한국음향학회지 제41권 제2호 pp. 218～226 (2022)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.41, No.2 (2022)
https://doi.org/10.7776/ASK.2022.41.2.218

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

수중 음향 통신에서 주파수 편이 변조 신호의 프리엠블 오류율을 이용한 주파수 이득 조절 연구

A study on frequency gain control of frequency shift keying signals using the preamble error rate for underwater acoustic communications

정현우,[1] 정지원,[1†] 김완진[2]

(Hyun-Woo Jeong,[1] Ji-Won Jung,[1†] and Wan-Jin Kim[2])

[1]한국해양대학교, [2]국방과학연구소

(Received January 17, 2022; revised February 23, 2022; accepted March 16, 2022)

초 록: 수중 음향 채널의 주요 특징은 다중 경로와 빠른 주파수 페이딩을 가지고 있다. 이로 인해 다중 주파수 대역을 가지는 주파수 변이 변조(Frequency Shift Keying, FSK) 신호는 다중 경로로 인한 선택적 페이딩으로 인하여 특정한 주파수에 할당된 정보 비트의 손실을 가져온다. 따라서 본 논문에서는 프리엠블 오류율 기반으로 각 중심 주파수의 이득을 조절하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 수신되는 신호의 페이딩으로 인한 특정 주파수의 이득을 변화하면서 프리엠블 오류율이 10 % 미만인 영역의 값을 할당하여 최적의 이득 값을 추정하였다. 경북 문경의 호수에서 300 m ~ 500 m의 이동 거리를 가지는 호수 실험을 하였으며, 부호화율 1/3을 가지는 주파수 변이 변조 신호의 터보 등화 모델에서 터보 등화 반복 횟수가 증가함에 따라 제안한 알고리즘의 적용 시 모두 복호됨을 확인하였다.
핵심용어: 반복 부호, 터보 부호, 수중 음향 채널, 주파수 이득, 프리엠블 오류율

ABSTRACT: The main characteristics of the underwater acoustic channel have varying multipath and fast fading. Especially, Frequency Shift Keying (FSK) signals with multiple frequency bands caused loss of information bits allocated on the specific frequencies due to selective fading phenomenon. Therefore, this paper proposes frequency gain control algorithm based on preamble error rates. The proposed algorithm estimates optimal gain value in the range of preamble error rate with less than 10 % for specific faded frequency. By employing turbo equalized FSK signals with rate of 1/3, the experiment was conducted on a lake in Munkyeong city with distance of 300 m to 500 m. The result confirms that packets are decoded successfully by applying proposed algorithm as increasing number of iterations.
Keywords: Iterative codes, Turbo code, Underwater acoustic channel, Frequency gain, Preamble error rate

PACS numbers: 43.60.Ac, 43.60.Dh

I. 서 론

수중에서는 직접파와 더불어 해수면과 해저 면의 반사 등으로 인해 다중경로 전달을 포함한 다양한 특성으로 수중음향통신은 가장 복잡한 채널을 가지고 있다. 수중에서의 음파 전달 특징은 잡음, 전달 손실, 진동 그리고 수중 채널의 공간적 변화 등으로 특징된다. 특히 이러한 요소들로 인하여 제한된 주파수, 다중경로, 도플러 확산 등이 발생하며, 이는 성능에 영향을 미치는 주된 요소이다.[1] 다중경로 현상은

†**Corresponding author:** Ji-Won Jung (jwjung@kmou.ac.kr)
Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-Gu, Busan 49112, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4424, Fax: 82-51-404-3986)

Copyright ⓒ 2022 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

주파수 영역에서의 진폭에 대한 변화를 나타내며, 빠른 페이딩과 느린 페이딩을 가지는 선택적 주파수 페이딩을 의미하며, 이는 성능에 영향을 미치는 주된 요소로 특징된다. 또한 다중경로로 인한 채널의 대역폭은 도플러 확산과 밀접한 관계가 있으며, 도플러 확산이 작으면 주파수 페이딩이 자주 발생하지 않아 채널 대역폭이 넓어 느린 페이딩으로 되어 성능에는 영향을 주지 않으나, 도플러 확산이 넓으면, 주파수 페이딩이 자주 발생하는 빠른 페이딩이 생기며, 이는 채널 대역폭이 좁아 같은 패킷에서 서로 다른 도플러가 발생하여 도플러 추적이 어렵게 된다.[2] 이러한 도플러 확산에 따른 선택적 페이딩은 변조 신호에 대한 감쇠를 초래하므로 성능 향상을 위해 채널 부호화 알고리즘 및 변복조 방식의 선택이 매우 중요하다.

