



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](#)

碩士學位論文

수중음향통신에서 위상고정루프와
등화기의 결합 성능에 대한 연구

濟州大學校 大學院

에너지應用시스템學部 電子工學專攻

金 昇 煥

2023 年 2 月



수중음향통신에서 위상고정루프와 등화기의 결합 성능에 대한 연구

指導教授 高 碩 峻

金 昇 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2022 年 12 月

金昇煥의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

도 양 희



委 員

김 경 연



委 員

고 석 준



濟州大學校 大學院

2022 年 12 月



A Study on the Performance of Phase-Locked
loop with Equalizer in Underwater Acoustic
Communications

Seung-Hwan Kim
(Supervised by Professor Seokjun Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment
of the requirement for the degree of
Master of Science

Major of Electronic Engineering
Faculty of Applied Energy System
Graduate School
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2022. 12.

목차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iv
Abstract	v
제 1 장 서론	1
제 2 장 수중음향통신 수신기 구조 이론	3
2.1 송수신기 구조	3
2.2 등화기	4
2.3 위상고정루프	8
2.4 등화기와 위상고정루프	12
제 3 장 시뮬레이션	13
제 4 장 장거리 해상실험	16
4.1 2020 해상실험	16
4.2 2022 해상실험	26
제 5 장 결론	42
참고문헌	43

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Tx-Rx structure of Under water acoustic communications	3
Fig. 2. Tapped-Delay Line	4
Fig. 3. Equalizer with LMS algorithm	6
Fig. 4. Decision Feedback Equalizer	6
Fig. 5. Phase-Locked Loop	8
Fig. 6. TAN-DPLL	9
Fig. 7. \tan^{-1} characteristic	10
Fig. 8. DD- \tan^{-1}	10
Fig. 9. Equalizer with PLL	12
Fig. 10. Tx signal, channel characteristic in simulation	13
Fig. 11. Equalizer result in simulation	14
Fig. 12. PLL result in simulation	15
Fig. 13. 2020 Sea experiment environment	16
Fig. 14. Equalizer result(ch#8_frame1)	18
Fig. 15. PLL result(ch#8_frame1)	19
Fig. 16. Equalizer result(ch#8_frame3)	20
Fig. 17. PLL result(ch#8_frame3)	21
Fig. 18. Equalizer result(ch#8_frame5)	22
Fig. 19. PLL result(ch#8_frame5)	23
Fig. 20. Equalizer result(ch#16_frame1)	24
Fig. 21. PLL result(ch#16_frame1)	25
Fig. 22. 2022 Sea experiment environment	26
Fig. 23. Filter 1 Equalizer result(ch#6_200bps)	28
Fig. 24. Filter 1 PLL result(ch#6_200bps)	29
Fig. 25. Filter 1 result(ch#6_500bps)	30
Fig. 26. Filter 1 result(ch#6_1000bps)	32
Fig. 27. Filter 1 Equalizer result(ch#5_200bps)	33
Fig. 28. Filter 1 PLL result(ch#5_200bps)	34
Fig. 29. Filter 1 Equalizer result(ch#5_1000bps)	35
Fig. 30. Filter 1 PLL result(ch#5_1000bps)	36

Fig. 31. Channel Multipaths37

LIST OF TABLES

Table 1. Simulation parameter	13
Table 2. 2020 sea experiment parameter	17
Table 3. 2022 sea experiment ber result	26
Table 4. 2022 sea experiment parameter	27
Table 5. Filter structure	27
Table 6. 2022 sea experiment 32km 1 st ber result - Filter 1	37
Table 7. 2022 sea experiment 32km 2 nd ber result - Filter 1	38
Table 8. 2022 sea experiment 68km 1 st ber result - Filter 1	38
Table 9. 2022 sea experiment 68km 2 nd ber result - Filter 1	38
Table 10. 2022 sea experiment 68km 3 rd ber result - Filter 1	38
Table 11. 2022 sea experiment 32km 1 st ber result - Filter 2	39
Table 12. 2022 sea experiment 32km 2 nd ber result - Filter 2	39
Table 13. 2022 sea experiment 68km 1 st ber result - Filter 2	39
Table 14. 2022 sea experiment 68km 2 nd ber result - Filter 2	39
Table 15. 2022 sea experiment 68km 3 rd ber result - Filter 2	39
Table 16. 2022 sea experiment 32km 1 st ber result - Filter 3	40
Table 17. 2022 sea experiment 32km 2 nd ber result - Filter 3	40
Table 18. 2022 sea experiment 68km 1 st ber result - Filter 3	40
Table 19. 2022 sea experiment 68km 2 nd ber result - Filter 3	40
Table 20. 2022 sea experiment 68km 3 rd ber result - Filter 3	40

Abstract

Underwater acoustic communications uses sound waves and a low frequency. Communication is performed in which frequency bandwidth is limited. Research on underwater acoustic communications continue. In underwater acoustic communications, the performance is influenced by underwater channel characteristics. Underwater channel characteristics are determined by transmission loss, multipath, transmission, Doppler influence and noise. The signal is modified and received according to the channel characteristics. A synchronous communication system is required for PSK signals and inter-symbol interference (ISI) and frequency and phase change are greatly affected by the influence of multiple paths. Data recovery is performed by an algorithm that combines an equalizer and a phase-Locked loop. Simulation and long-range sea experiments were conducted to verify performance. The performance results of the ideal case were confirmed through simulation and the success of data recovery was confirmed for various cases such as data rate, distance, and transmission signal length change through long-range sea experiments. Two long-range sea experiments were conducted and in the first long-range sea experiment five repetitive experiments were performed on signals with a length of 846 bits. In the second long-range sea experiment, the experiments were performed on signals with a length of 2010 bits. It was confirmed that data recovery was performed in many cases and it was confirmed that it was difficult to recover data in case of poor channel environment. It was confirmed that the Decision-Directed method, combination of the feedback filters, the parameter setting affect the performance.

초록

수중음향통신은 수중에서 음파를 사용하는 통신 시스템이다. 수중음향통신은 저주파 사용을 하며, 주파수 대역폭이 제약적인 상황에서의 통신이 이루어진다. 수중음향통신은 여러 분야에서 필요로 하고 있으며, 지속적인 개발이 이루어지고 있다. 수중음향통신에서 통신 성능은 수중채널 특성에 영향을 받는다. 수중채널 특성은 전달손실, 다중경로 전달, 도플러 영향, 잡음 등에 의해 결정이 된다. 신호는 채널 특성에 따라 다르게 변형되어 수신된다. PSK 계열의 신호에서는 동기 방식의 통신 시스템이 필요하다. PSK 계열의 신호에서는 동기 방식의 통신 시스템이 필요하며 통신 과정에서 다중경로의 영향으로 인접 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference:ISI)과 주파수 및 위상변화에 영향을 많이 받게 되고, 등화기(Equalizer)와 위상고정루프(Phase-Locked loop)가 결합된 알고리즘으로 데이터 복구를 한다. 성능 검증을 위해 시뮬레이션 및 장거리 해상실험을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 이상적인 경우의 등화기와 위상고정루프의 성능 결과를 확인하였고, 장거리 해상실험을 통해 데이터율, 거리, 송신 신호 길이 변화 등 다양한 경우에 대해서도 데이터 복구 성공 유무에 대해 확인하였다. 장거리 해상실험은 2번 진행되었으며, 첫 번째 장거리 해상실험에서는 846 비트의 길이를 가진 신호에 대해 5번의 반복실험이 수행되었다. 두 번째 장거리 해상실험에서는 2010 비트의 길이를 가진 신호에 대해 2번의 반복실험이 수행되었다. 두 번의 실험에서 다수의 경우 데이터 복구가 이루어진 것을 확인하였고, 채널 환경이 좋지 않은 경우에는 데이터복구가 어렵다는 것을 확인하였다. 또한 결정지향 방식과 궤환 필터의 결합 유무 및 파라메타 설정이 성능에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

제 1 장 서론

수중음향통신은 수중에서 음파를 사용하는 통신 시스템이다. 수중음향통신은 여러 분야에서 필요로 하고 있으며, 지속적인 개발이 이루어지고 있다. 수중음향통신 시스템의 성능은 전송되는 수중음향채널 특성[1]에 영향을 크게 받는다. 지상 통신과는 다르게 채널 환경에 변화가 많이 일어나고, 제약적인 요소가 더 존재한다. 수중음향채널의 특성은 전달손실, 다중경로 전달, 도플러 영향, 잡음 등에 의해 결정이 된다. 다양한 채널 특성 영향들로 인해 신호는 원래 보내야 하는 송신 신호와 다르게 변형되어 수신된다. 수중음향통신은 저주파 사용을 하고, 그로 인해 주파수 대역폭이 제약적인 상황에서의 통신이 이루어진다. 또한 낮은 음속의 음파를 사용하기 때문에 거리에 따른 신호크기의 감소효과가 크게 나타나고 신호가 잡히지 않는 지역인 음영지역에서는 신호 대 잡음비가 낮기 때문에 신호 검출이 불가능하다. 따라서 통신 가능 거리 및 통신 가능 지역은 통신 가능 여부에 대한 중요한 요소가 된다. 그리고 불규칙한 해수면 반사에 의한 도플러 천이나 도플러 확산 현상이 자주 발생하게 되며 PSK 계열의 신호에서는 동기 방식의 통신 시스템이 필요하다. PSK 계열 신호에 대한 동기 방식 통신 과정에서 다중경로의 영향으로 인접 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference:ISI)과 주파수 및 위상변화에 영향을 많이 받게 되고, 등화기(Equalizer)와 위상고정루프(Phase-Locked loop)가 결합된 알고리즘으로 데이터를 복구하게 된다. 수중음향통신에 맞는 등화 및 위상 동기화 방법은 국내[2],[3],[4] 및 해외[5],[6]에서 꾸준히 연구되어 오고 있다. 국내에서는 2012년 수중음향통신에서 혼련시퀀스와 신호 대 잡음비를 이용하여 등화기의 성능향상에 관한 연구가 2013년에는 다중경로를 보상하기 위한 터보 등화기에 대한 연구가 진행되었다. 또한, 2010년에 수중 채널 환경에서 PSK 계열 신호를 복구하기 위한 동해 실험에 대한 국내 연구 사례가 있다. 해외에서는 1994년 수중음향통신에서의 위상 동기 디지털 통신에 관한 연구가 1997년에는 등화기와 위상고정루프가 결합된 적응형 수신기에 대한 연구가 진행되었다. PSK계열 신호에 대한 동기 방식 통신은 상대적으로 구조가 복잡

하며, 안정적으로 동작 가능한 등화기와 위상 동기 알고리즘을 설계하는 것이 중요하다. 동기 방식 통신 시스템의 수신기에서는 프레임 동기 및 위상 동기가 필요하며, 동기화 과정이 제대로 이루어져야만 수신 데이터 복구가 가능하다. 데이터 복구를 위해 등화기를 사용하는 이유는 다중경로에 의해 발생한 인접 심볼간 간섭을 보상하기 위함이다. 인접 심볼간 간섭이 발생하게 되면 동기화를 진행하는 것에 있어 큰 영향을 미치게 되어 동기화가 되지 않는 문제가 발생하게 된다. 또한, 심볼간 간섭을 해결하기 위해 사용하는 등화기는 위상 오차 및 타이밍 오차가 동작 가능 범위 이내로 제한되지 않는다면 수렴하지 않는 문제가 발생된다. 도플러 주파수가 거의 없는 상황에서는 등화기 동작에 크게 영향을 주지 않지만, 큰 주파수 변화에 대해서 어려움이 존재한다. 주파수 변화를 보상하기 위해 위상 고정루프를 사용하며, 수중 음향 통신에서 수중 이동체의 움직임에 의해 발생하는 도플러 최대주파수가 큰 경우는 위상 동기의 역할이 더 중요해진다. 이는 위상 고정루프와 등화기를 결합하는 가장 큰 이유이다. 본 연구는 수신기에서 프레임 동기 후 복조 과정인 등화기와 위상 고정루프 결합 구조 설계 및 성능분석에 대해 진행하였다. 2장은 수중음향통신의 수신기 구조 이론이며 3장은 설계한 구조의 시뮬레이션, 4장에서는 장거리 해상실험을 통한 등화기와 위상 고정루프 결합구조의 성능 분석 순서로 진행하였다. 5장은 결론으로 구성되어 있다.

제 2 장 수중음향통신 수신기 구조 이론

2.1 송수신기 구조

수중음향통신에서 동기 방식 시스템의 송신기와 수신기의 구조는 그림1과 같다. 송신기는 증폭기, 주파수 상향 변환(Up-conversion), 제곱근 상승 코사인 필터(Square-root raised cosine filter), BPSK 변조기, 프레임 생성기의 구조이며, 수신기는 주파수 하향 변환(Down-conversion), 제곱근 상승 코사인 필터, 프레임 동기, BPSK 복조 구조로 되어있다. 이러한 구조에서 중요한 점은 동기 방식의 시스템이기 때문에 기저대역에서 수신기가 동작한다는 것이다. BPSK 복조 과정은 프레임 동기 이후이며, 수신 데이터의 첫 지점으로부터 등화기와 위상고정루프가 동작하여 최종적으로 데이터 복구를 진행하게 된다.

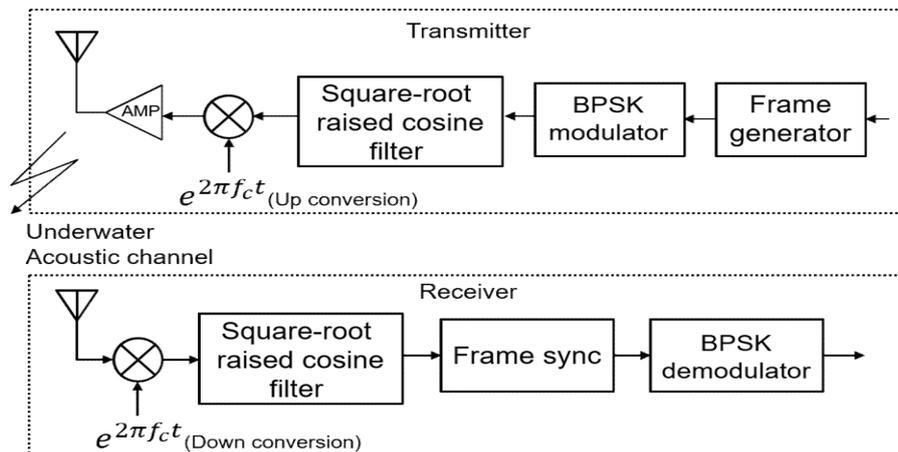


Fig. 1. Tx-Rx structure of Underwater acoustic communications

2.2 등화기

2.2.1 등화기 구조

그림1의 BPSK 복조과정에서 수중채널의 다중경로 전달로 인해 발생된 인접심볼 간 간섭의 영향을 제거하기 위해 등화기가 동작하게 된다. 등화기 필터 구조는 지연선(Tapped-Delay Line:TDL)이며 그림2와 같다.

