Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 1 pp. 91~98, 2017
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.1.91

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

해양플랜트 제어 감시용 수중 다중 센서 음향 통신 기법 연구

안태석[1] · 백창욱[2] · 정지원†

(Received September 2, 2016 ; Revised November 10, 2016 ; Accepted December 9, 2016)

A study on underwater multiple sensors acoustic communication for offshore plant monitoring

Tae-Seok Ahn[1] · Chang-Uk Baek[2] · Ji-Won Jung†

요약: 본 논문에서는 해양 플랜트 수중 구조물의 감시 제어를 위한 수중 다중 센서 음향통신 기법에 대해 분석한다. 각 구조물의 상태 정보는 구조물에 부착된 센서를 통해 정보가 수중으로 전송되며, 여러 구조물의 정보를 동시에 전송 및 수신하는 최적의 기법을 제시한다. 다중 센서를 통해 동일한 주파수를 이용하여 간섭 없이 성능 열화를 감소시키는 대역확산기법을 이용하여 수중 통신 송수신단 구성을 제시하며, 수중에서의 다중 경로로 인한 성능 열화를 감소시키기 위한 RAKE 기반의 수신모델을 제시한다. 본 논문에서는 센서의 갯수를 세 개로 제한하고 센서의 개수에 따른 성능을 시뮬레이션을 통해 제안한 방식의 효율성을 증명하였다.

주제어: 해양플랜트, 수중 통신, 대역확산, RAKE 수신

Abstract: In this paper, we analyzed underwater multiple sensors acoustic communication technologies for monitoring and control of offshore plants in underwater environments. Information on underwater structure of offshore plants is transmitted and received by multiple sensors at the same time. Using multiple sensors with same frequency, we employed spread spectrum techniques to avoid interferences between these multiple sensors. Owing to the multi-path characteristic in underwater communications, the performance is degraded. In order to improve the performance of underwater multiple sensors communication, we proposed turbo equalized RAKE receiver structures. Assuming that the number of sensors is fixed to three, we conformed the effectiveness of the proposed method as compared to the conventional one.

Keywords: Offshore plant, Acoustic communication, Spread spectrum, RAKE receiver

1. 서 론

과거 해양에 관한 연구는 군사적인 목적에 국한되어 주로 수중 음원 탐지 및 추적에 관한 연구가 이루어졌다. 하지만 최근 해양 자원 개발이 활발해지면서 해양에 대한 관심이 고조되고, 다양한 분야에서의 연구가 진행되고 있다. 특히 해양에서의 수중 음향 통신은 해양 연구의 필수적인 기술로써 응용분야가 확대되고 있는 추세이다. 최근에는 해양 플랜트 분야로 확대되어 해양 플랜트 건설을 위해 수상뿐만 아니라 수중에서도 많은 작업이 이루어지고 있다. 특히 수중에서의 해양 플랜트의 사고가 빈번하게 발생하는데 구조물의 안전성이 확보되지 못하면 대형 사고가 발생할 수 있으므로 해양 플랜트의 수중 구조물과 주변 해양 환경의 상태를 상시 감시하고, 재해를 미연에 방지하기 위해 적절한 실시간 수중 감시 시스템 구축이 필요하다. 예를 들어 **Figure 1 (a)**과 같은 해양 플랜트 구조물에서 **Figure 1 (b)**와 같은 구조물의 결함으로 인하여 **Figure 1 (c)**와 같이 해양 플랜트 구조물이 침체되어 대형 사고가 발생할 수 있다.

따라서 수중에서 각 구조물의 상태를 다수의 수중 센서를 통해 buoy로 전송되는 수중 전송 시스템의 핵심기술인 수중 다중 센서 통신의 기술이 필요로 한다.

다중 센서 수중 통신을 위해서는 각 구조물에서의 정보를 획득하기 위한 방법으로는 동일한 주파수 대역에서 서로 다른 직교 성분을 가지는 부호를 곱함으로써 수신측에서 각 구조물의 상태를 개별적으로 정보를 획득할 수 있는 대역확산 방식을 주로 사용한다. 대역확산 방식을 이용한 수중 통신 방식은 여러 논문들에 언급되어져 있다**[1][2]**. 일대일 수중 통신에서는 비동기 방식인 DPSK(Differential Phase Shift Keying)방식을 이용한 RAKE 수신기를 적용하며, 다중 사용자일 경우에는 논문 **[3]**에서와 같이 SIC

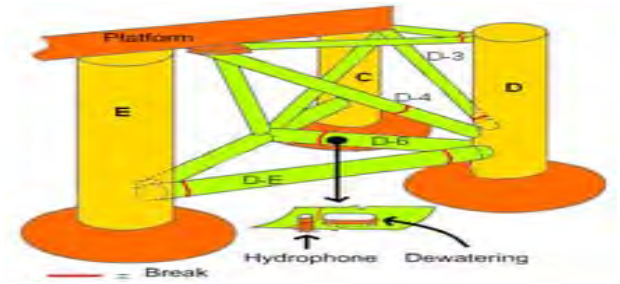
† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9467-2478): Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: jwjung@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4425
1 Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: ats320@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4920
2 Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: cubaek@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4920

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.

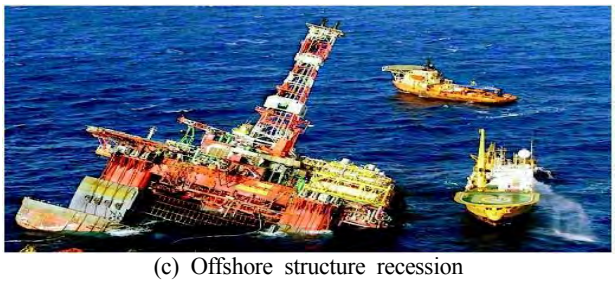
Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

(Successive Interference Cancelation) 방식을 이용하여 다른 사용자의 간섭을 제거하여 RAKE 방식을 적용하는 논문이 대부분이다. 일대일 통신에서의 비동기 방식 적용은 오류 전파 효과가 있어 성능이 감소되며, 다중사용자 통신 환경에서는 채널 정보가 정확치 않으면 오히려 성능이 감소되는 단점들이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점들을 보완한 대역확산 방식 기반의 해양 플랜트 다중 센서 수중 통신 구조를 제안하며, 이에 대한 효율적인 복호 구조를 제안한다.

