한국항해항만학회지 제36권 제8호(Vol. 36, No. 8), pp. 637~641, 2012 (ISSN-1598-5725/eISSN-2093-8470)
Journal of Navigation and Port Research
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2012.36.8.637

수중음향통신을 위한 선형등화기의 최적화에 관한 연구

이태진* · † 김기만

* 한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 전파공학과 교수

A Study on the Optimization of Linear Equalizer for Underwater Acoustic Communication

Tae-Jin Lee · † Ki-Man Kim*

Dept. of Radio Communication Eng., Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문에서는 저전력 수중음향통신 시스템을 구현하기 위해 선형 등화기에 최적화된 탭 길이를 결정하는 기법을 제안하였다. 먼저 선형 등화기에서 탭 길이와 결정지연과의 관계를 조사하였다. 이 결과를 토대로 일정 이상 MSE(Mean Square Error) 성능을 만족하는 탭 길이에 대하여 분산을 구하고 이를 활용하여 최적의 결정 지연 범위가 추정된다. 또한 탭 길이에 따른 최적의 결정지연을 결정하기 위해 MSE 그래프를 도출하였으며, 이를 통해 최적의 값을 얻어냈다. 모의실험을 수행한 결과 최대의 탭 길이에서보다 40% 적은 탭 길이로도 충분한 성능을 보여주었으며, 동해 해상시험에서 획득한 데이타에 적용한 결과 탭 계수가 충분히 수렴했다고 볼 수 있는 최대 길이의 탭보다 33% 적은 탭 길이로 충분한 성능을 보여주었음을 확인하였다.

핵심용어 : 저전력 수중음향통신, 선형등화기, 탭 길이, 결정지연, MSE, 계산량

Abstract : *In this paper, the method that reduce a computation time by optimizing computation process is proposed to realize low-power underwater acoustic communication system. At first, dependency of decision delay on tap length of linear equalizer was investigated. Variance is calculated based on this result, and the optimal decision delay bound is estimated. In addition to decide optimal tap length with decision delay, we extracted the MSE(Mean Square Error) graph. From the graph, we obtained variance value of the MSE-decision delay, and estimated the optimum decision delay range from the variance value. Also, using the extracted optimal parameters, we performed a simulation. According to the result, the simulation employing optimal tap length, which is only 40% of maximum tap length, showed a satisfactory performance comparable to simulation employing maximum tap length. We verified that the proposed method has 33% lower tap length than maximal tap length via sea trial.*

Key words : *Low-power Underwater Acoustic Communication, Linear Equalizer, Tap Length, Decision Delay, Mean Square Error, Computational load*

1. 서 론

수중음향통신은 과거에는 주로 군사적인 목적을 위해 제한적으로 사용되었으나 최근 해양에 대한 관심이 고조되고, 해양 탐사나 해저 자원 탐사가 활발해지면서 수중 운동체와의 상호 통신과 같이 활용 분야가 확대되었다. 최근 해양 환경 모니터링 및 재해 방지 시스템 구축 차원에서 수중에서 센서 네트워크를 구축하기 위한 연구들이 진행되고 있으나, 수중이라는 운용환경의 특수성으로 인해 채널의 대역폭이 제한되고 다중경로에 의한 인접 심볼간 간섭(Intersymbol Interference, ISI)이 크게 발생하여 성능을 저하시킨다(Baggeroer, 1984). 이와 같이 인접 심볼간 간섭과 잡음으로 인해 왜곡된 신호를 복원하기 위하여 수중통신에서의 등화기는 필수적이다. 뿐만 아니라 수중 센서 네트워크에 사용될 통신 시스템은 다수의 센서노드를 이용하여 통신을 하는 시스템이며, 육상으로부터 전력을 공급받을 수 없어 자체 전원을 이용하여야 한다. 이러한 제약으로 인해 저전력 소모를 갖도록 설계되어야 한다. 따라서 저전력 통신 기법을 활용하여 각 심볼의 송신전력을 절반 가까이 줄이는 PSSK(Phase Shift Silence Keying), PSPM(Phase Shift Position Modulation)과 같은 기법이 연구되고 있으며 (이·김, 2011; 장·한·김·이, 2011; Oh·Kim·Lee·Kim, 2010), 또한 시스템의 계산량을 줄여 저전력화를 실현하기 위한 방법으로 Sparse 등화기가 있다. Sparse 등화기는 Matching Pursuit 알고리즘을 기반으로 하는 등화기로 적은 수의 다중 경로가 수십~수백 심볼의 길이로 넓게 퍼져 있는 Sparse 채널 환경에 맞게 탭 계수를 최적화시킨다(Cotter·Rao, 2002). 다른 방법으로 시스템의 계산량을 줄이기 위해 등화기의 탭 계수의 길이를 최적화하는 방법