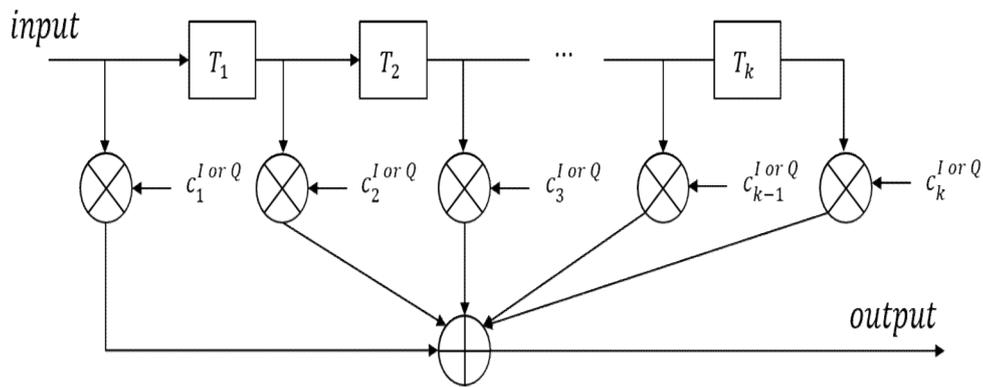


Fig. 2. Tapped-Delay Line

그림2에서 k 는 순서 인덱스를 나타내는 값이며, T_k 는 k 번째 필터의 탭, c 는 I(In-phase)와 Q(Quadrature-phase) 채널 필터의 계수값을 의미한다. 필터의 계수값은 입력신호에 곱하여 다중경로를 보상하게 된다. 등화기의 종류는 다양하게 존재하지만, 시변 채널에서 성능을 향상시키기 위해 적응형 등화기를 사용한다.[7] 다중경로에 의한 심볼간 간섭 영향을 보상하기 위해 등화기 필터마다 계수값이 존재하는데 등화기의 동작으로 업데이트가 된다. 등화기는 평균제곱오차(Mean Square error:MSE)를 최소화하는 방식으로 동작한다. 평균제곱오차를 나타내는 식은 식2.2.1a와 같다.

$$MSE = E[e^2(n)] = E[(d(n) - d'(n))^2] \quad (2.2.1a)$$

식2.2.1a에서 MSE는 에러값을 자승 후의 기댓값을 취한 값이다. 기댓값에서 원래의 값의 차를 구한 것이 에러 값이며, n 은 순서 인덱스이고 e 는 n 번째 시간에 대한 오차, d 는 n 번째 시간에 대한 원래의 송신 데이터, d' 는 등화기 필터의 출력값을 의미하고 d' 은 식2.2.1b와 같이 나타낸다.

$$d'(n) = \hat{w}^T(n)u(n) \quad (2.2.1b)$$

식2.2.1b에서 $\hat{w}(n)$ 은 필터 계수 값이고, $u(n)$ 은 등화기 입력값을 의미한다. 평균 제곱오차를 최소로 만들기 위해서 최소 평균 제곱(Least mean square:LMS) 알고리즘을 적용하였다[8]. LMS 알고리즘에 대한 식은 식2.2.1c, 2.2.1d와 같이 나타낸다.

$$e(n) = d(n) - X^T(n)w(n) \quad (2.2.1c)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu X(n)e(n) \quad (2.2.1d)$$

식2.2.1c, 2.2.1d에서 w 는 필터의 계수 값, μ 는 필터의 step-size이고, $(X)^T$ 는 (X) 행렬의 전치 행렬이다. n 값이 증가할수록 필터의 계수 값을 최소화하게 만드는 알고리즘이다. LMS 알고리즘을 적용한 등화기의 구조는 그림3과 같다[9].

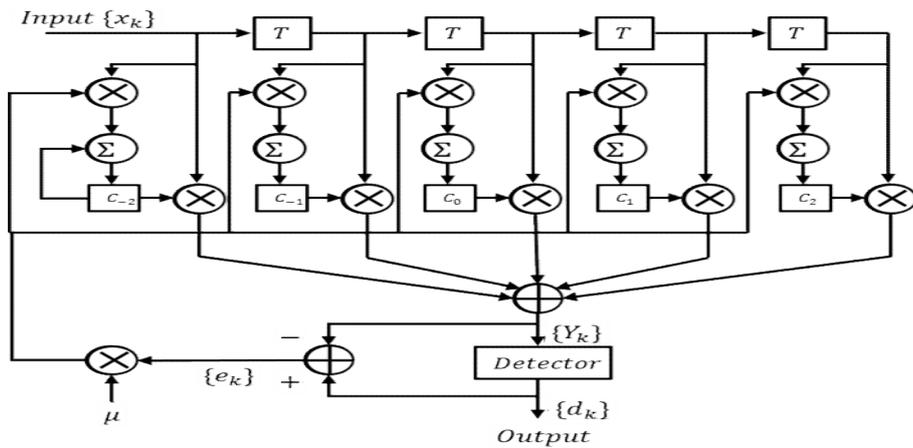


Fig. 3. Equalizer with LMS algorithm

수중음향통신에서는 채널 변화가 심하게 일어나기 때문에 시변 채널에서 동작에 유리한 등화기인 적응형 등화기를 사용한다. 최종적으로는 적응형 필터인 순방향 (Feedforward:FF) 필터와 궤환(Feedback:FB) 필터가 결합된 비선형 등화기인 판정 궤환 등화기(Decision Feedback Equalizer:DFE)를 사용한다[10],[11]. 궤환 필터의 입력값은 경판정(Hard Decision) 후의 값이다. 판정궤환등화기를 사용하는 이유는 순방향 필터에서 줄여준 오차에 대해 더욱 안정적으로 동작하기 위해 궤환 필터를 결합하여 사용하는 것이며, 구조는 그림4와 같다.

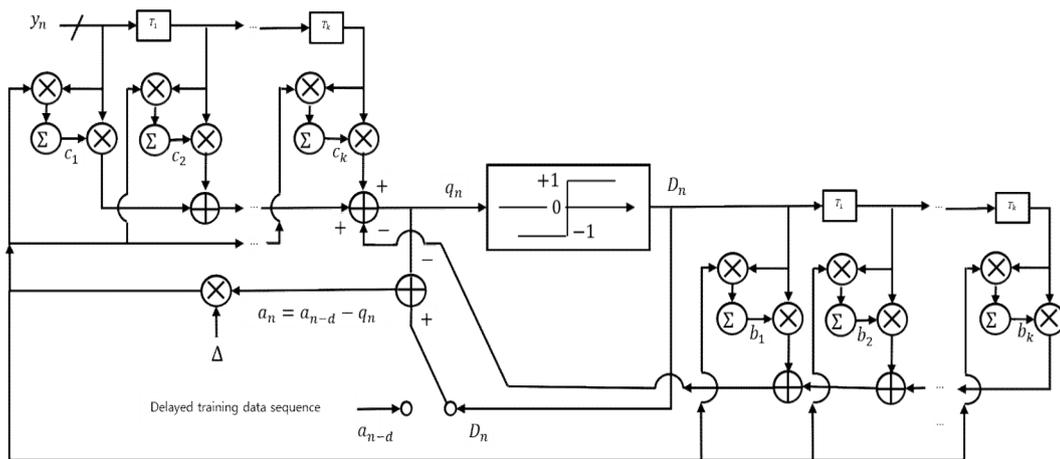


Fig. 4 . Decision Feedback Equalizer

판정 케환 등화기의 출력값은 식2.2.1e와 같이 나타낸다.

$$q_n = \sum_{i=0}^{K_1} c_n(i)y_{n-i} - \sum_{j=1}^{K_2} b_n(j)D_{n-j} \quad (2.2.1e)$$

식2.2.1e에서 q 는 판정 케환 등화기의 출력값으로 순방향 필터의 출력값에서 케환 필터의 출력값의 차를 의미한다. c 는 i 번째 순방향 필터의 계수 값, b 는 j 번째의 케환 필터의 계수값을 의미한다. y 는 순방향 필터의 입력값이며, D 는 케환 필터의 입력값으로, q 값을 경판정 한 값이다.

판정 케환 등화기의 필터 계수 값을 구하기 위해 LMS 알고리즘을 사용하며, 순방향 필터와 케환 필터의 계수 값을 구하는 식은 식2.2.1f,2.2.1g와 같이 나타낸다.

$$c_{n+1}(i) = c_n(i) + \Delta e_n y_{n-i} \quad (2.2.1f)$$

$$b_{n+1}(i) = b_n(i) - \Delta e_n D_{n-i} \quad (2.2.1g)$$

식2.2.1f,2.2.1g에서 Δ 는 필터의 step-size이며, e 는 필터의 에러 값을 의미한다. 판정케환등화기의 에러 값은 두 가지의 구간에서 다르게 사용하게 되는데, 이는 판정케환 등화기의 구조에 따라 훈련 구간과 실제 데이터 구간을 두기 때문이다. 2개의 구간을 나누는 이유는 훈련 구간에서 빠르게 오차를 줄여 수렴구간 내에 담아주어 실제 데이터 구간에서 원하는 데이터를 정확하게 얻어내기 위함이다. 판정케환등화기에서도 필터의 계수 값을 업데이트 하기 위해 에러값이 필요한데 에러를 구하는 식은 식2.2.1h와 같이 나타낸다.

$$e_n = \begin{cases} a_{n-d} - q_n & \text{training period} \\ D_n - q_n & \text{real data period} \end{cases} \quad (2.2.1h)$$

식2.2.1h에서 a 는 송신 신호, q 는 필터의 출력 값, D 는 경관정 이후의 값을 의미한다. 또한 d 는 필터 탭의 지연을 의미하며, 보통 필터 탭 개수의 반으로 나누는 값을 사용한다. 필터 지연에 관한 식은 식2.2.1i와 같이 나타낸다.

$$d \simeq K/2 \quad (2.2.1i)$$

식2.2.1i에서 K 는 필터 탭의 개수를 의미한다. 수중 통신 시 주파수 및 위상 변화가 존재하기 때문에 시변 채널의 인접 심볼간 간섭을 보상하여도 데이터 복구가 이루어지기 힘들다. 이러한 문제를 보완하기 위해 등화기와 위상고정루프를 결합하여 사용한다[12]. 위상고정루프는 다중경로의 영향을 받을수록 성능이 감소하게 되는데, 등화기나 위상고정루프 중 한가지라도 동작에 어려움이 있다면, 제대로 된 데이터 복구를 하는 것이 어려우며, 제대로 맞물려 동작하는 것이 필요하다.

2.3 위상고정루프

2.3.1 위상고정루프 구조

위상고정루프의 기본구조는 위상검출기, 루프필터, VCO로 그림5과 같다[13].

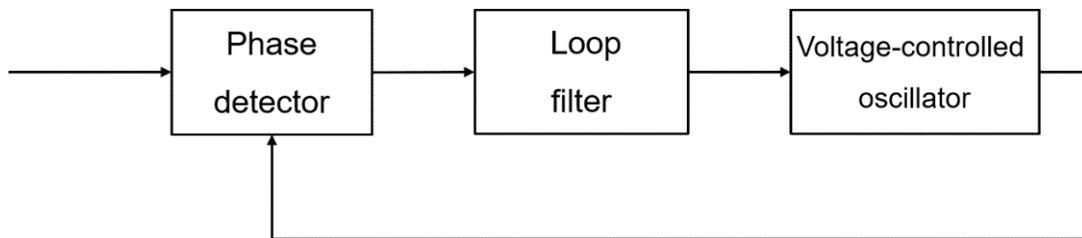


Fig.5. Phase-Locked Loop

그림6은 TAN-DPLL 구조이다. 수신된 신호의 위상을 검출하기 위해서 위상검출기를 사용한다. 이 구조에서는 위상검출기를 \tan^{-1} 방식을 사용한 PLL 구조를 나타낸다.

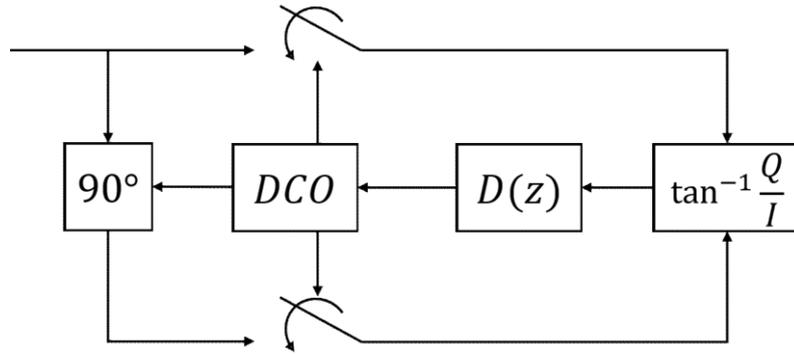


Fig.6. TAN-DPLL

다수의 위상 검출기는 사인파에 대해 선형 근사화를 하게 된다. 그리고 사인파는 $-180 \sim 180^\circ$ 중 약 $-30 \sim 30^\circ$ 구간에서만 선형구간을 이룬다. 하지만 \tan^{-1} 방식의 위상 검출기를 사용한다면, 식2.3.1a를 이용하여 위상을 검출하게 된다. 따라서 위상 검출 범위가 $-180 \sim 180^\circ$ 구간으로 늘어나며, 다른 위상 검출기에 비해 보다 많은 범위의 위상을 검출할 수 있다. 그림7은 \tan^{-1} 구조 위상 검출기의 특성을 나타낸다.

$$\tan^{-1}(\sin\phi/\cos\phi) \tag{2.3.1a}$$

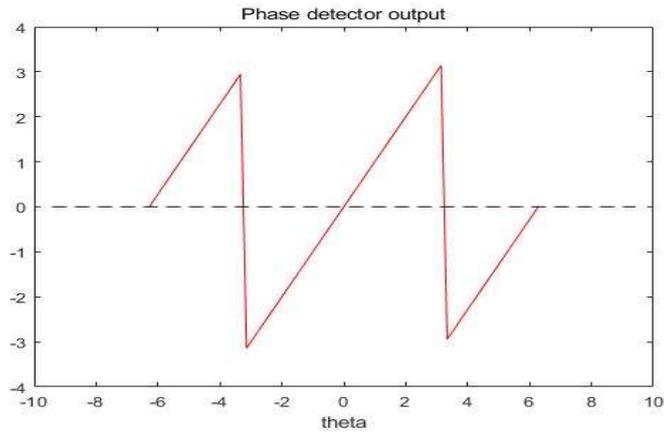


Fig.7. \tan^{-1} characteristic

위상을 검출하는 과정에서 수신된 데이터의 포함되어있는 송신 데이터의 영향을 제거하지 않는다면 정확한 위상을 검출하기가 어렵다. 따라서 송신 신호의 값의 영향을 제거해야하며, 데이터 영향 제거를 위해 결정지향방식(Decision-Directed method:DD method)을 사용한다. 결정지향방식과 \tan^{-1} 방식의 결합된 구조의 위상 검출기는 그림8과 같다.

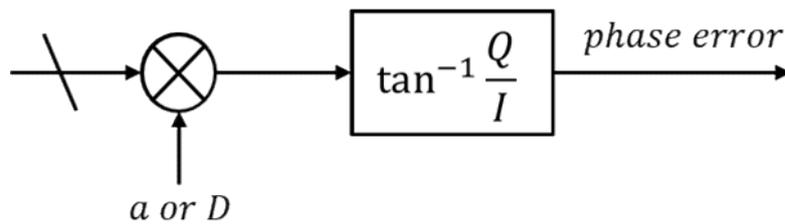


Fig.8. DD- \tan^{-1}

결정지향방식은 송신신호와 같은 값을 수신 데이터에 곱해주어 항상 '1'의 값을 만들게 된다. 그림8에서 a 는 송신 신호이고 D 는 등화기 필터의 출력값을 경관정한 값이며, 만약 BPSK 신호일 경우 '±1'의 값이 된다. 위의 과정을 통해 얻어진 값을 등화기의 입력신호에 곱해주어 데이터를 제거하게 된다. 또한, a 와 D 로 나

누어진 이유는 판정계환등화기의 구조가 훈련 구간과 실제 데이터 구간에서의 동작이 다르게 이루어지기 때문이다. 훈련 구간에서는 알고 있는 데이터인 송신 신호를 곱하고, 실제 데이터 구간에서는 경판정 후의 값을 곱해주게 되는 것이다.

그림6에서 $D(z)$ 는 디지털 루프필터의 전달함수이다. 2차 루프 필터의 식은 식 2.3.1b와 같이 나타낸다.

$$y_k = G_1 x_k + G_2 \sum_{i=0}^{k-1} x_i \quad (2.3.1b)$$

식2.3.1b에서 y_k 는 2차 루프필터의 출력 값, x 는 입력 값을 의미한다. G_1, G_2 는 필터의 이득 값이며, 위상고정루프의 안정성을 정하게 된다.