(a) Offshore structure



(b) Structure defect



(c) Offshore structure recession

Figure 1: Example of to need the construction of a underwater monitoring system

2. 다중 센서 수중 음향 통신 구조 및 수중 채널 특성

2.1 해양 플랜트 제어 환경에서 다중 음향 통신

해양 플랜트 환경에서 수중에서 건축물의 상태를 제어하기 위한 구조는 **Figure 2**와 같다. **Figure 2**와 같이 수중에서 각 구조물의 상태를 수중 센서를 통해 buoy로 전송되는 모뎀이 수중 전송 시스템의 핵심기술이다. 이는 수중에서 음파 통신을 이용하여 제어가 이루어지는데 수중 환경은 육상과는 달리 매우 복잡한 신호 전달 특성을 가지며, 이를 고려한 수중 통신 시스템 설계가 요구된다.

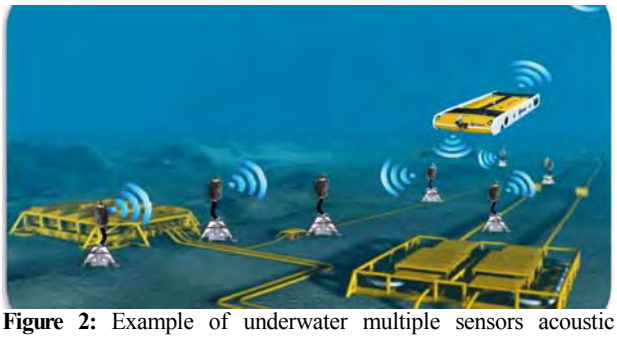


Figure 2: Example of underwater multiple sensors acoustic communication

각 구조물에서의 정보를 동시에 동일한 주파수 대역에서 전송하기에 적합한 방식이 대역 확산 방식이다. 대역 확산 기법의 기본 원리는 송수신단이 미리 알고 있는 PN(Pseudo Noise) 부호를 이용하여 주파수 및 시간적으로 변조를 시켜 전송하는 것이다. 이는 직접 수열 대역 확산(DSSS : Direct Sequence Spread Spectrum), 주파수 도약 대역 확산(FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum)등이 대표적인 방식이라 할 수 있다. 주파수 도약 방식은 송신하고자 하는 데이터를 PN 부호 별호 주파수를 여러 개로 나뉘어 전송하는 방식이다. 직접 수열 대역 확산 방식**[4]**은 보내고자 하는 송신 신호에 직접 PN 부호를 곱해 줌으로써 은밀성이 보장되는 것으로 널리 연구되는 방식이다**[5][6]**.

본 논문에서는 다양한 대역 확산 통신 기법 중 직접 수열 대역 확산 통신 기법을 적용하였다. 직접 수열 대역 확산 방식 기반의 각 구조물의 상태를 제어 및 통신을 위해서는 전송되는 송신부의 형태는 아래 그림 **Figure 3**과 같다. 여기서 각 사용자를 해양 플랜트 구조물이라 가정한다. 예를 들어 k번째 사용자의 의미는 k번째 구조물의 정보를 전송하는 센서를 의미한다.

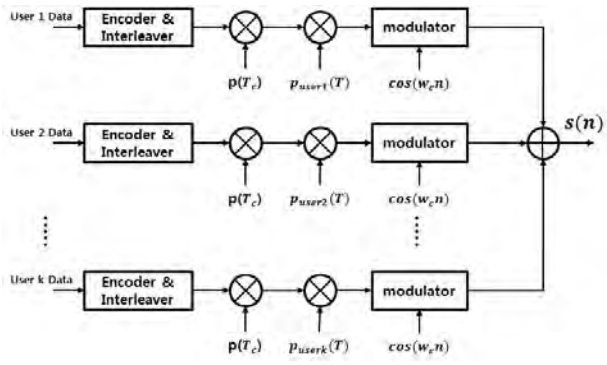


Figure 3: Transmission for multiple sensors acoustic communication

k번째 사용자가 보내고자 하는 데이터는 다중 채널 환경과 같은 수중 채널에서 우수한 성능을 보이는 연판정 기반의 채널 부호화 기술인 (2, 1, 7) convolution과 군집 오류를 산발 오류로 바꾸기 위한 랜덤 인터리버를 거친다. 인터리버의 적용에 따라 성능이 다르며, 이는 수중 채널상의 오류가 복호기의 정정 범위를 벗어날 수 있기 때문에 이를 산발 시켜 복호기의 오류 정정 범위내로 들어오게 하여 성능을 향상시킬 수 있으므로 이의 적용은 필수적이다. 인터리버는 데이터 길이만큼의 랜덤 인터리버를 적용하였다. 채널 부호화와 인터리버를 거친 데이터는 직접 수열 대역 확산을 위하여 PN 부호를 곱해준다. 그리고 각 사용자를 식별하기 위한 사용자 식별 부호를 곱해준 뒤, 변조기를 통하여 변조된 신호는 다른 사용자들의 송신신호와 합쳐진 뒤 최종적으로 송신하게 된다.

n 시점에서 k번째 사용자의 송신 신호를 $x_k(n)$이라고 할 때, 사용자의 대역확산을 위해 PN 부호의 칩 길이 T_c를 갖는 $p(T_c)$와 사용자 식별을 위한 PN 부호 T의 길이를 갖는 $p_{userk}(T)$, 변조를 위해 변조 주파수 w_c를 이용한 송신신호 $x_k(n)$은 **식 (1)**과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_k(n) = b_k(n)p(T_c)p_{userk}(T)\cos(w_c n) \tag{1}$$

변조과정까지 마친 k번째 사용자들의 송신 신호 $x_k(n)$은 다른 사용자들의 송신 신호와 겹쳐진 후 보내게 되는데 최종적인 송신 신호 $s(n)$은 **식 (2)**와 같이 다른 모든 사용자의 데이터들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$s(n) = \sum_{k=1}^{K} x_k(n) \tag{2}$$

K는 전체 사용자 수를 나타낸다.

