

수중음향통신을 위한 훈련 신호 구간의 비트 오차율에 기반한 레이크 수신기

손지홍 · 김기만*

Rake Receiver Based on Bit Error Rate of Training Sequence Duration for Underwater Acoustic Communication

Ji-hong Son · Ki-man Kim*

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

요 약

수중음향통신 채널은 다중 경로 전달이 주요 장애 요인이 되며, 이러한 문제점을 해결하기 위해 레이크 수신기를 이용하여 이를 통해 시간 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 그러나 수중음향통신 채널은 시변동성이 높은 채널로써 적합하지 못한 경로의 신호를 복조에 이용하게 될 우려가 있다. 이를 방지하기 위해 본 논문에서는 훈련 신호의 오차율에 기반을 두어 경로 선택 및 가중치 할당하는 레이크 수신기를 제안한다. 호수 실험을 통해 제안된 레이크 수신기와 기존의 레이크 수신기, 레이크 방법을 사용하지 않은 일반 수신기를 이용하여 성능을 분석하였다. 분석 결과, 전송 비트 512개 중에서 제안된 레이크 수신기는 8개, 기존의 레이크 수신기는 45개, 그리고 레이크 수신기를 사용하지 않은 일반 수신기는 72개의 비트오류가 발생하였다.

ABSTRACT

In the underwater acoustic communication channels, a multipath reflection becomes the cause of obstacle. To solve this problem, a rake receiver has been required for which one could take the time diversity. However, there is a concern about using incorrect path to recover signals with a high weighting value as underwater acoustic communication channels have severe time-variant property. In order to prevent these problem, a rake receiver is proposed which is based on BER(bit error rate) train sequence duration. The performance is evaluated through lake trials; there are three methods that are a proposed rake receiver, a conventional rake receiver, and a non-rake receiver. As a result, the number of bit errors in the proposed rake receiver, that of bit errors in the conventional rake receiver, and that of bit errors in the non-rake receiver is 8, 45, and 72, respectively.

키워드 : 레이크 수신기, 수중음향통신, 비트 오차율, 호수 실험

Key word : Rake Receiver, Underwater Acoustic Communication, Bit Error Rate, Lake Trial

Received 19 February 2016, Revised 29 February 2016, Accepted 18 March 2016

* Corresponding Author Ki-man Kim(E-mail : kimkim@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4918)

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.5.887>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

수중음향통신 채널은 육상통신 채널과 달리 음파를 이용함에 따라 해수면의 변화, 수심에 따른 음속 구조, 전송 거리, 해저 지형 등으로 인한 다양한 환경적 요소들에 의해 영향을 받는다[1]. 천해 환경에서는 직접파와 대부분 해수면과 해저면의 잔향에 의한 다중경로 전달 신호가 합해져서 수신되며, 대부분은 ray bending 현상에 의해 발생한다[2-4]. 이러한 다중 경로 전달에 의해 수신된 신호는 수중음향통신 시스템에서 인접 심벌간의 간섭(Inter-Symbol Interference : ISI)을 발생시키고, 통신 시스템의 성능 저하를 가져오는 주요 원인 중 하나이다. 따라서 다중 경로 전달 특성을 이용하여 시간 다이버시티 효과를 얻기 위해 레이크 수신기가 적용되었다.

수중음향통신 채널은 시변동성이 매우 큰 채널이므로 레이크 수신기가 채널의 경로 선택을 잘못하는 경우, 동기화 문제가 발생한다. 동기화 문제는 통신 시스템 성능에 매우 크게 영향을 미치기 때문에, 본 논문에서는 BPSK DSSS(binary phase shift keying direct sequence spread spectrum) [5] 통신 방식에서 혼련 신호를 이용하여 기존의 레이크 수신기를 변형하여 보다 안정적으로 경로를 추정하는 기법을 제안한다.

II. 기존의 레이크 수신기

레이크 수신기는 전력 문제에 민감한 셀룰러 등 CDMA와 같은 육상통신에서 많이 이용되었다[6]. 실제로 수중음향통신에서 레이크 수신기를 이용하여 실험적으로 결과를 도출한 연구도 진행되었다[7, 8].

