

수중통신에서 최적의 BCJR 등화 기법

김태훈¹ · 정지원^{1*} · 박태두² · 이동원²

Optimizing of BCJR Equalization with BCJR Decoder in the Underwater Communication

Tae-Hun Kim¹ · Ji-Won Jung^{1*} · Tae-Doo Park² · Dong-Won Lee²

¹Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

²Hanwha Corporation Gumi Plant (Development Team3), Gumi 730-904, Korea

요 약

수중에서의 음향 통신의 성능은 신호의 다중경로 전달과정에 의해 발생하는 지역 확산 현상으로 인하여 인접 심볼간 간섭의 영향을 받는다. 따라서 인접 심볼간 간섭을 제거하기 위하여 수중 통신에 적합한 등화기 기술, 채널 부호화 기술이 필요하다. 본 논문에서는 다중 경로 환경에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키기 위한 낮은 SNR에서 우수한 성능을 보이는 BCJR 복호기와 다중 경로로 인해 왜곡된 데이터를 보상하기 위한 기법인 결정 궤환 등화기가 결합된 반복기반 BCJR 등화기 구조를 제안하고, 경북 문경 경천호에서의 실제 수중 실험을 통하여 제안한 구조의 성능이 반복횟수의 증가에 따라 향상됨을 알 수 있다.

ABSTRACT

The performance of underwater acoustic communication system is sensitive to the inter-symbol interference due to delay spread develop of multipath signal propagation. Thus, it is necessary technique of equalizer and channel code to eliminate inter-symbol interference. In this paper, underwater acoustic communication system were analyzed by experiment using these techniques on the Kyeong-chun lake, Munkyeong City. Based on the results of experiment, we confirmed that the performance of the proposed iterative BCJR equalization method is improved by increasing the number of iterations.

키워드 : 수중 음향 통신, 컨볼루션 부호, BCJR 등화 기법, BCJR 복호, 결정 궤환 등화기

Key word : Underwater acoustic communication, Convolutional codes, BCJR equalization, BCJR decoding, DFE (Decision Feedback Equalizer)

접수일자 : 2014. 05. 30 심사완료일자 : 2014. 06. 19 게재확정일자 : 2014. 07. 02

* **Corresponding Author** Ji-Won Jung((E-mail:jwjung@kmou.ac.kr, Tel:+82-10-9319-4425)

Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Pusan 606-791, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.9.2094>

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

수중에서 전파는 급격한 감쇠특성을 갖기 때문에 수중에서의 무선통신에는 음파를 이용하여 통신을 하게 된다. 또한 다양한 해양환경의 변화에 따라 시·공간적 변동성을 가지며 잔향 및 다중경로 등에 의해 신호가 크게 왜곡되게 된다. 따라서 수중통신을 원활하게 하기 위해서는 채널 특성을 결정하는 해면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 한다. 특히 다중경로는 해면의 시변 잔향에 의해 도플러 확산과 직접파에 혼합되어 통신 채널의 특성을 좌우하게 된다. 이러한 음향 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중음향 통신에서 송신하는 심벌간의 상호간섭 (ISI : Inter-Symbol Interference) 을 야기하여 통신 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 비선형 복합 채널을 가지는 수중통신에서, 시간에 따라 채널의 특성이 매우 빠르게 변하는 시변 특성을 가지는 채널이므로, 이를 신뢰성이 있게 올바르게 복조하기 위해서는 여러 특성을 고려한 채널 부호화 방식과 적응 등화기의 기술이 매우 중요하다[1,2].

이에 본 논문에서는 다중 경로 환경에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키기 위하여 낮은 SNR에서 우수한 성능을 보이는 부호화 기법인 BCJR (Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv) 기반 컨볼루션 부호[3]와 다중 경로로 인해 왜곡된 데이터를 보상하기 위한 기법인 결정 궤환 등화기 (DFE : Decision Feedback Equalizer)[4,5]가 결합된 BCJR 등화기 구조를 제안하고, 경북 문경시 경천호에서의 실제 수중 실험을 통하여 성능을 분석하였다.