2.4 등화기와 위상고정루프

2.4.1 등화기와 위상고정루프 결합 구조

그림9는 판정계환등화기와 위상고정루프를 결합한 구조를 나타낸다. 설계한 구조의 성능을 안정화시키는 부분이 있는데 그림9 제일 앞단에 Power normalize가 그 역할을 한다. 등화기 입력 값에 대해 Power normalize가 이루어지는 이유는 등화기의 에러 폭을 줄이기 위함이다. 등화기의 에러를 구하는 과정에서 등화기 출력값과 비교가 되는 값은 식8의 a 와 D 값이다. BPSK 신호에 대한 동작에서 a 값은 '+1'과 '-1'의 값이고 D 는 등화기 출력값을 경판정 후의 값으로 '+1'과 '-1'이 되게 된다. 즉 등화기의 입력신호 '1'을 기준으로 Power normalize 하는 과정을 통해 등화기 에러의 폭을 줄여 안정적인 동작을 통해 성능 향상을 시키게 된다.

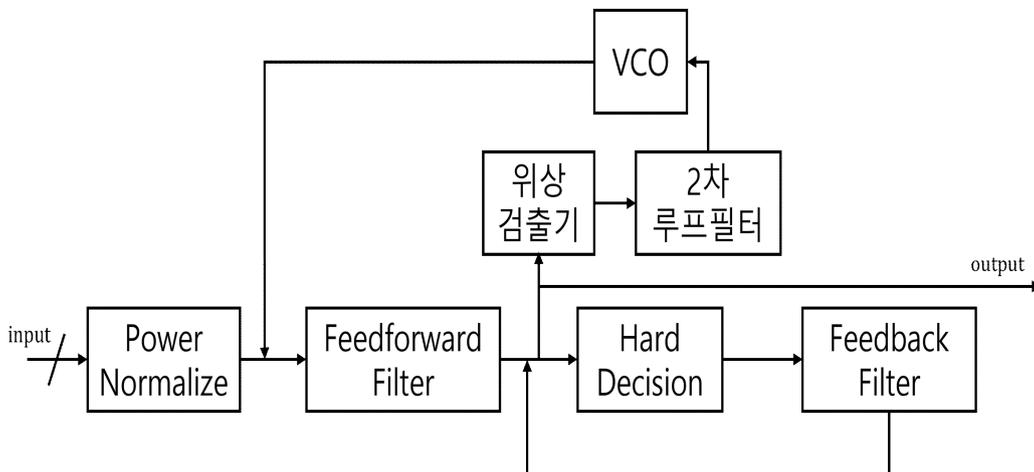


Fig.9. Equalizer with PLL

제 3 장 시뮬레이션

등화기와 위상고정루프 결합구조에 대한 성능 검증을 시뮬레이션을 통해 먼저 진행하였다. 실제 수중 통신 환경이랑 다른 이상적인 경우인 채널 다중경로의 시변동성이 없는 경우 결과이다. 표1은 시뮬레이션 실험의 파라메타이다.

Table 1. Simulation parameter

Parameters	Value
Modulation	BPSK
Data rate	100 bps
Preamble	510 bit
Random data	1680 bit
Frequency offset	1.5 Hz

시뮬레이션 실험은 프리엠블 길이가 510 비트이고 랜덤 데이터 길이가 1680 비트로 진행하였다. 프리엠블은 알고 있는 데이터이고 랜덤 데이터는 실제로 받아야 하는 데이터이다. BPSK 변조된 신호이며, 도플러 주파수에 대한 영향도 분석하기 위해 1.5Hz를 사용하였다. 채널 다중경로는 그림10의 (b)와 같다.

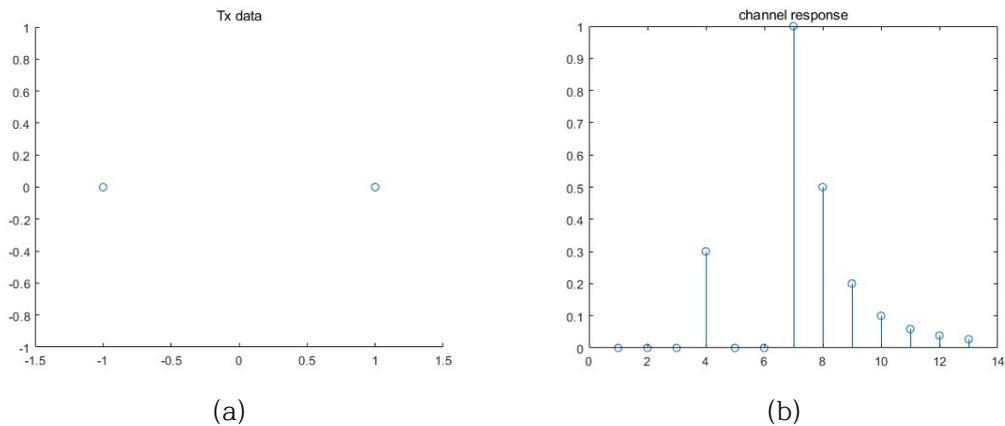


Fig. 10. Simulation result, (a) Tx signal, (b) channel multipath

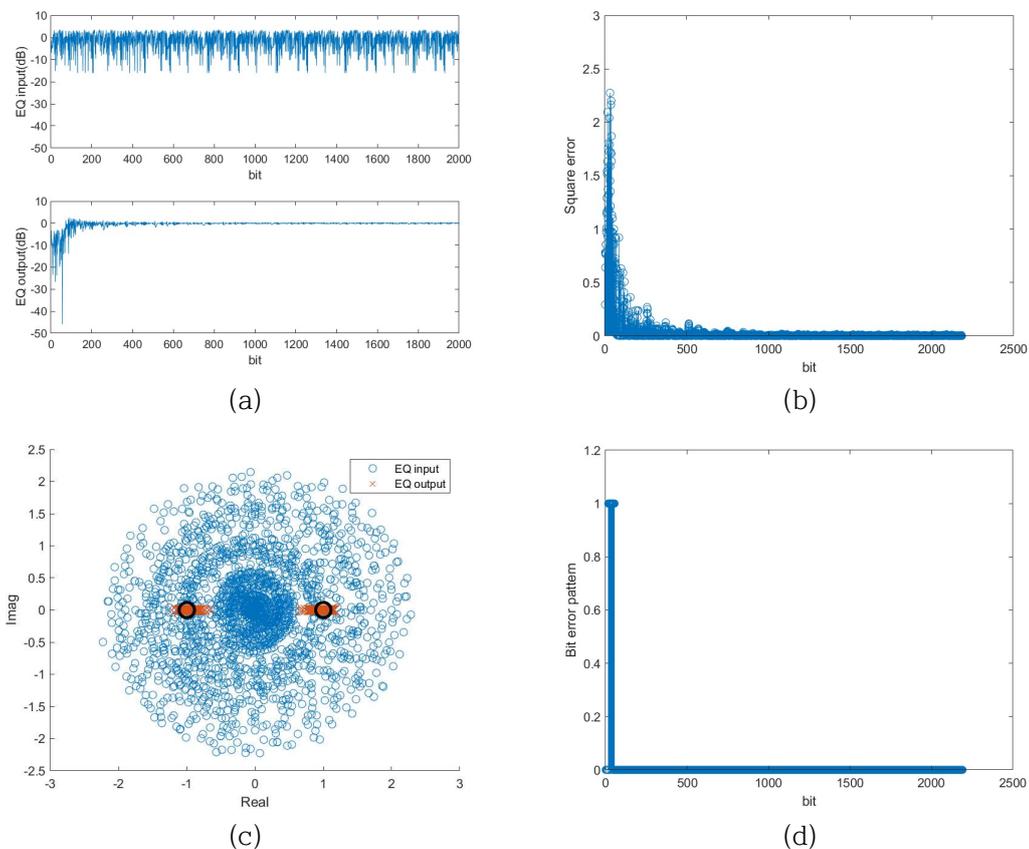


Fig. 11. Equalizer result in simulation, (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림11은 시뮬레이션 실험의 등화기 결과이다. (a)는 등화기 입력 및 출력을 dB 크기로 나타내었다. (a)를 통해 데이터 복구가 정상적으로 이루어진다면 출력값이 '0'의 값 근처에서 나타나는 것을 확인하였다. (b)는 자승오차 그래프이다. 8개의 다중경로가 존재해도 약 100 비트에서 '0'에 수렴하기 시작하였다. (c)는 등화기의 입출력 그래프의 산점도이다. 1.5Hz의 주파수 영향 때문에 입력값이 원형의 형태로 나타났고 출력값도 제대로 된 보상이 이루어져 '1'과 '-1'의 구간에서 나타났다. (d)는 비트에러 패턴의 그래프이며, '1'은 비트 에러를 의미하고, '0'은 비트 에러가 아님을 나타낸다. 또한 프리앰블 내에서 에러가 빠르게 보상되었으며, 랜덤 데이터 구간에서는 비트 오류율(Bit error rate:ber)이 '0'으로 데이터 복구가 되었다.

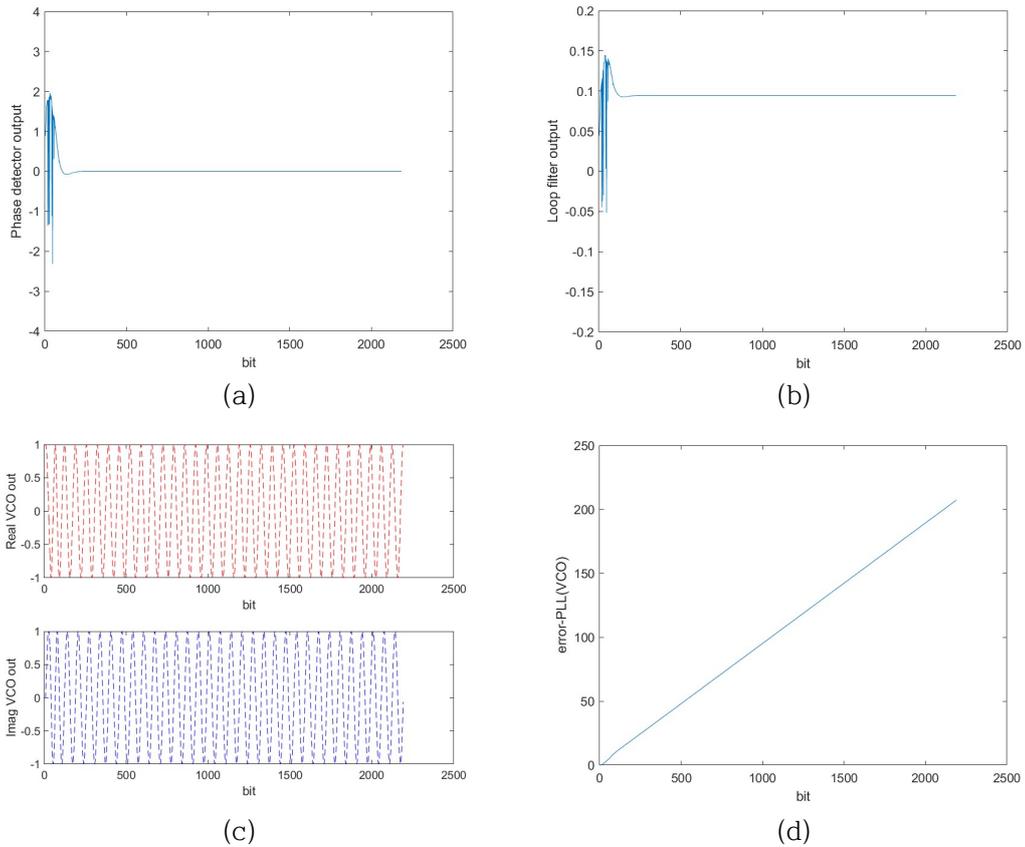


Fig. 12. PLL result in simulation, (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림12는 시뮬레이션 실험의 위상고정루프 결과 그래프이다. (a)는 위상 검출기 출력을 나타낸 결과이다. 위상 검출기는 \tan^{-1} 방식을 사용하였기 때문에 최대 ‘ $\pm\pi$ ’ 값까지 나타날 수 있으며, 초기 위상 오차가 크게 나타났지만 약 100비트 이후에는 위상 오차가 없었다. (b)는 루프필터의 출력 결과 그래프이며, 출력 형태는 위상 검출기와 유사한 형태로 동작하였고 (c)는 VCO의 출력 결과를 나타낸다. 출력 결과를 통해 주파수를 빠르게 보상하고 있음을 알 수 있으며 (d)는 VCO의 누적결과를 통해서도 확인하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 다중경로와 주파수 및 위상 동기가 정상적으로 이루어지는 것을 그림11,12를 통해 확인하였다. 또한, 자승오차 그래프와 위상 검출기 결과에서 ‘0’으로 수렴하는 시점이 유사했으며, 서로 맞물려 정상적으로 동작한 결과가 나타났다.

제 4 장 장거리 해상실험

4.1 2020년 해상실험

4.1.1 해상실험 실험 환경 및 파라메타

설계한 등화기와 위상고정루프의 성능을 검증하기 위해 2020년과 2022년 2번의 장거리 해상실험을 진행하였다. 실험은 동해에서 진행되었고 그림13은 첫 번째 실험인 2020년 해상실험 환경이다. 송수신기간 거리는 20km, 송신기의 수심은 200 m에 위치하였다. 수신기는 16개의 채널을 가지고 있으며 수심 179~221 m에 배치되었다.

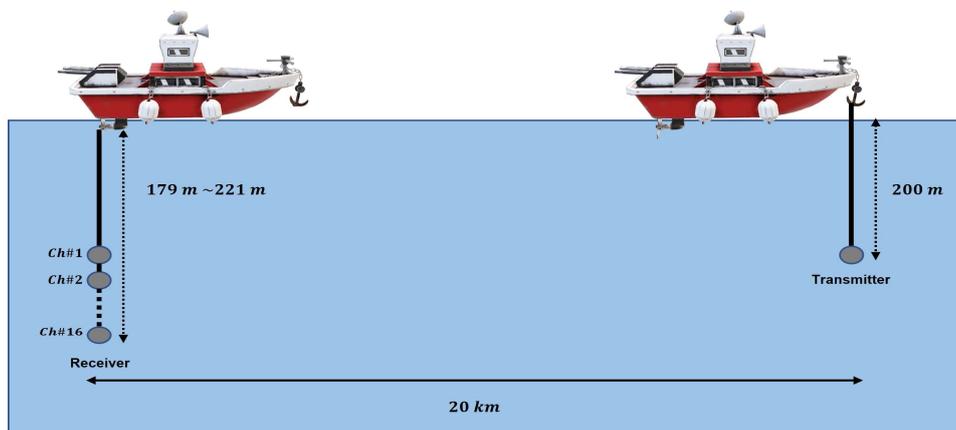


Fig.13. 2020 sea experiment environment

Table2. 2020 sea experiment parameter

Parameters	Value
Modulation	BPSK
Tx - Rx distance	20 km
Data rate	100 bps
Transmitter depth	200 m
Receiver depth	179 ~ 221 m
Carrier frequency	1.8 kHz
Preamble data	510 bit
Random data	336 bit

표2는 2020년 해상실험의 파라메타이다. 데이터율이 100 bps인 BPSK 신호이며, 동일한 신호를 5번 반복 수행하였다. 이 실험에서 알고 있는 프리앰블 데이터 (510 비트)와 짧은 랜덤 데이터(336 비트)로 구성된 846 비트 신호를 송신하였고, 16개의 수신기를 사용하여 수심과 수신 크기가 다른 5개의 프레임에 따른 성능 분석과 장거리 해상에서의 데이터 복구 가능 유무에 대해 검증하였다.

