



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](#)

공학석사 학위논문

배경소음 준위에 따른 음선 기반 블라인드 디컨벌루션 성능 분석

Performance analysis of ray-based blind deconvolution in noisy
environments



지도교수 김재수

2020년 8월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

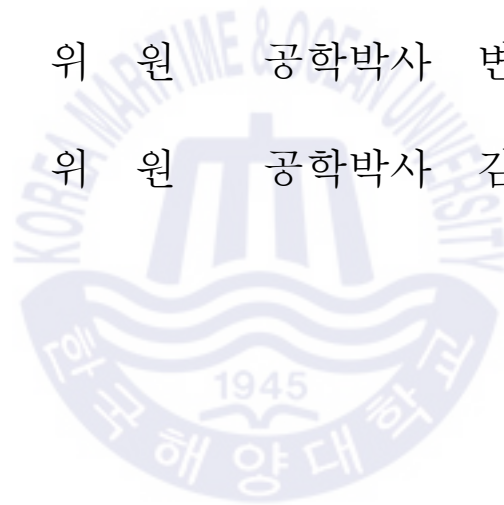
김 대 환

본 논문을 김대환의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 공학박사 김 기 만 (인)

위 원 공학박사 변 성 훈 (인)

위 원 공학박사 김 재 수 (인)



2020년 06월 30일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Figures	iii
Abstract	v
1. Introduction	1
1.1 Background and motivation	1
1.2 Thesis outline	2
2. Preliminary Considerations	3
2.1 RBD (Ray-based blind deconvolution)	3
2.2 Performance of RBD	5
3. Simulation Results	8
3.1 Experimental Environment	8
3.2 Influence of noise	12
3.3 Influence of noise in phase rotation	17
3.3.1 Noise free simulation	17
3.3.2 Noisy environment simulation	22
4. Experimental Results	25

5. Conclusion31

6. Reference32



List of Figures

Figure 2.1. Example how the is defined at 1 channel.	6
Figure 2.2. Example how the is defined.	7
Figure 3.1 Schematic of the experiment	9
Figure 3.2 Sound speed profile at East Sea in Oct.2010	9
Figure 3.3 VLA array configuration	10
Figure 3.3. Eigenray	11
Figure 3.4 Incoherent summed beam output	11
Figure 3.5 Source signal	12
Figure 3.6 Received signal	13
Figure 3.7 Received signal (SNR :-5dB)	14
Figure 3.8 Received signal (SNR : 30dB)	14
Figure 3.9 Estimated CIR (SNR : -5dB)	15
Figure 3.10 Estimated CIR (SNR : 30 dB)	15
Figure 3.11 Performance of RBD as a function of SNR	16
Figure 3.12 Received signal	17
Figure 3.13 Received signal (Channel : 13)	18
Figure 3.14 Beamformed signal using direct path	19
Figure 3.15 Phase of beamformed output and received signal	20
Figure 3.16 Phase comparison of received signal and beamformed output	20
Figure 3.17 Estimated CIR in noise free environment	21

Figure 3.18	Estimated CIR 13th channel in noise free environment	21
Figure 3.19	Phase comparison of direct path and beamformed output	22
Figure 3.20	Phase comparison of surface path and beamformed output	23
Figure 3.21	Estimated CIR	24
Figure 4.1	Band Pass Filtered received signal	25
Figure 4.2	Received signal (LFM #1)	26
Figure 4.3	Received signal spectrum (Channel : 13)	27
Figure 4.4	Beamformed output	27
Figure 4.5	Estimated CIR in experimental data	28
Figure 4.6	SNR_{CIR}	28
Figure 4.7	Performace of estimated CIR	29
Figure 4.8	Estimated CIR	30

배경소음 준위에 따른 음선 기반 블라인드 디컨벌루션 성능 분석

김 대 환

한국해양대학교 대학원

해양공학과

초 록

해양 도파관에서 음선 기반 블라인드 디컨벌루션(Ray-based blind deconvolution, RBD)은 측정된 신호에서 최소한의 환경정보(배열의 구조와 배열 위치에서의 평균 음속)만으로 송신 신호와 음원과 배열 사이의 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response, CIR)의 과형을 추정하는 기법이다. 본 논문의 목적은 다양한 배경소음 준위에 따라 RBD기법을 통해 추정한 채널 임펄스 응답의 성능을 분석하는 것이다. 추정된 채널 임펄스 응답의 성능은 신호 대 잡음비(SNR) 측면에서 시뮬레이션과 해상 실험 데이터를 통해 정량적으로 나타낸다.

핵심용어: 음선 기반 블라인드 디컨벌루션, 채널 임펄스 응답, 신호 대 잡음비

Performance analysis of ray-based blind deconvolution in noisy environments

Kim Dae Hwan

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

Abstract

The ray-based blind deconvolution (RBD) technique for ocean waveguides estimates waveforms of channel impulse response (CIR) between the signal and the sound source and the array with only minimal environmental information (knowledge of the array geometry and local sound speed) from the measured signal. The purpose of this paper is to analyze the performance of the channel impulse response estimated by RBD according to various background noise levels. The performance of the estimated channel impulse response is quantitatively represented through simulation and experimental data in terms of signal-to-noise ratio (SNR).

KEY WORDS: Ray-based blind deconvolution(RBD), Channel Impulse Response(CIR), Signal-to-noise ratio(SNR)

1. Introduction

1.1 Background and motivation

수중 채널을 통해 전달되는 음파는 음속구조에 따른 굴절 효과, 시변동에 따른 해수면의 변화 및 경계면에 의한 다중경로와 같은 다양한 요소에 지배적인 영향을 받아 수신기에 도달한다. 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response, CIR)은 복잡하게 변화하는 수중 채널에 대한 음파의 다중경로 구조, 경로의 지속성, 전달되는 음파의 세기 손실 및 수중 채널 특성 변화 현상을 이해하는데 중요한 요소이며, 수신 신호로부터 채널 임펄스 응답을 얻는 것이 중요하다. 채널 임펄스 응답은 일반적으로 수신된 신호를 알려진 송신 신호와 정합필터 (Matched filter)를 통해 수치적으로 계산된다.

최근 수동 소나 시스템에서 수신신호에 대한 정보만으로 채널 임펄스 응답을 추정할 수 있는 음선 기반 블라인드 디컨볼루션(Ray-based blind deconvolution, RBD) 기법을 Sabra *et al.*[1-2]가 제안하였다. 이에 따라 많은 사람들이 RBD를 활용 할 수 있는 방안에 대하여 연구하였고, 그 중 대표적으로 Byun *et al.*[4]은 선박소음을 이용하여 CIR 추정 가능성을 확인하였고, Song *et al.*[5]은 이를 확장하여 임의의 음원에 대하여 배열 불변성을 통해 거리 추정이 가능성을 보였다. RBD를 활용한 다양한 연구가 이루어짐에 따라 RBD의 성능에 대한 자세한 정보가 필요하며, Durofchalk *et al.*[8]는 선박소음을 이용하여 선박의 크기 및 이동속도와 같은 환경적 요인과 신호처리 측면에서의 신호의 길이 및 주파수 대역폭

에 따른 RBD 성능을 분석하였다.

RBD 성능에 영향을 줄 수 있는 환경적 요인으로 소음 준위가 있으며, 소음 준위에 따른 성능 분석이 필요해 보인다. 따라서 본 논문의 목적은 동해 인근 해역의 환경에서 CIR을 추정하기 위한 RBD 기법의 성능을 분석하고, 소음 준위가 RBD 기법에 미치는 영향을 보고자 한다.

1.2 Thesis outline

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수동 소나 시스템에서 채널 임펄스 응답 추정을 위한 음선 기반 블라인드 디컨벌루션에 대한 설명을 한다. 그리고 음선 기반 블라인드 디컨벌루션을 통해 추정된 채널 임펄스 응답을 정량적으로 나타내기 위한 방법에 대해 설명한다.

3장에서는 시뮬레이션을 통해 소음 준위에 따른 추정된 채널 임펄스 응답의 성능을 정량적으로 나타내고, 소음에 의한 영향을 수치적으로 비교, 분석한다.

4장에서는 2010년 동해에서 인근 해역에서 수행된 수중통신 실험 데이터를 이용하여 추정된 채널 임펄스 응답의 성능을 비교 분석하고 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. Preliminary Considerations

2.1 RBD (Ray-based blind deconvolution)

음선 기반 블라인드 디컨벌루션 기법은 배열 센서에 수신된 신호와 배열의 위치 정보만을 이용하여 송신 신호 및 채널 임펄스 응답을 추정하는 기법으로서의 시역전 기반 알고리즘이다. 해양 도파관에서 송신 신호 $s(t)$ 가 음원으로부터 수신기 배열단 j 번째 수신기로 전파된다고 가정할 때, j 번째 수신기에 수신되는 신호 $r_j(t)$ 는 식 (1)과 같이 시간영역에서 송신 신호와 CIR의 컨벌루션 (Convolution)으로 표현할 수 있고, 푸리에 변환을 통해 식(2)와 같이 주파수 영역에서 표현된다. 여기서 $R_j(\omega)$ 와 $S(\omega)$ 는 각각 j 번째 수신기에 수신되는 신호와 송신 신호의 스펙트럼을 의미하고, $G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)$ 는 음원의 위치 \vec{r}_s 로부터 수신기 배열단 j 번째 수신기 위치 \vec{r}_j 에서의 전달함수를 나타낸다.

$$r_j(t) = h_j(t) * s(t) \quad (1)$$

$$R_j(\omega) = G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)S(\omega) = G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|S(\omega)|e^{i\phi_s(\omega)} \quad (2)$$

음선 이론식에 따르면, 전달함수는 식 (3)과 같이 K 개의 음선이 가지는 진폭 $A_k(\omega)$ 와 경로에 따른 지연시간 $T(\theta_k)$ 의 합으로 표현할 수 있다[6].

$$G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) = \sum_{k=1}^K A_k e^{i\omega\{\tau_j(\theta_k) + T(\theta_k)\}} \quad (3)$$

여기서 θ_k 는 k 번째 경로에 해당하는 음선의 입사 각도를 나타내며, $\tau_j(\theta_k)$ 는 배열 중심으로부터 j 번째 수신기에 대응되는 시지연을 의미한다.