수중 음향 통신에서 적용되는 변조 방식으로는 크게 Phase Shift Keying(PSK) 방식과 주파수 변이 변조(Frequency Shift Keying, FSK) 방식으로 대두된다. 수중에서 PSK 방식은 도플러 추정 및 위상 추정 그리고 심볼 타이밍 동기 등이 필요하여 매우 복잡한 구조를 가지는 반면, 주파수 변이 변조 방식은 도플러에 강인하면서 포락선 검파를 하는 비동기 방식의 구조로 PSK 방식에 비해 비교적 단순하다.[3] 그러나 다중 주파수 대역을 가지는 주파수 변이 변조 신호는 선택적 페이딩으로 인하여 특정한 주파수에 할당된 정보 비트의 손실을 가져 올 수 있으므로 이에 대한 이득을 조절하는 알고리즘이 매우 중요하다. 대부분의 논문에서는 주파수 변이 변조 신호의 복조 과정에서 동기 방식을 적용하여 제곱을 취한 신호의 에너지를 검출하여 임계값에 따른 주파수 이득을 조절하는데,[4,5] 주파수 변이 변조 신호의 동기 복조 방식은 미세한 도플러 편이로 인하여 성능이 감소하게 된다.[6] 따라서 본 논문에서는 포락선 검파를 이용하는 비동기 방식의 4-ary 주파수 변이 변조 방식과 부호화율 1/3을 가지는 터보 부호화 방식을 적용하여 4-ary 주파수 변이 변조에 할당된 특정한 주파수에 대한 이득을 제어할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 송수신자가 서로 알고 있는 프리엠블 정보 비트를 이용하여 특정한 주파수의 이득 값에 따른 프리엠블 오류율의 변화를 보고 프리엠블 오류율이 가장 작은 이득 값을 적용하여 성능을 개선하고자 한다. 본 논문에서 제시된 성능을 분석하기 위해서 문경의 호수에서 300 m ~ 500 m의 거리를 가지는 호수 실험을 하였으며, 주파수 영역에서 중심 주파수 이득이 가장 작은 신호에 대하여 이득 값을 변화하면서 프리엠블 오류율이 가장 작은 지점의 최적 이득 값을 곱한 결과 모두 오류가 정정됨을 알 수 있다.

II. 주파수 변이 변조 신호 송수신 모델

최적의 채널 신뢰도를 추정하기 위한 터보 주파수 변이 변조 송수신 변조 방식으로 4-ary 주파수 변이 변조 방식을 사용하는 부호화율 1/3을 가지는 터보

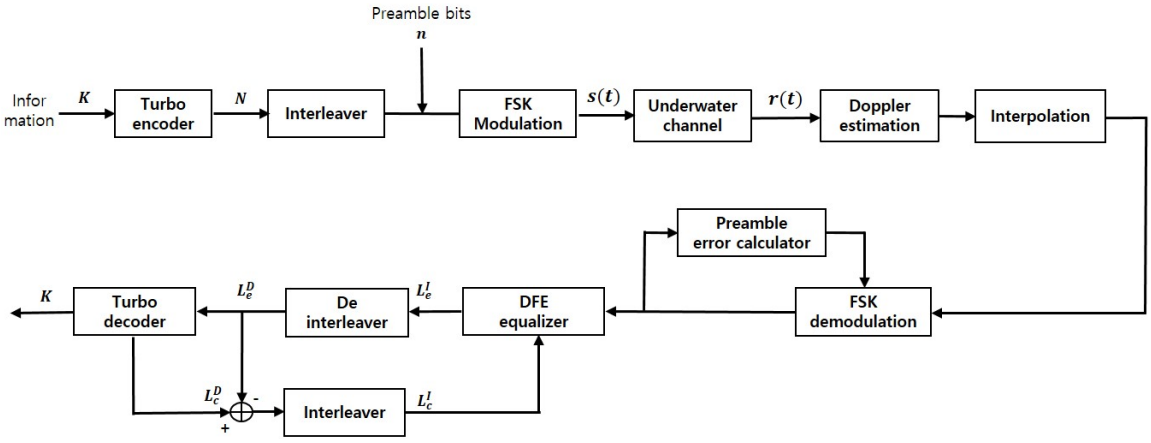


Fig. 1. Transceiver structure of FSK signals.

부호화 방식을 적용하여 4-ary 주파수 변이 변조에 할당된 특정한 주파수에 대한 이득을 제어할 수 있는 알고리즘을 위한 송수신 구조는 Fig. 1과 같다. 송신부에서 K개의 비트가 채널 부호화를 통과한 후 N개의 부호화 비트가 생성되며, 반복 부호화기를 통과한 신호는 인터리버를 거친 후에 동기 획득을 위한 n개의 프리엠블 비트와 N개의 부호화된 비트로 구성된 패킷 데이터의 비트 열은 4-ary 주파수 변이 변조를 하였으며, 각 중심 주파수에 대역통과필터(Band Pass Filter, BPF)를 통과시켜 원하는 특정 중심 주파수 대역 내의 세력만 감쇠 없이 통과된 신호들을 전송한다. 송신신호 $s(t)$는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = e^{j(2\pi f_i t)} \quad 0 \le t \le Ts \quad (i = 1,2,3,4). \tag{1}$$

f_i는 i번째 중심 주파수를 나타내며, T_s는 심볼 시간을 의미한다. 수신신호를 $r(t)$이라 하였을 때 $r(t)$는 Eq. (2)으로 나타낼 수 있다.