II. 수중통신에서의 반복기반의 송수신구조

터보 등화기[6,7]는 기존의 등화기보다 좋은 성능을 보이지만 원래 MAP(Maximum a Posteriori) 알고리즘을 사용하기 때문에 복잡도가 채널 길이 등에 대해 지수적으로 증가하는 단점이 있다. 이러한 이유로 인해 터보 등화기의 복잡도를 줄이기 위한 방법으로 MAP 등화기보다 복잡도가 적은 선형 등화기나 결정 궤환 등화기를 사용하는 방법이 있다. 또한 터보 등화기의 터보 부호의 복잡도를 줄이기 위해 BCJR 부호를 사용할

수 있다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 결정 궤환 등화기와 BCJR 부호를 갖는 등화기를 고려하였다. 이를 BCJR 등화기라 명한다.

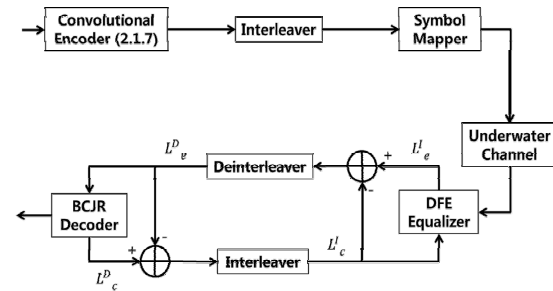


그림 1. BCJR 등화기 모델
Fig. 1 Model of the BCJR equalization in baseband

데이터는 (2.1.7) 컨볼루션 부호화기를 거친 뒤 인터리버, 심벌 매핑 후 변조기를 통과한다. 전송된 심벌은 채널을 통과한 후 백색 가우시안 잡음이 더해진다. 수신단의 BCJR 등화기는 등화기와 복호기로 구성되어 있으며, 등화기와 복호기는 인터리버, 디인터리버를 통해 연결되어 서로의 정보를 반복해서 갱신한다. 인터리버는 송신 측에서 한 개 블록 크기의 부호기 출력 값을 재배치시키고, 디인터리버는 인터리버의 역 과정을 거쳐 송신신호를 복원한다. 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재입력한다. 송신된 신호는 수중채널을 거치고 백색 가우시안 잡음이 더해져 수신된다. 기저대역으로 변환한 후 L_e^I 는 결정 궤환 등화기의 출력 값으로 수신 신호로부터 등화기에서 추정되어진 extrinsic 값이다. $y[k]$ 를 k 시점에서의 등화기 입력 값이라 하면, 등화기의 출력은 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$L_e^I[k] = \sum_{i=0}^{N_c-1} c_i[k]y[k-i] - \sum_{j=1}^{N_c} b_j[k]\widehat{L}_e^I[k-j] \quad (1)$$

$c_i[k] (i = 0, 1, \dots, N_{c-1})$ 는 k 시점에서의 피드포워드 탭 계수이며 $\widehat{L}_e^I[k]$ 는 정상도 상에서 $L_e^I[k]$ 에 가장 가까운 점들인 slicer 출력 값이다. 일반적으로 결정 궤환 등화기에서 피드포워드와 피드백 계수들을 갱신하는 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} c_j[k+1] &= c_i[k] - \mu e_D[k] y[k-i], \\ b_j[k+1] &= b_j[k] + \mu e_D[k] \widehat{L}_e^I[k-i], \end{aligned} \quad (2)$$

μ 는 수렴상수이고 $e_D[k] = L_e^I[k] - \widehat{L}_e^I[k]$ 는 DD (Decision-directed) 오차로써 결정 궤환 등화기의 출력으로부터 추정되어진 $L_e^I[k]$ 와 slicer 출력 값인 $\widehat{L}_e^I[k]$ 의 오차를 이용하여 피드백을 통하여 결정 궤환 등화기의 출력 오차를 줄이는 계수 값인 $c_i[k+1], b_j[k+1]$ 를 갱신하기 위하여 사용된다. SAG(Stop And Go) 알고리즘을 사용하는 경우에 필터 탭 계수는 아래 식 (3)을 통해 갱신되며, 여기서 $f[k]$ 는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} c_j[k+1] &= c_i[k] - \mu f[k] e_D[k] y[k-i], \\ b_j[k+1] &= b_j[k] + \mu f[k] e_D[k] \widehat{L}_e^I[k-i], \end{aligned} \quad (3)$$

$$f[k] = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}\{e_D[k]\} = \text{sgn}\{e_s[k]\} \\ 0 & \text{if } \text{sgn}\{e_D[k]\} \neq \text{sgn}\{e_s[k]\}, \end{cases} \quad (4)$$