4.1.2 2020년 장거리 해상실험 결과분석

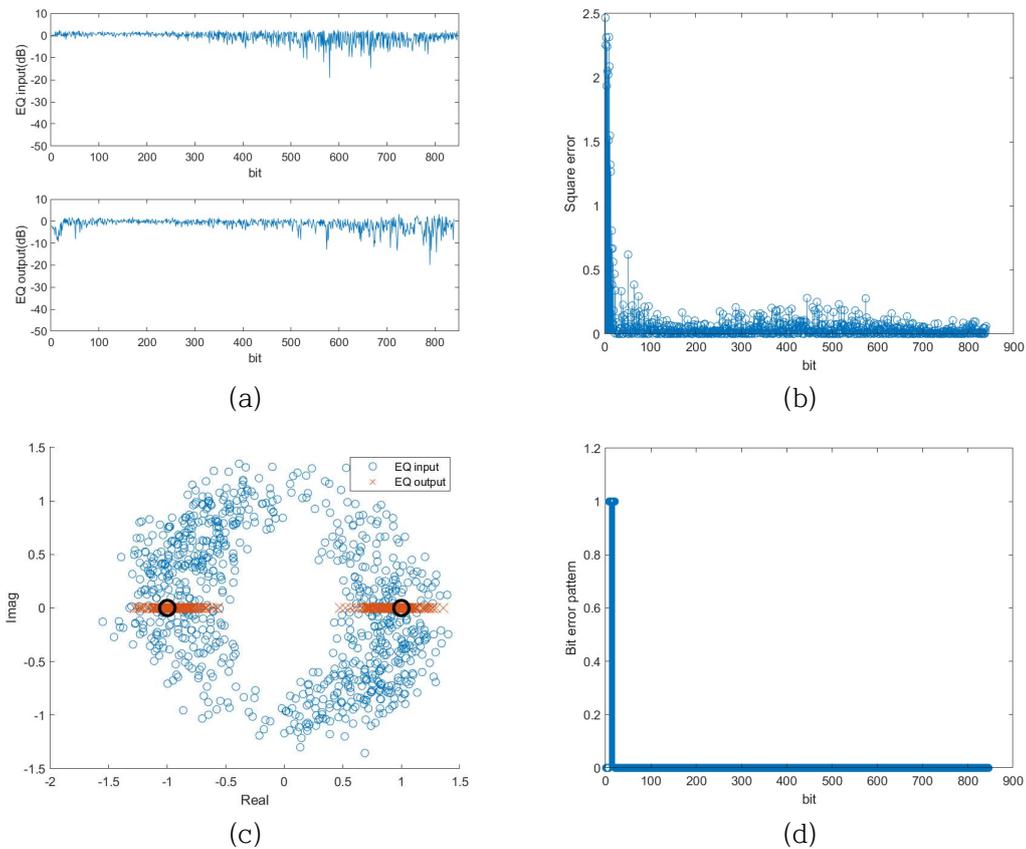


Fig. 14. Equalizer result(ch#8_frame1), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림14-21은 2020년 장거리 해상실험 결과이다. 그림14는 ch#8의 첫 번째 프레임 등화기 결과 그래프이다. (a)는 입력과 출력의 크기를 dB 단위로 나타낸 결과이다. 입력과 출력 크기의 변화가 랜덤 데이터 구간에서 나타났지만 크게 문제가 되지 않았다. (b)는 자승오차 그래프이다. 초반 비트를 지난 약 100 비트 이후에는 '0'으로 수렴형태가 나타났고 '0'에 수렴했기 때문에 시뮬레이션과 동일하게 비트 오류 패턴에서도 에러가 없었다. (c)는 입력과 출력값의 산점도이다. 해상실험에서도 도플러 주파수 영향에 의해 입력신호는 원을 그리는 형태가 나타났으며, 출력값은 BPSK 신호를 복구하였기 때문에 '+1'과 '-1' 두 개의 부분으로 나누어진 것을 확인하였다. (d)는 전체 신호의 비트 에러 패턴이며, '1'은 비트 에러를 의미하고, '0'은 비트 에러가 아님을 나타내었다. 자승오차 그래프와 유사한

패턴을 확인하였으며, 랜덤 데이터 구간의 ber 값이 0으로 데이터 복구가 잘 이루어졌다.

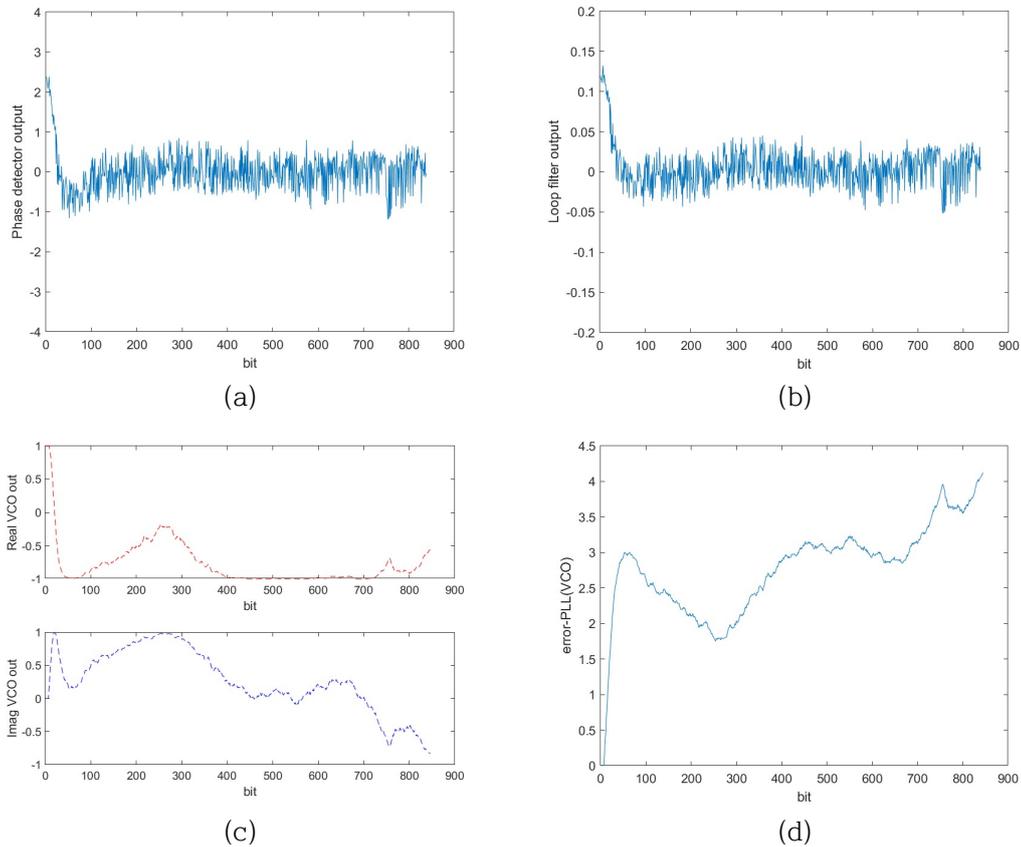


Fig. 15. PLL result(ch#8_frame1), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림15는 ch#8의 첫 번째 프레임 위상고정루프 결과 그래프이다. (a)는 위상 검출기 출력을 나타낸 결과이다. 초기 위상 오차가 크게 나타났지만 약 100 비트 이후 정상 상태의 동작을 확인하였다. (b)는 루프 필터의 출력 결과 그래프이다. 루프 필터의 출력 형태는 위상 검출기와 거의 유사하게 나타났다. (c)는 VCO의 출력 결과이다. 출력 결과를 통해 주파수가 아닌 위상을 따라가고 있는 형태가 나타났다. (d)는 VCO의 누적결과를 나타낸 그래프이며, 두 개의 결과 그래프를 통해 위상고정루프가 풀리지 않고 동작하고 있는 결과를 확인하였다.

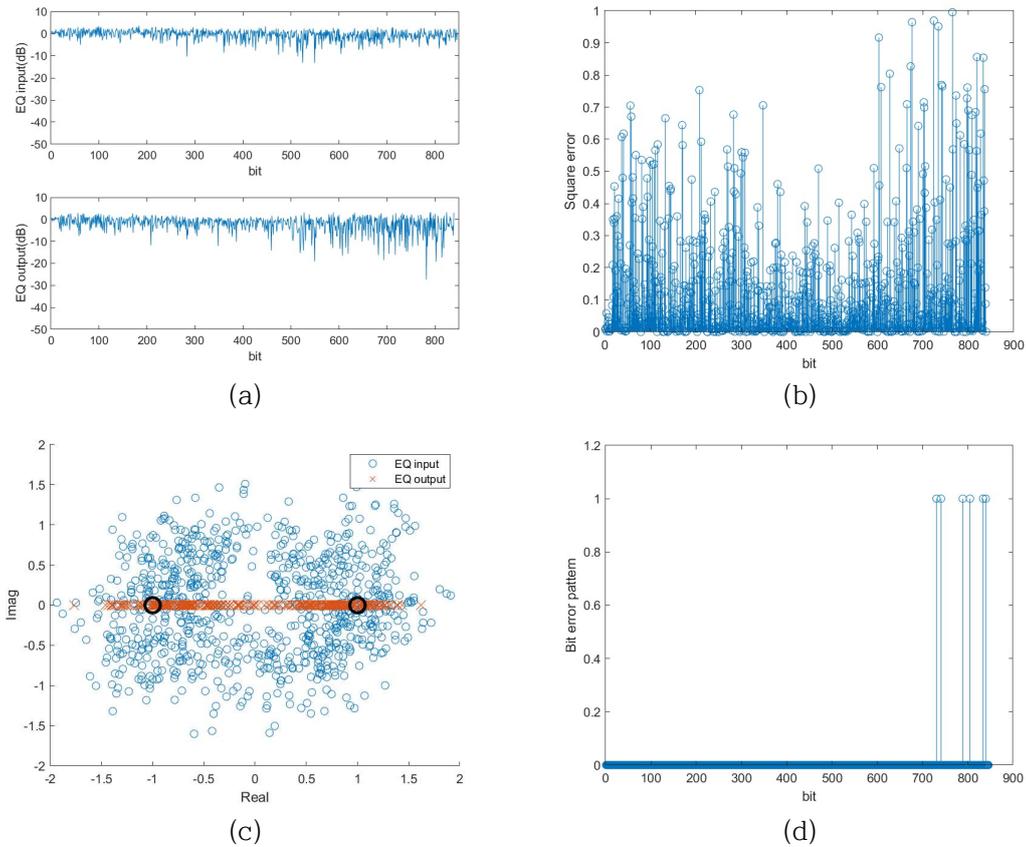


Fig. 16. Equalizer result(ch#8_frame3), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림16은 ch#8의 세 번째 프레임 등화기 결과 그래프이며, 첫 번째 프레임 결과와는 다르게 나타났다. (a)의 입력값의 크기변화가 심하게 나타나지 않았지만 출력값은 약 600비트 이후 최대 30 dB 크기가 감소하였고 (b)에서도 동일하게 나타났다. (d)에서는 자승오차가 나타나고 조금 지난 시점인 700 비트 이후부터 에러가 나타났고, 대략 600 비트부터 등화기가 불안정해지고 있다는 것을 확인하였다. (c)는 출력 값이 '1'과 '-1' 부분으로 나누어진 것으로 보이지만, 600 비트 이후의 에러가 난 부분이 많이 존재하지 않기 때문에 그래프에서는 구별하기 힘들다. (d)의 랜덤 데이터 구간에서 비트 에러가 존재하지만, 랜덤 데이터 구간의 BER은 0.02로 데이터 복구가 되었다고 할 수 있다. 하지만 랜덤 데이터 후반 비트에서 동작이 불안정하기에 긴 데이터에 대해서도 결과분석이 필요하다.

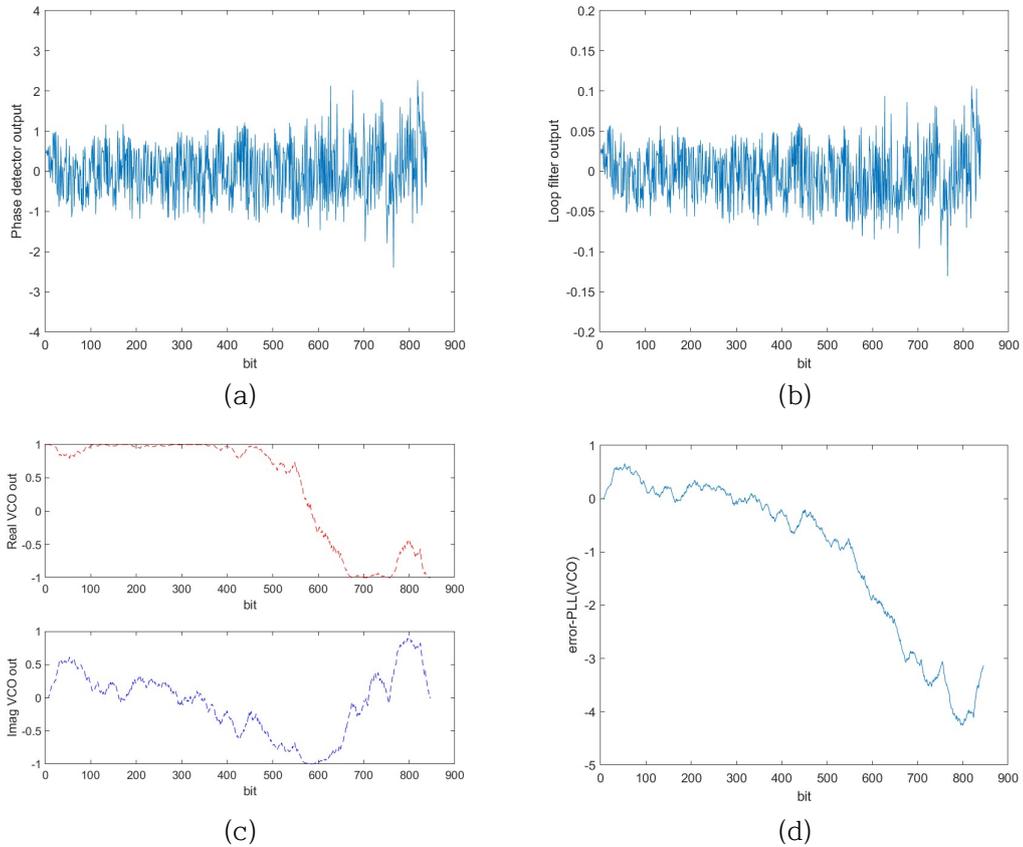


Fig. 17. PLL result(ch#8_frame3), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림17은 ch#8의 세 번째 프레임의 위상고정루프 결과 그래프이다. (a),(b),(c)에서 등화기의 결과와 유사하게 약 600 비트 이후 흔들림 현상이 나타났다. 또한 500 비트까지는 크게 변화 없이 잘 따라가고 있는 형태가 보이지만, 600 비트 이후에 급격히 떨어지는 현상을 통해 위상고정루프의 영향으로 인해 등화기의 동작 결과에도 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

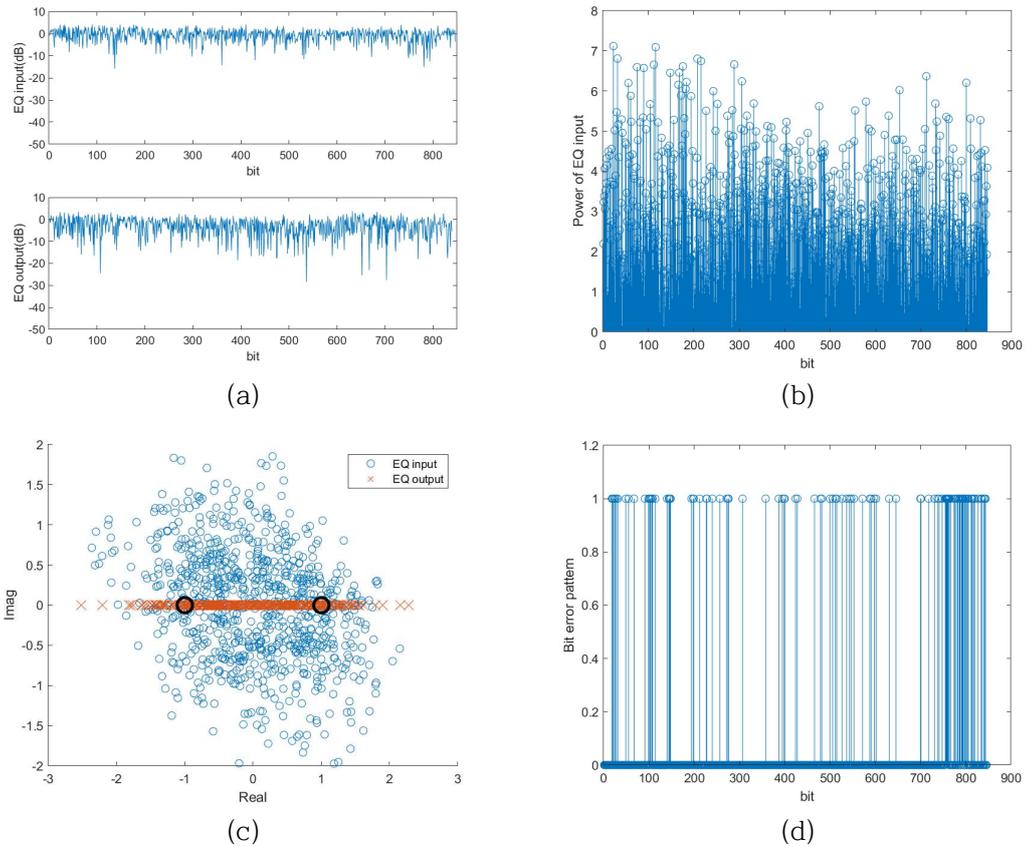


Fig. 18. Equalizer result(ch#8_frame5), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림18은 ch#8의 다섯 번째 프레임 등화기 결과 그래프이다. 앞선 결과들과는 다르게 출력 크기가 상당히 흔들리고 있음을 (a)에서 확인하였다. 또한 (b),(d)의 결과로부터 등화기가 프리앰블 구간 내에서 수렴구간에 들어가기 전 다시 에러가 나타났다. (b)는 수렴하는 형태가 나타나지 않고 있으며 (d)는 세 번째 프레임 결과와 유사하게 약 700 비트 이후에서 에러가 다시 나타나고 있음을 확인하였다. 다수의 결과 그래프들을 통해 등화기의 동작이 불안정함이 나타났다.