직접 수열 대역확산 방식의 레이크 수신기에서 동기를 획득하는 방식 중에서 대표적으로 두 가지 방법이 있는데 두 가지 방법 모두 정합 필터(matched filter)를 이용하여 도플러 주파수와 동기를 획득할 수 있다[9]. 첫째, 대역확산 시 사용되는 직교성이 높은 코드를 이용하여 정합 필터를 구성하는 방법으로 주로 PN (pseudo noise) 코드를 이용한다. 이 방법은 각 심벌마다 도플러 주파수를 구할 수 있으며, 심벌 당 레이크 수신기를 적용하여 동기를 맞출 수 있다. 그러나 SNR(signal-to-noise ratio)이 낮은 환경에서는 정합 필터 출력이 불

명확하여 동기화가 어려운 문제점이 있다. 두 번째, 혼련 신호를 이용하여 정합 필터를 구성하는 방법이 있다. 이 방법은 각 심벌 당 도플러 주파수 추정은 어려우나 혼련 신호 구간에서의 도플러 주파수를 구할 수 있다. 그리고 혼련 신호가 각 심벌 당 PN 코드에 보다 길기 때문에 낮은 SNR 환경에서도 구분이 명확한 정합필터 출력을 얻을 수 있다. 따라서 두 번째 방법을 이용하여 패킷의 동기를 얻을 수가 있으며, 수신되는 경로마다 각각의 수신기를 구성한다.

정합 필터는 잡음이 있는 통신 채널 환경에서 수신기가 신호를 수신하는데 있어 이의 영향을 최소화함으로써 SNR을 최대로 하여 신호 검출을 용이하게 하는 필터이다[5]. 예를 들어, 혼련 신호를 이용하여 정합 필터를 구성하면 수신기에서 정합 필터의 출력이 그림 1과 같이 나타난다.

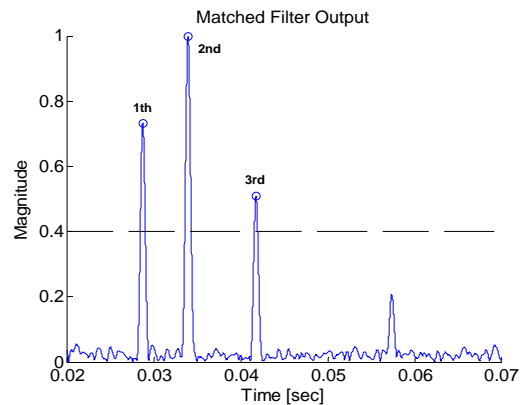


Fig. 1 Normalized Matched Filter Output

그림 1의 정규화된 정합 필터 출력을 보면 대략 0.029초에서 1번 경로, 약 0.033초에서 2번 경로, 그리고 약 0.041초에서 3번 경로 신호가 수신된다. 이러한 다중 경로 전달이 발생한 신호를 레이크 수신기에 적용하여 시간 다이버시티 효과를 얻는다.

기존의 레이크 수신기는 일반적으로 문턱 값보다 높은 정합 필터 출력 시간을 수집하여 각각의 수신기를 구성한다. 예를 들어, 그림 1처럼 문턱 값이 0.4일 때, 1-3번의 세 개의 경로가 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 2와 같이 세 개의 수신기 finger를 구성하여 수신부에서 신호처리 과정을 거친다. 그림 2에서 하나의 수신기 finger의 구성은 그림 3과 같다.

