

유전자 알고리즘을 이용한 결정 궤환 등화기의 탭 길이가 최적화

손지홍 · 김기만*

Tap-length Optimization of Decision Feedback Equalizer Using Genetic Algorithm

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, 일반적으로 이러한 문제점을 극복하기 위해 등화기가 적용된다. 본 논문에서는 결정 궤환 등화기의 탭 길이를 유전자 알고리즘을 통해 최적화하는 방법을 제안하였다. 유전자 알고리즘의 유전 정보를 전방향 필터와 후방향 필터의 길이로 입력받은 후, 목적함수에 따라 훈련 신호 구간에서의 BER(bit error rate)을 계산하여 필터 길이를 최적화한다. 목적함수는 결정 궤환 등화기, BER 계산으로 설정되었다. 실험 결과, 수신 25 m에 배치된 수신기에 수신된 신호에 훈련 신호만을 이용하였을 때, BER이 0.0355로 나타났다. 모든 데이터를 목적함수 내의 BER 계산에 이용하였을 때, BER이 0.0215로 나타났다.

ABSTRACT

In the underwater acoustic communication channels, multipath reflection become the cause of obstacle. Generally, equalizer has been applied to overcome these problems. In this paper, the method was proposed to optimize tap-length of decision feedback equalizer using genetic algorithm. After inputting feed-forward filter length and feed-back filter length as genetic information of the genetic algorithm, it optimize tap-length using BER(bit error rate) calculation in accordance with object function. The object function consist of decision feedback equalizer and BER calculation. For the purpose of BER calculation in the object function, the method was proposed to optimize the tap-length of decision feedback equalizer with genetic algorithm using preamble signals. As a result of experiments, the optimized BER is 0.0355 for signals which were received through a 25m receiver and which were applied to calculate BER merely using preamble signals in object function. When all data were used to calculate BER in object function, the optimized BER is 0.0215.

키워드 : 결정 궤환 등화기, 유전자 알고리즘, 최적화, 수중음향통신

Key word : Decision Feedback Equalizer, Genetic Algorithm, Optimization, Underwater Acoustic Communication

Received 23 April 2015, Revised 14 May 2015, Accepted 29 May 2015

* 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.2015.19.8.1765>

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

일반적으로 다중 경로 전달로 인한 심볼 간 간섭 현상이 매우 심각한 수중음향통신 채널과 같은 주파수 선택적 채널에서 신호의 복구를 위해 등화기가 사용된다. 등화기는 선형 등화기와 비선형 등화기 두 가지로 분류할 수 있는데 이 가운데 결정 궤환 등화기는 비선형 등화기로서 일반적으로 선형 등화기보다 성능이 뛰어나다. 하지만 등화기의 성능은 탭 길이에 영향을 많이 받는데, 결정 궤환 등화기가 올바르게 동작하기 위해서는 전방향 필터(feed forward filter)와 후방향 필터(feed back filter)의 탭 길이를 적절하게 설정해야 한다.

등화기의 탭 길이 최적화를 위해 초기 백색화기(pre-whitener)를 등화기 앞에 두어 탭 길이를 최적화하는 연구가 진행되었다[1]. 본 논문에서는 결정 궤환 등화기의 탭 길이를 최적화하기 위해서 유전자 알고리즘에 기반한 방법을 제안하였다. 전방향 필터와 후방향 필터의 길이는 유전자 알고리즘에서 유전 정보로 취급된다. 유전자 알고리즘은 전방향 필터와 후방향 필터의 길이를 사용하여 무작위 교배(random cross-over) 방법을 통해 동작한다. 목적함수는 RLS (recursive least square) 알고리즘으로 동작하는 결정 궤환 등화기와 BER(bit error rate) 계산으로 구성된다. 위와 같은 목적함수로 유전자 알고리즘을 시행하여 수중음향통신 채널에 적합한 결정 궤환 등화기의 최적의 탭 길이를 추정하였다.

실제 통신에서는 훈련 심볼만을 이용해야 되기 때문에, 본 논문에서는 목적함수에서 BER을 계산하는 데 사용되는 신호를 훈련 심볼과 전송된 데이터 모두 사용하는 경우와 훈련 심볼만 이용하는 경우, 두 가지로 최적화 성능을 비교 분석하였다.