2.2 수중 채널 특성

다중 경로 전달에 의해 수신된 신호는 수중 음향 통신 시스템에서 인접 심벌간의 간섭(ISI : Inter Symbol Interference)을 발생시키고, 통신 시스템의 성능 저하를 가져오는 주요 원인 중 하나이다. 음향 신호가 전달되는 과정에서 수신기로 직접 도달되는 직접파와 해수면과 해저면에 반사(reflection)되거나 산란(scattering)되어 발생하는 잔향(reverberation) 현상이 존재한다. 또한 수심에 따라 달라지는 수온에 의해 음파의 전파 경로가 달라지는 ray bending 현상은 다중 경로를 만들게 된다. 통상적으로 수직 채널의 경우 대부분 해수면의 후방 산란에 의해 짧은 시간의 다중 경로 확산이 생기는 반면 수평 채널의 경우 매우 긴 다중 경로로 확산이 생길 수 있다. 천해 환경에서는 직접파와 대부분 해수면과 해저면의 잔향에 의한 다중 경로 전달 신호가 합해져서 수신되며, 대부분은 ray bending 현상에 의해 발생한다**[7]**.

3. 효율적인 수신 구조

3.1 RAKE 기반의 수신 구조

송신부에서 보내진 송신 신호는 다중 경로와 같은 수중 채널 특성에 의하여 왜곡되어 수신부에 수신되어진다. **Figure 5**는 다중 센서 수중 음향 통신을 위한 수신부 구조를 나타낸 블록도이다. 수신신호 $r(n)$은 다중 경로를 통하게 되고, 잡음이 더해져 들어옴으로 다음과 같은 **식 (3)**과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(n) = \sum_{l=1}^{L} c_{k,l}(n)s(n) + w(n) \tag{3}$$

L은 전체 다중 경로의 수를 나타내며 l은 l번째의 다중 경로를 나타낸다. $c_{k,l}(n)$은 k번째 사용자의 l경로에 있는 채널 응답 계수를 나타내며 $w(n)$은 가우시안 잡음을 나타낸다.

수신부측에서는 수신 된 신호를 복원하기 위하여 복조과정과 함께 복원을 원하는 사용자의 해당하는 사용자 식별 부호를 곱해준다. 사용자 식별 부호는 '1'과 '-1'로 구성되어 있기 때문에 같은 사용자 식별 부호를 곱하였을 때 '1'로써 사용자 식별 부호 성분은 제거 되어 진다. 또한 사용자 식별 부호는 높은 자기 상관관계 값을 구할 수 있으므로 원하는 사용자의 데이터를 찾을 수 있다.

수신 신호 $r(n)$에 복조를 위한 $\cos(w_c n)$과 사용자 식별 부호인 $p_{userk}(n)$을 곱하여 주게 되면 고주파수 성분은 LPF(Low Pass Filter)를 통하여 제거되어지고 사용자 식별 부호 성분은 사라지면서 k번째 사용자의 데이터를 뽑아 낼 수 있다. 다음 **식 (4)**는 수신 신호 $r(n)$에서 k번째 사용자에 대한 데이터를 복원하기 위한 복조과정을 나타낸 식이다.

$$\begin{aligned} y_k(n) &= r(n)p_{userk}(T)\cos(w_c n) \\ &= \sum_{l=1}^{L} c_{k,l}(n)s(n)p_{userk}(T)\cos(w_c n) + w(n)p_{userk}(T)\cos(w_c n) \\ &= \sum_{l=1}^{L}\sum_{1k=1}^{K} c_{k,l}(n)b_k(n)p(T_c)p_{userk}^2(t)\cos^2(w_c n) + \overline{w}(n) \\ &= \sum_{l=1}^{L} c_{k,l}(n)b_k(n)p(T_c) + \overline{w}(n) \end{aligned} \tag{4}$$

$y_K(n)$는 수신 신호에서 k번째 사용자에 대한 신호를 뽑아낸 데이터이며 $\overline{w}(n)$은 잡음을 나타낸다. 사용자 식별 부호의 상관관계(correlation) 값은 k번째 사용자의 상관관계 값은 큰 값으로 나오게 된다. 그 외의 사용자의 상관관계 값은 작은 값으로 나오게 됨으로 해당하는 k번째 사용자의 신호를 뽑아 낼 수 있다.

사용자 식별이 끝난 뒤, 복원을 원하는 데이터는 **Figure 5**과 같은 RAKE 과정을 거치게 된다. RAKE 수신 구조는 다중 경로와 같은 수중 채널 환경에서 우수한 성능을 보여주는 수신 구조이다. 다중 경로에 따른 수중 채널 환경을 탭 지연 라인으로 표현을 하면 RAKE 수신 구조**[8]-[10]**는 최적의 채널 탭들을 선택하여 활용한다.

