성능을 가진다. 또한 사이드 로브 레벨의 변화가 거의 없는 기존의 초점 MUSIC의 특징을 제안한 빔 영역 초점 MUSIC 방법에서도 보이고 있다. 제안한 빔 영역 초점 MVDR의 평균 사이드 로브 레벨은 약 -37 dB, 빔 영역 초점 MUSIC은 -80 dB로 기존의 초점 MVDR 빔 형성과 MUSIC 방법은 각각 제안한 방법과 거의 비슷한 성능을 가지고 있다. 하지만 제안한 방법은 기존의 초점 지연 합 방법보다 좋은 성능을 나타내었다.



(a)



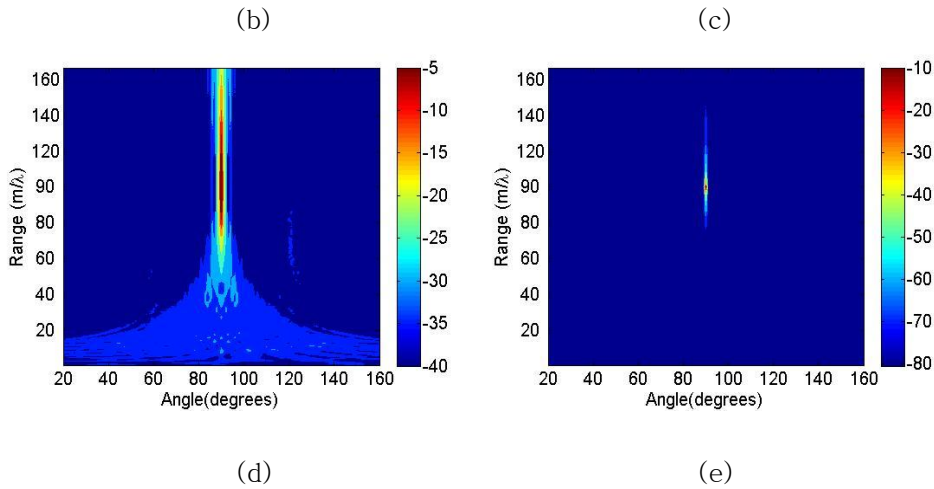
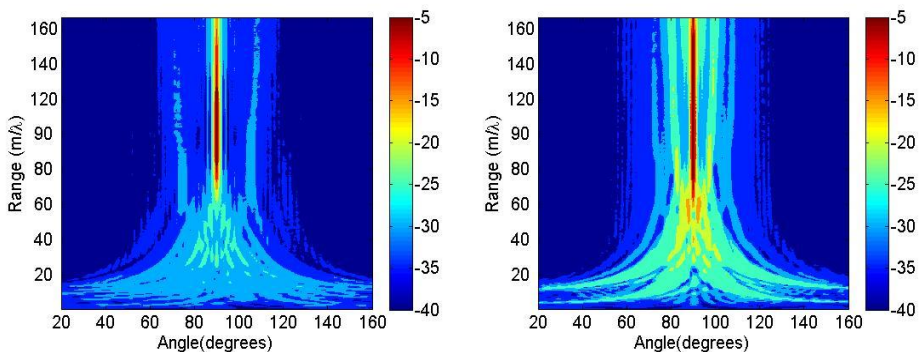


그림 4.1 공간 스펙트럼, (a) 초점 지연-합, (b) 초점 MVDR, (c) 초점 MUSIC, (d) 빔 영역 초점 MVDR($M=16$), (e) 빔 영역 초점 MUSIC($M=16$)

Fig. 4.1 Spatial spectra by, (a) Focused delay and sum, (b) Focused MVDR, (c) Focused MUSIC, (d) Beam space focused MVDR($M=16$), (e) Beam space focused MUSIC($M=16$)

제안한 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성, MUSIC 방법의 부 배열의 수에 따른 성능을 비교하기 위해 표적의 위치는 같고 부 배열의 수를 8, 4로 바꾸어 모의실험을 수행한 결과를 그림 4.2에 나타내었다.