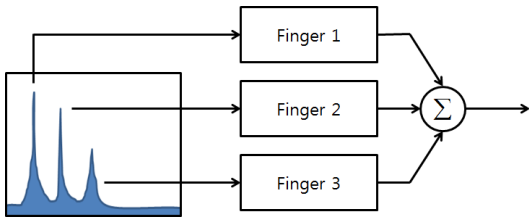


Fig. 2 The structure of a rake receiver

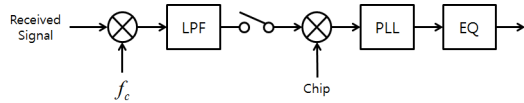


Fig. 3 The schematic diagram of a receiver

그림 3의 수신기 계통도는 그림 2의 하나의 finger 구성과 같다. 그림 3의 LPF(low pass filter)는 저역 통과 필터, PLL(phase locked loop)는 위상 동기 루프, EQ(equalizer)는 등화기를 의미한다[10]. 그리고 f_c 은 중심 주파수, chip은 대역 확산을 위한 코드를 의미한다. 각각의 경로 이득에 따라 가중치를 구한 뒤, 등화기에서 출력되는 심볼에 할당되어 합산한다.

기존의 레이크 수신기에서는 하나의 finger에서 나온 심볼은 경로 이득에 따라 가중치 값이 계산된다. 가중치의 합이 1이 되도록 정규화된 가중치를 부가한다[6]. 가중치 할당 방법은 식 (1)과 같다.

$$\alpha_m = \frac{Z_m^2}{\sum_{m=1}^M Z_m^2} \quad (1)$$

여기서 α_m 은 m번째 finger 수신기에서 나온 심볼에 적용되는 가중치, Z_m 은 m번째 경로의 정합 필터 출력이다. M은 선택된 경로의 총 개수이다. 그림 4는 경로가 세 개일 경우, 레이크 수신기의 구조와 가중치 적용 방법을 표시한 블록도이다.

먼저, 수신된 신호의 정합 필터 출력 값이 문턱 값보다 높은 값을 지닌 경로만을 선택한다. 선택된 경로의 수만큼 수신기 finger를 구성하여 복조과정을 거친다. 경로 이득에 따라 식 (1)을 이용하여 가중치를 계산한 후, 각 해당하는 경로에 할당한다. 이후, 모든 수신기에서 출력된 가중치가 적용된 심볼을 합산하여 데이터를 복구한다.

앞에서 언급하였듯이 수중음향통신은 시변동성이 매우 큰 채널로 정확한 동기화가 매우 어렵다. 이러한 환경에서 기존의 레이크 수신기의 문제점은 가중치 할당을 경로 이득에 의존하기 때문에 잘못된 경로에 높은 가중치가 할당될 수 있다는 점이다.

III. 오차율에 기반한 레이크 수신기

제안한 레이크 수신기에서는 수신기 finger를 문턱 값에 따라 구성하고, 가중치 할당은 혼련 신호 구간의 오차율에 따라 계산한다. 오차율에 따라 가중치를 할당하기 때문에 오차율이 매우 높은 경로는 제외시키기 위해 오차율에 대한 문턱 값을 설정한다. 혼련 신호를 분석하여 혼련 신호 구간에서의 오차율을 계산하고, 오차율 문턱 값보다 낮은 오차율을 갖는 경로의 신호만 이