RBD는 수신신호 $R_j(\omega)$ 로부터 전달함수를 추정하기 위해 우선적으로 수신된 신호의 정규화를 수행하면 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\tilde{R}_j(\omega) = \frac{R_j(\omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |R_j(\omega)|^2}} = \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)S(\omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)S(\omega)|^2}} \quad (4)$$

식 (4)에서 세 번째 항에 식 (2)를 대입하면 식 (5)의 두 번째 항과 같다. 두 번째 항의 분모에서 $e^{i\phi_s(\omega)}$ 의 크기는 1이며, 송신신호의 세기 $|S(\omega)|$ 는 상수로써 약분된다. 즉, 정규화를 통해 송신 신호의 세기를 최소화하며 전달함수와 송신신호의 위상만 남게 된다.

$$\tilde{R}_j(\omega) = \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|S(\omega)|e^{i\phi_s(\omega)}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|S(\omega)|e^{i\phi_s(\omega)}|^2}} = \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|^2}}e^{i\phi_s(\omega)} \quad (5)$$

특정 각도 θ_k 에 대한 빔형성을 통해 송신 신호의 위상을 얻을 수 있으며, 빔형성에 대한 식은 다음과 같다.

$$B(\omega, \theta_k) = \sum_{j=1}^N A_k e^{-i\omega\tau_j(\theta_k)} R_j(\omega) \approx |B(\omega, \theta_k)|e^{i\{\phi_s(\omega) + i\omega T(\theta_k)\}} \quad (5)$$

$$\psi(\omega, \theta_k) = \arg(B(\omega, \theta_k)) = \phi_s + \omega T(\theta_k) \quad (6)$$

마지막으로 빔출력의 위상 $\psi(\omega, \theta_k)$ 과 정규화된 수신 신호의 위상 보정 (phase rotate)을 통해 송신 신호의 위상이 제거되며, 임의의 시간 지연이 적용된 형식의 전달함수를 추정할 수 있다.

$$\hat{G}(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega) = \frac{R_j(\omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |R_j(\omega)|^2}} e^{-i\psi(\omega, \theta_k)} = \frac{G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |G(\vec{r}_j, \vec{r}_s, \omega)|^2}} e^{-i\omega T(\theta_k)} \quad (7)$$

본 논문에서는 noise에 따른 RBD의 성능 변화를 추정된 CIR 통해 분석하는 것이 목적이므로 식 (7)의 $e^{-i\omega T(\theta_k)}$ 에 해당하는 시간 지연은 무시할 수 있고, 송신 신호 추정에 대한 식은 생략한다.

2.2 Performance of RBD

수신 신호에서의 배경 소음 준위가 증가할수록 CIR의 (배경) 소음 준위 또한 증가하며, 이로 인해 CIR의 성능이 저하될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 CIR의 성능을 추정하기 위해 CIR 결과에서의 신호 대 잡음비를 활용하기로 한다[7,8]. 3장에서는 추정된 CIR 결과로부터 신호 대 잡음비를 계산하기 위한 수식과 이를 시각적으로 표현한 개념도를 구체적으로 설명한다.

신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)는 신호의 준위와 소음의 준위 사이의 상대적인 양을 의미하며, 이는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\psi_s^2}{\psi_n^2} \right) \quad (8)$$

여기서 ψ_s 는 왜곡이 없는 신호의 최대 rms 값이며, ψ_n 는 소음의 rms 값으로 일반적으로 $\psi_n = \sigma_n$ 이 될 수 있도록 평균값이 0인 것으로 가정된다. 왜곡이 없는 정현파의 경우 신호의 rms 값은 $\psi_s = (1/\sqrt{2})L_{\max}$ 로 나타낼 수 있으며, L_{\max} 는 신호의 peak amplitude이다.

Gaussian random 신호의 경우, 왜곡에 의해 peak 값은 이론적으로 정의

하기 힘들다. 따라서 평균값이 0인 Gaussian random 신호가 유의한 오차 없이 ± 3 표준편차($L_{\max} = 3\sigma_s$)로 잘릴 수 있다고 가정할 수 있으며[8], (수신기의 특성에 의한 clipping) 본 연구에서는 추정된 CIR을 Gaussian random 신호로 가정하고 식 (9)로 추정된 CIR의 성능을 분석한다.

$$\text{SNR}_{\text{CIR}} = 20\log_{10} \frac{\sigma_s}{\sigma_n} = 20\log_{10} \frac{(1/3)L_{\max}}{\sigma_n} = 20\log_{10} \frac{\overline{\text{CIR}}_{\text{pk}}}{3\sigma_n} \quad (9)$$

$$\left(\overline{\text{CIR}}_{\text{pk}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{CIR}_n^m \right) \right)$$

여기서, M은 수신 배열의 수신기 개수이며, N은 음선 경로를 의미한다.

Figure 2.1, 2.2는 추정된 CIR로 식(2.15)의 SNR_{CIR} 을 계산하기 위한 예시이다.

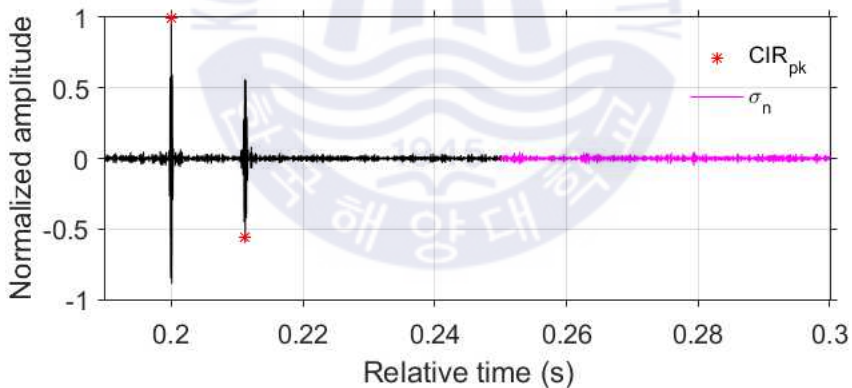


Figure 2.1. Example how the SNR_{CIR} is defined at 1 channel.

Figure 2.1은 Figure 2.2의 추정된 CIR의 24 채널중 13번 채널을 나타낸 그림이다. CIR_{pk} 는 경로별 최대 amplitude이며 다중 경로일 경우 peak 값들의 평균을 사용한다. SNR_{CIR} 의 noise에 해당하는 σ_n 는 Figure 2.1, 2.2와 같이 경로가 없는 magenta 영역의 rms 값이다. Figure 2.1과 같이 각 채널마다 추정된 CIR의 peak값과 noise를 계산하여($CIR_{pk}/3\sigma_n$) 전체 채널의 평균을 낸다.

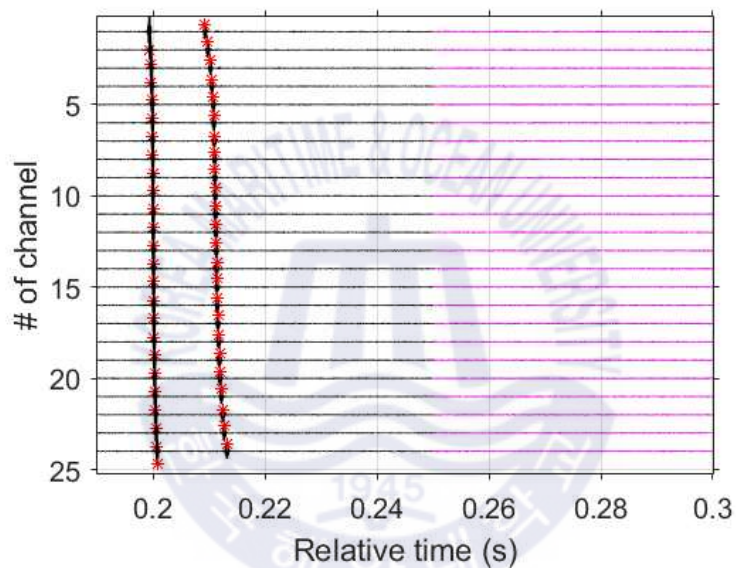


Figure 2.2. Example how the SNR_{CIR} is defined.

3. Simulation Results

3장에서는 2장에서 설명한 기본 이론을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 RBD의 성능 분석을 수행하였다. 구체적으로 3.1절에서 시뮬레이션 환경에 대해 정리하며 3.2절에서 noise의 변화에 따른 RBD의 성능을 정량적으로 나타내고 분석한다. 3.3절에서 위상 보정에서 noise의 영향을 분석한다.

3.1 Experimental Environment

2010년 10월 동해시 인근 해역에서 국방과학연구소 주관으로 수중음향 통신실험이 수행된 바 있으며, 본 논문에서는 시뮬레이션(3장)과 해상실험 데이터 분석(4장)을 위해 해당 실험을 활용하였다.

실험 구성 및 해역의 음속 구조는 Figure 3.1, 3.2와 같다. 송신기와 수신기의 거리는 468 m이고 수심은 약 350 m이다. 송신기는 수심 60 m에 위치하며 수평으로 무지향성이고 수직으로 $\pm 40^\circ$ 의 유효 빔폭을 갖는다. 수신기는 Figure 8과 같이 92.5m ~ 107.5m에 비 균등 간격으로 구성된 네스티드 배열(Nested array)이며, 총 채널 수는 24개이다. 네스티드 배열은 4개의 설계 주파수 대역으로 구성될 수 있으며, 간격, 길이 등과 같은 구체적인 사양은 표 1에 정리하였다. 또한, Figure 3.3은 네스티드 배열 구성에 관한 그림을 나타낸다.