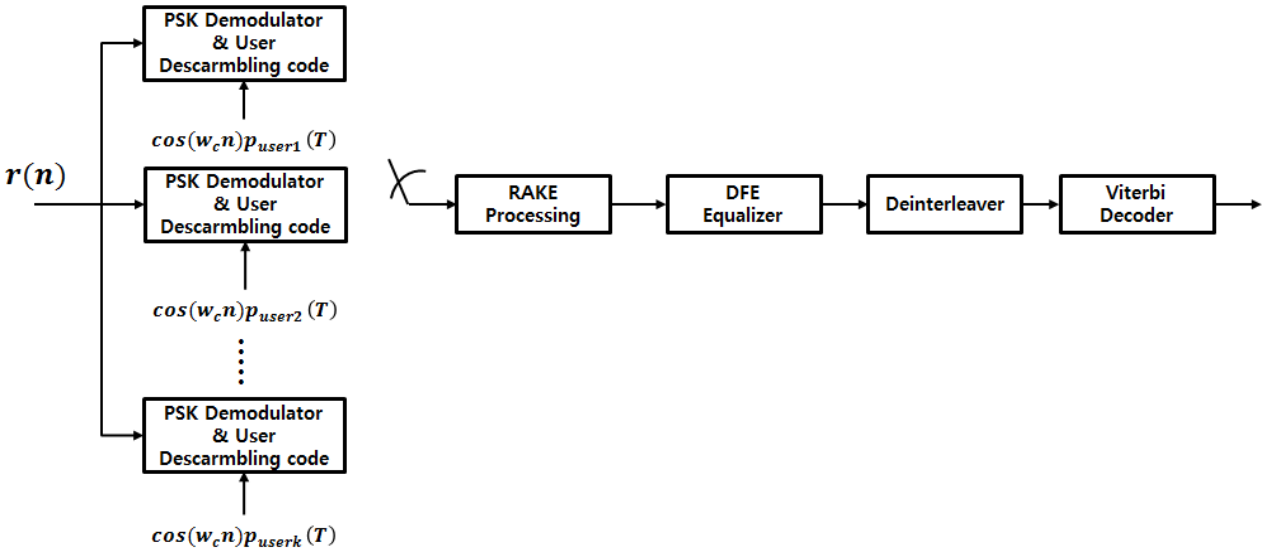


Figure 4: RAKE receiver based on multiple sensors acoustic communication

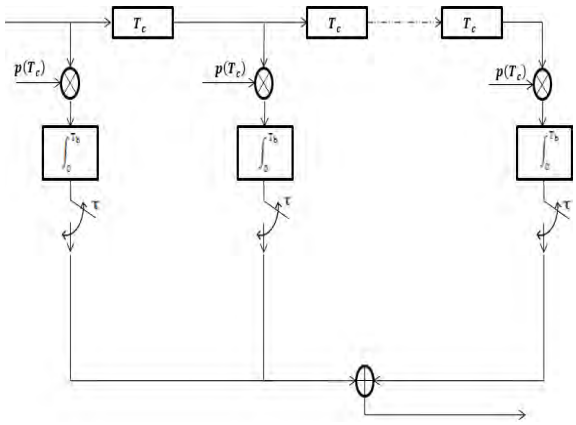


Figure 5: RAKE processing

수신된 신호는 수중에서의 다중 경로로 인해 진폭 및 시간이 지연되어 수신되므로 본 논문에서는 수신신호를 T_c 만큼의 지연을 시켜 각 T_c개의 탭에서 역확산 과정을 하여 모두 더하여 등화기로 보내진다. 각각의 탭에서는 송신측에서 대역 확산을 위하여 사용한 PN 부호를 다시 곱하여 상관관계를 구하게 되는데 이러한 연산은 PN 역 확산 과정도 포함된다. PN 부호는 이상적으로 지연되지 않았을 경우, 가장 큰 상관관계 값을 가지게 되고 그 외의 경우에는 상관관계 값이 매우 작아진다. 상관관계를 구하고 적분을 통하여 복조를 한 다음, 각각의 탭들의 출력 값들을 이용하여 최대 비 합성법(MRC : Maximum Ratio Combining)을 사용하여 합성 한 뒤 신호를 복호하게 된다.

RAKE과정을 거친 후 다중경로의 효과를 제거하기 위하여 결정 궤환 등화기(DFE : Decision Feedback Equalizer)를 이용한다**[11]**. 채널 추정은 송수신기가 서로 알고 있는 패킷의 훈련 심볼을 이용하여 추정하는데, 이는 DFE 등화기의 초기 계수 값을 결정한다. Convolutional 부호기의 복호기인 Viterbi복호에서 MLD(Maximum Likelihood Detection) 기반의 복호를 하여 오류를 정정한다.

3.2 SIC/RAKE 수신 구조

여러 사용자의 신호들은 수신될 때 신호들이 합쳐져 들어옴으로써 자기 자신이외의 신호들은 신호를 검출 할 때 방해가 된다. 이러한 사용자 간 간섭을 다중 접속 간섭 (MAI : Multiple Access Interference)라 한다. 다중 경로 환경과 같은 수중 채널에서 효율적인 수신 구조인 RAKE 구조에 기초하여 다중 접속 간섭을 억제 하는 방법 중 SIC(Successive Interference Cancellation) 방식을 이용하여 인접 사용자 간섭을 제거하는 방법이 널리 적용된다**[12]**.

SIC/RAKE 수신 구조는 여러 사용자의 송신 신호가 합쳐진 수신신호에 복원을 원하는 사용자에 데이터를 검출하기 위하여 다른 사용자에 대한 데이터를 단계별로 여러 사용자의 중첩된 신호에서 제거함으로써 다중 간섭을 제거하는 방식이다. 다중 간섭을 제거함으로써 SIC/RAKE 수신 구조는 다중 사용자 검출에 대하여 성능 향상을 기대 할 수 있다. 다음 **Figure 6**은 SIC/RAKE 수신구조를 나타낸 그림이다.

수신신호 $r(n)$은 모든 사용자에서 대해서 사용자 식별과 복조 과정을 거치게 된다. 첫 번째 사용자에 대한 사용자 식별과 복조를 한 신호는 다중 간섭을 제거하기 위하여 두 번째 사용자 신호를 빼주게 된다. 그리고 동일한 방법으로 마지막 사용자에 대한 신호까지 빼줌으로써 다중 간섭을 제거한다. 다중 간섭을 제거한 후 RAKE 과정을 거친 다음 복호기로 입력된다. SIC/RAKE 수신구조는 정확한 채널 추정이 필요하며 사용자가 증가할수록 계산량이 급격히 늘어나는 단점이 있다.