† 교신저자 : 정회원, kimkim@hhu.ac.kr 051)410-4918
* 정회원, itsfred@hhu.ac.kr 051)410-4918

이 있다(Gong·Cowan, 2004). 이론적으로 등화기에서 탭 계수의 길이가 길어질수록 더욱 정확한 채널 추정을 할 수 있으나 이는 계산량의 증가로 실용적이지 않으므로 적절한 범위에서 탭 길이를 정해야 한다. 또한 실시간 시스템에서 등화기의 오차와 비교할 훈련 신호열의 결정 지연(Decision delay)이 적절할 때 최적의 성능을 보이므로 등화기의 성능을 향상시키기 위해 탭 계수의 길이와 결정 지연을 동시에 결정하는 기법에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 최적의 탭 길이와 결정 지연을 확인하기 위해, MSE 그래프를 도출하였으며 이 결과를 토대로 일정 이상 MSE 성능을 만족하는 탭 길이에 대하여 분산을 구하였으며 이를 활용하여 최적의 결정 지연 범위를 추정하는 방법을 제안하였다.

2. 최적의 탭 길이와 결정지연

고전적인 등화기의 설계에서 탭의 길이와 결정 지연은 고정되어 있으며, 등화기 설계에 부수적인 문제로 인식되어 왔다. 그러나 탭의 길이와 결정 지연은 등화기의 성능에 큰 영향을 미치며 적절한 값으로 조정해 줄 필요가 있다. 우선 Fig. 1에 결정지연이 적용된 등화기의 등가모델을 나타내었다. 그림에서 $H(z)$은 통신채널의 전달함수이며, $W(z)$은 등화기의 전달함수이다. 계수 값이 $w_n(k)$인 선형 등화기인 경우 등화기 출력 $z(k)$는 아래와 같이 나타난다.

$$z(k)=\sum_{n=0}^{N-1} w_n(k)y(k-n) \tag{1}$$

여기서 N은 탭 계수의 길이이다. 또한 $e(k)$는 지연된 훈련 심볼 $d(k)$와 등화기 출력 사이의 오차신호를 의미하며, k는 샘플 인덱스를 뜻한다. 등화기의 입력 $y(k)$은 등화기의 탭을 거치는 과정에서 지연이 발생한다. 따라서 최적의 성능을 얻기 위해서는 오차 $e(k)$을 정확하게 판정할 수 있도록 적절한 지연 보상이 필수이다. 결정 지연 Δ가 고정되어 있는 등화기의 경우 탭 계수의 길이 N이 너무 크면 탭 계수의 시작과 끝 값이 0에 근접한다. 이때 이 0에 가까운 탭의 수, 즉 N을 줄이면 등화기의 성능이 약간 감소하겠지만 결과적으로 계산량이 줄어들게 되어 시스템의 저전력화를 실현시킬 수 있다. 반대로 N이 너무 작다면 모든 계수들이 등화기의 성능에 크게 영향을 줄 수 있는 만큼 큰 값들을 가지게 되며, 이는 N을 더 크게 설정해 줄 필요가 있음을 의미한다.