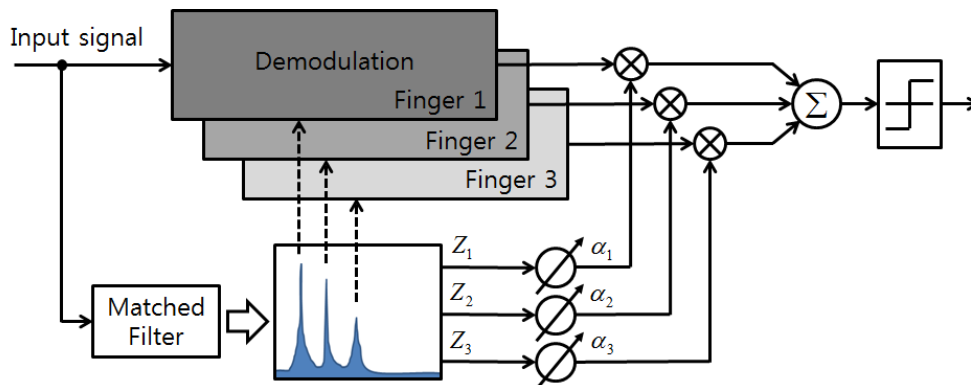


Fig. 4 Conventional rake receiver

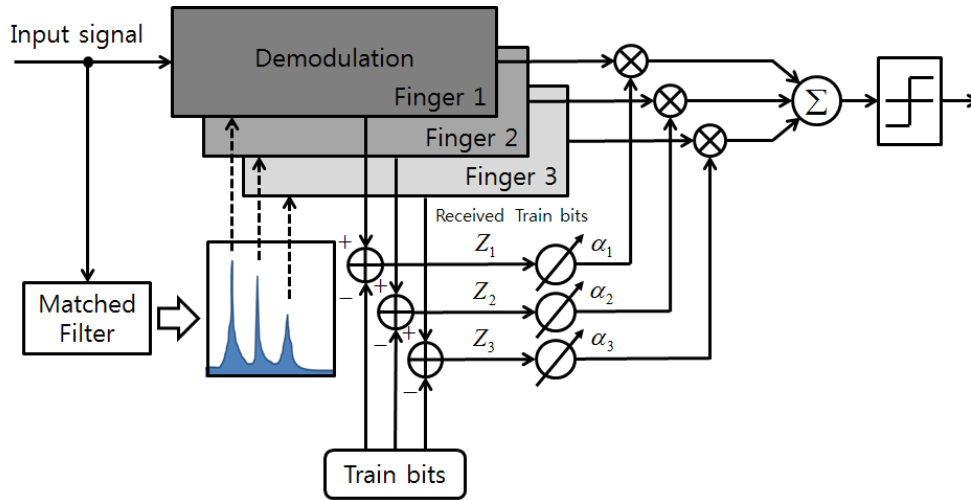


Fig. 5 Proposed rake receiver

용하여 가중치를 구하고 합산한다.

그림 5는 제안된 레이크 수신기의 블록도이다. 우선적으로 수신된 신호를 정합 필터에 통과시킨 후, 경로 이득에 의해 경로가 선택되는 것은 기존의 레이크 수신기와 동일하다. 그림 5에서 Training bits 블록은 훈련 신호 비트를 의미하며, 그림 5와 같이 훈련 신호의 비트를 이용하여 훈련 신호만의 오차율을 구할 수가 있다. 이를 각각의 수신기 finger에 적용하여 복구 과정을 거친 훈련 신호의 오차율을 계산한다. 오차율이 낮은 값일수록 더 높은 가중치가 할당되도록 한다. 그림 5의 Z 값이 낮은 오차율이 높은 값으로 지나도록 하는 변수이다. Z값은 식 (3)으로 계산된다.

$$Z = 1 - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |d(n) - r(n)| \quad (2)$$

식 (2)의 두 번째 항은 훈련 신호의 오차율을 구하는 식이다. 여기서 $d(n)$ 는 훈련 신호 비트, $r(n)$ 는 수신된 훈련 신호의 비트이며, N 은 훈련 신호 비트 길이이다. 훈련 신호의 오차율을 구한 후, 오차율이 낮을수록 높은 이득을 지나도록 하여야한다. 오차율은 가장 높은 값이 1이며, 가장 낮은 값이 0이므로, 최대치인 1과의 차로 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 구한 값을 식 (1)을 이용하여 가중치를 계산한다.

만약 경로의 신호가 모두 오류일 경우, 해당 경로에

할당되는 가중치는 0이 된다. 설명, 경로 이득이 높아 수신기 finger가 구성되었다고 하더라도, 가중치 할당에 의해 높은 오차율이 유입되는 것을 막을 수 있다.

제안된 레이크 수신기의 훈련 신호 오차율 문턱 값을 계산하기 위해 식 (3)과 식 (4)를 이용한다.

$$\bar{e} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e(m) \quad (3)$$

$$\eta = \bar{e} + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \{e(m) - \bar{e}\}^2 \quad (4)$$

여기서 M 은 수신된 신호의 전달 경로 개수이고, e 는 훈련 신호 오차율이며, η 는 훈련 신호 오차율이다. 식 (3)은 전체 경로 훈련 신호 오차율의 평균값이다. 이를 이용하여 식 (4)를 나타낼 수 있는데, 훈련 신호 오차율의 평균과 분산의 합으로 오차율 문턱 값을 계산할 수 있다. 이러한 문턱 값을 설정하여 해당 채널에서 수신된 신호의 전달 경로 선택에 이용된다.