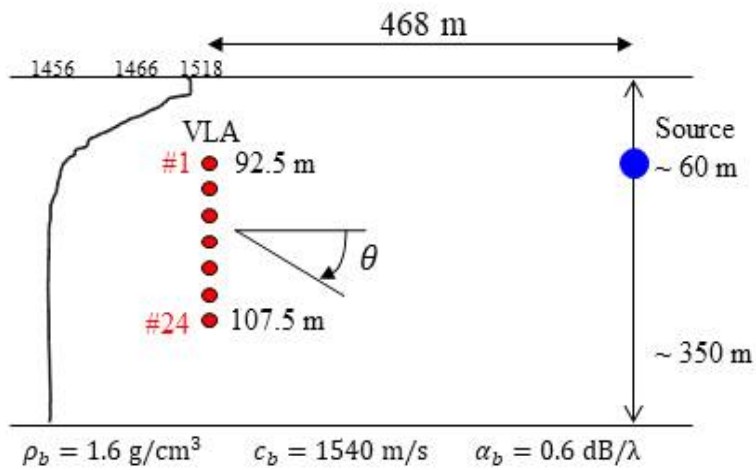


Figure 3.1 Schematic of the experiment

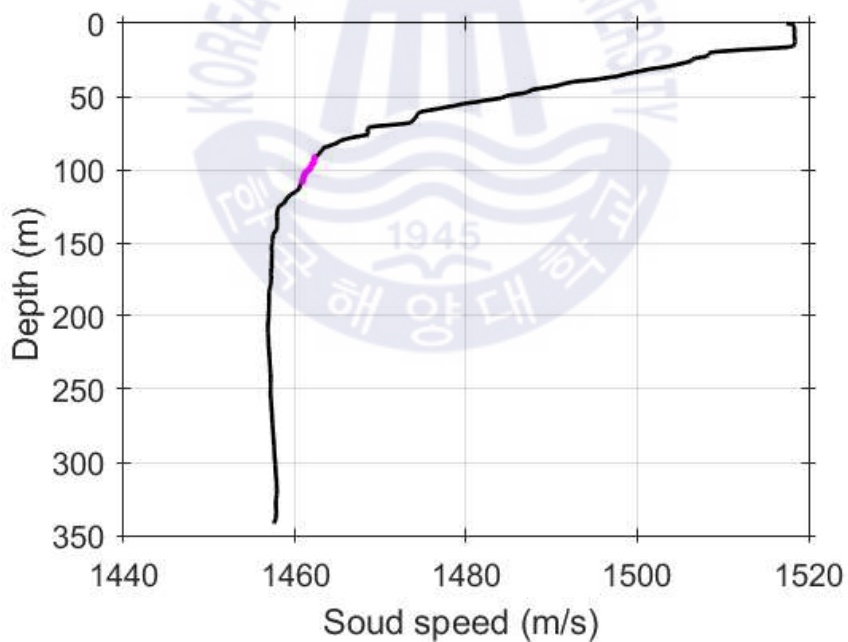


Figure 3.2 Sound speed profile at East Sea in Oct.2010

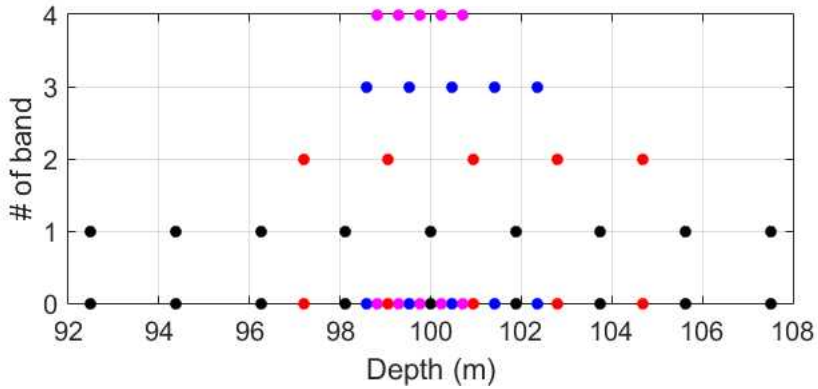


Figure 3.3 VLA array configuration

Table 1. The frequency bands and array spacing of vertical receiver array.

	Frequency (Hz)	Spacing (cm)
Band 1	400 - 800	187.5
Band 2	800 - 1600	93.75
Band 3	1600 - 3200	46.87
Band 4	3200 - 6400	23.43

해상실험 동안 탐침 신호와 통신 신호가 송신되었으며, 사용된 신호의 중심주파수와 대역폭은 각각 6kHz와 4kHz이다. 탐침 신호는 15 chip과 511 chip으로 구성된 두 종류의 M-seq 신호와 LFM 신호로 구성되었다. 본 논문에서는 탐침 신호 중 LFM 신호만을 사용하여 분석하였으며, 따라서 통신 신호에 대한 자세한 설명은 생략하기로 한다.

Figure 3.3은 해상실험 환경조건을 이용하여 음향전파 모델 BELLHOP로 eigenray를 나타낸 그림이며, 이때 송신 각도는 $\pm 40^\circ$, 빔 개수는 4000개이다. 빨간색 선은 direct path를 나타내고 파란색 선은 해수면에 반사되어 들어온 surface path를 나타내고, 수신 신호를 모의하여 식 (5)를 통해 얻은 빔형성 값을 주파수 대역에 걸쳐 비상관 합산 처리를 통해 빔출력을 계산하면 Figure 3.4와 같이 direct path는 -8° , surface path는 -23° 를 나타낸다.

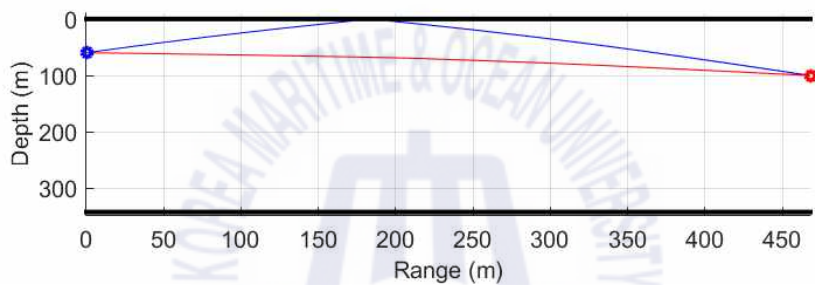


Figure 3.3. Eigenray

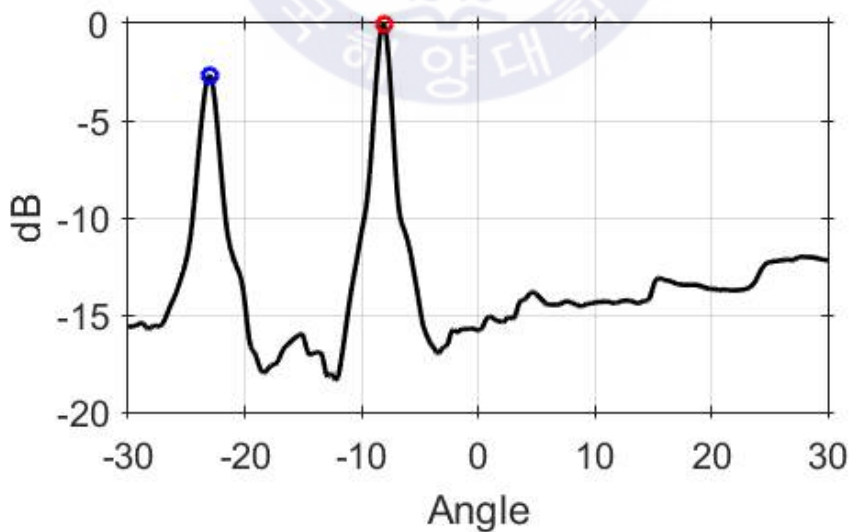


Figure 3.4 Incoherent summed beam output

3.2 Influence of noise

본 절에서는 noise에 따른 RBD로 추정된 CIR의 성능을 분석한다.

Figure 3.5와 같이 중심 주파수 6 kHz, 주파수 대역폭이 4 kHz (4-8 kHz)인 0.01 s LFM 신호를 모의했을 때, noise가 없는 수신신호는 Figure 3.6과 같다.