$\text{sgn}\{\cdot\}$ 은 아래와 같이 정의되는 시그넘 함수이며, $e_s[k]$ 는 식 (6)과 같은 Sato 예러이다.

$$\text{sgn}\{x\} = \begin{cases} -1 & \text{when } x < 0 \\ 0 & \text{when } x = 0 \\ +1 & \text{when } x > 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$e_s[k] = L_e^I[k] y[k] - \gamma \text{sgn}\{L_e^I[k]\} \quad (6)$$

여기서 γ 는 적절한 상수 값이다. L_e^D 값은 결정 궤환 등화기의 출력 값 L_e^I 와 L_c^I 의 차를 디인터리빙하여 복호기로 입력한다. 복호기에서 추정되어진 extrinsic 값 L_e^D 은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$L_c^D = \log \frac{P(x=+1)}{P(x=-1)} \quad (7)$$

extrinsic 값 L_e^D 는 복호기의 출력 값으로써 사후 확률 값을 계산하여 0 또는 1의 오류 값을 보정할 수 있는

값이다. 이러한 L_c^D 와 L_e^D 의 차이 값을 인터리빙한 L_c^I 가 결정 궤환 등화기에 입력된다. L_c^I 를 업데이트 하여 오류 값을 보정하는 방법을 취하게 되는데, 반복횟수가 늘어남에 따라 업데이트 하는 오류 보정 값이 송신하고자 하는 원 신호에 가깝게 되어 BER(Bit Error Ratio) 성능이 향상되게 된다.

2.1. BCJR 알고리즘

BCJR 알고리즘의 복호과정은 다음과 같다. 수신 심벌 $R_k = (x_k, y_k)$ 를 원소로 하는 수신신호열 $R_1^N = (R_1, R_2, \dots, R_k, \dots, R_N)$ 라 할 때, BCJR 알고리즘의 복호기는 다음 식 (8)과 같이 정의되는 LLR (Log Likelihood Ratio)를 이용하여 복호한다. 여기서, $P_r(d_k = i | R_1^N) = \sum_m^{2^{v-1}} \lambda_k^i(m)$ 이고, 부호기의 메모리가 v 이며, m 은 부호기의 상태번호, 그리고 i 는 입력비트이다. ($m = 0, 1, \dots, 2^{v-1}$). $\lambda_k^{i,m}$ 은 k 시점에서 격자도 상의 임의의 한 상태 m 에서 입력 비트 I 에 대한 사후확률이다. 입력 비트 d_k 에 대한 LLR 값은 아래 식 (8)과 같이 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned} L(d_k) &= \log \left(\frac{\Pr(dk = 1 | \text{observation})}{\Pr(dk = 0 | \text{observation})} \right) \\ &= \frac{\Pr(dk = 1, S_k = m | R_1^N)}{\Pr(dk = 0, S_k = m | R_1^N)} \\ &= \log \frac{\sum_m \lambda_k^{1,m}}{\sum_m \lambda_k^{0,m}} \end{aligned} \quad (8)$$

이는 BCJR 복호기의 soft output이며, 아래와 같이 $L(d_k)$ 를 임계값 0과 비교함으로써 복호기는 복호비트를 hard-decision할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{if } L(d_k) \geq 0, \text{ the decoded bit is } 1 \\ &\text{if } L(d_k) \leq 0, \text{ the decoded bit is } 0 \end{aligned}$$

$\lambda_k^{i,m}$ 은 수신신호열에 대한 입력 d_k 와 상태번호 S_k 의 조건부확률로 정의할 수 있으며, 이를 Bayes의 정

리를 이용하여 분해하고 정리하면 3개의 조건부 확률 성분으로 나눌 수 있다. 따라서 최종적인 LLR 은 다음 식 (9) 과 같다.

$$L(d_k) = \log \frac{\sum_m \alpha_k^m \beta_{k+1}^{f(1,m)} \delta_k^{1,m}}{\sum_m \alpha_k^m \beta_{k+1}^{f(0,m)} \delta_k^{0,m}} \quad (9)$$

여기서 $\alpha^{i,m}$ 은 Forward State Metric, $\beta^{i,m}$ 은 Backward State Metric 그리고 $\delta^{i,m}$ 은 Branch Metric 이다.