II. 결정 궤환 등화기의 탭 길이 최적화

2.1. 결정 궤환 등화기

일반적으로 비선형 등화기는 선형 등화기보다 더 좋은 성능을 갖는 것으로 알려져 있다[2,3]. 결정 궤환 등화기는 전형적인 비선형 등화기로서, 과거의 심볼 출력을 현재의 심볼 계산에 사용한다. 그림 1에서 등화기 입력은 전방향 필터 부분에 연결되어 있고, 출력은 후방향 필터에 연결되어있다[4,5].

등화기의 계수를 갱신하기 위해서 RLS 알고리즘과 같은 적응 알고리즘을 사용할 수 있다[6]. 등화기 출력 심볼 $y(n)$ 은 전방향 필터 출력 값에서 후방향 필터 출력 값의 차로 표현된다. 이 때 전방향 필터와 후방향 필터 탭 길이에 따라 성능이 불규칙적으로 나타난다[7-9]. 따라서 전방향 필터와 후방향 필터 탭 길이의 조정은 매우 중요하다.

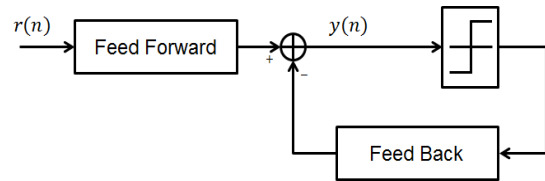


그림 1. 결정 궤환 등화기
Fig. 1 Decision Feedback Equalizer

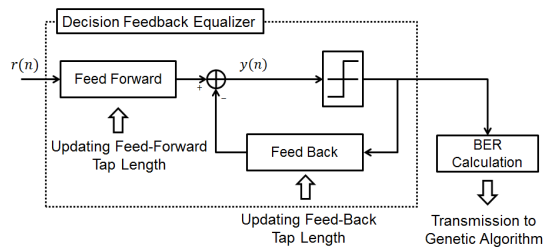


그림 2. 목적 함수
Fig. 2 Object Function

2.2. 유전자 알고리즘을 통한 탭 길이 최적화

유전자 알고리즘은 함수의 상태를 최신허하기 위해 어떠한 계수나 값을 최적화하는 기술이다[10-12]. 본 논문에서는 이 유전자 알고리즘을 결정 궤환 등화기의 탭 길이 최적화에 적용하는 방법을 제안하였다. 제안한 유전자 알고리즘을 시행하기 위해서 다음과 같은 과정이 처리된다. 첫 번째, 한 세대가 시작될 때, 무작위로 유전 정보를 지닌 여러 개체를 만들어야 한다. 여기서 세대는 개체들의 묶음을 의미한다. 이 때, 무작위로 생성된 유전 정보로 사용되는 정수 값은 전방향 필터와 후방향 필터 길이이다. 두 번째, 목적함수를 구성한다. 목적함수는 결정 궤환 등화기와 BER 계산 과정으로 구성된다. 유전자 알고리즘에서 생성된 유전 정보를 결정 궤환 등화기의 전방향 필터와 후방향 필터의 길이로 사용하여 목적함수를 통해 BER을 계산한다.

목적함수 부분을 수식으로 표현하면 다음과 같다. $r(n)$ 은 수신된 심볼, $y(n)$ 은 등화기 출력,, $w_f(k)$ 는 전방향 필터, $w_b(k)$ 는 후방향 필터이고, $d(n)$ 은 경관정 후 심볼 값이라 할 때 $y(n)$ 은 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{k=1}^{N_f} w_f^*(k) r(n-k+1) - \sum_{k=1}^{N_b} w_b^*(k) d(n-k) \quad (1)$$

여기서 N_f 는 전방향 필터 탭 길이, N_b 는 후방향 필터 탭 길이이다. 탭 길이는 각 세대마다 개체별로 교배 과정 후 나온 수를 이용하여 갱신한다. 식 (1)을 행렬로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = W_f^H R_n - W_b^H D_n = W_k^H X_n \quad (2)$$

$$W_f = [w_f(1), w_f(2), \dots, w_f(N_f)]^T \quad (3)$$

$$W_b = [w_b(1), w_b(2), \dots, w_b(N_b)]^T \quad (4)$$

$$W_k = [W_f, W_b]^T \quad (5)$$

$$R_n = [r(n), r(n+1), \dots, r(n+N_f-1)]^T \quad (6)$$

$$D_n = [d(n-1), d(n-2), \dots, d(n-N_b)]^T \quad (7)$$

$$X_n = [r(n), r(n+1), \dots, r(n+N_f), d(n-1), \dots, d(n-N_b)]^T = [R_n, D_n]^T \quad (8)$$