식 (4)와 같이 평균과 분산의 합으로 오차율 문턱 값으로 설정할 경우, 높은 훈련 신호 오차율을 지닌 경로의 출력 신호는 차단되며 비슷한 훈련 신호의 오차율을 지닌 finger의 출력은 신호 복구에 이용된다.

송수신기가 포함된 BPSK DSSS 방식을 이용한 제안된 레이크 수신기의 전체적인 블록도를 그림 6에 나타

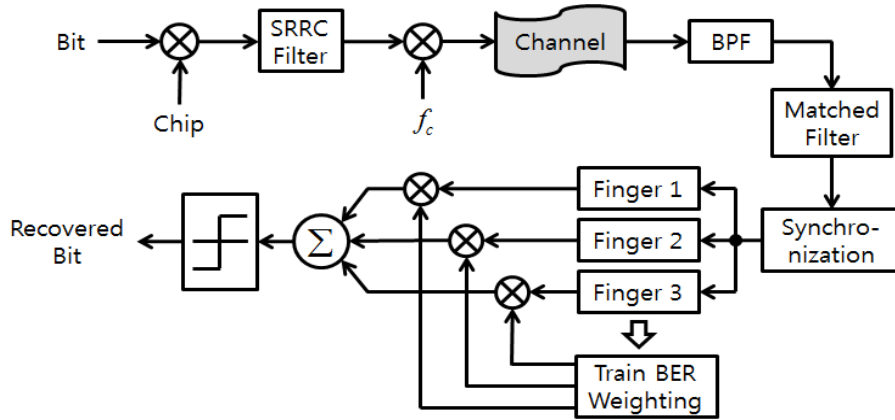


Fig. 6 Block diagram of a underwater communication system with a proposed rake receiver

내었다. 그림 6은 정합 필터 출력이 문턱 값을 초과하는 3개의 경로를 지닌 신호를 처리하는 제안된 레이크 수신기의 블록선도이다. 여기서 SRRC 필터는 square root raised cosine filter를 의미하며, BPF(band pass filter)는 대역 통과 필터를 의미한다. Synchronization은 기존의 레이크 수신기와 같이 경로 이득에 따라 신호는 분리하는 것을 의미하며, finger는 그림 3과 같이 구성된다.

IV. 호수 실험 결과

제안된 레이크 수신기의 성능을 분석하기 위해 호수에서 실험을 진행하였다. 실험에서 데이터는 BPSK DSSS 변조되었으며, 심볼 전송률은 100 bps로 하였다. 반송(carrier) 주파수는 16 kHz로 하였으며, 샘플링 주파수는 192 kHz로 하였다. 패킷은 256개의 M시퀀스가 사용된 훈련 구간과 512개의 비트로 구성된 데이터 구간으로 구성되었으며 확산을 위해 16개의 M시퀀스가 사용되었다. 실험은 2015년 4월 경북 경천호에서 그림 7과 같은 구성으로 진행되었는데 당시 호수의 수심은 약 40 m이었으며, 송신기의 수심은 4 m, 수신기의 수심은 15 m로 하였다. 송수신기 간의 거리는 약 340 m로 하였다. 송신기는 Neptune D/17/BB 모델[11], 수신기는 B&K 8106 모델[12]을 사용하였으며, 송신 신호의 증폭을 위해 전력 증폭기가 사용되었다.

통신 신호를 보내기 전에 채널 전달 특성을 추정하였다. 선형 주파수 변조된 신호(LFM : linear frequency

modulation)를 반복적으로 송수신하여 채널 응답 특성을 추정하였고, M시퀀스 신호를 이용하여 산란함수(scattering function)를 구하였다.