III. 수중 실험 환경

그림 2와 같은 환경에서 실제 수중 실험을 수행하였다. 송신기로는 ITC 1001을 사용하였고 수신기로는 B&K 8103을 사용하였다. 실험은 경북 문경시 경천호에서 수행되었다. 실험 시기는 2014년 3월초로 실험 환경은 바람에 의한 파도가 있었으며 송수신기 사이의 거리는 최대 400 m로 하였다. 그리고 송신기는 수면 아래 2 m, 수신기는 30 m 아래 위치하였다. 반송파 주파수와 샘플링 주파수는 각각 16 kHz 및 192 kHz로 하였으며, 전송율은 1 Kbps로 하였다.

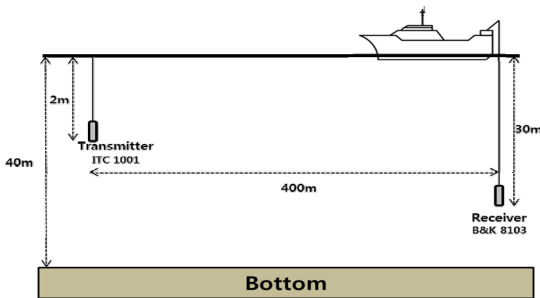


그림 2. 수중 실험 환경
Fig. 2 Environment of oceanic experimentation

그림 3에는 실험 해역에서 측정된 채널 전달 특성을 나타낸 것이다. 이 측정을 위해 약 2 kHz 대역폭을 갖는 0.2 sec 길이의 LFM (Linear Frequency Modulation) 신호를 주기적으로 약 1000회 가량 송신하였다. 그림

은 송수신된 LFM 신호의 상관관계를 이용하여 모델링 한 것으로 다중경로에 따른 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 수면에 반사되어지는 반사파 그리고 바닥에서 반사되어 들어오는 신호들이 있다는 것을 의미한다.

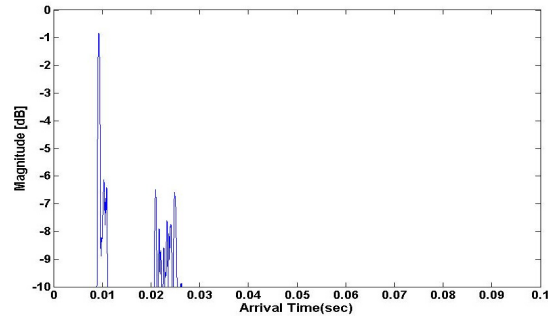


그림 3. 실험 거리 400M에서 전달 지연 특성
Fig. 3 Delay profile in the distance of 400m

IV. 수중 실험 결과

본 논문에서는 표 1과 같은 파라미터를 이용하여 실제 수중 실험을 하였다. 데이터 속도는 1kbps, 중심 주파수는 16kHz, 샘플링 주파수는 12배인 192kHz를 적용하였다. 컨볼루션 부호화 방식을 적용하였으며, 변조 방식은 QPSK 변조 방식을 적용하였다.

표 1. 수중실험 파라미터
Table. 1 Parameters for oceanic experimentation

Source (Text)	Underwater Communication Experiment - DSP & SC Lab. in KMOU	
Convolutional Codes	R = 1/2, K = 472, N = 944	
Modulation (QPSK)	Bit rate	1k bps
	f_c	16k Hz
	f_s	192k Hz
Distance	400m	
Depth	Tx : 30m, Rx : 2m	

그림 4에서 처음과 끝의 신호는 LFM이며, 이는 패킷의 시작과 끝을 알리는 신호이며, 두 번째 신호인 training 데이터는 수신되는 신호의 정확한 타이밍을 잡

기 위해 사용되었으며, 또한 결정 궤환 등화기에서 다중 경로를 추정하기 위해 사용되었다. 그림 4와 같은 패킷 구조를 이용하여 실험을 진행하였다. 실제 실험에서 송신한 신호와 최종적으로 수신된 신호의 형태는 그림 5 (a), (b)와 같다.