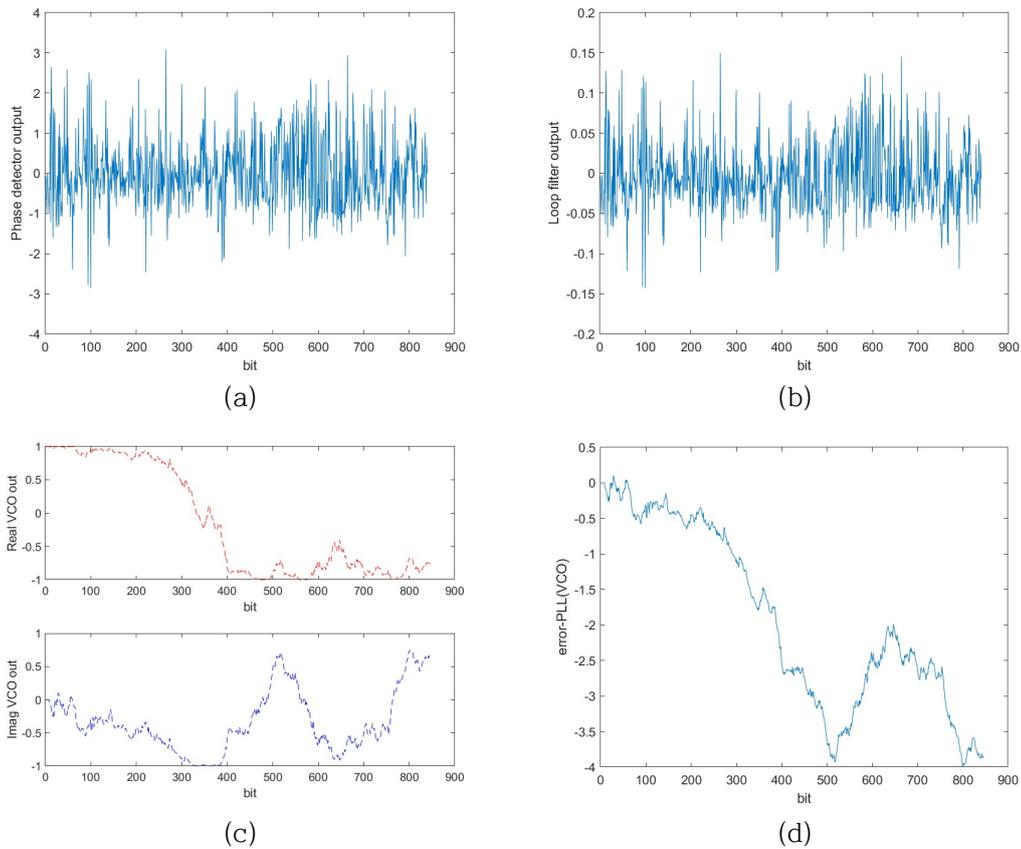


Fig. 19. PLL result(ch#8_frame5), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림19는 ch#8의 다섯 번째 프레임 위상고정루프 결과 그래프이다. (a),(b),(c)를 통해 이전 결과들과는 다르게 흔들림 현상이 지속적으로 나타나고 있으며 약 400 비트 이후에 더 크게 흔들리고 있는 현상이 나타났다. 다섯 번째 프레임으로 갈수록 수신 신호의 크기가 줄어서 입력되는데 이를 통해 등화기와 위상고정루프에 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 수신 신호 크기의 보상이나 등화기와 위상고정루프 내의 최적의 성능을 위한 파라메타 설정이 필요한 것으로 보여졌다.

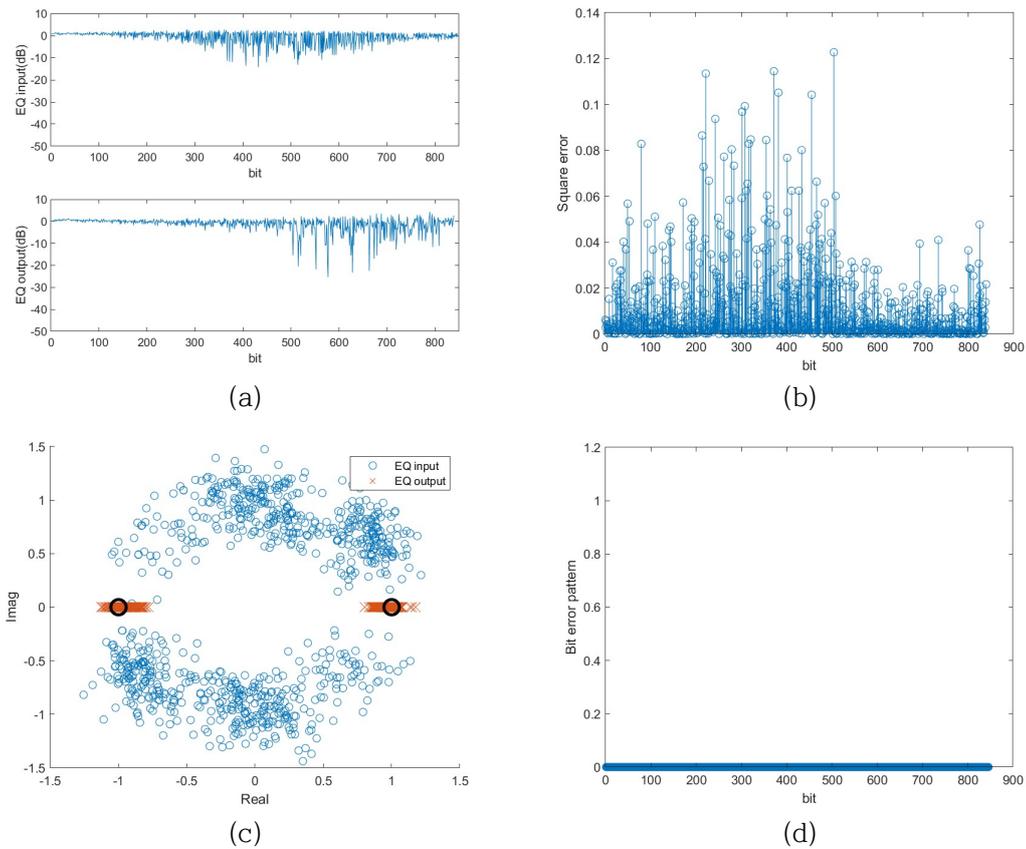


Fig. 20. Equalizer result(ch#16_frame1), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림20은 ch#8 보다 깊은 수심에 위치한 수신기인 ch#16의 첫 번째 프레임의 등화기 결과이며 수심에 따른 프레임별 결과 비교가 가능하다. (a),(b) 결과를 통해 등화기가 불안정한 것처럼 보인다. 그러나 (b)의 자승오차의 값의 최대 크기가 '0.14'라는 '0'에 가까운 수치 내에서의 변화이기 때문에 에러의 영향을 크게 미치지 않았다. (c)에서 등화기 출력이 잘 나누어진 것을 확인가능하고 (d)의 랜덤 데이터 구간의 에러가 없음을 통해 데이터 복구가 정상적으로 되었음을 확인하였다.

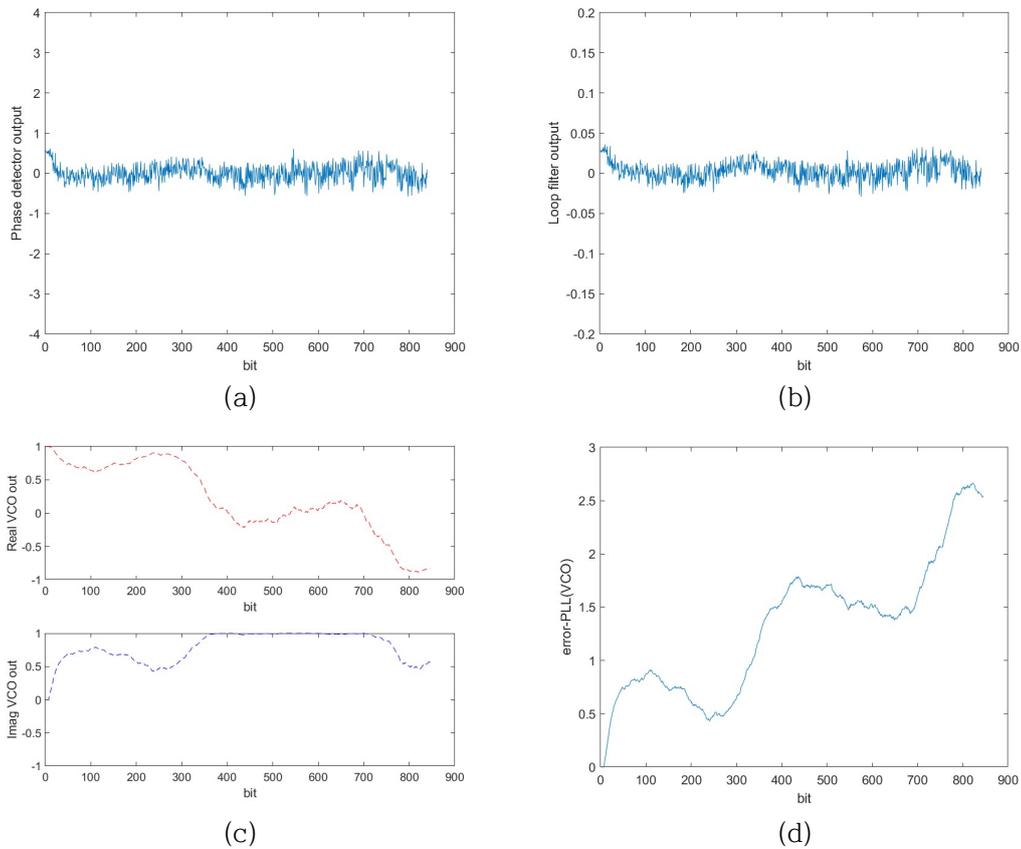


Fig. 21. PLL result(ch#16_frame1), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림21은 ch#16의 첫 번째 프레임 위상고정루프 결과 그래프이며, (a),(b),(c)로부터 초반부터 상당히 안정적으로 동작하고 있다. 등화기의 결과에서 에러가 나타나지 않은 이유는 위상고정루프가 정상 상태에서 동작하고 있기 때문이라고 볼 수 있으며, 좋은 채널 환경인 것으로 추정가능하다. 표3은 해상실험의 프레임과 채널 별 BER 결과를 나타낸다. 결과를 보면, 첫 번째 프레임일 경우가 채널에 상관없이 모두 데이터 복구가 잘되었고, 수신 크기가 적게 감소하고 수심이 깊은 위치에 있던 수신기일수록 데이터 복구가 잘 되었다. 네 번째 프레임이 BER이 다섯 프레임 중 가장 크게 나타났는데, 실험 당시의 영향이 있었던 것으로 판단 된다.

Table 3. 2020 sea experiment BER result

Frame \ Channel	ch#8	ch#13	ch#16	비고
frame1	0	0	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
frame2	0	0	0	
frame3	0.02	0	0	
frame4	0.38	0.45	0.18	
frame5	0.18	0.14	0.13	

4.2 2022년 해상실험

4.2.1 2022년 장거리 해상실험 실험 환경 및 파라메타

2020년 장거리 해상실험과는 다르게 긴 데이터(2010 비트)와 조금 더 먼거리에서 다양한 데이터율 변화에 대한 데이터 복구를 위해 동해에서 장거리 해상실험을 진행하였다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 32 km, 68 km 이다. 송신기의 수심은 100 m 이며, 수신기 수심은 200 ~ 375 m 지점이였다. 수신기 채널은 수신기 위치에 따라 1~8번까지 8개의 채널에서의 실험을 진행하였다. 2022년 해상실험의 실험 환경은 그림22와 같고, 파라메타는 표4와 같다.

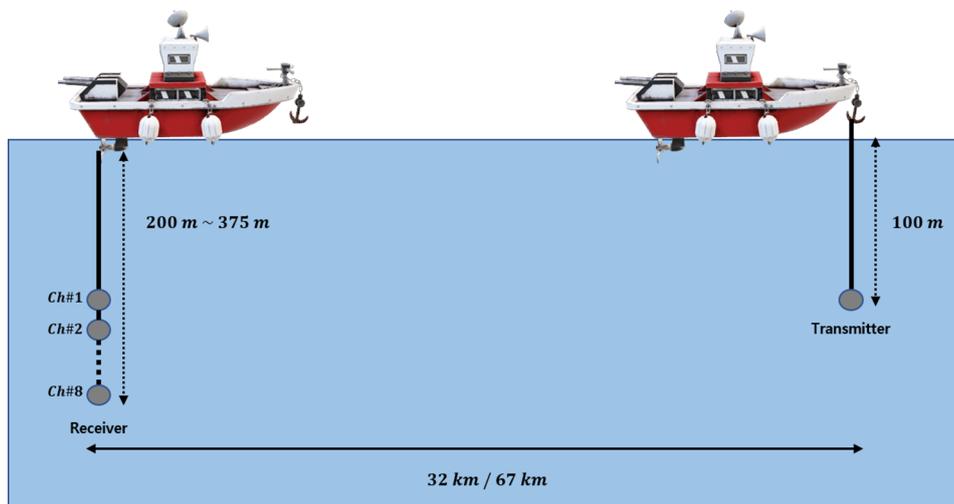


Fig.22. 2022 sea experiment environment

Table 4. 2022 sea experiment parameter

Parameters	Value
Modulation	BPSK
Distance	32 / 68 km
Data rate	100/200/500/1000 bps
Transmitter depth	~ 100 m
Receiver depth	200 ~ 375 m
Depth	~ 1000 m
Sampling frequency	100 kHz
Carrier frequency	3.2 kHz
Preamble data	510 bit
Random data	1000/1500 bit

4.2.2 2022년 장거리 해상실험 Filter 구조

결과분석은 프레임 동기 이후 데이터에 대한 8개 채널 중 수심이 상대적으로 깊은 채널에 대해 분석을 진행하였다. 또한 수신된 신호에 대해 등화기와 위상 고정루프의 형태를 3가지로 나누어 분석하였다. Filter 구조를 3가지로 나누어 분석하는 이유는 등화기의 구조에서 케환 필터의 유무에 따른 비교 분석과 결정지향 방식을 통해 데이터를 제거하기 위해 사용하는 값이 다르기 때문이다. Filter 3가지의 구조는 표5와 같다.