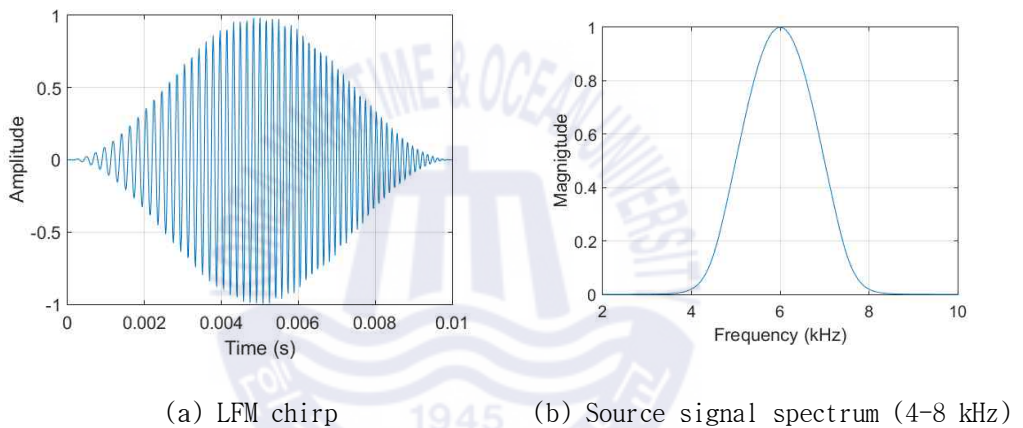


Figure 3.5 Source signal

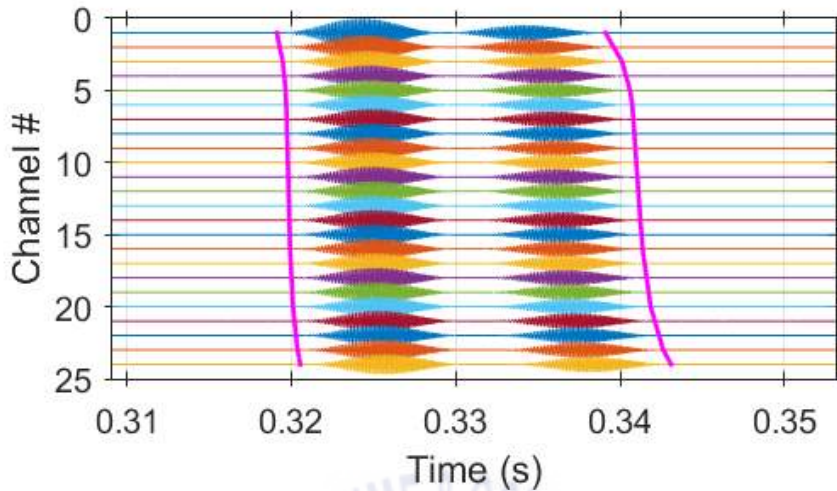


Figure 3.6 Received signal

시뮬레이션이 수행된 환경은 Figure 3.3과 같이 direct path와 해수면에 반사된 surface path가 수신되며, 두 경로를 통해 수신되는 신호는 간섭이 없는 것을 확인할 수 있다. Figure 3.6 수신신호의 magenta 영역은 신호가 수신되는 구간이며, rms 레벨은 대략 -61 dB가 된다. Noise에 따른 RBD의 성능을 분석하기 위해 White gaussian noise를 생성하는 MATLAB 함수 “wgn”을 이용하여 SNR이 -5 dB부터 30 dB가 되도록 noise를 수신신호에 추가하였고, SNR이 -5 와 30 dB일 때 수신신호는 각각 Figure 3.7, 3.8과 같다.

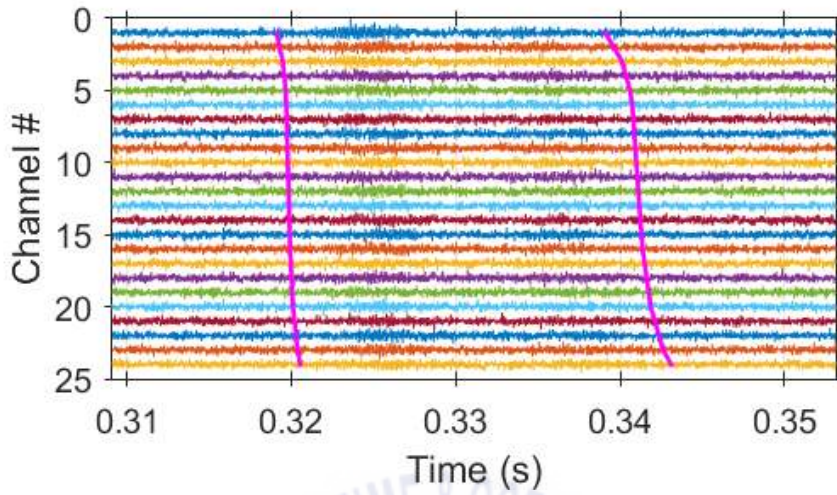


Figure 3.7 Received signal (SNR :-5dB)

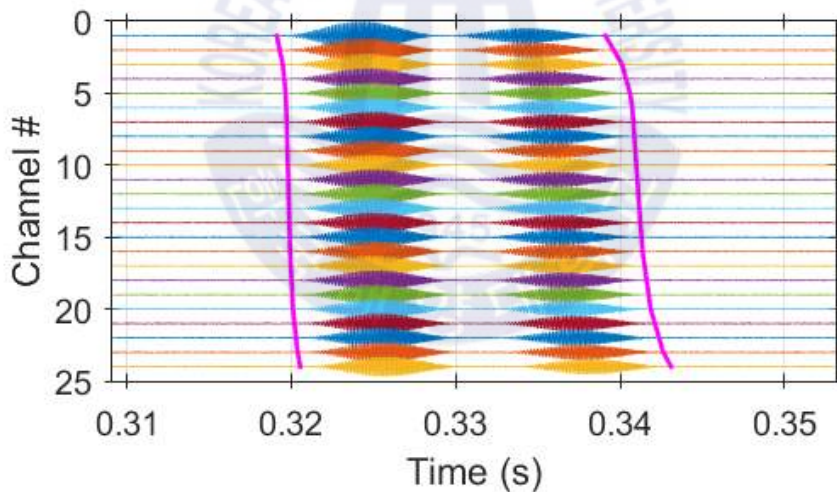


Figure 3.8 Received signal (SNR : 30dB)

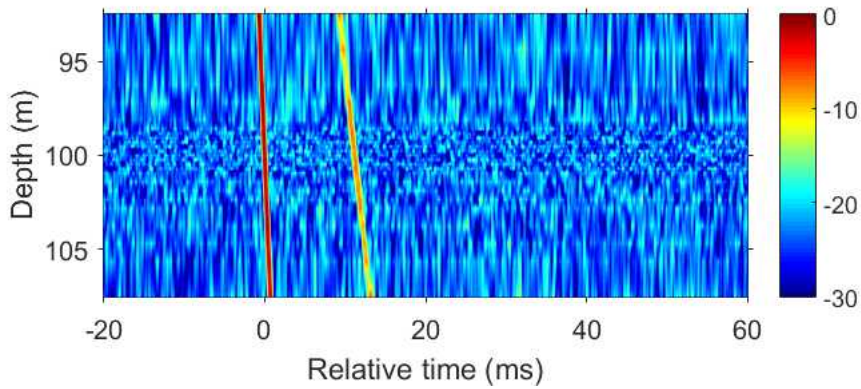


Figure 3.9 Estimated CIR (SNR : -5dB)

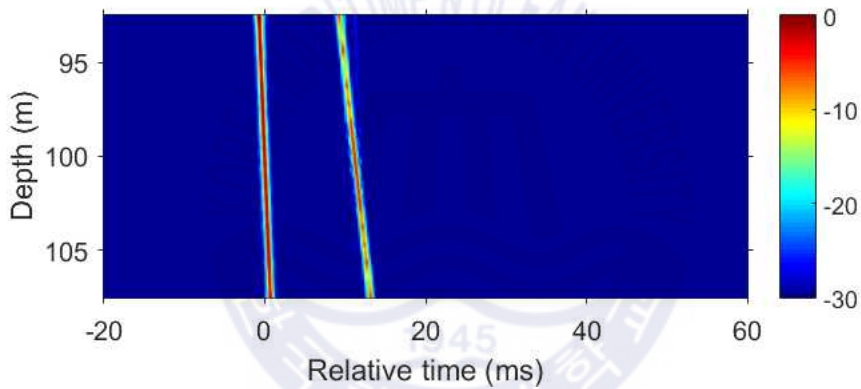


Figure 3.10 Estimated CIR (SNR : 30 dB)

Figure 3.9과 3.10은 각 SNR에서 RBD를 통해 추정된 CIR을 힐버트 변환(Hilbert-transform)과 보간법 (Interpolation)을 통해 나타낸 그림이며, 위상 보정을 위해 direct path (-8°)를 선택한 결과이다. 식 (9)를 통해 SNR의 변화에 따라 추정된 CIR의 성능을 정량적으로 나타내면 Figure 3.11과 같은 경향이 나타난다.

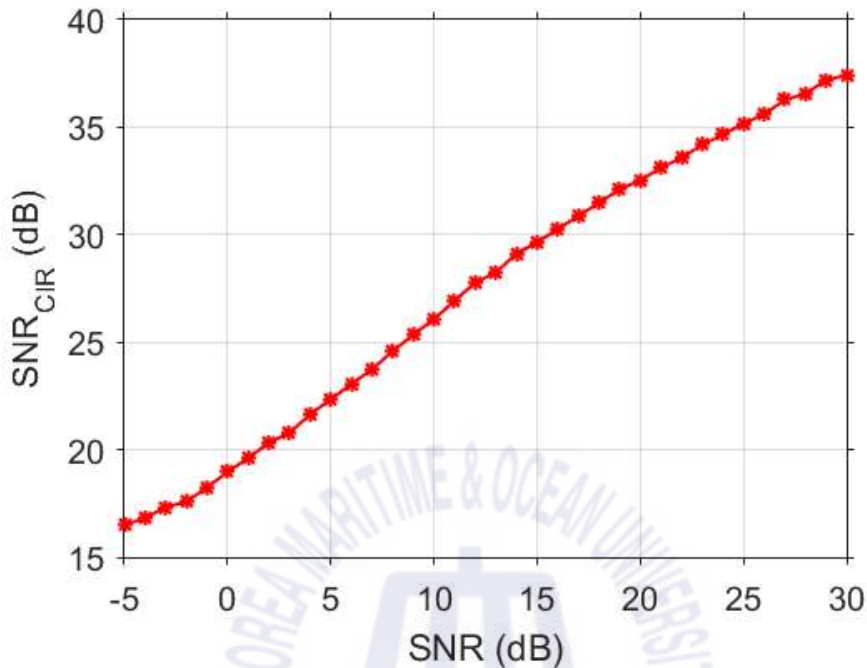


Figure 3.11 Performance of RBD as a function of SNR

Figure 3.11을 통해 noise의 레벨에 따라 RBD의 성능에 영향을 주는 것을 알 수 있다. Noise의 영향이 적은 SNR이 30 dB의 경우 Figure. 16과 같이 direct path와 surface path 모두 추정이 잘 이루어진다. 반면, Figure 3.9와 같이 SNR이 -5 dB가 되는 시뮬레이션에서는 위상 보정을 위해 빔 형성에서 선택된 direct path는 추정이 효과적으로 이루어지지만 선택되지 않은 surface path의 세기가 약해지고 sidelobe가 높아져 RBD의 성능에 영향을 준다. 이는 noise로 인한 위상 변동이 선택되지 않은 path에 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서 3.3절에서 위상 보정에서의 noise 영향을 분석한다.