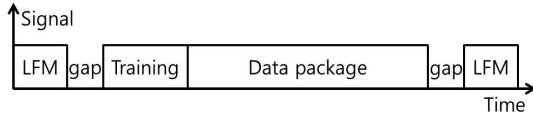


그림 4. 송신 패킷 구조
Fig. 4 Packet structure of transmitted signal

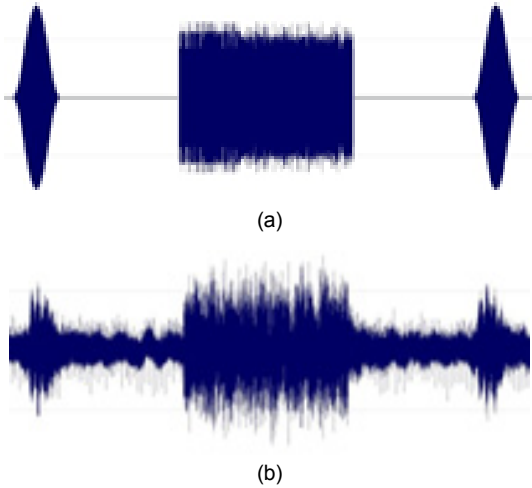


그림 5. 파형 (a) 송신신호 (b) 수신신호
Fig. 5 Waveform (a) transmitted signal (b) received signal

그림 6은 수중 실험을 통해 수신된 신호와 제안하는 구조를 통해 등화된 후의 성상도이다. 등화기는 LMS (Least mean squares) 알고리즘을 이용하여 시간에 따라 변화하는 채널의 전달특성을 보상하였다. 결정 궤환 등화기에서 사용되어진 FF/FB 탭수는 각각 2탭으로 고정하였고, 결정 궤환 등화기의 μ 값은 0.009을 사용하였다. 그림 6-(a)를 보면, 수신된 신호의 성상도는 QPSK 성상점에 모이지 않고, 알아볼 수도 없을 정도로 넓게 퍼져 있는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 6-(b)에서처럼 제안하는 구조를 통해 다중 경로에 의한 인접 심볼 간의 간섭과 백색 가우시안 잡음을 보상함에 따라 성상도는 QPSK 성상점으로 데이터가 모이는 것을 알 수 있다.

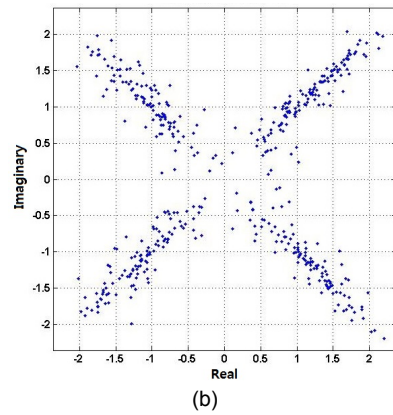
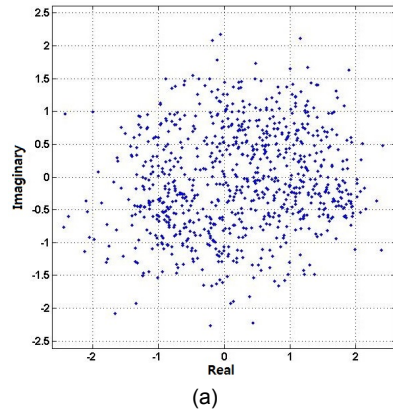


그림 6. 성상도 (a) 수신신호 (b) BCJR 등화기 신호
Fig. 6 Constellations (a) received signal (b) BCJR equalized signal

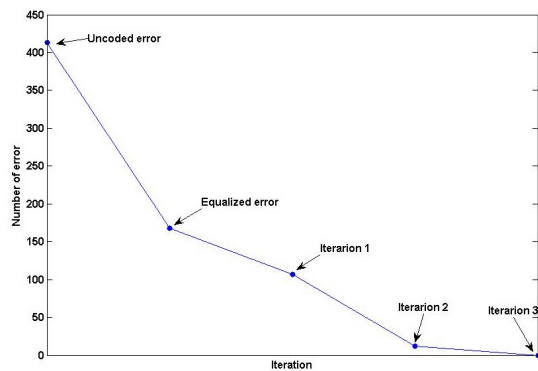


그림 7. BCJR 등화기의 반복에 따른 에러 수
Fig. 7 The number of errors according to iteration of BCJR equalization