여기서 W_f 와 W_b 는 각각 순방향 필터와 역방향 필터의 계수이다. X_n 는 수신신호 벡터 R_n 와 경관정 후 심볼 벡터 D_n 를 연결하여 만든 열벡터이다. N 은 전송된 심볼의 길이이다.

$$e(n) = |s(n) - \hat{d}(n)| \quad (9)$$

$$BER = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(n) \quad (10)$$

식 (9)의 $\hat{d}(n)$ 는 경관정 이후 심볼을 비트로 바꾼 값이다. 즉, 수신된 비트로 송신 비트 $s(n)$ 와 비교하여 비트 오류를 측정한다. 한 세대의 각 개체마다 BER을 평가하여 성능이 좋은 순으로 정렬하여 성능이 좋지 않은 개체의 절반을 제거한다. 다음 세대로 넘어가기 전에 빈자리를 채우기 위해 무작위로 새로운 개체를 생성한

다. 그리고 다음 세대를 위해 개체들을 교배시키게 되는데 이를 위해서 유전 정보를 이진수로 변형해야 한다. 본 논문에서는 무작위 지점 선정 교배 방법을 사용하였다. 예를 들어, 유전 정보가 최대 2^7 인 개체가 교배를 하는데 무작위 지점이 4가 나왔다고 가정하자. 아래 그림과 같은 교배 방법을 통해 다음 세대를 생성한다. 다음 세대가 생성되고, 이진수를 다시 십진수로 변환하여 유전정보로 사용한다.

Ancestor 1	1	0	1	0	1	0	1
Ancestor 2	1	1	1	0	0	0	0

↓ Cross-over

Descendant 1	1	1	1	0	1	0	1
Descendant 2	1	0	1	0	0	0	0

그림 3. 지점 선정 후 교배

Fig. 3 Cross-over after Selecting Point

Ancestor 1	1	0	1	0	1	0	1
Ancestor 2	1	1	1	0	0	0	0

↓ Cross-over

Descendant 1	1	1	1	0	1	0	1
Descendant 2	1	0	1	0	0	0	0

↓ Reversal

Descendant 1	1	0	1	0	1	1	1
Descendant 2	0	0	0	0	1	0	1

그림 4. 지점 선정 후 교배와 역배치

Fig. 4 Cross-over and Reversal after Selecting Point

세대가 거치면서 진화하는 도중에 최적화 상태가 아닌 방향으로 진화하는 경우를 방지하기 위해 낮은 확률로 돌연변이가 발생하도록 설정한다. 이진수 유전 정보의 임의 지점에서 돌연변이가 발생하였을 때, 그 지점이 만약 '1'이라면 '0'으로 변화하고, 만약 '0'이라면 '1'로 보수 관계로 돌연변이가 발생하도록 둔다.

유전자 개체 다양성을 유지하기 위해서 동일한 성능을 지닌 유전 정보를 지는 개체를 삭제하는 중복성 검사를 시행한다. 다양한 유전 정보를 지닌 개체가 많을 수록 최적화 상태에 빠르게 도달할 수 있다.

III. 실험 결과

유전자 알고리즘을 적용한 결정 궤환 등화기를 포함하는 수중음향통신 시스템의 성능을 분석하였다. 본 실험에서 데이터는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 변조되었으며, 비트 전송률은 1 kbps로 하였다. 반송 주파수는 16 kHz로 하였으며, 샘플링 주파수는 192 kHz로 하였다. 패킷은 512개의 M 시퀀스가 사용된 훈련 구간과 2,000개의 비트로 구성된 데이터 구간으로 구성되었다. 실험은 2015년 3월 송신기 1개, 수신기 2개로 진행되었다. 호수의 수심은 약 40 m였으며, 송신기의 수심은 4 m, 수신기의 수심은 15 m와 25 m로 하였다. 송수신기 간의 거리는 약 340 m로 하였으나 고정되지 않았다. 송신기는 ITC-1001 모델, 수신기는 B&K 8106 모델을 사용하였으며, 전력 증폭기는 B&K 2713 모델을 사용하였다.