Table 5. Filter structure

Filter number	Structure
Filter 1	DFE + DD \tan^{-1} (Preamble + Decision data)
Filter 2	FFE + DD \tan^{-1} (Preamble + Decision data)
Filter 3	FFE + DD \tan^{-1} (All preamble)

Filter 1은 판정케환등화기와 결정지향 방식의 \tan^{-1} 위상고정루프가 적용된 구조다. Filter 2는 Filter 1과 동일한 방식으로 동작하고 등화기는 케환 필터가 없는 구조다. Filter 3는 Filter 2와 유사한 구조이지만 결정지향방식을 통해 데이터를 제거할 때 랜덤 데이터 구간에서 경판정 후의 값을 사용하지 않고 송신 신호 값을 사용한다. 이러한 구조는 실제 해상에서 가장 이상적인 경우의 결과를 확인

하기 위함이며, 실제 상황에서는 사용하기 어려운 구조이다.

4.2.3 2022년 장거리 해상실험 결과분석

송신기와 수신기 사이의 거리가 32 km인 경우 실험이 2번 진행되었고 Filter1에 대한 채널 환경이 좋았을 경우와 안 좋았을 경우의 데이터율 증가에 따른 결과를 비교 분석하였다. 채널 환경이 좋고 데이터 복구가 잘 이루어진 채널은 8개 중 ch#6이었으며, 등화기와 위상고정루프의 결과는 그림23,24와 같이 나타낸다.

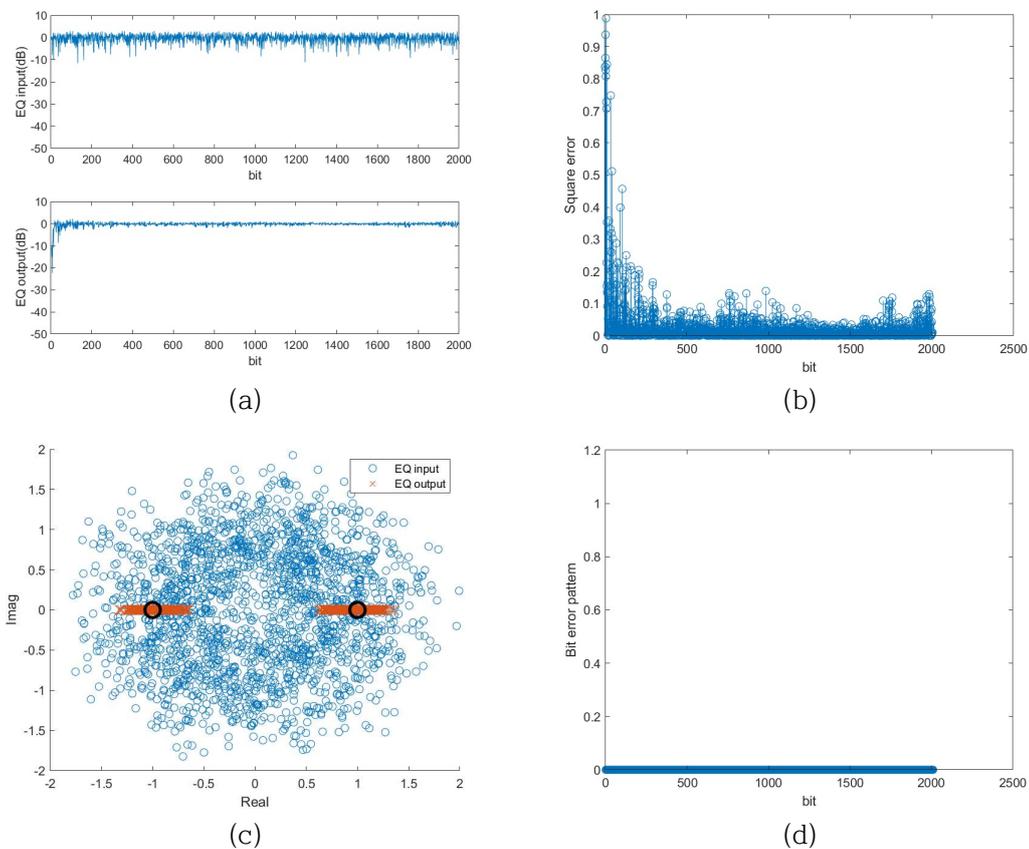


Fig. 23. Filter 1 Equalizer result(ch#6_200bps), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림23은 200 bps ch#6 등화기 결과 그래프이다. (a)의 입력과 출력을 비교해보면 출력 초반에는 크기 감소가 일어나긴 하지만 전반적으로는 '0'에 가깝게 수렴하였다. (b)에서 랜덤 데이터 구간에서 '0' 근처에서 수렴하는 형태를 확인하였다.

(d)의 데이터 전체 구간에서 비트 에러가 없음을 확인하였다. 즉, 데이터 복구에 성공한 결과를 확인하였다.

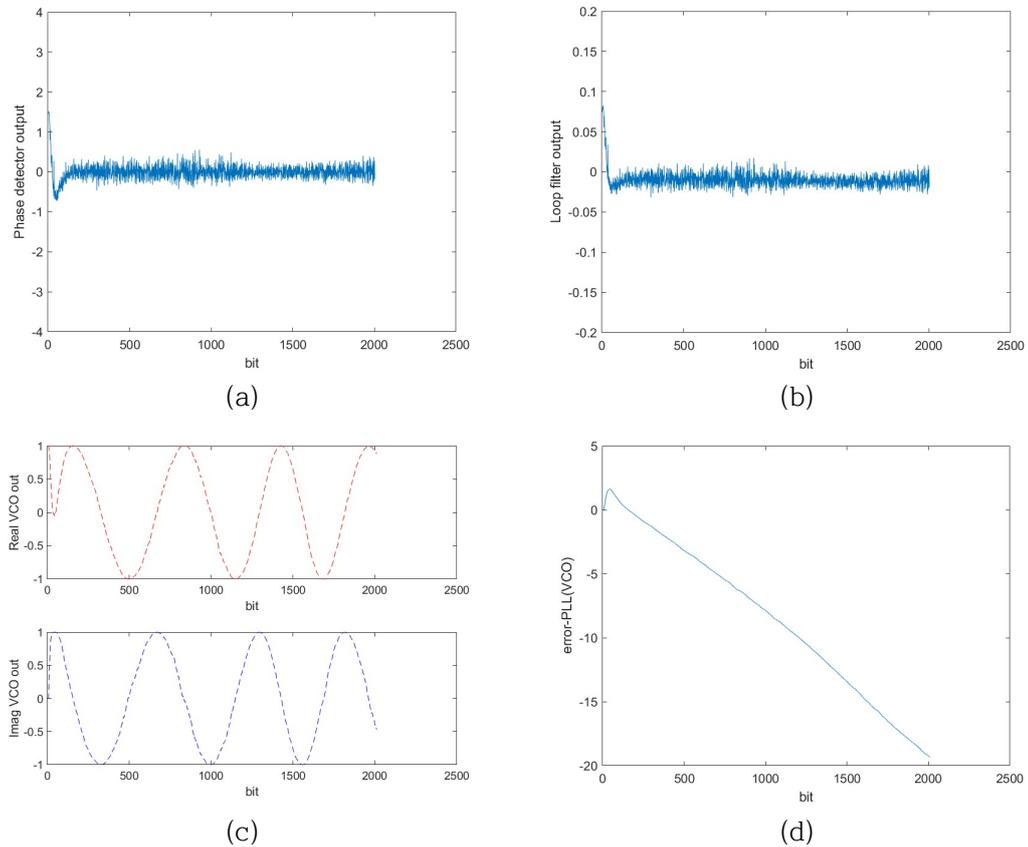


Fig.24. Filter 1 PLL result(ch#6_200bps), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림24는 200bps ch#6 위상고정루프의 결과 그래프이다. (a)에서 초기 위상이 크게 나타났지만 100 비트 이후에는 '0' 근처에서 수렴하는 것으로 나타났다. 랜덤 데이터 구간에서도 튀는 형태가 나타났지 않으며 정상 상태에 계속 머무르는 것도 확인하였다. (b)의 2차 해상실험에서도 위상고정루프와 동일한 형태로 나타났다. (c)의 출력 결과를 통해 위상은 정현파의 형태로 나타났고 (d)와 함께 두 개의 결과 그래프를 통해 위상고정루프가 풀리지 않고 동작하는 것을 확인하였다. 그림23,24를 통해 채널 환경이 좋은 상황에서는 1차 해상실험보다 거리 더 긴 데이터와 더 높은 데이터율을 사용한 실험이지만, 데이터 복구가 잘 이루어진 것을

확인하였다.

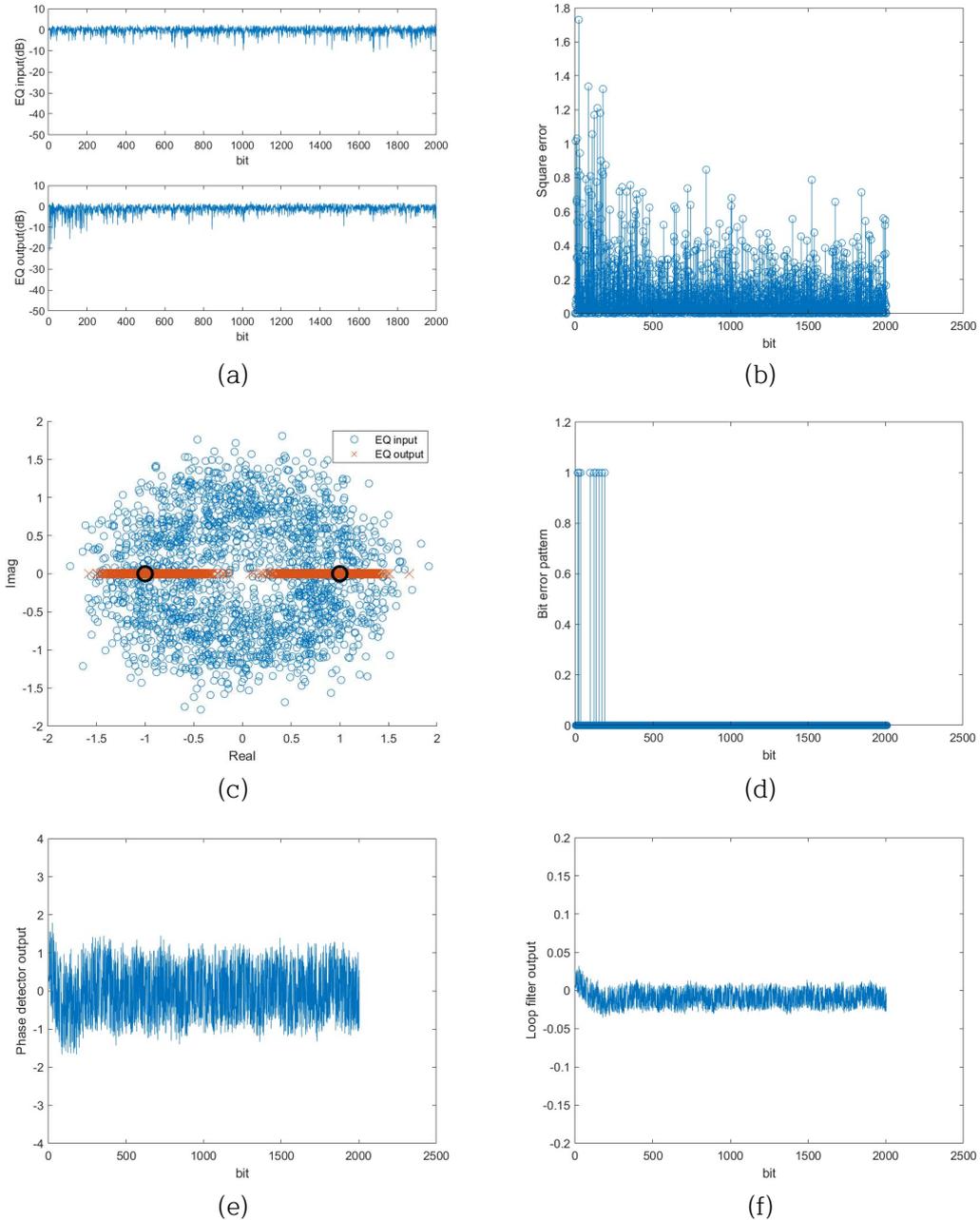


Fig. 25. Filter 1 result(ch#6_500bps), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern (e) Phase detector output (f) Loop filter output

그림25는 데이터율이 500bps 인 ch#6번 결과이다. (a)는 200 bps 결과와 전반적

으로 비슷한 형태의 결과가 나타났다. 하지만, 200 bps와 비교해보면 출력값이 상대적으로 조금 더 크게 흔들리는 형태가 나타났다. 또한 데이터율이 증가함에 따라 (b)에서는 자승오차가 크게 나타났지만 (d)의 결과에서 비트에러가 프리엠블 초반 이후 나타나지 않았다. (e)에서 출력값도 크게 나타났다 (f)에서 루프 필터의 출력 크기가 비교적 작아졌는데 데이터율이 증가함에 따라 이득값 조정에 따른 결과였다. 다양한 결과들을 통해 500 bps로 데이터율이 2배 이상 증가하였지만 데이터 복구는 문제없이 이루어졌다.