$$r(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_l(t) s(t-l) e^{j2\pi \triangle ft} + \eta(t). \tag{2}$$

L은 전체 다중 경로의 수를 나타내며 l은 l번째의 다중 경로를 나타낸다. $h_l(t)$는 l경로에 있는 채널 응답 계수를 나타내며 $\eta(t)$는 가우시안 잡음을 나타낸다. $\triangle f$는 도플러 주파수 편이를 나타내며, 이러한 도플러 편이가 일정하지 않을 때 도플러 확산이 발생하며, 다중 경로와 도플러 확산으로 인하여 선택적 주파수 페이딩을 야기한다. 수신된 신호는 프리엠블의 상관도를 이용하여 도플러 주파수 편이를 구하여 보간한다.[7]

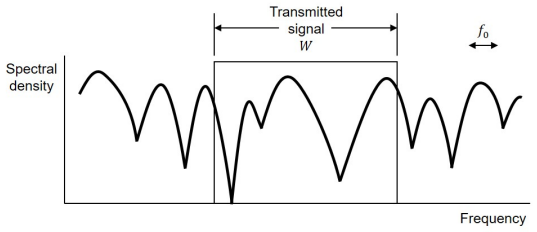
Fig. 1의 주파수 변이 변조 복조 과정에서 각 중심 주파수를 분할하기 위해 각 주파수 대역을 갖는 대역 통과 필터를 사용하여 신호를 분리하고 난 뒤, 각각의 주파수 대역에서 포락선 검파를 하여 최대의 값을 가지는 데이터를 복조한다. 터보 부호기와 결정 궤환 등화기를 연접한 반복 기반의 터보 등화기에서 복조된 데이터 열에서 프리엠블을 이용하여 다중 경로 간섭을 제거하고 원 데이터를 복호한다. 등화기의 출력 값 L_e^I는 수신 신호로부터 결정 궤환 등화기에서 추정되어진 외부의 값이다. 복호기에서 추정되어진 외부입력 값 L_c^D는 복호신호에 대한 확률 값으로써 오류를 보정하는데 사용된다. 반복을 하면서 L_c^I를 업데이트하여 오류 값을 보정한다. 반복 횟수가 늘어나면 오류 보정 값이 원 신호에 가깝게 되므로 BER 성능이 향상된다.[8]

III. 프리엠블 오류율을 이용한 주파수 이득 조절

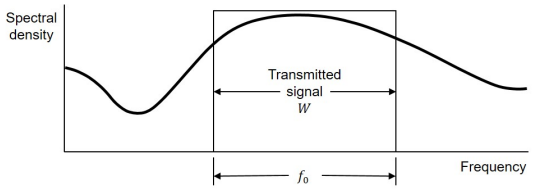
3.1 수중 채널에서 주파수 페이딩

채널 전달 특성 등의 환경이 매우 빠르게 변하는 수중음향통신 환경에서 다중 경로 페이딩 및 도플러 확산은 특정 주파수에 대한 감쇠가 일어나 성능을 저하시킬 수 있는 매우 중요한 요인이다.

Fig. 2는 다중 경로 페이딩에 의한 선택적 주파수 페이딩과 플랫 페이딩 채널을 나타낸다. 이러한 선택적 주파수 페이딩은 다중 경로의 최대 지연 시간(T_m)이 심볼 시간(T_s) 보다 클 때 발생한다. Fig. 2(a)는 채널의 대역폭(f_o)이 전송 신호의 대역폭(W) 보다 작을 때 주파수 대역에서 빠른 페이딩이 발생하며, 역으로 그림 Fig. 2(b)와 같이 채널의 대역폭이 전송신호의 대역폭 보다 클 때, 느린 페이딩 또는 플랫 페이딩이라 한다.[9]



(a) Typical frequency-selective fading case ($f_o < W$)



(b) Typical flat fading case ($f_o > W$)

Fig. 2. Frequency-selective and flat fading channel.

이러한 선택적 페이딩은 다중 주파수 대역을 가지는 주파수 변이 변조 신호에 대한 감쇠를 초래하므로 즉 이는 특정한 주파수에 할당된 정보 비트의 손실을 의미하므로 이에 대한 이득을 조절하는 알고리즘이 매우 중요하다.

3.2 프리엠블 오류율을 이용한 이득 조절

프리엠블 신호는 송수신간에 서로 알고 있는 데이터를 이용하여 동기를 획득하는 기능을 하고 있으므로 채널 부호화를 하지 않고 전송된다. 이러한 비부호화된 프리엠블 데이터는 대부분의 연구에서는 데이터 부분의 주파수 및 위상 동기를 획득하기 위해 활용되지만 다중 경로 등의 열악한 채널 환경에서는 프리엠블의 비트 수를 수십~수백 비트로 할당하므로 이의 오류율 또한 데이터 부분의 오류율과 상관성을 가지고 있으므로 비부호화 된 프리엠블의 오류율을 이용하여 데이터 부분의 오류율을 예측하여 데이터 부분의 복호부에 정보를 제공할 수 있다.