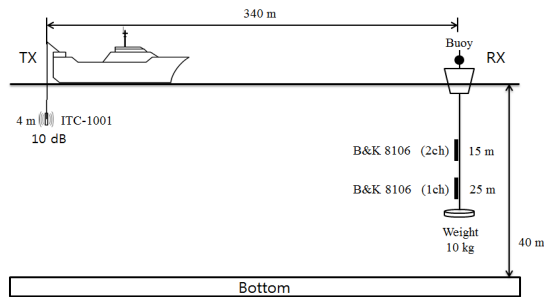


그림 5. 실험 구성도
Fig. 5 Experimental Setup

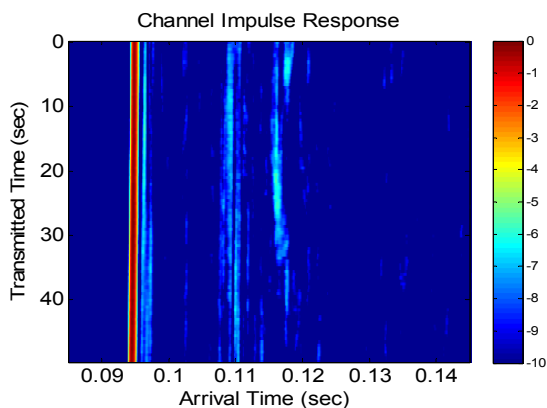


그림 6. 채널 응답 특성 25 m (1ch)
Fig. 6 Channel Impulse Response 25 m (1ch)

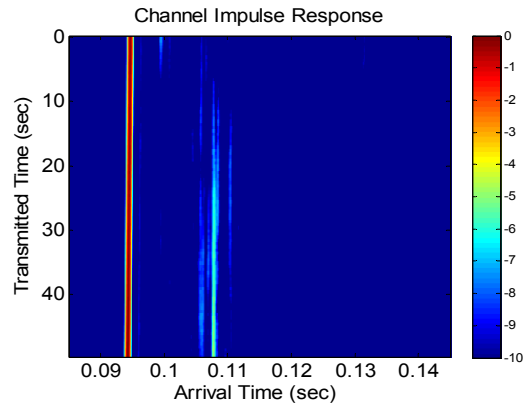


그림 7. 채널 응답 특성 15 m (2ch)
Fig. 7 Channel Impulse Response 15 m (2ch)

그림 6과 7은 선형 주파수 변조된 신호를 주기적으로 반복 전송하여 획득한 신호를 이용하여 추정된 채널 응답 특성이다. 그림 6은 25 m 수신기(1 ch)의 채널 응답 특성이고, 그림 7은 15 m 수신기(2 ch)의 채널 응답 특성이다.

그림 6은 가장 먼저 도달되는 직접파와 약 0.015초 후에 호수 바닥면에 의한 반사파와 약 0.023초 후에 호수 수면에 의한 반사파가 수신되는 것을 알 수 있다. 실험 당시 호수 수면에 얇은 조각난 얼음이 형성되어있어 수면 얼음에 의한 반사파는 산란되어 수신되는 것을 볼 수 있다. 그리고 2ch의 경우, 수면에 의한 반사파는 수신되지 않고 바닥면에 의한 반사파만 수신되는 것을 알 수 있다.

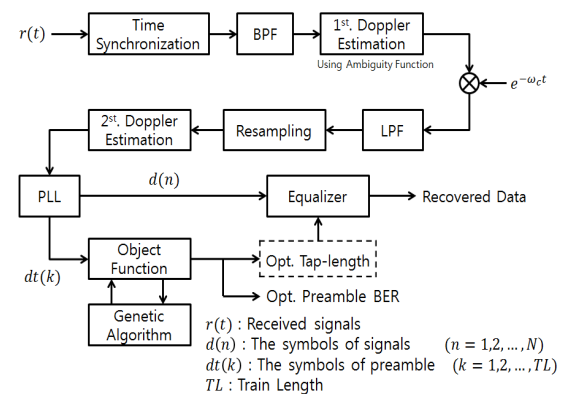


그림 8. 수신기 구조
Fig. 8 Receiver schemes

수신된 QPSK 신호는 그림 8과 같은 수신기 구조로 처리되었다. 수신기는 신호의 동기화와 도플러 주파수 추정 및 보상[13,14] 과정 등으로 구성되었다. PLL (phase locked loop)은 위상 동기 루프이다.