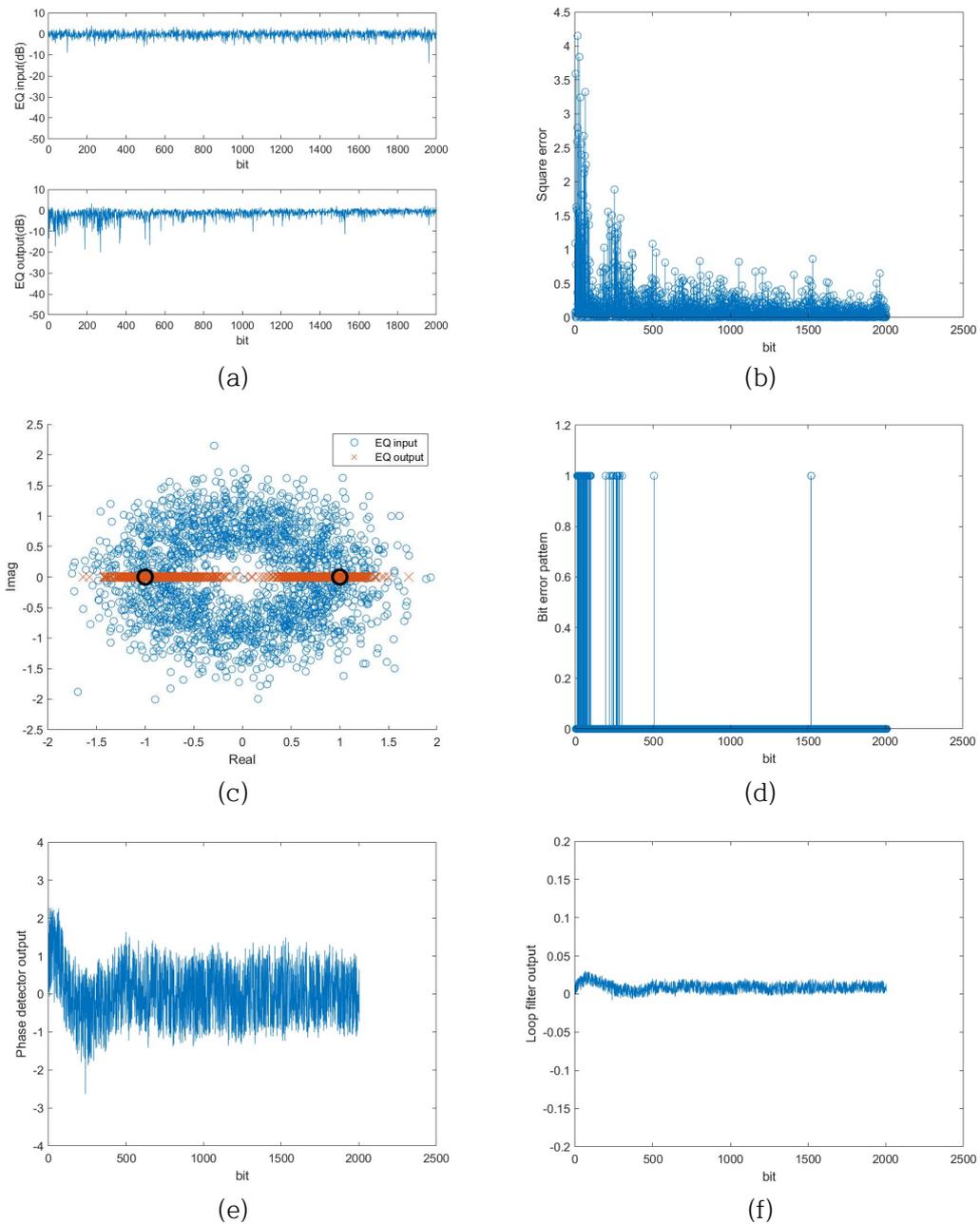


Fig. 26. Filter 1 result(ch#6_1000bps), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern (e) Phase detector output (f) Loop filter output

그림26은 데이터율이 1000 bps 인 ch#6번 결과이다. 데이터율이 1000 bps 까지 크게 증가했음에도 불구하고 채널 상황이 좋은 경우에는 데이터 복구가 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. (b)에서 초기 자승오차가 낮은 데이터율에 비해 크게

나타나고 두 번 흔들림이 나타났으며 상대적으로 정상 상태까지의 수렴시간이 증가하였고 이러한 현상은 비트에러패턴 및 위상고정루프의 결과에서도 나타났다. 결과적으로는 1000 bps에서도 이전의 데이터율 결과에 비해 값들이 크게 나타났지만 데이터 복구에 있어서 문제가 되지 않았다. 2020년 장거리 해상실험과 비교한 결과 더 긴 데이터와 더 높은 데이터율에서도 데이터 복구를 성공하였다. 그림23~26은 32 km 에서의 채널(ch#6)이 좋은 상황의 동작 결과를 나타내었다. 하지만 데이터 복구가 어려운 경우도 확인하였다. 반대의 경우는 68 km 실험에서 확인할 수 있었다. 68 km 실험은 3번 진행되었으며, ch#5 결과를 통해 확인할 수 있었다. ch#5 에서는 데이터율에 상관없이 전부 데이터 복구가 되지 않았다.

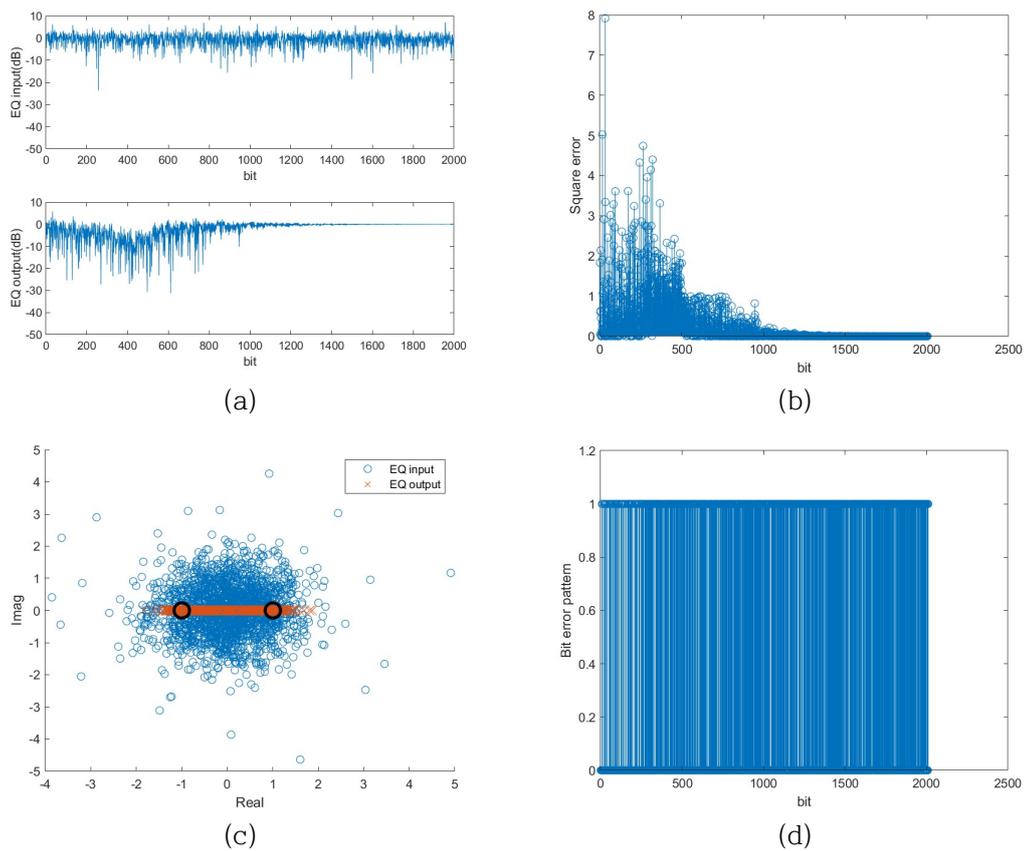


Fig.27. Filter 1 Equalizer result(ch#5_200bps), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림27는 채널 환경이 좋지 않은 ch#5의 200 bps 등화기 동작 결과이다. (a),(b)를 다른 결과와 같이 보지 않는다면 출력 그래프가 약 1000 비트 이후 0에 수렴하는 형태가 나타나는 것으로 데이터 복구가 잘 이루어진 것처럼 나타났다. 하지만, (d)의 결과를 통해 비트 에러 패턴에서 전부 '1'의 값으로 등화기의 동작이 정상적으로 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

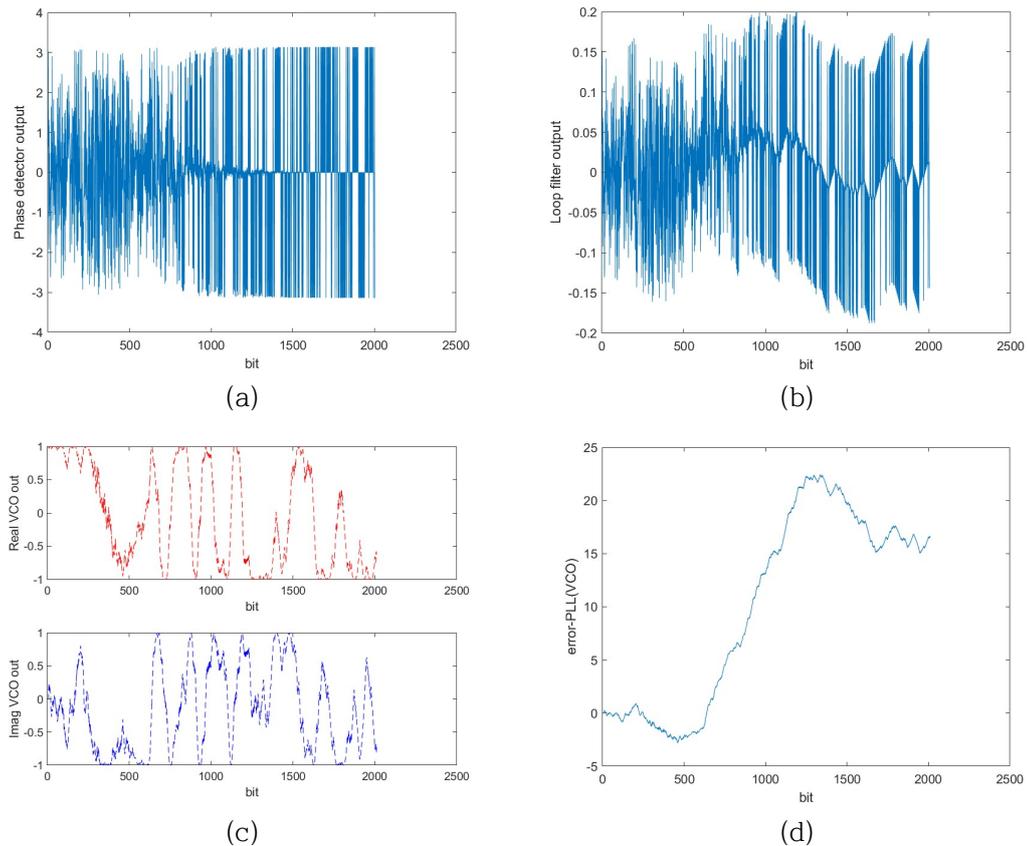


Fig.28. Filter 1 PLL result(ch#5_200bps), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

등화기가 동작하지 않는 이유를 찾기 위해 맞물려 동작하는 위상고정루프를 확인하였다. 그림28은 채널 환경이 좋지 않았을 경우 ch#5의 200 bps 위상고정루프 동작 결과이다. (a)는 위상 검출기 출력 그래프이며, 데이터율이 크지 않은 200 bps 상황에서도 위상이 초반부터 많이 흔들리고 있음을 확인하였다. 또한, 약 700 비트 이후 구간에서 위상이 최대값인 $\pm\pi$ 로 나타나며 다른 결과들에서도 전

혀 위상 오차를 보상하고 있지 않았다. 결과들을 통해 초기부터 큰 위상 오차를 보상하지 못하는 것으로 보이며 약 700 비트 이후 구간에서 발산해버리는 결과가 나타났다. 이렇게 위상고정루프가 정상 상태에 들어오지 못한다면, 등화기와 결합되어 동작하기 때문에 등화기에 결과에도 영향을 미치게 된다. 따라서 등화기의 결과에서도 위상고정루프의 영향을 받아 약 800 비트 이후에는 발산해버리는 결과가 나타난 것으로 보여졌다. 채널이 좋지 않을 때 데이터율이 큰 경우 결과는 그림29와 같이 나타낸다.

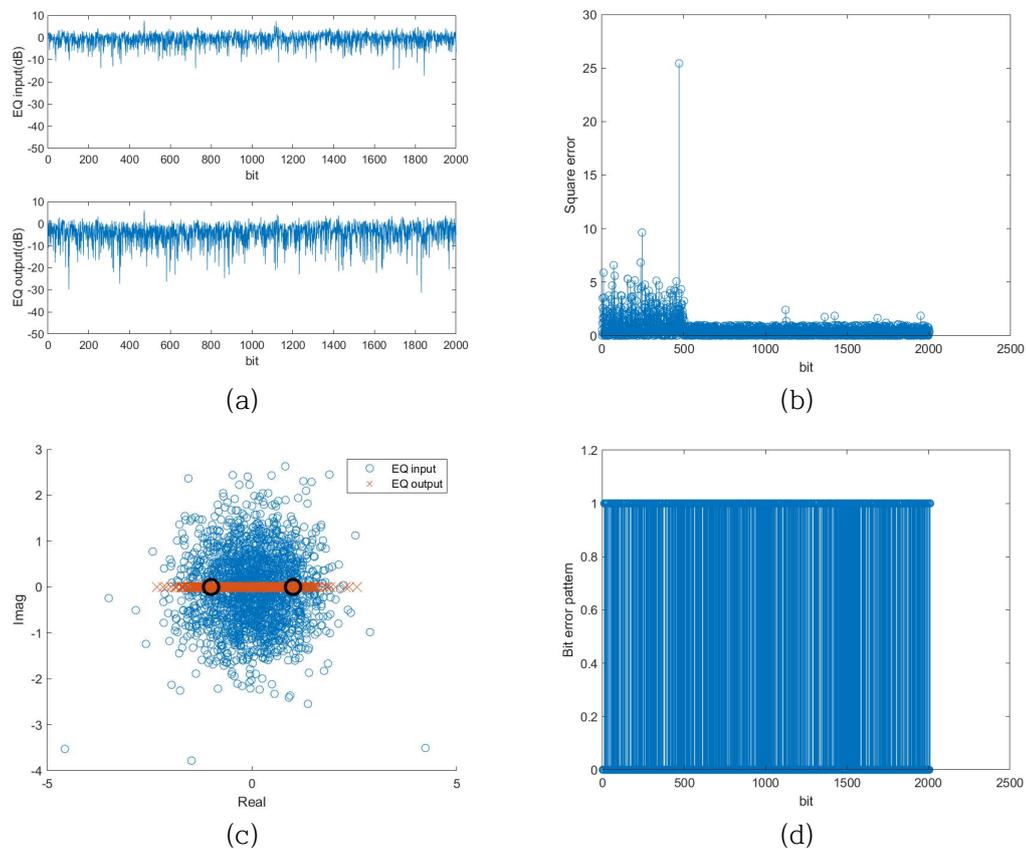


Fig.29.Filter 1 Equalizer result(ch#5_1000bps), (a) Input&Output Power(dB), (b) Square Error, (c) Scatter diagram (d) Bit error pattern

그림29는 채널 환경이 좋지 않은 ch#5의 1000 bps 등화기 동작 결과이다. (a) 결과를 통해 이전 결과들과 다르게 입력보다 출력 크기 감소가 지속적으로 나타났다. (b),(d)를 통해 비트 전체 구간 내에서 보상이 전혀 이루어지지 않는 것을 확

인하였다. 프리앰블 내에서 수렴구간에 진입하지 못했기 때문에 랜덤 데이터 구간에서도 발산하였고 (d)에서 대부분의 비트에서 비트 에러가 '1' 이 나타났으며 데이터 복구가 전혀 되지 않았음을 재확인하였다.