프리엠블 오류율은 터보 부호화된 데이터 성능을 예측할 수 있으며, 프리엠블 오류율과 데이터 오류율의 상관관계는 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 임의로 프리엠블을 포함한 전체 데이터의 오류율을 10 % 미만의 두 가지 경우와 10 % 이상의 세 가지 경우에 대하여

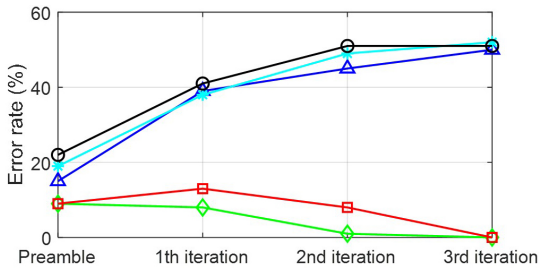


Fig. 3. (Color available online) Relation of error rates of coded data and preamble.

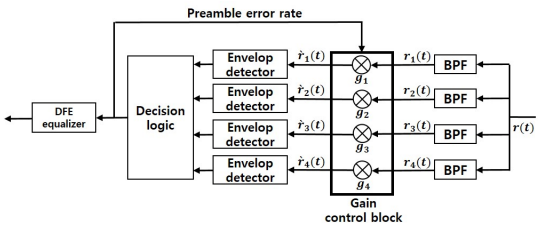


Fig. 4. The gain control block using the preamble error rate.

성능 분석을 하였다. 세로축은 패킷 전체의 오류율을 나타내며, 가로축은 이에 따른 프리엠블 오류율과 부호화율 1/3을 가지는 터보 등화 반복 횟수에 따른 데이터 오류율을 나타낸다. 프리엠블 오류율이 10 % 미만일 때 터보 등화 반복 시 데이터의 오류가 모두 정정됨을 알 수 있으며, Reference [10]에 의하면 통산적으로 프리엠블 오류율이 10 % 이내이면 터보 데이터 오류율이 완벽하게 복원이 된다. 따라서 이를 이용하여 Fig. 1의 수신부 구조에서 수신된 신호의 복조된 프리엠블 오류율을 분석하여 주파수 변이 변조 각 중심 주파수의 이득을 조절하여 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안한다. 그림 Fig. 4는 프리엠블 오류율을 이용한 주파수 이득 조절 블록도를 나타낸다.

4-ary 주파수 변이 변조 수신 신호에 때한 프리엠블 오류율을 이용하여 주파수 이득을 조절하는 절차는 아래와 같이 4단계로 나눌 수 있다.

Step 1. 중심 주파수 별 대역통과필터 통과

수신신호를 주파수 변이 변조의 각 중심 주파수 대역에서 대역통과필터를 사용하여 네 개의 신호를 분리하여 주파수 이득이 가장 낮은 i번째 대역인 f_i를 선택한다.

Step 2. 주파수 이득 비교 및 조절

가장 낮은 이득을 갖는 중심 주파수의 이득을 1부터 0.1 단위로 조정하면서 Eq. (3)과 같이 이득 g_i를 곱한다.

$$\grave{r}_i(t) = g_i r_i(t). \tag{3}$$

Step 3. 포락선 검파 복조

주파수 이득이 곱해진 각각의 신호를 포락선 검파를 하여 최대의 값을 가지는 데이터를 복조한다.

Step 4. 프리엠블 오류율 분석

프리엠블 오류율을 분석하여 오류율이 10 % 미만일 때는 등화기에 입력되며, 오류율이 10 % 이상일 때는 Step 2로 돌아가서 주파수 이득을 다시 조절하게 된다.

이러한 주파수 이득 조절 알고리즘은 도플러 확산에 따른 선택적 페이딩을 개선하고, 복조 과정 후에 더 낮은 오류를 갖는 프리엠블 정보를 이용하여 복호 오류율을 낮출 수 있다.

IV. 실험 결과

4.1 실험 환경

주파수 변이 변조 신호의 프리엠블 오류율을 이용한 주파수 이득 조절 알고리즘의 성능을 분석하기 위해서 Fig. 5와 같은 환경에서 실제 수중음향통신 실험을 수행하였다. 실험은 경북 문경의 호수에서 수행되었다.

실험 시기는 2021년 6월에 실험을 하였으며, 송수신기 사이의 거리는 실험 장소의 거리 제한으로 인하여 약 300 m ~ 500 m로 하였다. 송신기로는 Neptune 사의 D/17모델을 사용하였고, 수신기로는 TC 4032를 사용하였다. 송신기는 수면 아래 5 m, 수신기는 20 m 아래 위치하였다. 수신부는 고정된 장소이며, 송신부는 모선을 이용하여 300 m에서 500 m로 이동하면서 실험하였다.