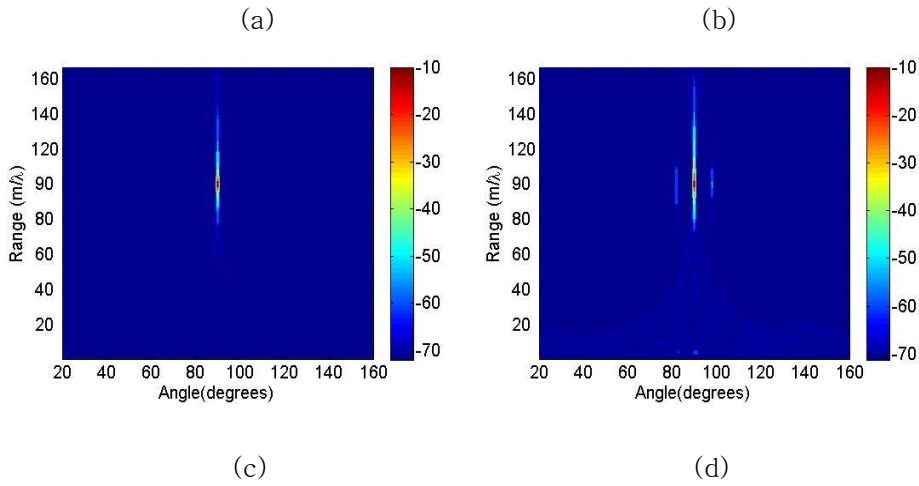


그림 4.2 부 배열 수에 따른 공간 스펙트럼, (a) 빔 영역 초점 MVDR($M=8$), (b) 빔 영역 초점 MVDR($M=4$), (c) 빔 영역 초점 MUSIC($M=8$), (d) 빔 영역 초점 MUSIC($M=4$)

Fig. 4.2 Spatial spectra according to the number of subarray, (a) Beam space focused MVDR($M=8$), (b) Beam space focused MVDR($M=4$), (c) Beam space focused MUSIC($M=8$), (d) Beam space focused MUSIC($M=4$)

그림 4.1 (d), (e)와 그림 4.2를 비교해 보면 제안한 빔 영역 초점 MVDR과 MUSIC의 부배열 수 감소에 따라 모호성이 증가하였다. 또한 사이드로브의 평균 레벨도 증가하였다. 제안한 빔 영역 초점 MVDR과 MUSIC의 성능은 부배열의 수와 비례 관계를 가지고 있다. 이는 부배열의 수가 증가할수록 기존의 초점 MVDR과 MUSIC 방법에 수렴하기 때문이다. 하지만 부배열이 증가하면 계산량이 증가한다. 따라서 계산량 성능과 모호성 성능이 서로 반비례 관계이기 때문에 적절한 부배열의 수의 설정이 필요하다.

그림 4.3은 표적이 위치한 거리를 $90\text{ m}/\lambda$ 부터 $3.33\text{ m}/\lambda$ 간격으로 $123.3\text{ m}/\lambda$ 까지 몬테카를로 모의실험을 100번 수행하여 평균 오차를 나타낸 것이다. 기존의 방법과 제안한 방법 모두 표적의 거리가 멀어질수록 평균오차는 증가하였다. 이는 거리가 멀어질수록 배열에 도달하는 파면이 구면파가 아닌 평면파로 수렴하기 때문이다.