다양한 N에 따른 평균자승오차(MSE : Mean Square Error) 결과를 Fig. 2에 보였다. Fig. 2는 탭 길이와 결정 지연 간의 관계를 보여주는 MSE 그래프이다. 여기서 MSE는 여러 번 독립 시행을 수행하여 결과들의 통계적인 평균을 취한 것이다. 이는 각기 다른 탭 길이 N에 대해 등화기의 계수가 충분히 수렴하였을 때 MSE 결과를 바탕으로 결정 지연을 다르게 설정한 그래프이다. 탭 길이를 1개에서 5개씩 증가시키면서 결과를 보면 MSE는 일정 이상의 탭 길이에서 약간의 성능 차이를 보이며 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉, 탭 길이가 적절하면 탭 길이에 무관하게 거의 유사한 성능을 보여주므로 이 이상의 탭 길이는 불필요한 계산량 증가만을 유발하게 된다. 이 모의실험에서 가장 적절한 탭 길이는 네모로 표시한 부분으로 21~31개의 탭 길이로 볼 수 있다.

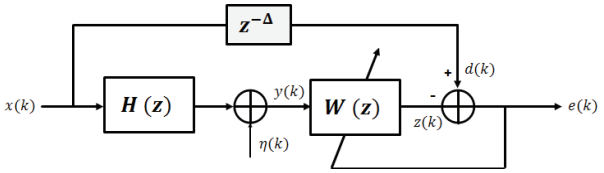


Fig. 1 The equivalent model for equalizer with decision delay

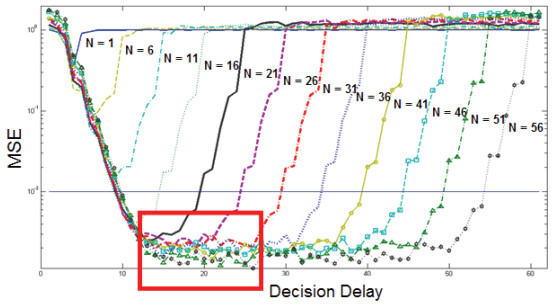


Fig. 2 Relationship between tap length and decision delay

3. 선형등화기 최적화 기법 제안

최적의 탭 계수와 결정 지연을 선택하기 위해 Fig. 2의 결과를 활용한다. 가장 먼저 등화기의 성능 목표치를 정한다. 등화기 성능의 목표치를 너무 높게 정하면 이 요건을 충족하는 탭 길이가 길어져야만 하고, 심지어 어떠한 탭 길이도 목표를 만족하지 못하는 경우가 생기므로 운용 환경에 맞추어 결정해야만 한다. 위 채널 환경에서는 MSE 문턱치(Threshold)를 0.01로 설정하였고 이를 그래프의 청색 가로 실선으로 표시하였다. 이를 통해 MSE 기준치를 만족하는 탭 길이와 결정 지연에는 1을, 만족하지 못하는 경우 0을 갖도록 하면 Fig. 3과 같은 그래프를 얻을 수 있다. Fig. 3은 탭 길이 21일 때 결과이며, 결정 지연이 10~19일 때 MSE 기준치를 만족하는 것을 알 수 있다.