목적함수를 이용하여 BER 분석을 할 때, 훈련 신호만을 이용하여 목적함수 내에서 BER을 계산하여 제안한 유전자 알고리즘을 시행하였다. 훈련 신호 구간 동안의 최적화된 결정 궤환 등화기의 탭 길이를 적용하여, 데이터 신호를 복구하였다. 수신된 신호에 유전자 알고리즘을 적용하기 위해 알고리즘 시행 총 세대 수는 30세대, 세대 당 개체 수는 10개체, 유전 정보는 최대 2^6 으로 고정하였다. 1ch로 입력된 신호의 SNR(signal to noise ratio)은 약 7.2 dB, 2ch로 입력된 신호의 SNR은 약 10.3 dB로 1ch이 2ch에 비해 다중 경로 전달 신호와 잡음이 많이 첨가된 것으로 측정되었다.

그림 9는 1ch 신호에 탭 길이를 최적화하지 않고, 임의의 값을 탭 길이로 선정하여 등화기의 출력 값을 정상도로 나타낸 것이며, 그림 10은 1ch 신호에 유전자 알고리즘을 이용하여 탭 길이를 최적화된 등화기의 출력 값을 정상도로 나타낸 것이다.

그림 9는 그림 10에 비해 정상도가 많이 퍼져 있는 것을 알 수 있고, 그림 10은 그림 9에 비해 정상도가 모여 있는 것을 알 수 있다. 그림 11은 2ch 신호에 탭 길이를 최적화하지 않은 등화기 출력 값의 정상도이다. 그림 12와 비교하였을 때, 그림 12에 비해 정상도가 퍼져 있는 것을 알 수 있다.

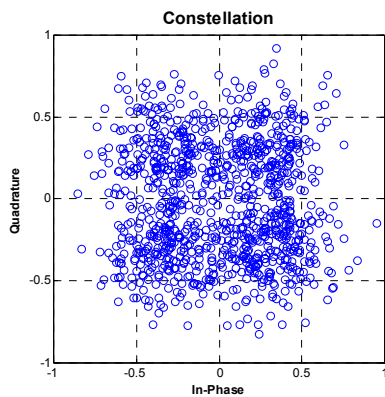


그림 9. 최적화 되지 않은 등화기의 정상도 (1ch)
Fig. 9 Constellation of the non-optimized equalizer

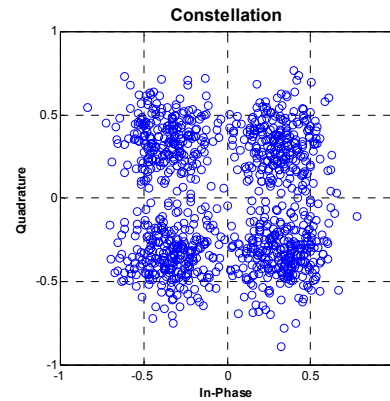


그림 10. 최적화 된 등화기의 정상도 (1ch)
Fig. 10 Constellation of the optimized equalizer

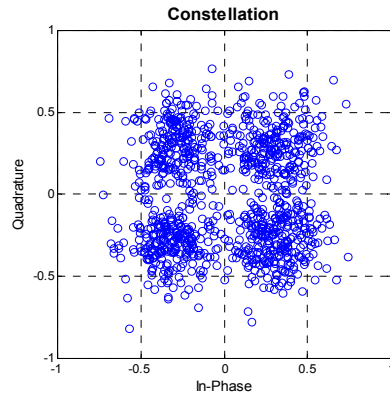


그림 11. 최적화 되지 않은 등화기의 정상도 (2ch)
Fig. 11 Constellation of the non-optimized equalizer