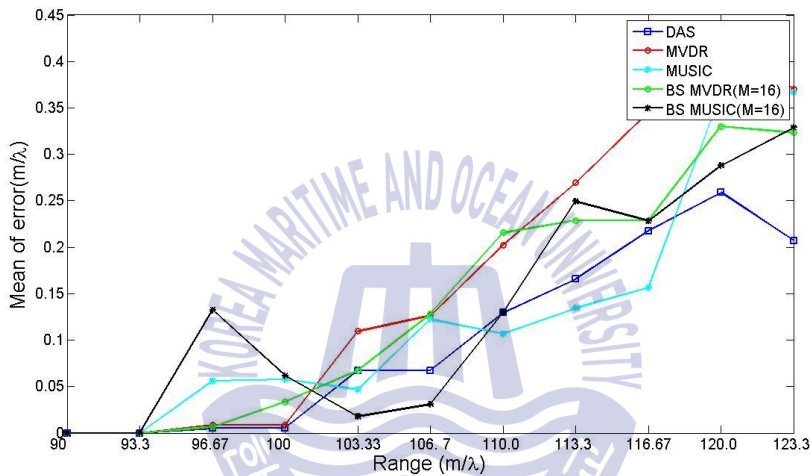


그림 4.3 표적 거리에 따른 평균 위치 추정 오차

Fig. 4.3 Average positioning error according to the target range

4.2 근접 표적 위치 추정 성능

2개의 표적이 근접해 있을 경우, 제안한 방법과 기존은 방법들을 비교 분석하였다. 모의실험을 위한 배열은 앞선 경우와 같다. 2개의 표적 중 하나는 $90\text{ m}/\lambda$, 90° 에 고정하고, 나머지 표적은 같은 거리에서 방위를 바

꾸어, 두 표적이 부분 가능한 최소 방의 차를 구하였다. 그림 4.4는 각각의 표적이 $90\text{ m}/\lambda$, 90° , $90\text{ m}/\lambda$, 92° 에 위치해 있을 때 각 방법들의 2차원 공간 스펙트럼을 나타낸 것이다.