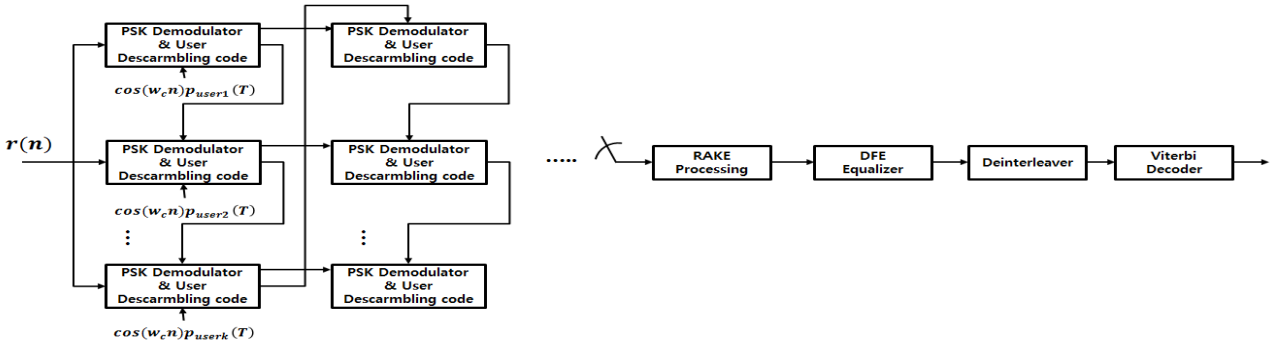


Figure 6: SIC/RAKE receiver based on multiple sensors acoustic communication

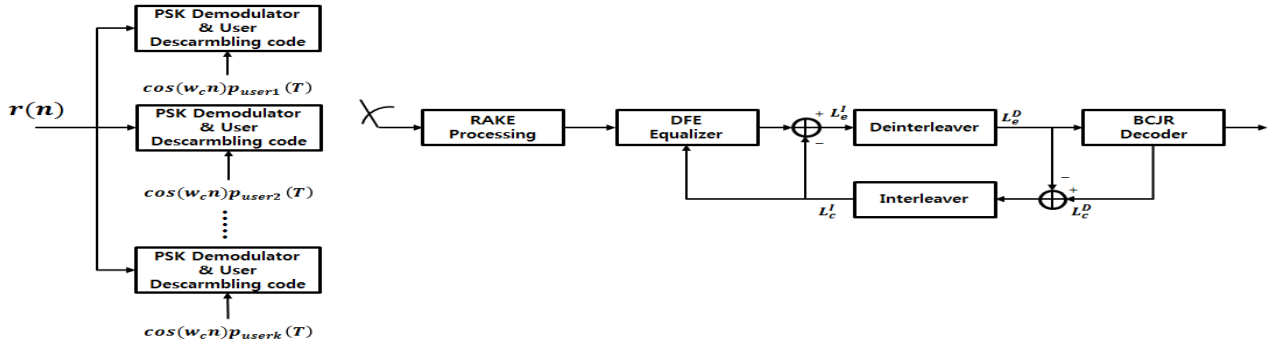


Figure 7: Turbo equalized RAKE receiver based on multiple sensors acoustic communication

3.3 임계 값을 고려한 RAKE 수신 구조

Figure 4의 RAKE 과정 까지 동일하며, **Figure 6**의 단점인 채널 추정이 정확하지 않으면 성능이 열화되며 사용자 수가 증가되면 지수적으로 계산량이 많은 단점을 가진 SIC 부분을 제거한 후 본 논문에서 제안한 터보 등화 기반의 RAKE 수신 구조는 **Figure 7**과 같다. 3.1절에서 언급한 RAKE 과정 후 수신 심볼들은 터보 등화기로 입력된다.

터보 등화기는 등화기와 BCJR 복호기로 구성되어 있다. BCJR 복호기에서는 BM(Branch Matrix), FSM(Forward State Matrix), BSM(Backward State Matrix)를 구하기 위하여 입력 값에 따른 출력 값과 함께 변화하는 상태를 나타내는 격자도를 이용하여 복호한다. BCJR 복호기**[13]**를 통하여 수신 비트 스트림 크기만큼의 LLR(Log Likelihood Ratio) 값이 출력된다. BCJR의 복호 방식은 터보 부호의 복호 방식과 동일하며, 각 상태에서 '0'의 확률과 '1'의 확률을 계산하여 FSM, BSM을 계산하여 최종적으로 $LLR = \log\frac{p(x=+1)}{p(x=-1)}$ 값을 계산한다.

등화기와 BCJR 복호기는 인터리버와 디인터리버를 통해 연결되어 서로의 정보를 반복해서 갱신한다. 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재입력한다**[14]**.

RAKE 수신 구조는 최대 비 합성법을 사용하여 합성 한 뒤 신호를 복호하게 된다. 최대 비 합성법은 여러 가지(branch)로부터 입력된 신호를 최적의 성능을 얻기 위해 중첩한다. 합성 전에 동기를 취하는 방식으로 상관관계 값이 작은 값에 대해서는 기여도를 적게하고, 시간 지연이 되지 않은 상관관계 값은 기여도를 크게하여 합성 효과가 커지도록 한다. 각각의 탭들의 출력 값들은 시간 지연 되지 않은 가장 큰 상관관계를 제외한 나머지 값들은 의도치 않게 self-noise가 되고 이러한 self-noise가 된 값들은 RAKE 과정에서 악영향을 주게 된다. 그 결과 수신기의 성능 저하를 야기 시키게 되지만 이러한 문제점은 임계 값을 적용함으로써 해결을 한다. 다음 **Figure 8**는 임계 값을 적용한 RAKE 과정을 나타낸 블록도이다. 각각의 탭의 출력 값에 임계 값을 주어 임계 값 미만의 값인 self-noise 값들을 제거하여 신호들의 합에서 잡음들이 감소하게 되어 성능 향상에 도움이 된다.