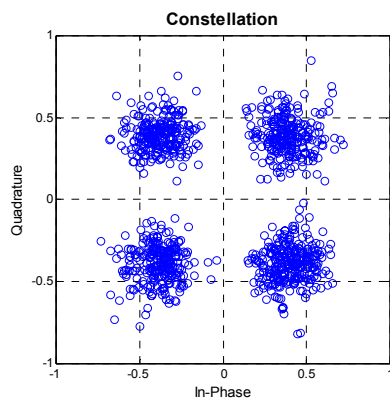


그림 12. 최적화 된 등화기의 정상도 (2ch)
Fig. 12 Constellation of the optimized equalizer

그림 13과 그림 14는 1부터 2⁶까지 전방향 필터와 후방향 필터의 탭 길이를 두었을 때, BER 결과 그림이다. 흰색일수록 낮은 BER을 가지며, 검정색일수록 높은 BER을 지닌다. 그림 13은 1ch의 신호의 BER그림이다. 1ch은 전방향필터는 3~10, 후방향필터는 30~40에서 낮은 BER을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 14는 2ch의 신호의 BER그림이다. 2ch 신호는 1ch 신호에 비해 낮은 BER 영역이 보다 광범위하게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 전방향 필터는 거의 모든 부분에서 낮은 BER을 지닌 것을 알 수 있으나, 12~14구간에서는 후방향필터가 50이상일 되었을 때, 높은 BER이 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 전방향 필터가 30이상일 때, 후방향필터가 30이상이면 높은 BER이 나타나는 것을 알 수 있다.

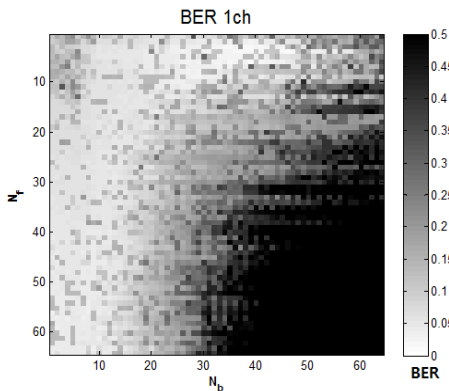


그림 13. 탭 길이에 따른 1ch BER
Fig. 13 1ch BER in accordance with tap-length

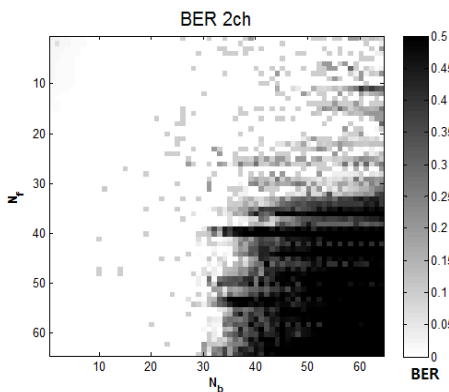


그림 14. 탭 길이에 따른 2ch BER
Fig. 14 2ch BER in accordance with tap-length

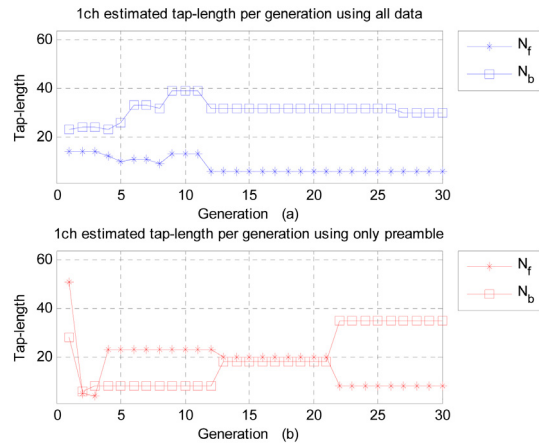


그림 15. 유전자 알고리즘 세대 당 1ch 탭 길이
Fig. 15 Tap-length per generation of GA (1ch)

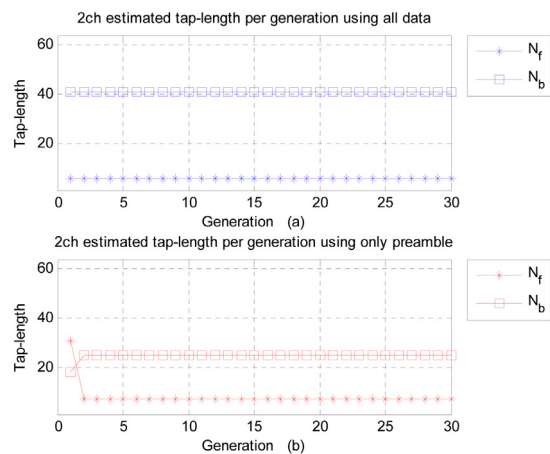


그림 16. 유전자 알고리즘 세대 당 2ch 탭 길이
Fig. 16 Tap-length per generation of GA (2ch)