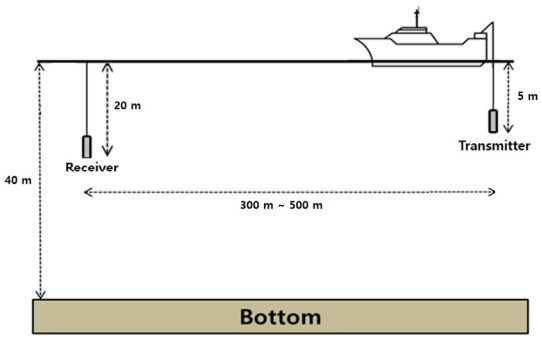


Fig. 5. (Color available online) Illustration of the lake trial.

Table 1. Parameters of experiment.

Channel coding	Turbo pi code ($K = 112$, $N = 336$)
The number of preamble bits (n)	510bits
Modulation	4-ary FSK
Center frequency	$f_1 = 15$ kHz $f_2 = 16$ kHz $f_3 = 17$ kHz $f_4 = 18$ kHz
Sampling frequency (N_s)	192 kHz
Data rate	100 bps

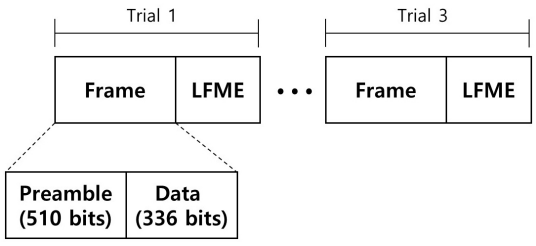


Fig. 6. Transmission packet structure.

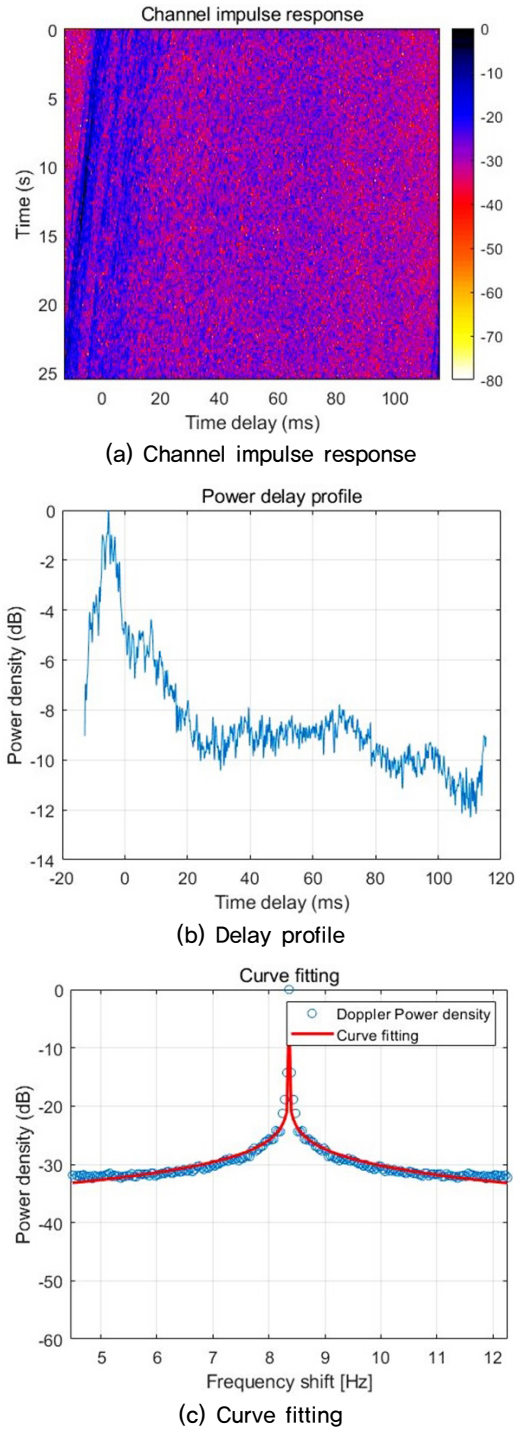
실험 파라메타는 Table 1과 같으며, 4-ary 주파수 변이 변조 반송파 주파수는 부호화된 2비트를 기준으로 하였으므로, 15 kHz를 초기 주파수로 하여, 1 kHz 차이를 두어 4개의 주파수를 할당하였다. 샘플링 주파수는 192 kHz로 하였으며, 전송율은 100 bps로 하였다. 원 데이터인 112비트를 부호화율 1/3을 가지는 터보 부호화 하여 336비트의 부호화 비트를 생성한다. 프리엠블 비트 수는 255비트의 M-시퀀스 두 개를 연접하여 510비트를 사용하였다. 두 개의 M-시퀀스를 연접한 이유는 수중에서 의 다중 경로 및 도플러 확산으로 인해 패킷 동기를 정확하게 획득하기 위함이다. 프리엠블 비트수의 결정은 상관 시간과 밀접한 관계가 있으나[11] 실험전 채널 상태를 모르기 때문에 많은 프리엠블 비트를 할당하였으며, 또한 본 논문에서 프리엠블 오류율 기반으로 주파수 이득을 제어하기 때문에 프리엠블 오류율의 정확도를 높이기 위함이다. 송신 신호는 총 3회 송신하였으며 각기 다른 시간에 전송하였다.