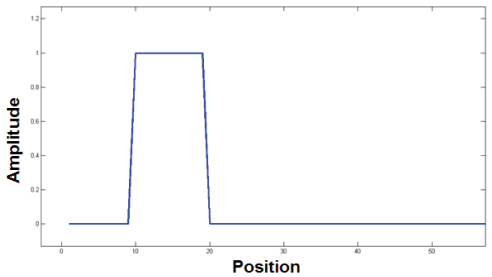


Fig. 3 Decision delay meet with MSE threshold condition

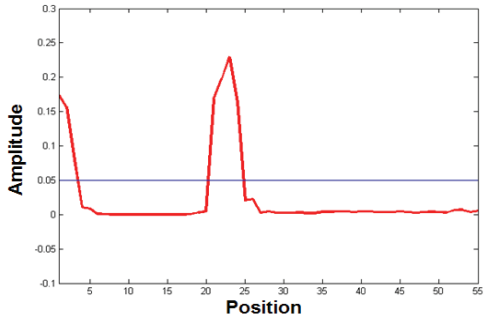


Fig. 4 Variance data get from decision delay

또한 Fig. 2의 결정 지연 그래프에서 분산(variance)을 구하는데 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 분산을 구하는 이유는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 충분히 수렴하여 최적의 성능을 보이는 탭 길이에서는 적절한 범위의 결정 지연에 그 MSE 값이 일관되는 특성을 보이기 때문이다. 그러나 탭 길이가 MSE를 만족하지 못하는 경우 또는 이로 인해 적절한 결정 지연이 보이지 않는 경우는 Fig. 2의 탭 길이 N이 1개에서 16개일 때와 같이 MSE 값이 민감하게 변한다. 따라서 이러한 탭 길이의 데이터는 충분한 탭 길이로 보기 어려우며, 분산을 통한 데이터까지 적용하면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 알 수 있는 사실은 MSE가 충분히 수렴하여 적절한 결정 지연에서 좋은 성능을 보이는 위치에서 0에 가까운 분산을 보이는 동시에, MSE가 수렴하지 못해 큰 오차를 보이는 지점에서 역시 0에 가까운 분산을 보인다. 이 문제를 해결하기 위해 MSE 분산의 일정 문턱치보다 낮은 지점을 1로, 기준치보다 높은 지점을 0으로 처리한다. 여기서 분산의 기준치를 너무 낮게 잡으면 출력되는 값의 차이가 커지기 때문에 마찬가지로 적정 수준에서 분산의 기준치를 선택하여야 한다.

본 논문에서는 분산 기준치를 0.05로 설정하였고 이를 Fig. 4에 수평 실선으로 표시하였다. 이를 통해 기준치를 만족하는 분산에는 1을, 만족하지 못하는 경우 0을 갖도록 하면 Fig. 5와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 이를 통해 얻은 분산 데이터에는 MSE를 충분히 수렴하는 위치에서의 정보도 얻을 수 있으나 MSE가 수렴하지 않는 위치의 정보도 나타난다. 따라서 불필요한 정보인 수렴하지 않는 위치 정보(Fig.5의 Position 25~55 범위)를 제거하기 위해 Fig. 3을 활용한다. Fig. 3과 Fig. 5의 데이터를 동시에 만족하는 정보를 얻기 위해 논리연산 중 AND를 활용하면, Fig. 6의 결과를 얻을 수 있다. 이를 통해 탭 길이 21일 때 설정한 MSE 기준치를 만족하면서도 등화기가 수렴하는 결정 지연의 범위를 볼 수 있다.