3.3 Influence of noise in phase rotation

RBD는 정규화된 수신 신호에 위상 보정을 통해 CIR을 추정하는 구조로 구성되어 있으며, noise가 존재할 경우 위상 보정 인자 $\psi(\omega, \theta_k)$ 에는 송신 신호의 위상과 noise의 위상 영향이 포함될 수 있다. 송신 신호의 위상은 동일하므로, 결국 noise로 인한 위상의 변동이 위상 보정에서 영향을 주어 RBD의 성능에 영향을 줄 것이라 예상된다. 따라서 본 절에서 수신 신호의 위상과 빔형성을 통해 얻은 빔출력의 위상을 비교하여 noise의 영향을 수치적으로 분석하고자 한다. 3.3.1절에서 noise가 없는 환경에서 수신 신호의 위상과 빔출력의 위상을 확인하여 비교하고, 3.3.2절에서 noise의 준위에 따라 각 신호의 위상 변동을 확인하고 비교한다.

3.3.1 Noise free simulation

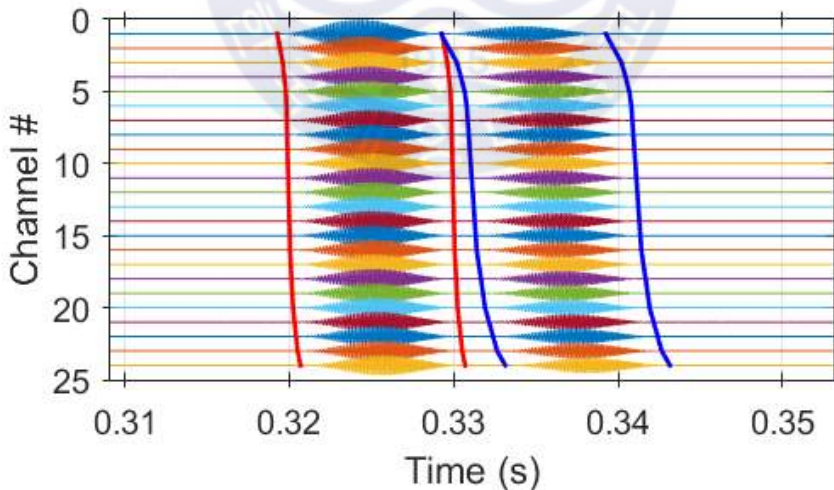


Figure 3.12 Received signal

Noise가 없는 조건에서 신호를 모의할 경우, Figure 3.12와 같이 신호가 수신된다. 수신신호에 빔형성 처리를 적용한 후 위상을 추출하면 송신신호의 위상과 특정 시지연 (또는 선택된 음선의 도달시간)에 해당하는 위상을 얻을 수 있다. 음향 전파모델 BELLHOP을 통해 정확한 시지연 값 ($T(\theta_k)$)을 알기 때문에 각 음선을 통해 배열의 채널별 수신되는 신호의 위상을 얻을 수 있다. 빨간색 영역은 direct path, 파란색 영역은 surface path를 통해 수신된 신호 구간에 해당된다.

24채널의 수신 배열에서 배열의 중심이 되는 13번째 채널의 수신 신호가 추후 분석에 사용되었으며, Figure 3.13과 같다. 여기서, 13번째 채널의 direct path의 시지연은 0.32 s, surface path의 시지연은 0.3312 s이다.

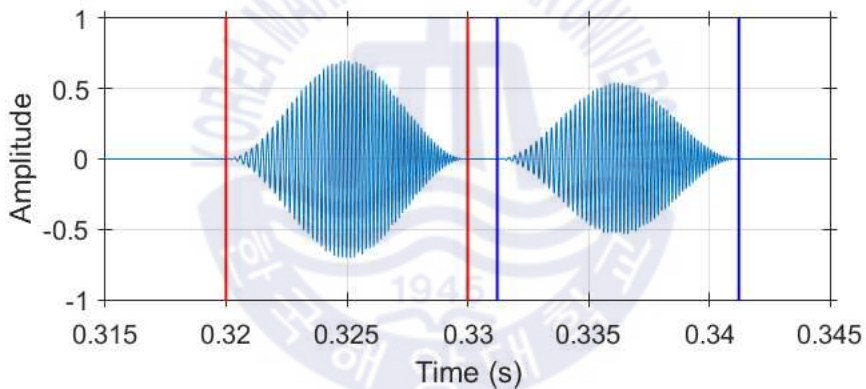


Figure 3.13 Received signal (Channel : 13)

Direct path를 기준으로 빔형성된 신호는 Figure 3.14와 같으며, direct path의 각도로 delay-and-sum 되었기 때문에 빔형성 신호의 시지연은 direct path의 시지연과 같은 0.32 s를 가진다.

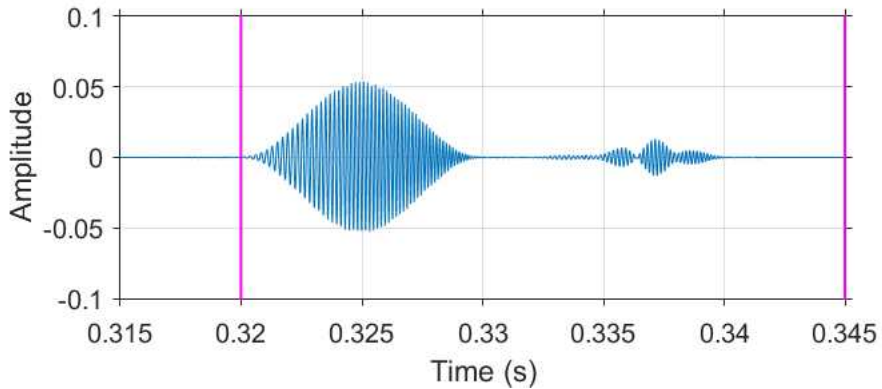


Figure 3.14 Beamformed signal using direct path

13번째 채널 수신 신호 direct path의 위상 (ϕ_{direct})과 surface path의 위상 (ϕ_{surf}), 그리고 빔형성된 신호의 위상 (ϕ_{BF})과 나타내면 Figure 3.15와 같고, 수신신호의 위상과 빔형성된 신호의 위상 차이($\phi_{direct} - \phi_{BF}$, $\phi_{surf} - \phi_{BF}$)는 Figure 3.16과 같다. 여기서, 송신 신호에 hanning window로 인해 신호의 대역인 4-8 kHz가 아닌 5.5-6.5 Hz 주파수 대역에서 위상을 나타내었다.

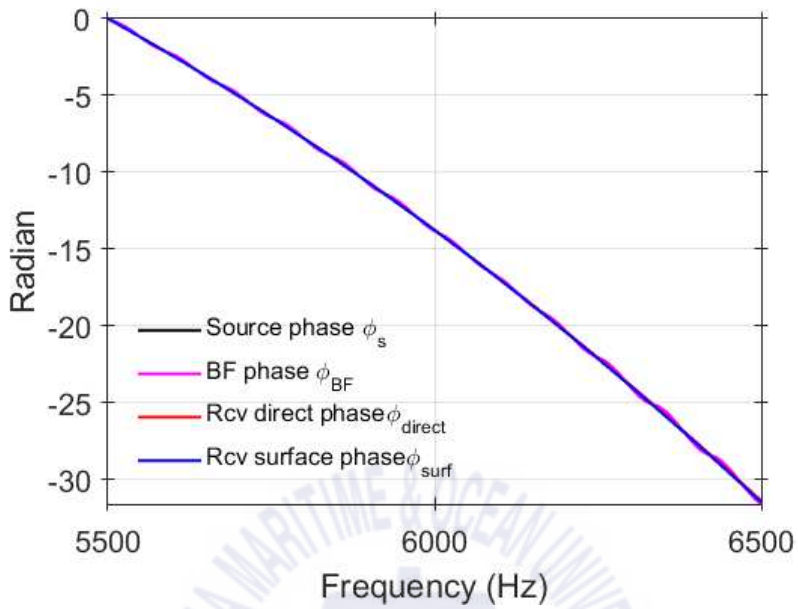


Figure 3.15 Phase of beamformed output and received signal

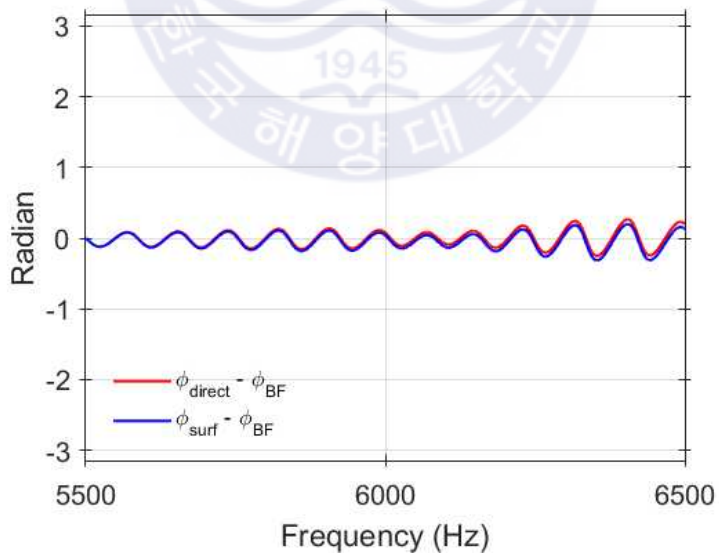


Figure 3.16 Phase comparison of received signal and beamformed output

Figure 3.16을 통해 수신 신호와 빔출력 위상 차이가 적어 정규화된 수신 신호에서 위상 보정을 통해 신호의 위상이 효과적으로 제거되며 Figure 3.17, 3.18과 같이 CIR 추정이 잘 되는 것을 알 수 있다.