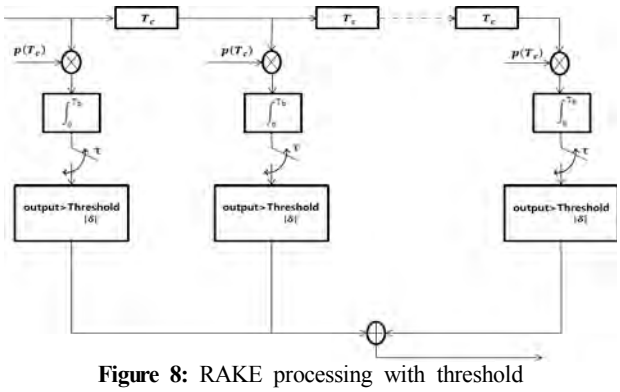


Figure 8: RAKE processing with threshold

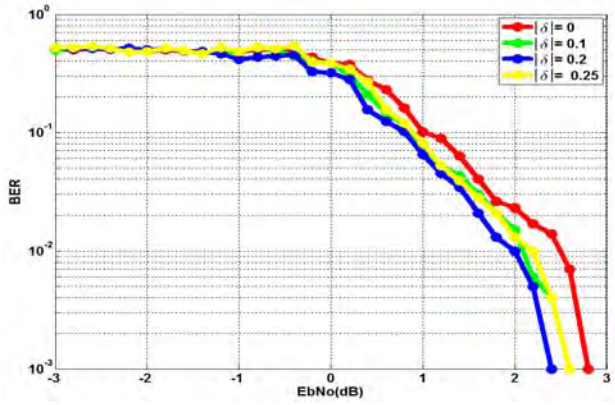


Figure 9: RAKE receiver with threshold (K = 1)

Figure 9은 RAKE 수신구조에 대하여 사용자의 수가 하나일 경우 임계 값 δ에 따른 성능 곡선을 나타낸 그래프이다. δ는 최대 상관관계 값의 반대 부호 값들을 제거하기 위하여 반대 부호 값들의 최대 값을 임계 값으로 주어준다. MRC 단계에서 반대 부호 값들은 δ로 인하여 제거 되고 그로 인해 self-noise가 감소하게 된다. δ가 0.2일 경우 2.5 dB에서 모든 데이터를 복호하여 성능이 가장 우수하였다. 이처럼 사용자 수에 따른 δ를 조정하여 성능을 향상 시킬 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안된 방식의 성능을 분석하기 위하여 실제 동해상에서 실험을 통하여 얻은 Sound Velocity Profile을 기초로 하여 채널을 생성한 후 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 환경은 **Table 1**과 **Figure 10**과 같다. 해양플랜트 구조물의 개수인 사용자 센서의 수를 한 개에서 세 개로 정하고, 데이터 비트수를 10^4 bit로 하고 대역확산을 위한 PN sequence 비트수를 8 bit로 하였고 각 센서의 식별을 위한 채널 식별 부호를 8bit로 설정하였다. 채널 부호화기로는 (2,1,7) 컨볼루션 부호화기를 사용하였고, 변조방식으로는 BPSK를 사용하였으며 복호기는 BCJR을 사용하였다. 중심 주파수는 16 kHz, 샘플링 주파수는 192 kHz로 하였고, 데이터 속도는 187.5 bps로 하였다.

Table 1: Parameters of simulation

Data	10000 bit
PN code	8 bit
User identification code	8 bit
The number of users K	1,2,3
Channel coding	(2,1,7) convolution
Modulation	BPSK
Decoding	BCJR
Bit rate	187.5 bps
Center frequency	16 kHz
Sampling frequency	192 kHz

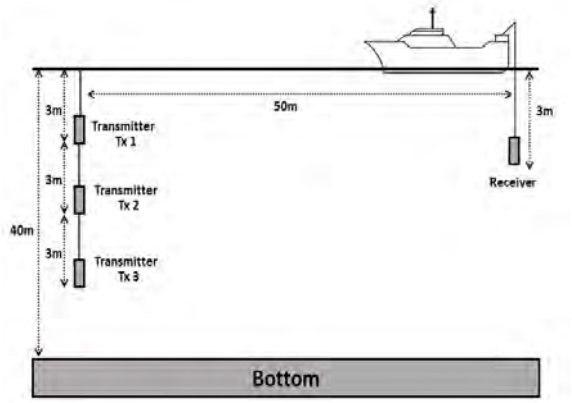


Figure 10: Illustration of simulation

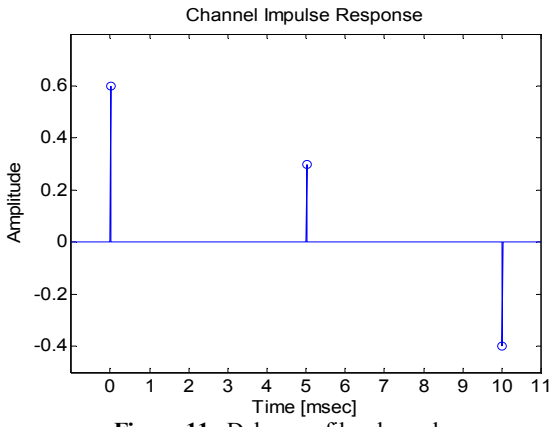


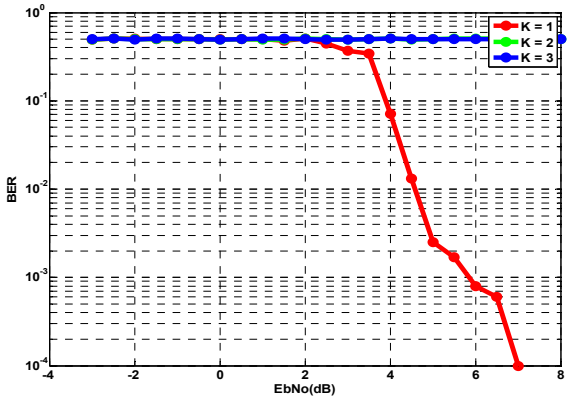
Figure 11: Delay profile channel

시뮬레이션을 위해 적용된 채널 응답은 **Figure 11**와 같이 모든 채널 응답 특성이 동일하다고 가정하였다. 가장 먼저 도착한 신호는 해수면이나 해저면에 부딪히지 않고 바로 들어온 신호로써 amplitude가 0.6으로 가장 크다. 가장 먼저 도착한 신호를 시작으로 5 ms 간격으로 신호들이 수신된다. 마지막으로 들어온 신호는 위상이 반전되며 amplitude가 가장 작다.