이와 같은 결과를 통해 제안하는 구조가 실제 수중 통신에서 효과적으로 작용한다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 제안하는 시스템의 성능을 나타낸다. 먼저 수신신호는 944비트 중에서 413비트의 오류가 발생했다. 등화기를 처음 통과 하였을 때 오류의 개수는 168비트로 약 250 비트가 감소하였으며, 제안하는 시스템의 반복을 통해 3번째 반복에서 모든 오류가 복호되어 완벽한 신호가 되는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

수중 통신 채널은 다중 경로 전달 특성을 가지므로 인접 심볼 간의 간섭 현상에 의해 성능이 크게 저하된다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 다중 경로 환경에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키기 위하여 낮은 SNR에서 우수한 성능을 보이는 BCJR 복호기와 다중 경로로 인해 왜곡된 데이터를 보상하기 위한 기법인 결정 궤환 등화기가 결합된 BCJR 등화기 구조를 제안하였다.

제안하는 구조를 바탕으로 2014년 3월초 경북 문경시 경천호에서 실제 수중 실험을 수행하였다. 수중 통신 실험을 통하여 제안하는 BCJR 등화기의 반복 수행 과정을 통해 성능의 이득을 얻을 수 있었으며, 3번 반복하게 되면 에러프리가 됨을 확인하였다. 실험을 통해 BCJR 등화기가 실제 수중 통신에 있어서도 효과적으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한화와의 위탁연구로 수행된 연구결과 중 일부입니다.

REFERENCES

- [1] Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol.25, no.1, pp.4-27, Jan. 2000.
- [2] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase coherent digital communications for underwater acoustic channels.," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp.100-111, Jan. 1994.
- [3] L. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal Decoding of Linear Codes for minimizing symbol error rate", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-20(2), pp. 284-287, 1974.
- [4] K. Berberdis, T. Rontogiannis and S. Theodoridis, "Efficient block implementation of the LMS based DFE," *Proceedings 13th Digital Signal Processing International Conference*, Vol.1, pp. 143-146, July 1997.
- [5] J. Salz, "Optimum Mean-Square Decision Feedback Equalization," *BSTJ*, 52, No. 8 (October 1973), p. 1341-73. 4
- [6] M. Tuchler, et al. "Turbo Equalization : Principles and New Results," *IEEE Trans. Communications*, Vol. 50, No. 5, pp. 754-767, 2002.
- [7] R. Koetter, A. C. Singer, and M. Tuchler, "Turbo equalization," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 67-80, Jan. 2004.



김태훈(Tae-Hun Kim)

2013년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학사)

2013년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정

※관심분야 : 위성 통신, 이동 통신, 수중 통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



정지원(Ji-Won Jung)

1989년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학사)
1991년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학석사)
1995년 2월 : 성균관대학교 정보공학과(공학박사)
1991년 1월 ~ 1992년 2월 : LG 정보통신 연구소 연구원
1995년 9월 ~ 1996년 8월 : 한국통신 위성통신연구실 선임연구원
1997년 3월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 초빙연구원
1996년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 정교수
2001년 8월 ~ 2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship(Communication Research Center 근무)
※관심분야 : 위성 통신, 이동 통신, 수중 통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



박태두(Tae-Doo Park)

2008년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학사)
2010년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학석사)
2014년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과(공학박사)
2014년 ~ 현재 : (주)한화 구미사업장 개발 3팀 선임연구원
※관심분야 : 수중통신, 임베디드시스템, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등



이동원(Dong-Won Lee)

2004년 2월 : 동명정보대학교 정보통신공학과(공학사)
2008년 2월 : 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과(공학석사)
2012년 2월 : 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과(공학박사)
2013년 ~ 현재 : (주)한화 구미사업장 개발 3팀 선임연구원
※관심분야 : 수중통신, 모델설계, 임베디드시스템