Fig. 6은 송신 신호의 구조이다. 프리엠블 비트와 송신 데이터, 마지막으로 신호의 끝을 나타내는 0.5초 동안의 Linear Frequency Modulation End(LFME) 신호가 하나의 패킷으로 구성되어있다.

4.2 실험 결과

Fig. 7은 호수 실험에서 측정한 전달 특성을 나타내고 있다. 측정을 위해 약 2 kHz 대역폭을 갖는 0.2 s 길이의 LFM 신호를 주기적으로 송수신 하였다. Fig. 7(a)에서 다중경로에 따른 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 수면에 반사되어지는 반사파, 그리고 바닥에서 들어오는 신호들이 있다는 것을 의미한다.

Fig. 7(b)은 수중 채널의 지연 프로파일을 나타내며, Fig. 7(a)의 아주 큰 다중 경로가 1개가 있음을 알 수 있다. 또한 LFM을 이용하여 도플러 확산을 측정한 결



(a) Channel impulse response

(b) Delay profile

(c) Curve fitting

Fig. 7. (Color available online) Underwater channel characteristic.

과 모선을 이동하면서 측정을 하였으므로, 약 8.3 Hz 정도의 도플러 편이가 발생하였으며, 도플러 확산은 약 1.5 Hz 정도가 있음을 Fig. 7(c)에서 알 수 있다.

실험에서 측정된 1.5 Hz의 도플러 확산은 아래 식

Table 2. Experiment results.

Frame number	Data BER according to number of turbo equalized iterations		
	1	3	5
Frame 1	$10^{-0.62}$	$10^{-0.65}$	$10^{-0.77}$
Frame 2	$10^{-0.69}$	$10^{-0.71}$	$10^{-0.75}$
Frame 3	$10^{-0.62}$	$10^{-0.65}$	$10^{-0.67}$

과 같이 수신기에서 모선의 이동으로 인하여 발생되는 값이며, 이는 다음 Eq. (4)과 같이 구할 수 있다.

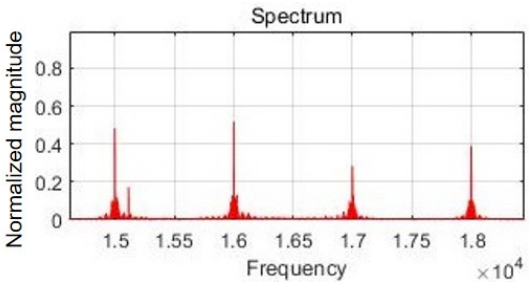
$$f_d = f_i \frac{v}{c}, \tag{4}$$

여기서 c는 음파 속도인 1500 m/s이며, v는 모선의 이동 속도이다. 위의 식에서 도플러 확산이 1.5 Hz 임을 감안하며 바람에 의한 모선의 이동 속도는 약 0.24 knot ~ 0.29 knot 정도 됨을 예상할 수 있다. 본 논문에서 도플러 확산에 따른 도플러 추정 방식은 기저 대역에서 도플러를 추정하는 PSK 방식과는 달리 주파수 변이 변조 방식은 수신 신호와 송수신자가 서로 알고 있는 프리엠블 신호의 상관도를 이용하여 추정한다. 채널 대역폭에서 여러 주파수 편차를 가지는 프리엠블 신호의 뱅크를 만들어[12] 최고 피크치를 가지는 도플러 편이 값을 추정한다.

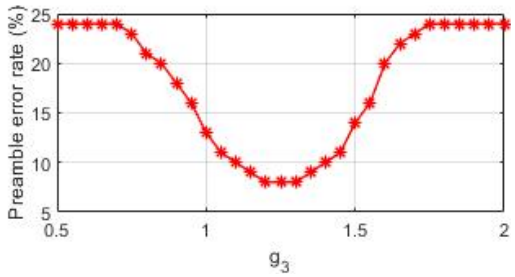
Table 2는 수신된 3개의 프레임을 터보 등화기 반복 횟수에 따라 성능 분석한 결과이다. 본 논문에서는 성능 향상을 위해 터보 등화 반복 횟수를 5회로 고정시키고, 도플러 효과에 강인한 대역 통과 필터 후 포락선 검파를 하는 복조기로 구성을 고정하여 성능 향상을 분석하였다. 각 프레임은 일정한 시간 간격 및 이동하면서 측정한 결과이므로 주파수 대역의 이득이 차이가 있음을 알 수 있다. 3개의 프레임 모두 터보 등화기 반복 횟수가 5회임에도 오류를 정정하지 못하였다.