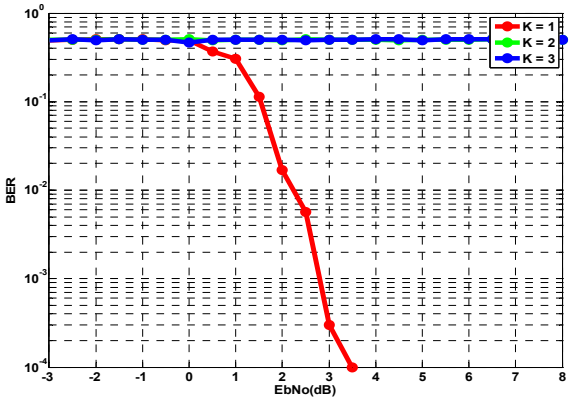
시뮬레이션은 전체 사용자 수 K와 RAKE 수신구조의 유무에 따른 각 사용자의 평균 성능을 BER(Bit Error Ratio) 곡선 그래프로 나타내었다.

Figure 12 (a)는 Non RAKE 수신기 구조에서 각 사용자의 평균 성능 곡선을 나타낸다. Non RAKE의 의미는 **Figure 8**의 구조에서 Rake Processing을 하지 않은 수신 구조를 나타내며, 사용자의 수가 하나일 때 7 dB에서 모든 데이터를 복호 할 수 있었지만 사용자의 수가 2, 3일 경우에는 데이터를 복호 할 수 없다.

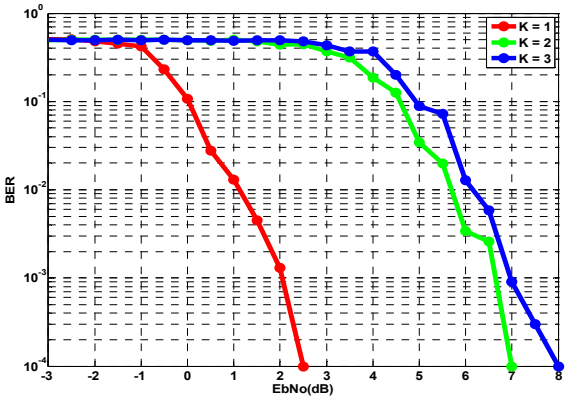
Figure 12 (b)는 RAKE 수신기 구조에서 각 사용자의 평균 성능 곡선을 나타낸다. RAKE의 의미는 **Figure 8**의 구조에서 Rake Processing을 적용한 수신 구조를 나타내며, 각 사용자의 평균 성능 곡선 그래프이다. 사용자의 수가 하나 일 때 3.5 dB에서 모든 데이터를 복호하여 성능 향상을 볼 수 있었지만 RAKE 수신구조를 사용하지 않았을 때와 마찬가지로 사용자의 수가 2, 3일 경우 데이터를 복호하지 못 하였다.



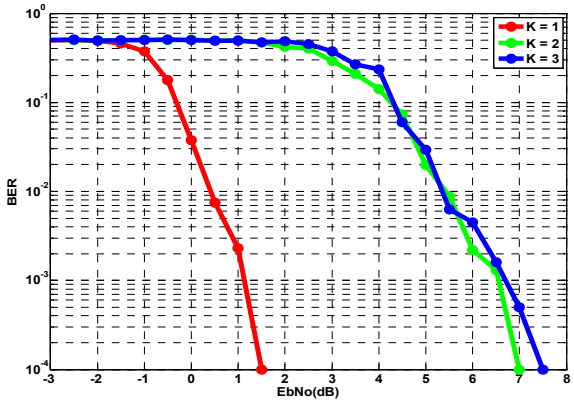
(a) Non RAKE receiver



(b) RAKE receiver



(c) RAKE receiver with threshold



(d) Turbo equalized RAKE receiver (iteration = 3)

Figure 12: BER performance graph by number of user

Figure 12 (c)는 RAKE 수신구조에 대하여 임계 값을 적용하였을 때의 각 사용자의 평균 성능 곡선 그래프이다. 임계값 δ는 사용자의 수의 따라 0.2과 0.08로 설정하였을 때 가장 우수한 성능을 보여주었다. 사용자의 수가 하나일 경우, 2.5 dB에서 모든 데이터를 복호하였다. δ를 적용하여 1 dB 만큼 성능이 향상되었다. 사용자의 수가 2, 3일 경우, δ를 설정하지 않았을 경우에는 모든 데이터를 복호하지 못하였지만 δ를 적용하여 각각 7 dB와 8 dB에서 모든 데이터를 복호하였다. δ 값이 0.2과 0.08 이외의 값을 적용하였을 경우, 성능이 오히려 하향되거나 모든 데이터를 복호하지 못하였다.

Figure 12 (d)는 임계 값을 적용한 RAKE 수신구조에 반복횟수를 3으로 하였을 때의 결과를 나타낸 그래프이다. 반복을 하지 않았을 경우 보다 사용자의 수가 하나일 때와 사용자의 수가 3일 때 각각 1 dB와 0.5 dB의 성능 향상을 관찰 할 수 있었다.