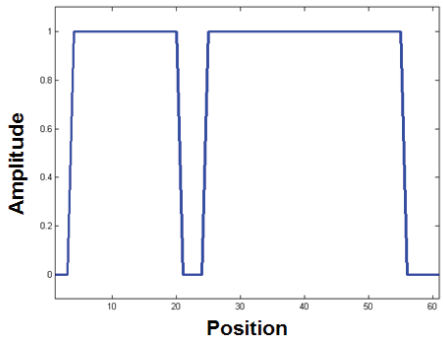


Fig. 5 Variance meet with variance threshold condition

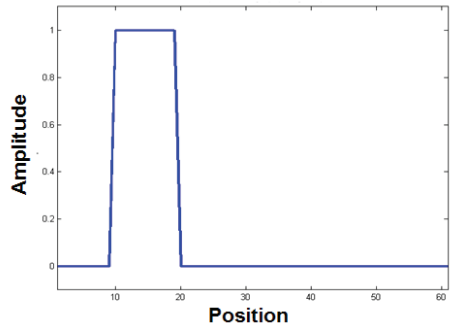


Fig. 6 Decision delay range meet with MSE performance

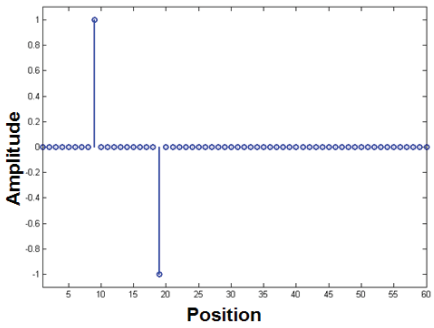


Fig. 7 Differential value of decision delay range

마지막으로 위에서 얻은 범위의 시작점과 끝점을 알기 위해 미분을 하면 Fig. 7과 같으며, 최대값과 최소값의 지점을 통해 결정 지연의 범위를 얻게 되고 이 결정 지연 범위의 중심 지점을 구하면 현재 탭 길이에 최적인 결정 지연 값 Δ를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 결정지연의 결과를 Table 1에 나타내었다. 따라서 미리 설정한 MSE의 오차 기준치 1×10^{-2}를 만족하는 탭 중 최적의 탭 길이는 21~26개임을 알 수 있으며 이에 적합한 결정 지연 Δ는 14~17이다.

Table 1 Optimum decision delay result from different tap length

Tap Length	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61
MSE Threshold	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Start of Decision Delay	-	-	-	-	9	9	9	9	9	9	9	9	10
End of Decision Delay	-	-	-	-	19	24	29	34	39	44	49	54	55
Optimal Decision Delay	-	-	-	-	14	17	19	22	24	24	29	32	33

4. 해상 실험 결과 및 분석

제안된 기법의 검증을 위해 2011년 동해 해상 실험에서 얻은 실제 데이터에 적용하였다. 실험 환경은 Fig. 8과 같으며, Fig. 9에 실험 당시 사용한 송수신기의 사진을 나타내었다. 수심은 200 m이며 송신기와 수신기 사이의 거리는 3 km이고 송신기의 깊이는 100 m, 수신기의 깊이는 200 m였다. 실험 당시 수중 음속 프로파일을 Fig.10에 보였으며, 측정된 채널 임펄스 응답은 Fig.11과 같다. 변조기법은 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum)이 적용된 QPSK(Quadratic Phase Shift Keying) 변조기법으로 50 SPS(Symbol Per Second)이며 Spreading Factor는 10이다. 심볼 타이밍은 PN(Pseudo Noise) 코드를 이용한 교차상관 기법으로 구하였다. 해수면의 시변 산란과 해류에 의한 송/수신기 사이의 움직임에 따른 반송파 위상 오차를 보상하기 위해 PLL(Phase Lock Loop)를 적용하였다.

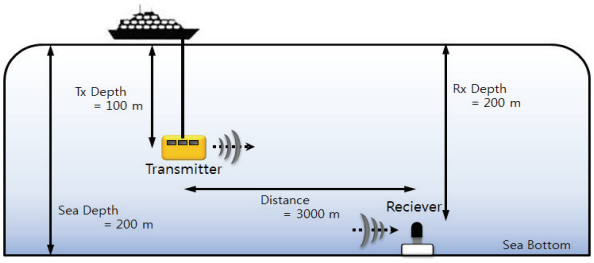
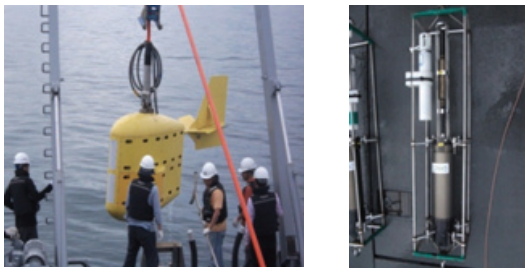


Fig. 8 Sea trial environment



(a) (b)