그림 15는 1ch의 신호를 유전자 알고리즘을 적용하여 출력된 전방향 필터와 후방향 필터의 탭 길이이다. 그림 15-(a)는 목적함수에서 BER분석을 위해 훈련 심볼과 전송된 심볼을 모두 사용했을 경우이다. 12세대부터 수렴하여 27세대에서 전방향 필터의 탭 길이는 6, 후방향 필터의 탭 길이는 30으로 낮은 BER 영역으로 수렴된 것을 알 수 있다. 그림 15-(b)는 목적함수에서 BER 분석을 위해 훈련 신호만을 사용했을 경우이다. 세대 초반에는 탭 길이 변동성이 크나, 22세대부터 수렴하여 전방향 필터의 탭 길이는 8, 후방향 필터의 탭 길이는 35로 낮은 BER 영역으로 수렴된 것을 알 수 있다.

그림 16은 2ch 신호를 유전자 알고리즘을 적용하여 출력된 전방향 필터와 후방향 필터의 길이이다. 그림 16-(a)는 목적함수에서 BER분석을 위해 훈련 심볼과 전송된 심볼을 모두 사용했을 경우이다. 첫 세대부터 수렴하여 전방향 필터의 탭 길이는 6, 후방향 필터의 탭 길이는 41로 고정되었다. 그림 16-(b)는 목적함수에서 BER분석을 위해 훈련 신호만을 사용했을 경우이다. 첫 세대에 변동이 약간 있으나 2세대부터 수렴하여 전방향 필터의 탭 길이는 7, 후방향 필터의 탭 길이는 25로 낮은 BER영역으로 수렴되었다.

유전자 알고리즘을 적용하여 BER을 분석한 결과, 세대 별로 BER이 그림 17과 같이 나타났다. 1ch 신호에 훈련 신호만 적용했을 때, BER이 0.0355로 수렴하였다. 1ch 신호에 모든 데이터를 적용했을 때, BER이 0.0215로 수렴하였다. 1ch의 경우 훈련 신호만 적용했을 때, 모든 데이터를 사용한 것에 비해 다소 부정확한 최적화 성능이 나타났다. 2ch의 경우 왜곡이 거의 없어 훈련 신호만 적용했을 때, BER이 10^{-4} 로 수렴하였다. 2ch 신호에 모든 데이터를 적용했을 때, 첫 세대부터 BER이 0으로 수렴하여 나타났다.

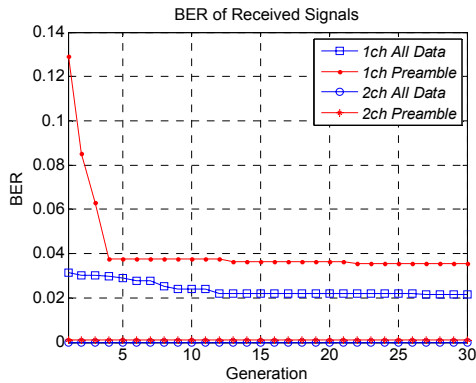


그림 17. BER 분석
Fig. 17 BER Analysis

위와 같은 사실로부터 훈련 심볼만을 이용하여 유전자 알고리즘에 적용했을 때, 훈련 심볼 구간만 이용하여 최적화한 것이기 때문에 모든 신호를 이용했을 때보다 부정확하다. 그러나 심볼 길이가 짧아 계산량이 적고, 모든 데이터를 적용하여 유전자 알고리즘을 시행했을 때와 유사한 최적화 성능이 나타난다.