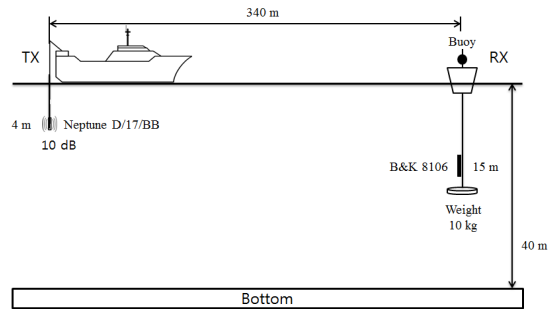


Fig. 7 Experimental setup

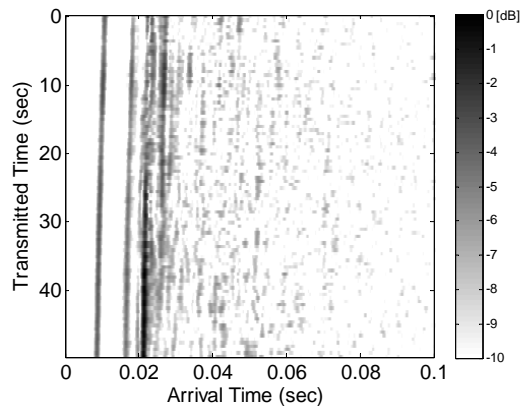


Fig. 8 Channel impulse response

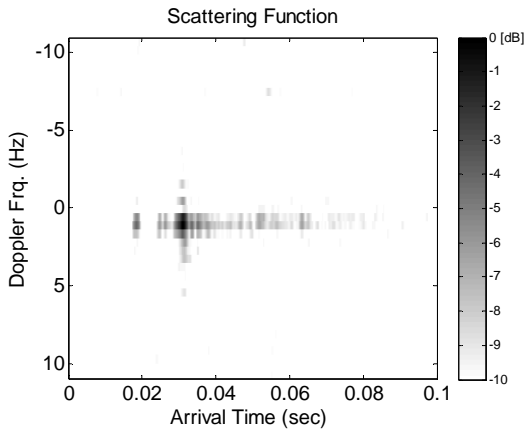


Fig. 9 Scattering function

호수 채널 특성을 측정하기 위해 주기적인 LFM과 M 시퀀스 신호를 수신하여 정합 필터를 이용하여 나타내었다. 그림 8은 추정된 채널 응답 특성으로 그림은 다중 경로 전달에 의한 4-5개의 주요 경로가 나타나는 것을 알 수 있으며, 뒤쪽으로 산란파가 수신되는 것을 알 수 있다. 그림 9에 나타난 산란 함수로부터 도플러 천이 주파수가 약 1.3Hz 발생한 것을 알 수 있다. 이는 실험 당시 수신기가 고정되지 못하여 바람에 의해 약간 이동한 영향이다.

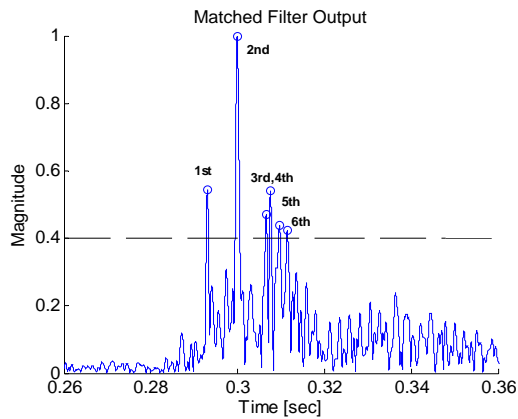


Fig. 10 Matched filter output of lake experiment signals

수신된 신호의 SNR은 약 8.74 dB였으며, 레이크 수신기의 경로 선택 및 합산을 위해 훈련 신호를 이용한 정합 필터를 적용하였다. 출력 값은 그림 10과 같다. 훈련 신호 비트 길이는 256비트이며, 경로 이득의 문턱 값

은 0.4로 두었으며, 정합 필터 출력을 통해 총 6개의 경로가 나타나는 것을 알 수 있다. 각 경로의 훈련 신호 구간에서의 오차율은 표 1과 같다.