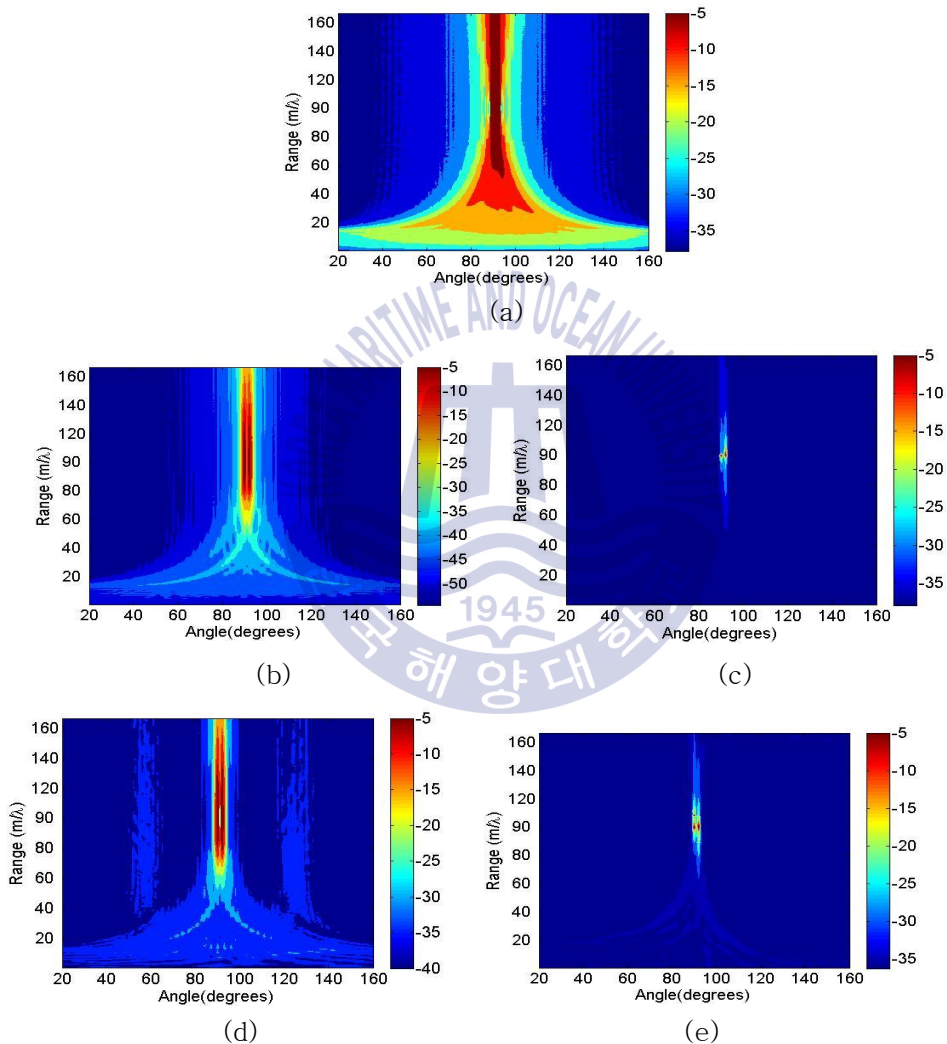


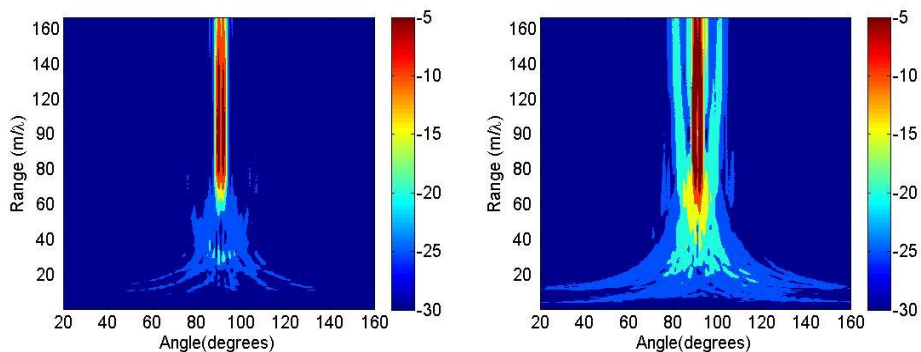
그림 4.4 공간 스펙트럼, (a) 초점 지연 합 , (b) 초점 MVDR, (c) 초점 MUSIC, (d) 빔 영역 초점 MVDR($M=16$), (e) 빔 영역 초점

MUSIC($M=16$)

Fig. 4.4 Spatial spectra by, (a) Focused delay and sum, (b) Focused MVDR, (c) Focused MUSIC, (d) Beam space focused MVDR($M=16$), (e) Beam space focused MUSIC($M=16$)

그림 4.4 (a)는 2개의 표적이 존재할 때, 초점 지연 합 방법의 공간 스펙트럼이다. 초점 지연 합 방법은 표적 방위차가 2° 일 때, 2개 표적이 하나의 표적처럼 보인다. 따라서 기존의 초점 지연 합 방법은 2개의 표적을 구분할 수 없다. 하지만 그림 4.4 (b)와 (c)에서 나머지 방법은 두 방법은 2개 표적을 구분할 수 있어 초점 지연 합 보다 성능이 좋다. 또한 기존의 초점 MUSIC 방법은 초점 MVDR 빔 형성보다 사이드 로브의 평균 레벨이 높지만 2개의 표적을 구분하는 성능은 좋다. 제안한 방법은 기존의 초점 MVDR 빔 형성과 초점 MUSIC 방법과 유사하게 표적을 구분한다.

그림 4.5는 2개의 표적이 존재할 때, 부배열 수에 따른 제안한 방법의 공간 스펙트럼이다. 그림 4.5 (a)는 부배열이 8개 일 때, 제안한 빔 영역 초점 MVDR의 공간 스펙트럼이다. 그림 4.4 (d)와 비교하면 모호성이 증가하였다. 또한 그림 4.5 (b)는 공간 스펙트럼 상에서 2개의 표적을 구분할 수 없다. 하지만 그림 4.5 (c)와 (d)는 공간 스펙트럼 상에서 2개의 표적은 구분할 수 있지만 부배열이 16개일 때 보다 성능이 떨어지는 것을 알 수 있다.