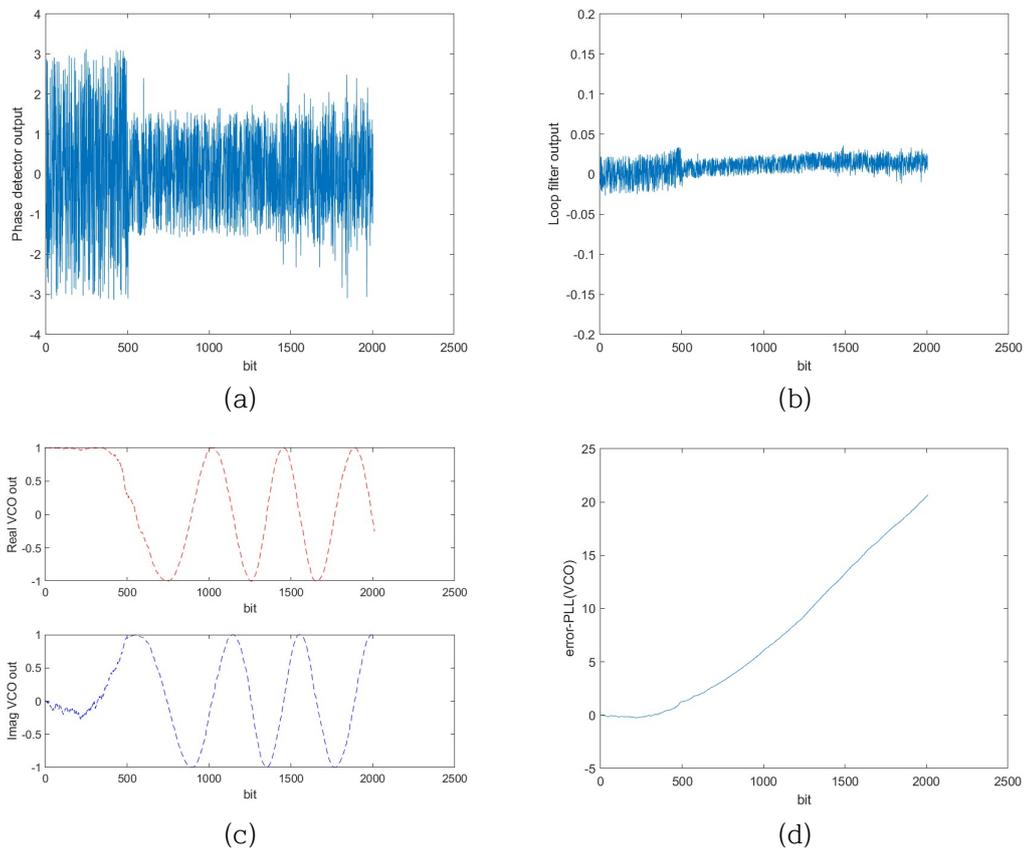


Fig.30. Filter 1 PLL result(ch#5_1000bps), (a) Phase detector output, (b) Loop filter output, (c) VCO output, (d) VCO cumulative result

그림30은 채널 환경이 좋지 않은 ch#5의 1000 bps 위상고정루프 동작 결과이다. 높은 데이터율인 1000 bps 결과 (a)에서도 위상검출기 출력 그래프에서 프리앰블 구간에서부터 위상이 최대값인 $\pm\pi$ 로 흔들리고 있다. 초기 위상 흔들림 현상은 데이터율이 낮았을 경우와 동일하게 나타났으며, 위상고정루프가 위상 오차 보상을 전혀 못한 것으로 보여졌다. 다수의 실험 결과에서 동일한 결과가 나타났는데 실험 당시 채널 환경이나 실험 환경에 영향을 크게 받은 것으로 추정되었다.

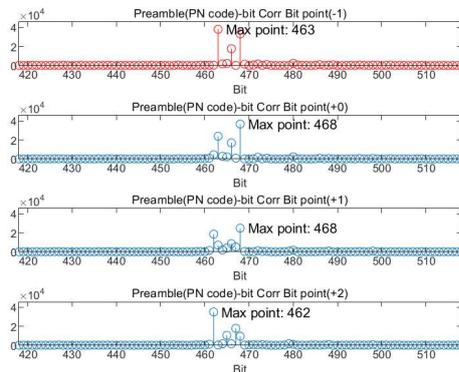


Fig.31. Channel Multipaths

설계한 구조가 동작되지 않는 이유를 찾기 위해 그림31을 확인하였다. 그림31은 프레임 동기 과정에서 상관을 이용해 채널의 다중경로를 나타낸 결과이다. (a)를 통해 다중경로의 영향이 미치고 있다는 사실을 확인하였다. 4번의 상관을 통해 확인한 결과 다중경로의 변화가 심하게 나타났으며, 신호의 시작 지점 또한 흔들리는 것을 확인하였다. 이러한 특성을 가진 채널 환경에서는 아무리 다중경로 및 도플러 주파수 영향을 보상하여도 신호의 시작지점이 확실하지 않는다면 등화기 및 위상고정루프의 동작이 불안정해질 수 밖에 없다. 그림23~31로부터 채널 환경이 좋은 경우와 좋지 않은 경우와 데이터율 증가에 따른 결과 분석을 진행하였다. 설계한 구조의 성능은 채널 환경 특성에 영향을 많이 받고 있었으며 더불어 데이터율의 증가도 영향을 미치는 것으로 보여졌다.

그림31까지의 결과들은 3종류의 Filter 중 1의 결과만 보여졌으며, Filter, 거리, 데이터율에 따른 BER 결과를 Filter 1부터 표6과 같이 나타낸다.

Table 6. 2022 experiment 32km 1st BER result

Channel / Data rate	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0	0	0	0.32	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0	0	0.46	0	
500 bps	0	0.02	0.06	0.11	
1000 bps	0.14	0.17	0.21	0.11	

Table 7. 2022 experiment 32km 2nd BER result

Channel Data rate	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0	0	0	0.03	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0	0.18	0.01	0	
500 bps	0.07	0	0.18	0.41	
1000 bps	0.23	0	0.24	0.66	

Table 8. 2022 experiment 68km 1st BER result

Channel Data rate	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0.06	0	0.01	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0.16	0	0.02	0.01	
500 bps	0.18	0.01	0.17	0.03	
1000 bps	0.49	0.08	0.51	0.09	

Table 9. 2022 experiment 68km 2nd BER result

Channel Data rate	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0.47	0	0	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0.49	0	0	0.48	
500 bps	0.51	0	0.05	0	
1000 bps	0.5	0.02	0.26	0	

Table 10. 2022 experiment 68km 3rd BER result

Channel Data rate	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0.18	0	0	0.01	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0.01	0	0	0.01	
500 bps	0.06	0.05	0.02	0.06	
1000 bps	0.45	0.48	0.49	0.45	

송수신기간 거리가 32 km 일 때 2번의 실험 결과를 통해 상대적으로 수심이 얕은 ch#5,6에서 수심이 깊은 ch#7,8 보다 데이터 복구를 많이 성공하였다. 그림31 과 같은 채널특성을 통과한 신호는 표9 ch#5와 같이 데이터 복구가 이루어지지 않았으며, 특이한 경우를 제외하고 데이터 복구가 되었다. 일부 결과를 통해 데이터율이 영향을 미치지 않은것처럼 보이지만, 데이터 복구가 되지 않는 다수의 경우는 높은 데이터율로 전송한 신호인 경우였다. 68 km 일 때는 3번의 실험이 이루어졌다. 예외적인 경우를 제외하면, 32 km 일때와 반대되는 결과가 나타났으며 오히려 수심이 깊은 ch#7,8에서 데이터 복구가 더 많이 성공하였다.

Table 11. 2022 experiment 32km 1st BER result

Data rate \ Channel	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0	0	0	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0	0	0.61	0	
500 bps	0.01	0.03	0.1	0.1	
1000 bps	0.15	0.17	0.18	0.16	

Table 12. 2022 experiment 68km 2nd BER result

Data rate \ Channel	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0	0	0	0.05	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0	0.02	0	0	
500 bps	0.07	0	0.17	0.36	
1000 bps	0.23	0	0.25	0.68	

Table 13. 2022 experiment 68km 1st BER result

Data rate \ Channel	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0.06	0	0.01	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0.11	0	0.02	0.02	
500 bps	0.17	0.01	0.18	0.03	
1000 bps	0.5	0.1	0.49	0.09	

Table 14. 2022 experiment 68km 2nd BER result

Data rate \ Channel	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0.4	0	0	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0.48	0	0	0.5	
500 bps	0.49	0	0.04	0	
1000 bps	0.5	0.02	0.32	0	

Table 15. 2022 experiment 68km 3rd BER result

Data rate \ Channel	ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
100 bps	0	0.01	0	0.01	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps	0.02	0	0	0.02	
500 bps	0.09	0.05	0.02	0.05	
1000 bps	0.45	0.47	0.49	0.44	

Filter 2에 대한 BER은 표11~15와 같이 나타낸다. Filter 2은 경우는 케환필터없이 동작하는데, 동일한 방식의 위상고정루프를 사용하는 Filter 1과 비교해보면 비슷한 수치가 나타났다. 이는 특별한 경우를 제외하고 피드 포워드 필터에서 수

럼구간에 진입하게 된다면, 궤환 필터가 결합되어도 동작하는 것을 확인하였다.
즉, 프리엠블 내에서의 등화기의 수렴이 중요한 것으로 나타났다.

Table 16. 2022 experiment 32km 1st BER result

Channel		ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
Data rate						
100 bps		0	0	0	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps		0	0	0.1	0	
500 bps		0.01	0.02	0.04	0.1	
1000 bps		0.12	0.16	0.11	0.08	

Table 17. 2022 experiment 32km 2nd BER result

Channel		ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
Data rate						
100 bps		0	0	0	0.02	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps		0	0.01	0	0	
500 bps		0.03	0	0.11	0.09	
1000 bps		0.03	0	0.11	0.15	

Table 18. 2022 experiment 68km 1st BER result

Channel		ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
Data rate						
100 bps		0.06	0	0.01	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps		0.11	0	0.02	0.02	
500 bps		0.16	0.01	0.17	0.03	
1000 bps		0.52	0.07	0.21	0.07	

Table 19. 2022 experiment 68km 2nd BER result

Channel		ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
Data rate						
100 bps		0.23	0	0	0	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps		0.52	0	0	0.5	
500 bps		0.47	0	0.05	0	
1000 bps		0.51	0.01	0.11	0.01	

Table 20. 2022 experiment 68km 3rd BER result

Channel		ch#5	ch#6	ch#7	ch#8	비고
Data rate						
100 bps		0.01	0	0	0.01	0.3 이상인 경우 빨간색 표시
200 bps		0.02	0	0	0.02	
500 bps		0.08	0.04	0.02	0.03	
1000 bps		0.43	0.34	0.35	0.31	

Filter 3에 대한 결과는 표16~20과 같이 나타낸다. 이는 4가지 Filter 중 가장 이

상적인 경우의 결과라고 할 수 있으며, 가장 많은 데이터 복구가 되었지만, 현실적으로 적용하기 힘든 구조이다. 그리고 Filter 1과 비교하여 궤환 필터의 유무가 성능에 영향을 주는지에 대해 확인하였고, Filter 2와 비교를 통해 결정지향 방식이 성능에 더 크게 영향을 주고 있는 것을 확인하였다. 2차 해상실험은 1차 해상실험과는 다르게 더 긴 송수신기 거리, 긴 데이터와 높은 데이터율에 대해 등화기와 위상고정루프 성능을 분석하였다. 등화기와 위상고정루프 성능에 영향을 주는 것은 채널 특성, 궤환필터 유무, 결정지향 방식과 같은 여러가지 원인이 존재했다. 채널 환경이 좋았을 경우 데이터율이나 거리에 상관없이 데이터 복구가 이루어졌으며, 반대의 경우에는 데이터 복구에 실패하였다. 궤환 필터의 유무는 프리엠블 구간 내에서 등화기의 수렴이 이루어진다면 충분히 정상 동작이 이루어졌으며, 반대의 경우에는 오히려 악영향을 미쳐 발산해버리는 결과가 나타났다. 결정지향 방식의 사용 역시 프리엠블 내에서의 동작 결과가 중요하게 작용하고 있었다.

제 5 장 결론

수중음향통신 환경에서 채널 특성에 의해 발생한 다중경로나 도플러 주파수 및 위상 변화 때문에 신호는 변형되어 수신된다. 변형된 신호 복구를 위한 등화기와 위상고정루프의 결합구조를 설계하였다. 성능분석을 위해 시뮬레이션, 2020년, 2022년 장거리 해상실험을 통해 진행하였다. 시뮬레이션 실험을 통해 설계한 구조의 시변동성이 없는 채널 특성(다중경로 및 도플러 주파수)인 경우에 대한 동작 결과를 확인하였다. 또한, 시변동성이 있는 채널에서의 성능분석을 위해 장거리 해상실험이 진행되었다. 2020년 해상실험은 거리 30 km에서 100bps 데이터를 가진 상대적으로 짧은 길이(846 비트) 신호에 대한 성능 분석을 진행하였다. 분석 결과 수신 신호의 크기 변화에 따라서 성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 2020년 장거리 해상실험과는 다르게 2020년 장거리 해상실험은 거리 32 km와 68 km에서 진행되었으며, 다양한 데이터율(100,200,500,1000 bps)과 수심에 따른 채널에 따라 상대적으로 긴 신호(2010 비트)에 대해 성능 분석을 진행하였다. 전반적으로 채널이 좋지 않은 경우는 데이터 복구가 어려웠다. 하지만 채널 환경이 좋은 경우 데이터율이 상대적으로 작은 100, 200 bps에서는 특별한 경우를 제외하고는 데이터 복구가 이루어졌다. 상대적으로 큰 데이터율인 500 bps 경우에서도 데이터 복구가 이루어진 경우도 꽤 존재하였고, 1000 bps인 경우에서도 데이터 복구를 일부 성공했지만 송수신기간 거리가 68 km 일 때 실패한 결과도 존재했다. 또한 2022년 해상실험 데이터의 Filter 별 결과 비교를 통해 결정지향 방식과 케환 필터의 결합 유무가 성능에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 그리고 등화기 성능을 결정할 때 케환 필터의 영향에 비해 결정지향방식의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 데이터율에 따른 필터의 최적의 파라메타 설정이 필요해 보였다. 결과적으로 BPSK 변조 신호에 대해서는 데이터율이 높은 일부 1000 bps 신호까지 데이터 복구가 이루어졌으며, 더 많은 복구 성공을 위해 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] A. C. Singer, J. K. Nelson, and S. S. Kozat, "Signal processing for underwater acoustic communications," in IEEE Communications Magazine, pp.90-96, 2009.
- [2] Hyeonsu Kim, Jongpil Seo, Jaeyoung Kim, Seongil Kim, and Jaehak Chung, "Equalizer Mode Selection Method for Improving Bit Error Performance of Underwater Acoustic Communication Systems," The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.31, No.1, pp.1-10, 2012
- [3] Tae-Doo Park, Ji-Won Jung, "Analysis of Optimum Iterative Codes for Underwater Acoustic Communication based on Turbo Equalizer," The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.37, No.5, pp.487-492, 2013
- [4] Hyeonsu Kim, Jongpil Seo, Jaeyoung Kim, Seongil Kim, and Jaehak Chung, "The Experimental Verification of Adaptive Equalizers with Phase Estimator in the East Sea", The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.29, No.4, pp.229-236, 2010
- [5] Milica Stojanovic, Josko A. Catipovic, and John G. Proakis, "Phase-Coherent Digital Communications for Underwater Acoustic Channels", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.19, No.1, pp.100-111, 1994
- [6] Mark Johnson, Lee Freitag and Milica Stojanovic, "IMPROVED DOPPLER TRACKING AND CORRECTION FOR UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATIONS", IEEE International Conference On Acoustic, Speech, and Signal Processing, pp.575-578, 1997
- [7] Jong Young Han, Dong Guk Lim, Jae Moun Kim, "An adaptive Linear Channel Equalizer Using Asymmetric Transversal Filter," The

Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.30, No.9A,
pp830-837, 2005

- [8] V. John Mathews, Senior Member, IEEE, and Zhenhua Xie, Member, IEEE, "A Stochastic Gradient Adaptive Filter with Gradient Adaptive Step Size," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.41, No.6, pp.2075-2087, 1993
- [9] Woong-Ki Cho, Ill-Soon Chang, Kyoung-Hak Kim, Yong-Kyoung Choi, and Kyoung-Rok Cho, "Performance Evaluation of the Transversal Filter Equalizer Using ZF and LMS Algorithm," Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences 16(3), pp.723-728, 1997
- [10] M.J. Lopez A.C, Singer S.L, Whitney G.S. Edelson, "A DFE COEFFICIENT PLACEMENT ALGORITHM FOR UNDERWATER DIGITAL ACOUSTIC COMMUNICATIONS," IEEE Oceans 99.MTS/IEEE. Finding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. pp.96-1001, 1999
- [11] W. Y. Yang, Y. S. Cho, and J. W. Lee, Digital Communication Using Matlab/Simulink (Hongrung Publish Compnay, Seoul, 2005)
- [12] Seunghwan Kim, In Soo Kim, Dae-Won Do, and Seokjun Ko, "Performance analysis of joint equalizer and phase-locked loop in underwater acoustic communications," The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.41, No.2, pp166-173, 2022
- [13] H.J.Choi, synchronous Digital Communications(Kohak Co. Seoul, 1995), pp.206-254