따라서 3.3장에서 제시한 프리엠블 오류율을 분석하여 주파수 변이 변조 각 중심 주파수의 이득을 조절하는 알고리즘을 적용하기 위해 프레임 신호의 주파수 스펙트럼과 중심 주파수의 이득에 따른 프리엠블 오류율 그래프를 Figs. 8 ~ 10에 나타내었다.

Fig. 8에서 Fig. 10은 1 ~ 3번째 프레임 신호의 주파

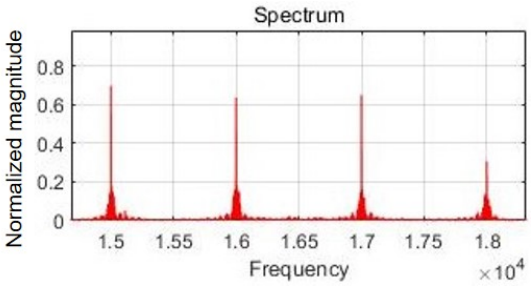


(a) Frequency domain

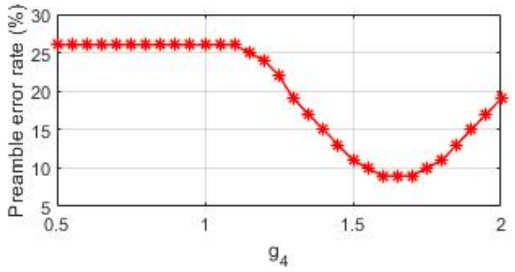


(b) Preamble error rate according to g_3 ($g_1 = g_2 = g_4 = 1$)

Fig. 8. (Color available online) Experimental results of frame 1.

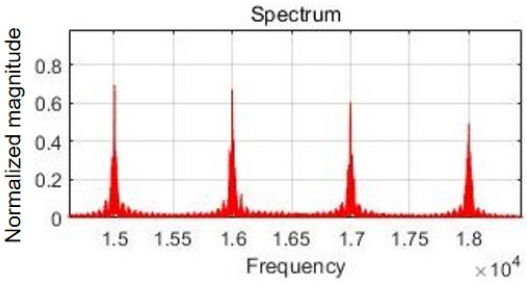


(a) Frequency domain

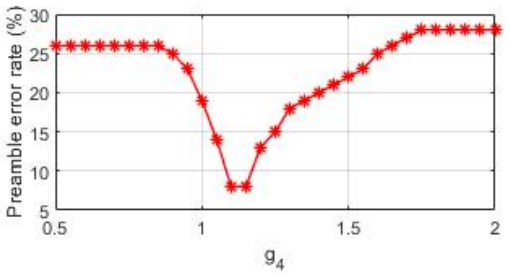


(b) Preamble error rate according to g_4 ($g_1 = g_2 = g_3 = 1$)

Fig. 9. (Color available online) Experimental results of frame 2.



(a) Frequency domain



(b) Preamble error rate according to g_4 ($g_1 = g_2 = g_3 = 1$)

Fig. 10. (Color available online) Experimental results of frame 3.

Table 3. Experiment results for difference frequency gain according to number of turbo equalized iterations.

Frame number	Frequency gain	Optimal values	% of Preamble error rate	Data BER according to number of turbo equalized iterations		
				1	3	5
Frame 1	g_1	1	8 %	$10^{-1.57}$	0	0
	g_2	1				
	g_3	1.25				
	g_4	1				
Frame 2	g_1	1	9 %	$10^{-0.94}$	$10^{-2.05}$	0
	g_2	1				
	g_3	1				
	g_4	1.65				
Frame 3	g_1	1	8 %	0	0	0
	g_2	1				
	g_3	1				
	g_4	1.1				

수 스펙트럼 및 제일 진폭이 낮은 주파수 이득에 따른 프리엠블 오류율을 나타낸다. Fig. 8(b)의 결과에서 4개의 이득 중 f_3에 해당하는 주파수 이득이 가장 낮으므로 3개의 주파수 이득은 1로 고정하고 g_3를 변화 하면서 프리엠블 오류율을 분석한 결과 g_3가 [1.1 ~ 1.4]의 범위에 있으면, 프리엠블 오류율이 10 % 이하인 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 Fig. 9(b)의 결과에서 g_4가 [1.55 ~ 1.75]의 범위에 있는 경우와 Fig. 10(b)의

결과에서 g_4가 [1.1 ~ 1.15]의 범위에 있는 경우, 프리엠블 오류율이 10 % 이하인 것을 확인할 수 있다.

Table 3은 가장 프리엠블 오류율이 낮은 주파수의 이득을 가중치 값으로 적용하였을 때의 터보 등화 반복 횟수에 따른 성능 결과이다. Table 3에서 알 수 있듯이 Table 2의 복호하지 못한 프레임에 대하여 이득이 가장 작은 주파수에 대해 최적의 주파수 이득을 곱함으로써 터보 등화 반복 횟수가 증가함에 따라 완벽하게 복원됨을 알 수 있다.