Fig. 9 (a) transmitter, (b) receiver

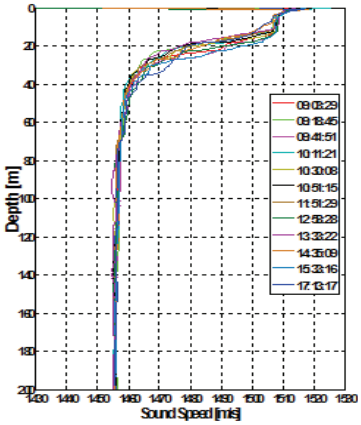


Fig. 10 Sound velocity profile

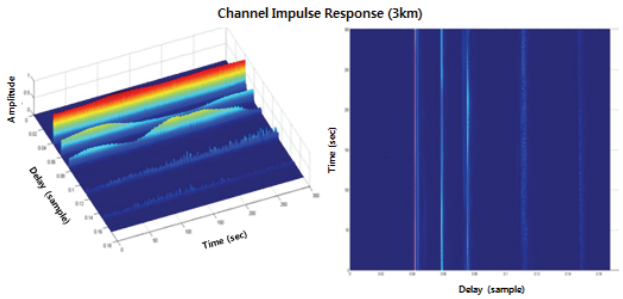


Fig. 11 Delay spread profile in sea trial

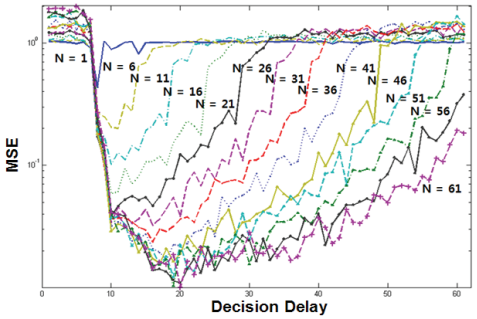


Fig. 12 MSE result in sea trial

Table 2 Optimum decision delay result from different tap length

Tap Length	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51	56	61
MSE Threshold	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O
Start of Decision Delay	-	-	-	-	-	-	-	-	17	17	17	17	17
End of Decision Delay	-	-	-	-	-	-	-	-	38	43	58	53	55
Optimal Decision Delay	-	-	-	-	-	-	-	-	28	30	33	35	37

해상시험을 통해 얻은 MSE 그래프는 Fig. 12와 같으며, 제안된 기법으로 적절한 탭 길이와 결정지연을 구한 결과를 Table 2에 보였다. 이로부터 최적의 탭 길이로 41개, 이때 결정지연은 28임을 알 수 있었다.

등화기를 통과하지 않았을 때의 성상도와 앞서 결정된 최적의 탭 길이와 결정지연일 때의 성상도를 각각 Fig. 13(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 13(c)는 충분한 탭 길이를 가진 등화기를 거쳤을 때의 성상도이며, Fig. 13(d)는 최종적으로 De-spread된 DSSS-QPSK의 성상도이다. 제안된 방법에 의해 결정된 41개의 탭 길이를 사용한 경우 BER(Bit Error Rate)은 2.17×10^{-3}이였으며, 충분한 길이의 탭 길이인 61개일 때 BER은 1.3×10^{-3}으로 제안된 방법을 사용한 경우와 비교하였을 때 성능의 차이가 근소하다고 말할 수 있다.

그 이유는 반복 부호화와 같은 오류 정정 부호화 기법을 적용할 때 10^{-2} 이하의 BER이 유지되면 복호 후 오류를 모두 정정할 수 있기 때문이다. 또한 탭 길이가 61개를 넘을 경우 성능 개선이 10^{-3} 이하로 극히 미미하였다. 따라서 제안된 기