시뮬레이션 결과, RAKE 수신구조에 임계 값을 적용하였을 때 가장 우수한 성능을 확인 할 수 있었으며, 여러 사용자의 데이터를 사용하여 송신하여도 수신 측에서는 원하는 사용자의 데이터를 복호 가능함을 알 수 있었다. 그리고 사용자의 수가 늘어남에 따라 성능이 열악해지는 것과 반복을 통한 성능 향상 또한 관찰 할 수 있었다.

Figure 13는 기존의 Viterbi 복호 방식을 적용한 수신 구조, SIC/RAKE 수신구조와 터보 등화 기반의 RAKE 수신구조에 대하여 사용자의 수가 3일 때의 각 사용자의 평균 성능 비교를 나타낸 그래프이다. Viterbi 복호 방식은 모든 데이터를 복호하지 못하였고 SIC/RAKE 수신구조는 12 dB에서 모든 데이터를 복호 할 수 있었다. 마지막으로 제안한 터보 등화 기반의 RAKE 수신구조는 7.5 dB에서 모든 데이터를 복호 할 수 있었다.

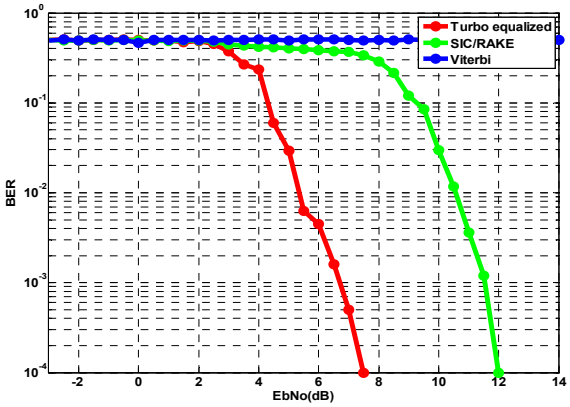


Figure 13: BER performance K = 3 comparison for conventional scheme

5. 결 론

최근 해양 플랜트 분야의 연구가 많이 관심을 받고 있는데 그 중에서 수중에서 이루어지고 있는 해양 플랜트 건설에서는 해양 플랜트 구조물의 부식 또는 결함으로 인하여

크고 작은 사고가 빈번히 발생한다. 이러한 사고를 방지하기 위하여 해양 환경의 상태는 감시하고, 적절한 실시간 수중 감시 시스템의 구축이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 다수의 수중 센서를 동일한 주파수 대역에서 사용 가능하기 위하여 서로 다른 직교 성분을 가지는 부호는 곱하는 방식의 대역확산 방식 기반의 해양 플랜트 다중 센서 수중 통신 구조를 제안하였고, 이에 대한 효율적인 복호 구조인 다중 채널과 같은 수중 채널 특성에 우수한 RAKE기반의 수신 구조를 제안하였다.

또한 시뮬레이션을 통하여 다수의 사용자에 대한 데이터를 사용하였음에도 원하는 사용자의 데이터를 모두 복호가 가능함을 알 수 있음을 확인 하였으며 제안하는 송수신 구조가 효과적으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

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

References

[1] M. Stojanovic, J. G. Proakis, J. A. Rice, and M. D. Green, “Spread spectrum underwater acoustic telemetry,” IEEE OCEANS '98 Conference Proceedings, vol. 50, pp. 650-654, 1988

[2] Z. Zhao and S. Guo, “Design of an acoustic communication system based on FHMA for multiple underwater vehicle,” Scientific Research, vol. 1, no. 1, 2010.

[3] K. Ouertani, S. Saodio, M. Ammar, and S. Houcke, “Performance comparison of RAKE and SIC/RAKE receivers for multiuser underwater acoustic communication applications,” IEEE OCEANS 2007-Europe, pp. 1-6, 2007.

[4] L. Freitag and M. Stojanovic, “MMSE acquisition of DSSS acoustic communications signals,” OCEANS '04. MTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04, vol. 1, pp. 14-19, 2004.

[5] S. J. Honade and Dr. P. V. Ingole, “Removal of Multiple Access Interference in DS-CDMA System,” International Journal of Scientific and Research Publications, vol. 2, pp. 1-6, 2012.

[6] T. C. Yang and W. B. Yang, “Low signal-to-noise-ratio underwater acoustic communication using direct-sequence spread spectrum signals,” IEEE Oceans 2007, pp. 821-826, 2007.

[7] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, “Phase coferent digital communications for underwater acoustic channel,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 19, pp.100-111, 1994.

[8] F. Blackmon, E. Sozer, M. Stojanovic, J. Proakis, D. P. Shea, and J. E. Mitchell, “Performance comparison of RAKE and hypothesis feedback direct sequence spread spectrum techniques for underwater communication Applications,” Proceeding of MTS/IEEE OCEANS, vol. 1, pp. 594-604, 2002.

[9] H. Z. Stefanovic, A. M. Savic, S. D. Veljkovic, and D. N. Milic, “Simulation models of RAKE receiver in DS-CDMA multipath propagation environment,” International Journal of Computer and Information Technology, vol. 3, pp. 34-39, 2012.

[10] H. Kulhandjian, T. Melodia, and D. Koutsonikolas, “Securing unserwater acoustic communication through analog network coding,” Proceedings of the 2014 Eleventh Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking(SECON), pp. 266-274, 2014.

[11] K. Ouertani, S. Saoudi, M. Ammar, and S. Houcke, “Performance Comparison of RAKE and SIC/RAKE Receiver for Multiuser Underwater Acoustic Communication Applications,” IEEE OCEANS 2007-Europe, pp. 1-6, 2007.

[12] K. Berberdis, T. Rontogiannis, and S. Theodoridis, “Efficient block implementation of LMS based DFE,” Proceedings of the 13th Digital Signal Processing International Conference, vol. 1, pp. 143-146, 1997.

[13] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, “Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate,” IEEE Transactions on Information Theory, vol. 20, pp. 284-287, 1974.

[14] K. Berberdis, T. Rontogiannis, and S. Theodoridis, “Efficient block implementation of the LMS based DFE,” Digital Signal Processing Proceedings, vol. 1, pp. 143-146, 1997.