식 (4)를 이용하여 훈련 신호 구간에서 오차율의 문턱 값을 계산하면 0.057로 설정된다. 이보다 낮은 오차율을 가지는 경로의 신호만을 이용하여 복구한다.

Table. 1 BER in training sequence duration

Path Number	BER (bit error rate)
1st	0.11
2nd	0.01
3rd	0.07
4th	0.07
5th	0.03
6th	0.05

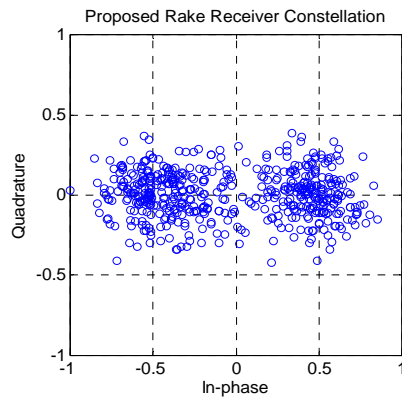


Fig. 11 Constellations of the proposed rake receiver output

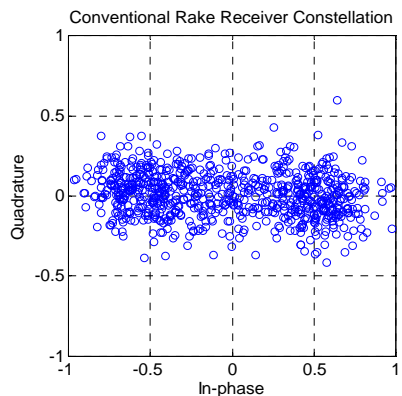


Fig. 12 Constellations of the conventional rake receiver output

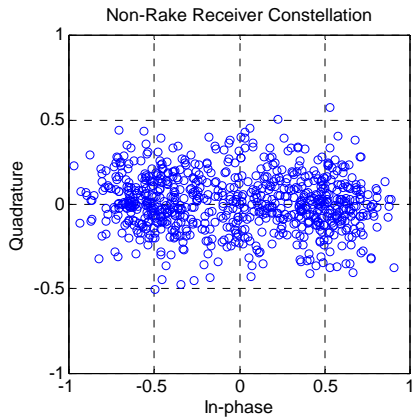


Fig. 13 Constellations of non-rake receiver output

제안된 레이크 수신기에서 2,5,6번 경로의 신호만을 이용하여 분석한 결과, 실제 혼련 신호 비트는 256개의 비트가 전송되었고, 데이터 비트는 512개의 비트가 전송되었다. 그림 11은 제안된 레이크 수신기를 적용한 경우 성상도로서 데이터 비트 512개 중에서 8개의 비트가 오류로 나타났다.

반면 그림 12와 같이 기존의 레이크 수신기의 경우 45개의 비트가 오류로 나타났으며, 그림 13처럼 레이크 수신기를 사용하지 않고 경로 이득이 가장 높은 2번 경로의 신호만을 이용하여 복구한 결과 72개의 비트가 오류로 나타났다. 기존의 레이크 수신기는 잘못된 경로에 높은 가중치가 할당되어 신호 복구에 사용되어 오차율이 높게 나타난 것이다. 그림 14는 위 세 가지 경우에 대한 BER을 나타낸 것이다.