V. 결 론

수중 통신에서 직접파와 더불어 해수면과 해저 면의 반사 등으로 인한 다중 경로 현상, 수중에서의 이동체에 대한 도플러 확산 등은 선택적 주파수 페이딩이 발생한다. 본 논문에서는 다중 주파수 대역을 가지는 주파수 변이 변조 신호는 선택적 페이딩으로 인하여 특정한 주파수에 할당된 정보 비트의 손실을 가져 올 수 있으므로 프리엠블 오류율 기반으로 각 중심 주파수의 이득을 조절하는 알고리즘을 제안하였다. 프리엠블 오류율은 터보 부호화된 데이터 오류율의 성능을 예측하는 기준이 되므로 프리엠블의 오류율이 가장 낮은 주파수 이득을 곱함으로써 성능을 개선할 수 있다. 본 논문에서 제시된 성능을 분석하기 위해서 문경의 호수에서 300 m ~ 500 m의 거리를 가지는 호수 실험을 하였으며, 주파수 영역에서 중심 주파수 이득이 가장 작은 신호에 대하여 이득 값을 변화하면서 프리엠블 오류율이 가장 작은 지점의 최적 이득 값을 곱한 결과 모두 오류가 정정됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 프리엠블 오류율을 이용한 주파수 변이 변조 신호의 주파수 이득을 추정하는 알고리즘은 수중 통신 환경에서 효율적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 향후 제안한 알고리즘을 100 km 이상의 장거리 실험에 적용하여 성능 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원(과제번호: UD200002DD)으로 수행되었습니다.

References

1. P. V. Walree, “Channel sounding for acoustic communications: techniques and shallow-water examples,” Norwegian Defence Research Establishment, Tech. Rep., 2011.
2. B. Sklar, “Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems Part I: Characterization,” IEEE Communications Magazine, **35**, 136-146 (1997).
3. B. Natarajan, C. R. Nassar, and S. Shattil, “Novel multi-carrier implementation of FSK for bandwidth efficient, high performance wireless systems,” Proc. ICC. 872-876 (2002).
4. S. Kolev, B. Nenova, and I. Ivanov, “Automatic gain control in an underwater acoustic receiver,” International Scientific Journals, section: technical facilities for ensuring security, **5**, 112-114 (2021).
5. J.-W. Park, Y.-C. Choi, Y.-K. Lim, and Y.-K. Kim, “A digital acoustic transceiver for underwater acoustic communication” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **24**, 109-114 (2005).
6. H.-W. Jeong, J.-E. Shin, and J.-W. Jung, “Analysis of transceiver structure and experimental results of underwater acoustic communication using the sub-band” (in Korean), JKIECT. **13**, 545-555 (2020).
7. F. Liu, Q. He, F. Kong, and Y. Liu, “Doppler effect reduction based on time-domain interpolation resampling for wayside acoustic defective bearing detector system,” Mechanical Systems and Signal Processing, **46**, 253-271 (2014).
8. J.-W. Jung, “Performance analysis of turbo equalizer in the multipath channel” (in Korean), JKIECT. **5**, 169-173 (2012).
9. H. R. Sarraj, “LMS and RLS adaptive equalizers in frequency-selective fading channel,” Proc. ICST. 115-118 (2019).
10. B. Natarajan, C. R. Nassar, and S. Shattil, “An efficient receiver structure based on pn performance in underwater acoustic communications” (in Korean), J . Navig. Part. Res. **41**, 173-180 (2017).
11. T. C. Yang, “Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water,” J. Acoust. Soc. Am. **120**, 2595-2612 (2006).
12. J.-H. Lee, G.-H. Lee, J.-H. An, K.-M. Kim, M.-S. Han, and S.-Y. Kim, “Signal synchronization method for depth information transmission of high-speed underwater vehicle” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **39**, 69-76 (2020).

저자 약력

▸ 정 현 우 (Hyun-Woo Jeong)

2020년 8월 : 한국해양대학교 전파공학과 학사
2020년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
2022년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 박사 과정
<관심분야> 위성통신, 수중통신, 채널 코딩

▸ 정 지 원 (Ji-Won Jung)

1995년 2월 : 성균관대학교 통신공학과 공학박사
1991년 ~ 1992년 : LG 정보통신 연구소 연구원
1995년 ~ 1996년 : 한국통신 위성통신연구실 선임연구원
1997년 ~ 1998년 : 한국전자 통신연구원 위성단 초빙연구원
2001년 ~ 2002년 : 캐나다 CRC(Communication Research Center) NSERC Fellowship(국외 초청연구원)
1996년 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학전공 교수
<관심분야> 위성통신, 수중통신, 채널 부호화 및 모뎀, FPGA 설계

▸ 김 완 진 (Wan-Jin Kim)

2005년 2월 : 부산대학교 전자전기 통신공학부 공학사 취득
2007년 2월 : 부산대학교 전자공학과 공학석사 취득
2011년 8월 : 부산대학교 전자공학과 공학박사 취득
2011년 11월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원