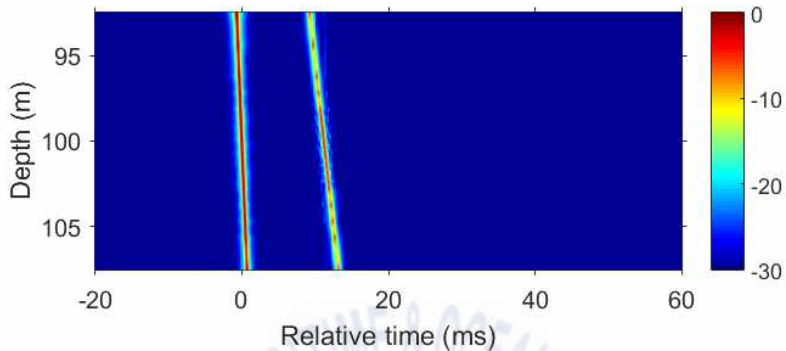


Figure 3.17 Estimated CIR in noise free environment

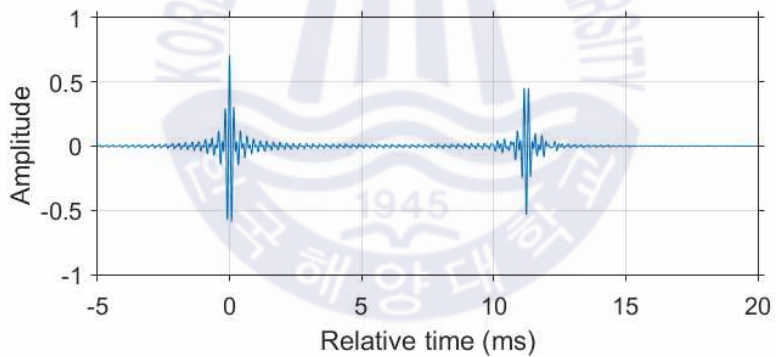


Figure 3.18 Estimated CIR 13th channel in noise free environment

3.3.2 Noisy environment simulation

본 절에서 SNR에 따라 수신신호의 위상과 빔출력의 위상 차이를 통해 noise에 의한 위상 변동이 RBD를 수행할 때 위상 보정에 얼마나 영향을 주는지 확인하고자 한다. 3.3.1절에서는 노이즈가 존재하지 않는 환경을 다뤘으며, 본 절에서는 noise가 존재하는 환경에서 noise가 수신신호의 위상과 빔출력의 위상 차이에 미치는 영향에 대해 분석하고자 한다.

Figure 3.19, 3.20은 수신 신호의 각 path별로 수신되는 신호와 빔형성된 신호의 위상 차이($\phi_{direct} - \phi_{BF}$, $\phi_{surf} - \phi_{BF}$)를 SNR별로 나타낸 결과이다.

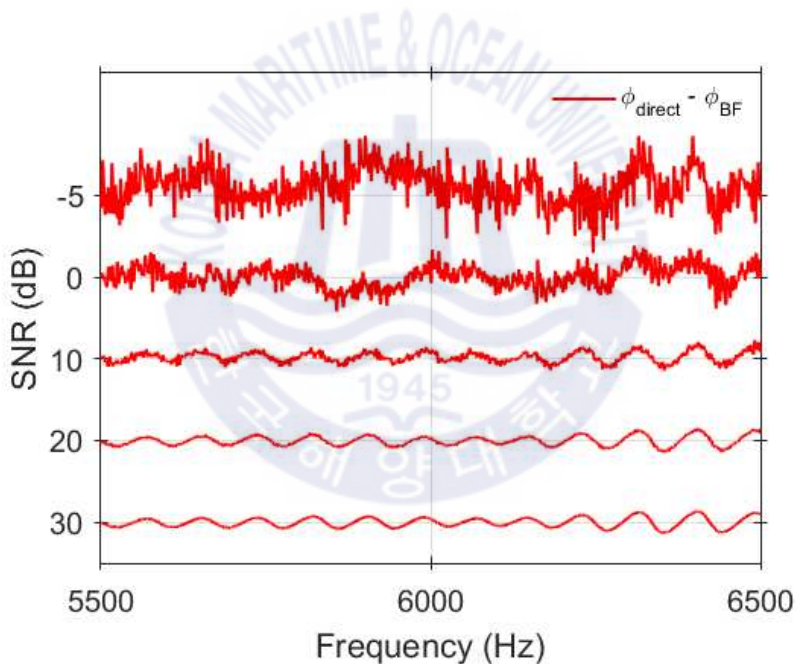


Figure 3.19 Phase comparison of direct path and beamformed output

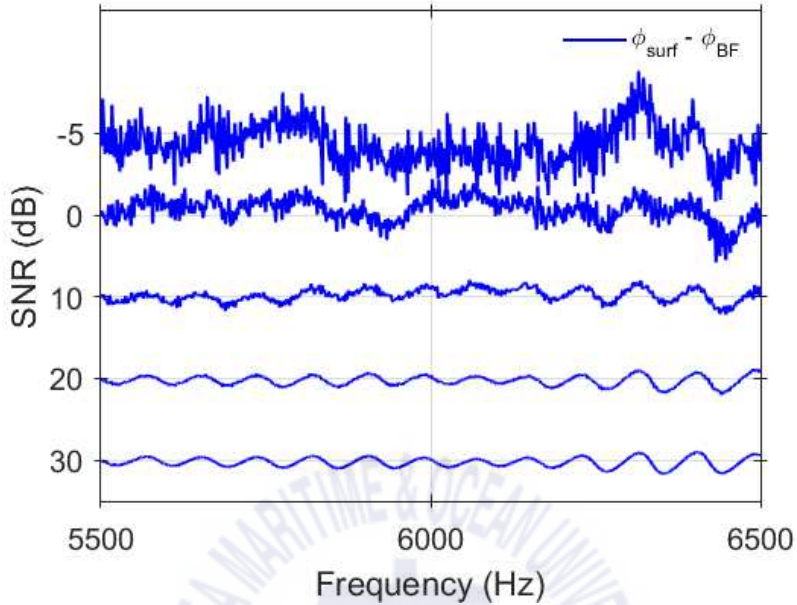
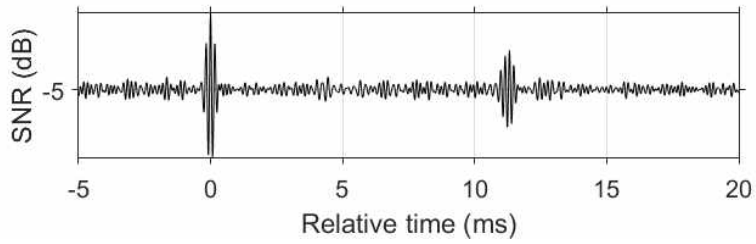


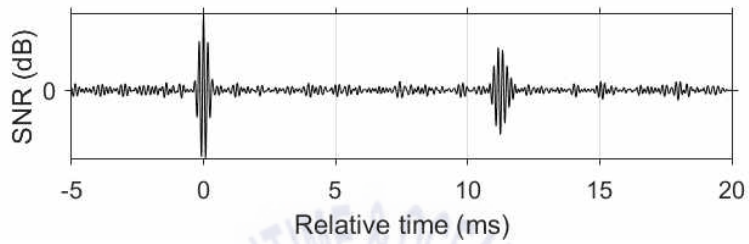
Figure 3.20 Phase comparison of surface path and beamformed output

SNR이 낮아지면 수신 신호에서 각 신호의 위상과 빔형성된 신호의 위상 차이가 증가하게 되는 것을 확인할 수 있다. SNR이 30 dB와 20 dB의 경우 Figure 3.16과 같이 noise가 없는 환경에서의 위상차와 비슷한 반면, 0 dB, 5 dB일 때 원 송신 신호의 위상에서 noise에 의해 위상 변동이 심하여 신호의 위상이 제거되지 않고 남아 RBD의 성능을 저하시키는 것으로 판단된다.

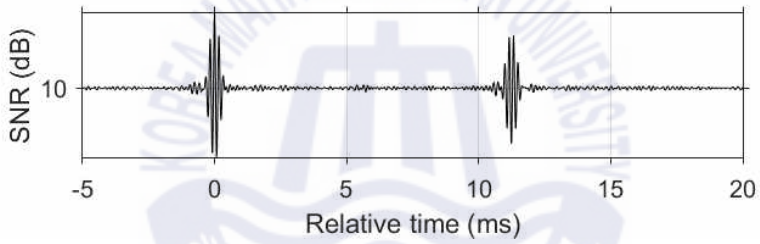
Figure 3.21은 noise 레벨에 따라 추정된 CIR를 나타낸 결과이며 SNR 30 dB에서의 결과는 20 dB의 결과와 유사하여 생략한다. Noise 레벨이 증가할수록 surface path의 준위가 줄어들고, sidelobe가 커지는 현상이 보이는 반면, direct path는 상대적으로 잘 유지되고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 추후에 추가적인 분석을 통해 살펴볼 필요가 있다.



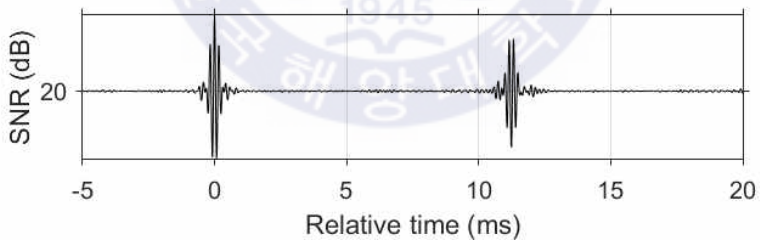
(a) SNR : -5 dB



(b) SNR : 0 dB



(c) SNR : 10 dB



(d) SNR : 20 dB

Figure 3.21 Estimated CIR

4. Experimental Results

본 장은 3.1절에 소개한 해상 실험 데이터의 분석 결과를 제시한다.