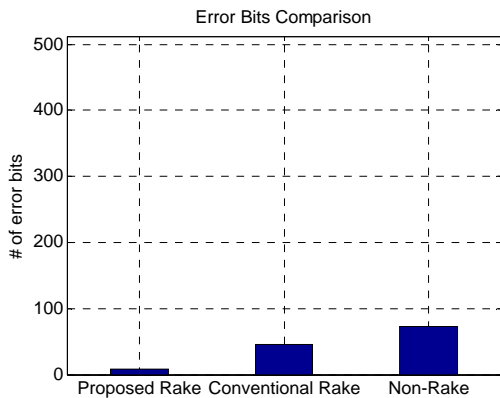


Fig. 14 Performance comparison with rake receivers

V. 결론

본 논문은 수중음향통신 채널에서 혼련 신호 구간의 오차율을 분석하여 경로를 선택하여 수신기를 구성하고, 가중치를 할당하는 레이크 수신기를 제안하였다. 호수 실험을 통해 제안된 레이크 수신기와 기존의 레이크 수신기, 레이크 수신기를 사용하지 않은 일반 수신기의 성능을 비교 분석하였다. 그 결과, 전송된 데이터 비트 512개 중에서 제안된 레이크 수신기는 8개의 비트 오류, 기존의 레이크 수신기는 45개의 비트 오류, 그리고 레이크 수신기를 사용하지 않은 일반 수신기는 72개의 비트 오류가 발생하였다. 이를 통해 제안된 레이크 수신기가 수중음향통신에서 혼련 신호 오차율 분석을 통해 바람직한 경로를 선택하고 복구에 사용하는 것을 알 수 있다.

향후 연구 내용으로는 다른 경로 선택 방법과 채널에 적합한 혼련 신호 길이를 결정하는 방법 등에 대한 연구가 필요하다. 아울러 염도, 수온, 해저지형 등의 요소에 따라 채널 전달 특성이 달라진다. 특히, 수온과 해저지형은 채널 전달 특성에 큰 영향을 미친다. 이러한 영향을 크게 받는 해상 실험을 통한 다양한 성능 분석에 대한 연구도 진행되어야 할 것이며, 이와 함께 수중 채널 전달 모델을 활용한 시뮬레이션 결과와 비교분석이 필요하다.

REFERENCES

- [1] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, Berlin, Springer, 2002.
- [2] F. B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, Woodbury : NY, AIP Press, 1994.
- [3] L. Brekhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, New York : NY, Springer-Verlag, 1982.
- [4] R.J. Urick., *Principles of Underwater Sound*, New York : NY, McGraw-Hill, 1983.
- [5] Bernard Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, 2nd Edition, Upper Saddle River : NJ, Prentice Hall, 2001.
- [6] K.M. Krishna, A. Mitra and C. Ardil, "A simplified single correlator rake receiver for CDMA communications,"

- International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol.4, no.2, pp.381-384, Feb. 2010.
- [7] F. Blackmon, E. Sozer, M. Stojanovic, and J. Proakis, "Performance comparison of RAKE and hypothesis feedback direct sequence," *Proc. MTS/IEEE Oceans*, vol.1, pp.594-603, Oct. 2002.
- [8] T.C. Yang and Wen-Bin Yang, "Low probability of detection underwater acoustic communications using direct-sequence spread spectrum," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.124, no.6, pp.3632-3647, Dec. 2008.
- [9] B.S. Sharif, J. Neasham, O.R. Hinton and A.E. Adams, "Computationally efficient doppler compensation system for underwater acoustic communications," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.25, no.1, pp.52-61, Jan. 2000.
- [10] Simon Haykin, *Adaptive Filter Theory: 4th Edition*, Prentice Hall, 2001.
- [11] Neptune Sonar Limited. Broad-band spherical projectors. Omni-directional Neptune D/17/BB [Internet]. Available: <http://www.neptune-sonar.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/Model-D17BB.pdf>.
- [12] Brüel & Kjær. Sound & Vibration Measurement A/S. Type 8106 Hydrophone. [Internet]. Available: <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/hydrophones/8106>.



손지홍(Ji-hong Son)

2014년 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2016년 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
※관심분야 : 수중음향통신, 신호처리



김기만(Ki-man Kim)

1988년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1996년 ~ 현재 한국해양대학교 전파공학과 교수
1997년 ~ 현재 한국정보통신학회, 중신회원
2007년 ~ 2015년 방위사업청 지정 수중통신탐지특화연구센터 실장
2013년 ~ 2015년 TTA 수중음파통신 표준화 그룹 위원
※관심분야 : 수중음향통신, 소나 신호처리, 배열 신호처리 등