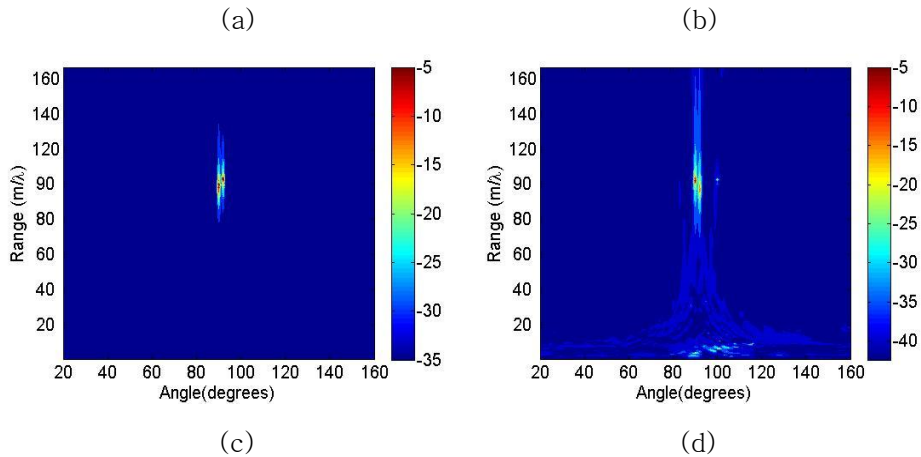


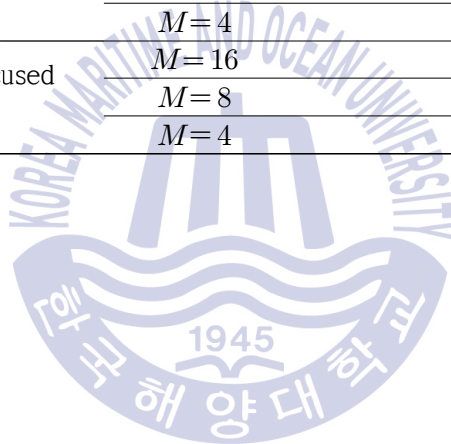
그림 4.5 2개의 표적이 존재 할 때, 부배열 수에 따른 공간 스펙트럼, (a) 빔 영역 초점 MVDR($M=8$), (b) 빔 영역 초점 MVDR($M=4$), (c) 빔 영역 초점 MUSIC($M=8$), (d) 빔 영역 초점 MUSIC($M=4$)

Fig. 4.5 Spatial spectra according to the number of subarray, (a) Beam space focused MVDR($M=8$), (b) Beam space focused MVDR($M=4$), (c) Beam space focused MUSIC($M=8$), (d) Beam space focused MUSIC($M=4$)

표 4.1은 부배열 수에 따른 제안한 방법과 기존 방법의 2개의 표적을 구분할 수 있는 최소 방위각 차이이다. 기존의 초점 MUSIC 방법이 0.5° 로 가장 좋은 성능을 가지고 있으며 부배열의 수에 따라 $0.9, 1.3, 18^\circ$ 로 구분할 수 있는 방위각 차이는 커진다. 또한 기존 초점 MVDR 빔 형성이 1.0° 로 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성에 비해 좋은 성능을 가지며 부배열 수에 따라 다른 성능을 가진다. 따라서 분해능 성능 또한 부배열의 수가 증가할수록 구분할 수 있는 최소 방위각 차이는 작아진다.

Table 4.1 Resolution performance of the proposed method according to the number of subarray

		Resolution
Focused delay-and-sum		3.2°
Focused MVDR		1.0°
Focused MUSIC		0.5°
Beam-space focused MVDR	$M=16$	1.4°
	$M=8$	1.7°
	$M=4$	2.2°
Beam-space focused MUSIC	$M=16$	0.9°
	$M=8$	1.3°
	$M=4$	1.8°



제 5 장 결 론

수중에서 표적의 위치를 추정하기 위해 대표적으로 도달 시간차, 도래각, 공간 스펙트럼 기반 등의 방법들이 있다. 천해의 환경에서 다수의 표적이 존재할 때, 도달 시간차와 도래각 기반의 표적 위치 추정은 지연 시간 또는 도달 방향을 표적 별로 구분하는데 어려움이 있다. 공간 스펙트럼 기반의 표적 위치 추정의 경우에는 빔 형성기의 높은 분해능을 요구한다. 초점 지연-합 빔 형성기 보다 높은 분해능을 갖는 빔 형성기에는 초점 MVDR과 초점 MUSIC 빔 형성기가 있지만 두 방법은 공분산 행렬의 역행렬 또는 고유치 분해의 과정이 필요해 초점 지연-합 빔 형성기보다 많은 계산량을 필요로 하는 문제점을 갖는다.