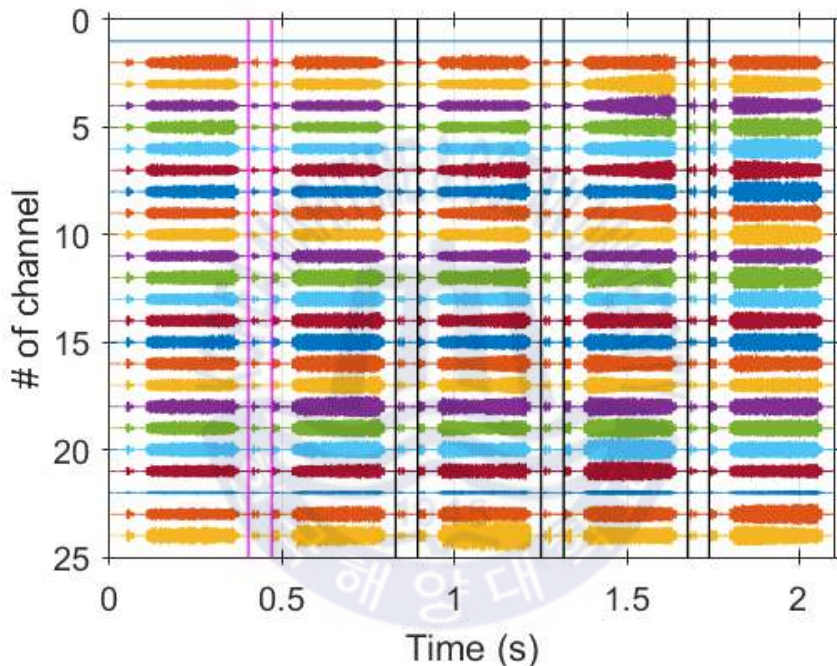


Figure 4.1 Band Pass Filtered received signal

Figure 4.1은 실험 데이터 분석을 위해 사용된 수신신호이다. 신호의 구분을 위해 송신신호의 주파수대역 (4-8 kHz)로 band pass filtering하여 나타내었고 성능 분석을 위해 사용되는 신호는 4-8 kHz의 주파수 대역을 가지는 10ms LFM신호이며 검은색 실선 영역에 해당된다. 4개의 LFM 신호 중 본 연구에 사용된 LFM신호는 마젠타 영역의 3번째 LFM 신호이다. 1번과 22번 채널은 기기 결함으로 인하여 수신 상태가 열악한 것을 확인하였고, 두 채널은 추정된 CIR의 성능 분석에서 제외되었다.

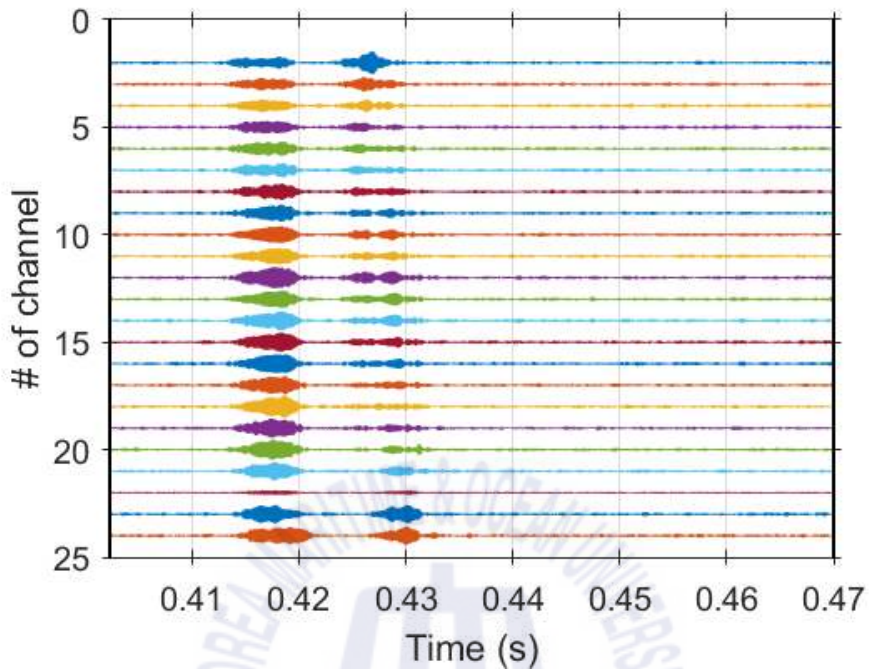


Figure 4.2 Received signal (LFM #1)

Figure 4.2는 본 연구의 분석에 사용된 LFM신호를 확대한 그림이며 3장의 시뮬레이션과 같이 direct path와 surface path가 분리되어 수신되는 것을 알 수 있다.

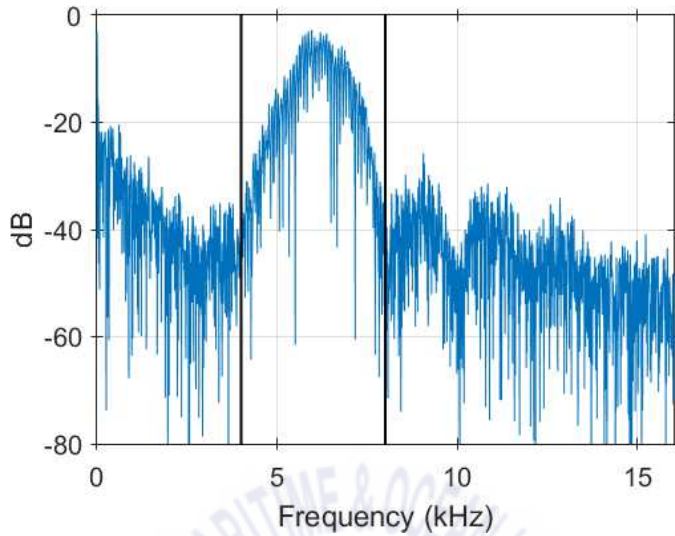
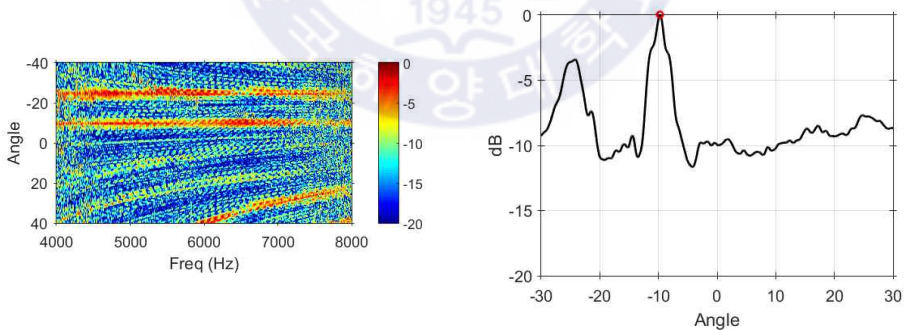


Figure 4.3 Received signal spectrum (Channel : 13)

Figure 4.3은 수신 배열에서 13번째 채널의 spectrum 그래프이며 검은 실선은 LFM 신호의 주파수 대역을 나타내며 해당 영역의 주파수 대역에서 RBD를 수행하였다.



(a) Conventional beamforming
(4-8 kHz)

(b) Incoherent summed beam output

Figure 4.4 Beamformed output

Figure 4.4는 빔출력 결과를 나타내며 (a)는 주파수 대역에 해당하는 빔 출력을 나타내며 배열의 설계 주파수 이상의 주파수 대역에서 공간 에일

리어싱이 발생함을 볼 수 있고, Incoherent summation을 통하여 에너지가 높은 빔 각도를 (b)에서 확인할 수 있다. Figure. 31 (b)의 그림에서 빨간 점이 나타내는 것은 위상보정을 위해 사용된 빔 각도를 나타내며 해당 각도는 -9.75° 로, 시뮬레이션의 direct path 각도와 1.75° 차이 나는 것을 알 수 있고, Figure 4.5는 추정된 CIR의 결과이다.

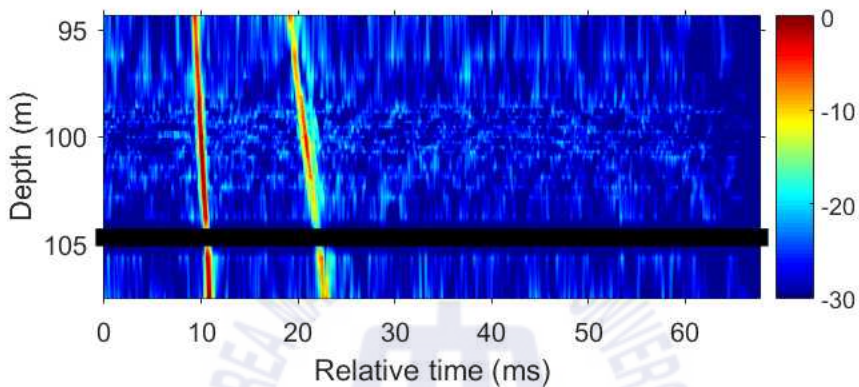


Figure 4.5 Estimated CIR in experimental data

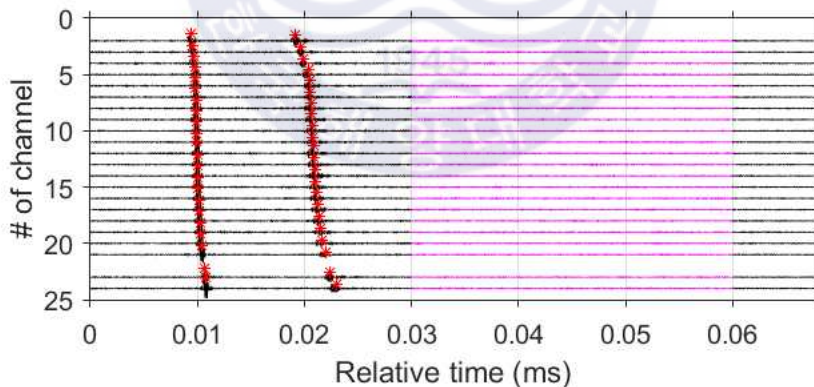


Figure 4.6 SNR_{CIR}

Figure 4.6은 RBD를 통해 추정한 CIR을 나타내며, 빨간 점은 CIR_{pk} 을 의미하며 path가 없는 30 ms의 구간인 마젠타 영역을 noise (σ_n)으로 설정하여 채널별 성능을 정량적으로 나타내면 Figure 4.7과 같다.