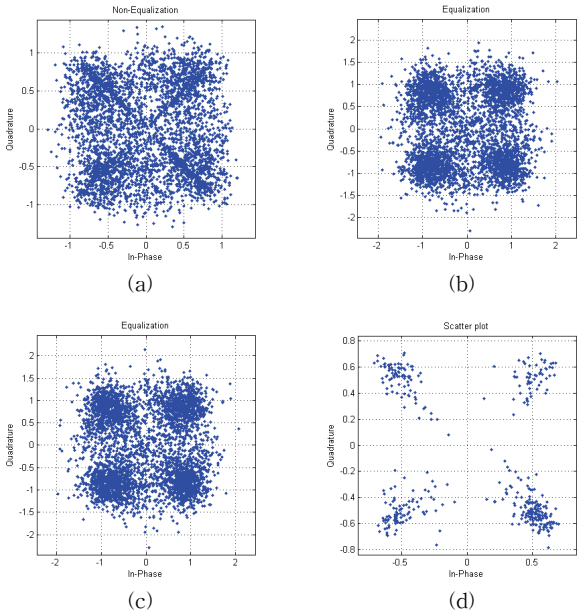


Fig. 13 Constellations,
(a) Equalizer input, (b) Equalizer output with 41 taps, (c) Equalizer output with 61 taps, (d) De-spreaded output

법으로 충분한 등화 성능을 얻을 수 있는 최적화된 탭 길이와 결정지연을 얻을 수 있었으며, 충분히 수렴되었다고 볼 수 있는 61개의 탭 길이에 비교하였을 때, 계산량은 약 33% 감소되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 저전력 수중음향통신 시스템의 구현을 위하여 필수적으로 요구되는 선형 등화기의 최적화 방법에 대해서 연구하였다. 이를 위해 먼저 선형 등화기의 탭 길이에 따른 변화와 결정 지연의 관계를 모의실험을 통해 고찰하였다. 최적의 탭 길이와 결정 지연을 확인하기 위해, MSE 그래프를 도출하였으며 이 결과를 토대로 일정 이상 MSE 성능을 만족하는 탭 길이에 대하여 분산을 구하고 이를 활용하여 최적의 결정 지연 범위를 추정할 수 있도록 설계하였다. 또한 이 설계를 검증하기 위해 모의실험을 수행하였으며 그 성능을 확인하였다. 모의실험과 해상실험 결과 제안된 방법의 성능이 탭 길이가 충분히 길었던 경우와도 성능이 유사하면서도 적은 계산량을 갖는 탭 길이라는 것을 입증하였다. 또한 해당 탭 길이에 최적인 결정 지연을 도출하였다.

향후에는 실제 수중 채널 환경에서 훈련 신호열을 수신한 등화기에 제안된 기법을 적용하여 최적의 탭 길이와 결정 지연을 확인하고, 반복적인 방법으로 탭 길이와 최적 지연 값을 찾는 방법에 대해 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2012년도 한국해양대학교 대외경쟁력 강화를 위한 연구강화지원사업 및 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업 연구지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 이태진, 김기만(2011), “해상실험을 통한 저전력 수중음향 통신 기법의 성능 분석”, 한국항해항만학회지, 제35권, 제10호, pp. 811-816.

[2] 장철희, 한정우, 김기만, 이성로(2011), “수중 센서 네트워크에서 저전력 통신을 위한 변조 기법의 적용성 연구”, 한국통신학회지, 제36권, 제6호, pp. 689-696.

[3] 한정우, 손윤준, 김기만(2010), “수중에서 OFDM 변조를 이용한 음향 통신의 성능 분석”, 한국항해항만학회지, 제34권, 제10호, pp. 769-774.

[4] Baggeroer, A. B.(1984), “Acoustic Telemetry - An Overview”, *IEEE J. Oceanic Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 229-235.

[5] Cotter, S. F. and Rao, B. D.(2002), “Sparse Channel Estimation via Matching Pursuit With Application to Equalization”, *IEEE Trans. Communications*, Vol. 50, No. 3, pp. 374-377.

[6] Gong, Y. and Cowan, C. F. N.(2004), “Optimum Decision Delay of the Finite-Length DFE”, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 11, No. 11, pp. 858-861.

[7] Oh, J. Y., Kim, J. H., Lee, H. S. and Kim, J. Y.(2010), “PSSK Modulation Scheme for High-Data Rate Implantable Medical Devices”, *IEEE Trans. Information Technology in Biomedicine,* Vol. 14, No. 3, pp. 634-640.

원고접수일 : 2012년 9월 5일
심사완료일 : 2012년 10월 10일
원고채택일 : 2012년 10월 15일