본 논문에서는 도달 시간차 기반의 표적 위치 추정 기법과 기존의 공간 스펙트럼 추정에서 초점 지연-합, 초점 MVDR 빔 형성, 초점 MUSIC 방법을 소개하고, 기존의 방법보다 적은 계산량을 갖는 빔 영역 초점 MVDR 빔 형성과 MUSIC 방법을 제안하였다. 또한 기존의 방법과 제안한 방법의 빅 오 표기법을 이용하여 계산량을 비교하였다. 제안된 방법들의 성능을 검증하기 위해 수행된 모의실험을 통해 한 개의 표적이 존재할 때, 기존의 방법과 제안한 방법의 공간 스펙트럼을 비교 분석한 결과에서 제안한 방법은 기존의 방법에 비해 적은 계산량을 가지면서도 유사한 성능을 나타내었다. 부배열 수가 증가할 때 모호성은 기존의 방법들의 성능으로 수렴하였고, 부배열수가 감소할 때 모호성은 증가 하였다. 이를 통해 모호성과 부배열은 반비례 관계임을 알 수 있었다. 반비례 관계를 가지는 이유는 부 배열의 수가 증가할수록 가상 센서 배열이 기존의 방법의 센서 배열에 수렴하기 때문이다. 표적 거리에 따른 성능 분석을 통해 각 방법들

은 비슷한 오차를 가지고 있고 거리가 증가할수록 평면파로 수렴하면서 오차는 커진다. 인접한 표적을 구분할 수 있는 성능을 비교하기 위해 2개의 표적인 인접한 경우를 가정하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험 결과 기존 초점 MUSIC 방법이 0.5° 의 성능을 나타내 성능이 가장 좋고 기존의 초점 지연-합 방법이 3.2° 로 가장 나쁜 성능을 보였다. 제안한 방법은 부 배열을 수에 따라 $2.2\sim 0.9^\circ$ 의 성능을 나타내었다. 모의실험을 종합해 보면 제안한 방법은 기존의 방법들과 비슷한 성능을 갖거나 향상된 성능을 나타내었다. 하지만 기존의 방법들과 비교하였을 때 적은 계산량을 가지고 있다.

향후 최적 부배열 수를 설정하기 위해 설계 파라미터 및 허용 오차와 같은 목표에 따라 달라지는 적절한 비용 함수를 설정하고 이에 따른 최적값을 설정하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 실제 실험을 통해 수집된 데이터를 이용한 분석이 요구된다.



참 고 문 헌

- [1] H. L. Van Trees, *Optimum array processing*, John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [2] A. D. Waite, *Sonar for practising engineers*, John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [3] Carter, G. C. “Time delay estimation for passive sonar signal processing.” *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol.29, no.3 pp.463-470, 1981.
- [4] W. B. Adams, J. P. Kuhn, and W. P. Whyland, “Correlator compensation requirements for passive time delay estimation with moving source or receivers.” *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol.28, no.2, pp.158-168, 1980.
- [5] G. C. Carter, “Passive ranging errors due to receiving hydrophone position uncertainty.” *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.65, no2, pp.528-530, 1979.
- [6] Moose, R., “Passive range estimation of an underwater maneuvering target” *IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing*, vol.35, no.3, pp.274-285, 1987.
- [7] Hinich and Melvin J. “Passive range estimation using subarray parallax.” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol.65, no.5, pp.1229-1230, 1979.
- [8] Chan, Yiu-Tong, and K. C. Ho. “A simple and efficient estimator for hyperbolic location.” *IEEE Trans. Signal Processing* vol.42, no.8, pp.1905-1915, 1994.
- [9] Shi J, Liu B, Song H, Zhao L, & Li, M. “Radiated noise sources location based on MVDR near-field focused beamforming.” *in Proc. 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp.849-852, 2008.