IV. 결론

수중음향통신 채널에서 결정 궤환 등화기의 전방향 필터와 후방향 필터의 길이를 결정하기 위한 유전자 알고리즘을 제안하였다. 유전자 알고리즘의 유전 정보를 등화기의 전방향 필터와 후방향 필터로 설정하고, 목적함수로는 등화기와 BER 계산 부분을 두었다. 목적함수에서 BER을 계산하기 위해 훈련 심볼과 전송된 심볼 모두 이용하는 경우와 훈련 심볼만을 이용하는 경우의 두 가지 최적화 성능을 분석하였다. 호수실험 결과, 훈련 심볼만 이용하여 유전자 알고리즘을 시행했을 때, 훈련 심볼과 전송된 심볼 모두 사용했을 때와 비슷한 성능이 나타났다.

향후 연구 내용으로 보다 정확한 최적화를 위해 채널에 따른 훈련 신호 길이를 결정하는 방법 등에 대한 연구가 필요하다. 아울러 해상 실험을 통한 성능 분석에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Yu Gong, Colin F.N. Cowan, and Jian Chen, "An Adaptive Linear Equalizer with Optimum Filter Length and Decision Delay," *7th International Conference on Mathematics in Signal Processing*, Sept. 2006.
- [2] Amit Agarwal, S. N. Sur and R. Bera, "Linear vs Non Linear Equalizer In Different Channel Condition," *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER) E-ICETT 2014, 3rd International e-Conference*, 2014.
- [3] C. Belfore and J. Park, "Decision Feedback Equalization," *Proceeding of The IEEE*, vol. 67, no. 8, pp. 1143-1156, Aug. 1979.
- [4] Amit Agarwal, S. N. Sur, Arun Kumar Singh, Hemanth Gurung, Abhishek Kumar Gupta and R. Bera, "Performance Analysis of Linear and Non-Linear Equalizer in Rician Channel," *C3IT-2012*, vol. 4, pp. 687-691, 2012.
- [5] Inkyu Lee, John M. Cioffi, "A Fast Computation Algorithm for the Decision Feedback Equalizer," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 11, pp. 2742-2749, Nov. 1995.
- [6] Weihua Zhuang, "RLS Algorithm with Variable Forgetting Factor for Decision Feedback Equalizer over Time-Variant Fading Channels," *Wireless Personal Communications*, vol.

- 8, pp. 15-29, Aug. 1998.
- [7] Yu Gong, Xia Hong and Khalid F. Abu-Salim, "Adaptive MMSE Equalizer with Optimum Tap-length and Decision Delay," *IEEE Sensor Signal Processing for Defence*, pp.1-5, Sept. 2010.
- [8] Yu Gong and Colin F. N. Cowan, "Optimum Decision Delay of the Finite-Length DFE," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 11, no. 11, pp. 858-861, Nov. 2004.
- [9] Paul A. Voois, Inkyu Lee and John M. Cioffi, "The Effect of Decision Delay in Finite-Length Decision Feedback Equalizer," *IEEE Transaction on Information Theory*, vol. 42, no. 2, March. 1996.
- [10] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Adaptive Probabilities of Crossover," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 24, no. 4, pp. 656-667, April 1994.
- [11] Cezary Z. Janikow and Zbigniew Michalewicz, "An Experimental Comparison of Binary and Floating Point Representations in Genetic Algorithms," *International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 31-36, 1991.
- [12] A. E. Eiban, P-E. Raue and Zs. Ruttkay, "Genetic Algorithms with Multi-parent Recombination," *Proceedings of the 3rd Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, pp. 78-87, 1994.
- [13] Bayan S. Sharif, Jeff Neasham, Oliver R. Hinton, and Alan E. Adams, "A Computationally Efficient Doppler Compensation System for Underwater Acoustic Communications," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 52-61, Jan. 2000.
- [14] Shuai Tao, Liang Xu-wen and Chen Xiao-ting, "Decision-Directed Estimation of Carrier Frequency and Phase for Burst PSK Transmission," *IEEE Wireless Communications Networking and Mobile Computing International Conference*, pp. 1-4, Sept. 2009.



손지홍(Ji-hong Son)

2014년 한국해양대학교 전파공학과 (학사)
2014년 ~ 현재 한국해양대학교 전파공학과 (석사과정)
※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, 종신회원
2007년 ~ 현재 방위사업청 지정 수중통신탐지특화연구센터 실장
2013년 ~ 현재 TTA WG9031 수중음파통신 표준화 그룹 위원
※관심분야 : 수중음향통신, 소나 신호처리, 빔 형성