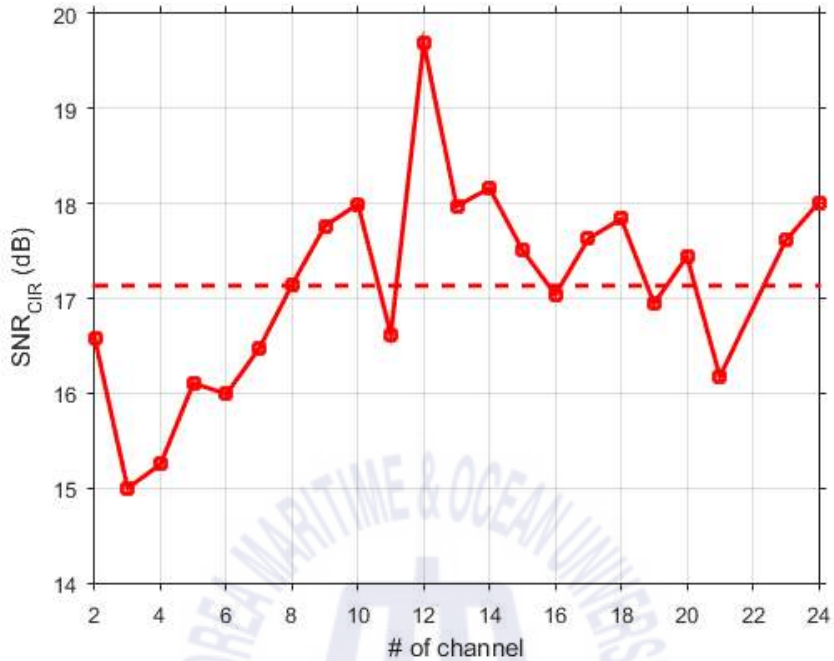
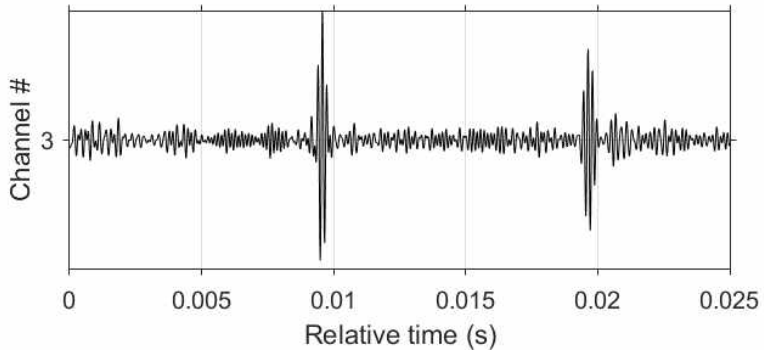


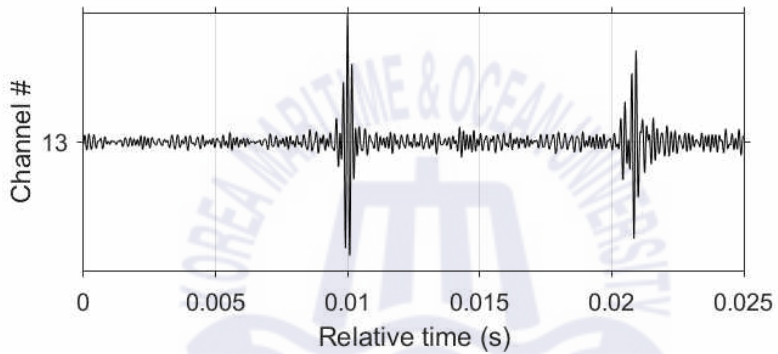
Figure 4.7 Performance of estimated CIR

Figure 4.7은 채널별 성능을 나타내는 그래프이다. 빨간 실선은 RBD를 통해 각 채널에서 계산한 결과이며 빨간 점선은 모든 채널의 평균값인 최종 SNR_{CIR} 값이 되며, 17.13 dB로 계산된다.

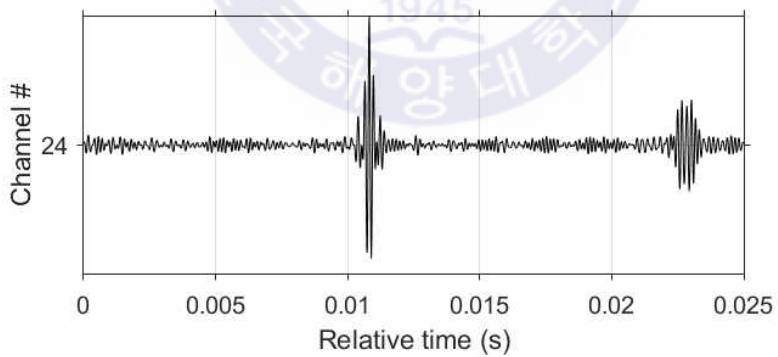
Figure 4.8을 통해 채널마다 추정되는 CIR이 다른 것을 확인할 수 있다. 실제 해상에서 수신되는 noise는 송신 신호와 상관성이 높은 잔향음이나 선박소음과 같이 방향성을 가진 소음이 존재하며, 시뮬레이션과 달리 white gaussian noise로 가정할 수 없어 채널마다 신호의 위상이 달라진다. 따라서 다양한 noise로 인해 채널마다 정규화된 신호에서 위상 보정되는 정도가 달라 성능이 달라지는 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해서는 방향성을 가지는 소음이나 잔향음이 존재하는 소음의 시뮬레이션을 통해 이를 확인할 필요가 있다.



(a) Channel # : 3



(b) Channel # : 13



(c) Channel # : 24

Figure 4.8 Estimated CIR

5. Conclusion

본 논문에서는 수동 소나 시스템에서 noise의 레벨에 따른 RBD의 성능에 대해 분석하였다.

시뮬레이션을 통해 다양한 소음 준위 (SNR ; -5~30 dB)에 따라 RBD로 추정된 CIR의 성능을 정량적으로 나타내어 소음 준위가 높아지면 RBD의 성능이 떨어지는 것을 확인하였다. 성능이 떨어지는 원인으로, 신호의 위상과 관련이 있다. RBD는 정규화된 신호에 빔형성된 신호의 위상을 보정하여 CIR을 추정하는 알고리즘이다. Noise가 없는 경우 위상 보정을 통해 수신 신호에서 송신 신호의 위상이 제거되어 이상적으로 CIR이 추정되지만, 신호가 noise와 함께 수신될 경우 noise로 인해 위상 변동이 생겨 신호의 위상이 완벽하게 제거되지 않아 RBD의 성능이 저하된다. 시뮬레이션에서 수신 신호와 빔형성된 신호의 위상 비교를 통해 SNR -5와 0 dB 환경에서 noise에 의해 위상 차이가 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

또한, 해상데이터에서 RBD 성능 분석 결과 채널마다 성능이 다른 것을 확인 할 수 있었다. White gaussian noise로 추가하여 noise에 의한 성능 분석한 시뮬레이션과 달리, 실제 수신되는 noise는 송신 신호와 상관성이 높은 잔향음이나 방향성을 가진 소음이 존재하며, 이로 인해 채널마다 신호의 위상이 다르다. 따라서 방향성을 가지는 소음이나 잔향음이 존재하는 소음의 시뮬레이션을 통해 이를 확인할 필요가 있다.

6. Reference

- [1] Sabra, K. G., & Dowling, D. R., 2004. “Blind deconvolution in ocean waveguide using artificial time reversal,” J. Acoust. Soc. Am. 116, 262-271
- [2] Sabra, K. G., Song, H. C. & Dowling, D. R., 2010. “ Ray-based blind deconvolution in ocean sound channels,” J. Acoust. Soc. Am. 127, EL42-EL47
- [3] Abadi, S. H., Rouseff, D., & Dowling, D. R., 2010. “Blind deconvolution for robust signal estimation and approximate source localization,” J. Acoust. Soc. Am. 131, 2599-2610
- [4] Byun, S. H., Verlinden, C. M. A., & Sabra, K. G., 2017. “Blind deconvolution of shipping sources in an ocean waveguide,” J. Acoust. Soc. Am. 141, 797-807
- [5] Song, H. C., Cho, C., Byun, G., & Kim, J. S., 2017. “Cascade of blind deconvolution and array invariant for robust source-range estimation,” J. Acoust. Soc. Am. 141, 3270-3273
- [6] Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B., & Schmidt, H., 2011. Computational Ocean Acoustics (Springer Science & Business Media, New York)
- [7] M.B. Porter., 2010. The BELLHOP manual and user’ s guide : PRELIMINARY DRAFT, Heat, Light and Sound Research, Inc

- [8] Durofchalk, N. C., & Sabra, K. G., 2020. “Analysis of the ray-based blind deconvolution algorithm for shipping sources,” J. Acoust. Soc. Am. 147, 1927-1938
- [9] Bendat, J. S., and Piersol, A. G., 2000. Random Data : Analysis and Measurement Procedures (Wiley, New York), pp. 324.
- [10] Eom, M. J., Park, J. S., Ji, Y. H., & Kim, J. S., 2014. “Mitigation of inter-symbol interference in underwater acoustic communication using spatial filter,” J. Acoust. Soc. Kr. 33, 48-53
- [11] Byun, G. H., Oh, S. H., Byun, S. H., & Kim, J. S., 2016. “Estimation of source signal and channel response using ray-based blind deconvolution technique for Doppler-shifted underwater channel,” J. Acoust. Soc. Kr. 35, 331-339