- [10] Y.D. Huang and B. Mourad, "Near-field multiple source localization by passive sensor array." *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.39, no.7, pp.968-975, 1991.
- [11] Ki-Man Kim , et all. "Passive-range estimation using dual focused beamformers." *J. Acoust. Soc. Kr*, vol.20, pp.52-57, 2001.
- [12] Van Trees, Harry L. *Detection, estimation, and modulation theory, optimum array processing*, John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [13] Kuperman, William A., et al. "Optimal time-domain beamforming with simulated annealing including application of apriori information." *The Journal of the Acoustical Society of America*. vol.88, no.4, pp.1802-1810, 1990.
- [14] Chen, H-W., and J-W. Zhao "Wideband MVDR beamforming for acoustic vector sensor linear array" *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol.151, no.3, pp.158-162. 2004.
- [15] Stoica, Petre, Zhisong Wang, and Jian Li. " Robust capon beamforming" *IEEE Signal Processing Letters*, vol.10, no.6, pp.172-175, 2003.
- [16] Wang, Z., Li, J. and Wu, R., "Time-delay- and time-reversal-based robust capon beamformers for ultrasound imaging" *IEEE Trans. Med. Imag*, vol.24, no.10, pp.1308-1322, 2005.
- [17] Liang, Junli, and Ding Liu. "Passive localization of mixed near-field and far-field sources using two-stage MUSIC algorithm." *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.58, no.1, pp.108-120, 2010.
- [18] R.O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation." *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.34, no.3, pp.276-280, 1986.
- [19] F. C. Schwegge, "Sensor array data processing for multiple signal sources." *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol.IT-14, pp.294-305, 1968.

- [20] Jeffers, Russell, Kristine L. Bell, and Harry L. Van Trees, "Broadband passive range estimation using MUSIC." *Acoustics, Speech, and Signal Processing IEEE International Conference*, pp.2921-2924, Mar. 2002,
- [21] Rodney A. Kennedy, Darren B. Ward, and Thushara D. Abhayapala, "Nearfield beamforming using radial reciprocity" , *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol.47, no.1, pp.33-40, Jan. 1999.
- [22] Thushara D. Abhayapala, Rodney A. Kennedy, and Robert C. Williamson, "Nearfield broadband array design using a radially invariant modal expansion" , *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.107, no.1, pp.392-403, Jan. 2000.
- [23] Thushara D. Abhayapala, Modal analysis and synthesis of broadband nearfield beamforming arrays, Ph.D dissertation, The Australian National University, Dec. 1999.
- [24] Feng-Gang Yan, et al. "Real-valued MUSIC for efficient direction estimation with arbitrary array geometries." *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.62, no.6, pp.1548-1560, 2014.
- [25] Xu and Kailath, "Fast subspace decomposition." *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.42, no.3, pp.539-551, 1994.

감사의 글

대학원 2년의 시간은 정말 빠르게 지났습니다. 이 2년의 시간이 날이 좋아서, 날이 좋지 않아서, 날이 적당해서 시간이 빨리 지나간 것은 아닙니다. 저에게 정말 소중한 추억이고 앞으로 있을 시간이 행복으로 다가올 수 있게 해줄 소중한 시간입니다.

먼저 부족한 저를 이끌어 주신 김기만 교수님께 감사인사를 드리고 싶습니다. 많이 부족한 저를 이끌어 주시고 학문적인 가르침뿐만 아니라 인생을 살아가는 방향을 지도해 주셨습니다. 앞으로 교수님의 가르침을 잊지 않으려 노력하며 역경과 고난이 저를 힘들게 하더라도 교수님을 가르침을 생각하며 헤쳐나가겠습니다. 제 논문을 심사하며 좋은 논문으로 거듭나게 도와주신 정지원 교수님, 운영 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 학부 과정에서 많은 지도를 해주신 김동일 교수님, 강인호 교수님, 조형래 교수님께도 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 앞으로 교수님의 가르침을 밑거름 삼아 사회에 나가서도 부끄럽지 않은 제자가 되겠습니다.

대학원 생활을 하면서 저에게 큰 힘이 되어 주신 찬호형님, 형우형님, 그리고 저의 정신적 지주이신 지홍이형님, 학부 수업 조교로 들어와 저에게 많은 가르침을 주신 병철이 형님, 대학원 생활을 재미있게 해준 창은, 은혜, 같이 대학원에 입학해서 고생한 세림이 현수, 실험실에서 공부하면서 많은 도움을 준 웅진이, 태웅이, 연구실 막내로 고생한 근혁이, 같이 공부도하고 고민도 상담하던 하현이형, 태석이형, 건웅이형, 저에게 많은 도움을 준 창욱형님, 재미있는 대학생활을 만들어준 전파공학과 10학년 친구들, 아치한울회 성현, 우성, 예람, 동희에게 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 저의 말에 귀기우려주시고 믿어주신 부모님과 항상 도움을 주려고 노력하는 누나에게 사랑과 감사의 마음을 전합니다.