
수중표적시뮬레이터설계

조내현*, 예윤해**, 정연모**

Design of an Underwater Target Simulator

NaiHyun Cho, YunHae Yeh, Yunmo Chung

Abstract

In this paper, we propose a model that simulates the reflective waveform from underwater objects by means of Doppler effect, highlight and elongation phenomenon. Also, this paper presents a hardware implementation of simulation model with the input and output parameters.

The underwater target simulator consists of transducer, receiver, transmitter and control parts. According to the experimental results of the simulator, it carried out the performances of real target in response to transmission signal.

Key Words : Underwater target simulator, Doppler effect, Highlight, Elongation

* 경희대학교 대학원 전자공학과

** 경희대학교 전자정보대학 교수

1. 서론

능동형 소나(SONAR)에서는 바다속 장애물이나 잠수함과 같은 표적을 탐지하기 위하여 일정 주파수의 코사인제곱 형태의 파형을 발사한다. 이때 표적으로부터 반사되는 수신파는 표적의 속도에 따라 주파수가 변하고, 표적의 자세에 따라 파형의 길이가 변하기도 하며, 표적의 반사강도에 따라 수신파형의 세기가 변하기도 한다. 표적속도의 변화에 따른 주파수의 변화를 도플러 효과(Doppler effect)로 불리며, 표적자세에 따른 펄스폭의 변화는 일롱게이션(elongation) 현상, 그리고 위상변화와 표적강도의 변화에 의한 포락선의 변화를 하이라이트(highlight) 현상이라고 한다[1].

수중 이동체의 성능평가에서 표적탐지능력은 가장 중요한 평가항목이다. 이와 같은 능력을 평가하기 위하여 잠수함 및 수상함과 같은 실제 표적을 이용할 경우에는 많은 시간과 비용이 수반되는 어려움이 있다.

따라서 실제표적을 대신하여 실제표적의 형태와 행동에 따른 반사파형을 발생시킬 수 있는 수중 표적 시뮬레이터가 요구되며 시뮬레이터는 기준신호를 수신하여 도플러 효과, 일롱게이션 현상, 그리고 하이라이트 현상을 고려된 반사신호, 즉 표적신호를 발생시킬 수 있어야 한다.

기존 연구에서는 이러한 요구기능을 하드웨어로 구현하기 위해서 아날로그 회로로써 송수신 제어회로를 구성하였으므로 기능변경 요구시 상당히 어려운 점이 있었다. 그러나 본 논문에서는 앞에서 제시한 시뮬레이터를 위하여 도플러 효과, 일롱게이션 현상, 그리고 하이라이트 현상을 물리적으로 적용하기 위한 수학적 모델을 연구하고 또한 해상환경을 고려한 입력 및 출력 설계 변수를 설정과 아울러 제작되어야 할 표적 시뮬레이터를 EPLD (Electrically Programmable Logic Device)로 구현하였다. 수중표적 시뮬레이터는 수중에서의 초음파 송수신을 위한 초음파 센서, 수신

부, 제어부, 디스플레이부, 송신부 등으로 구성되었다. 마지막으로 제작된 수중표적 시뮬레이터가 표적신호를 제대로 발생시킬 수 있는지 검증 하였다

2. 수중표적 시뮬레이터

10 kHz 이상의 진동수를 가진 초음파는 물체의 진동으로 생기는 것으로, 초음파의 전파속도는 매질의 물리상수에 따라 다르다. 매질의 물리상수가 일정할 때 음파 송수신간 시간차는 거리정보로 환산될 수 있으며, 또한 위상차로부터 방위정보도 추출할 수 있다[2]. 초음파는 전파나 광파에 비해 수중에서의 전송효율이 우수하여 수중표적의 탐지에 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 수중표적 시뮬레이터 제작을 위한 관련이론으로 수중에서의 초음파 전파, 표적강도와 소나 방정식, 그리고 도플러 프로세싱, 일롱게이션 및 하이라이트 현상을 연구하고, 이를 적용한 수중표적 시뮬레이터의 설계 및 구현에 관하여 기술하였다.

수중표적 시뮬레이터는 수중 이동체로부터 수신한 음파를 가공하는 표적신호 발생회로, 표적신호 발생회로의 전기적 출력을 초음파로 바꾸는 압전소자(piezoelectric transducer), 아날로그 구동장치, 그리고 이를 운용하기 위해 PC로 구성되었다.

2.1 소나의 원리

<그림 1>은 능동 소나의 수중표적에 대한 음파의 전달과정을 도식적으로 표현한 것이다. 일반적으로 수중에서의 음파 송수신 시스템의 설계 변수설정을 위해서 능동 소나의 경우 식 (1)과 같이 소나 방정식으로 표현할 수 있다 [1]. 구현하고자 하는 수중 표적 시뮬레이터에서는 실제 표적과 같이 표적강도를 조절할 수 있어야 한다.

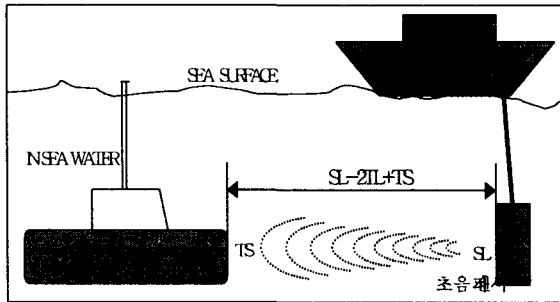
$$SL - 2TL + TS = NL + DT \dots\dots\dots(1)$$

- .SL(Source Level) : 기준송신음압
- .TL(Transmission Loss) : 전달손실
- .TS(Target Strength) : 표적강도
- .NL(Noise Level) : 잡음레벨
- .DT(Detection Threshold) : 탐지레벨

Δf_d 를 조절할 수 있어야 한다.

$$\Delta f_d = 2v / cf_c \dots\dots\dots(3)$$

- . v : 상대속도
- . c : 음파의 속도
- . f_c : 소나 송신주파수



<그림 1> 능동 소나 방정식의 표현

표적강도는 어떤 임의의 표적으로부터 음파강도의 반사율로 식(2)과 같이 정의된다[3].

$$TS = 10 \log(I_r / I_i) \dots\dots\dots(2)$$

- . I_r : 1 미터 지점에서의 반사파 강도
- . I_i : 입사파의 강도

2.2 수중표적 반사신호 구현

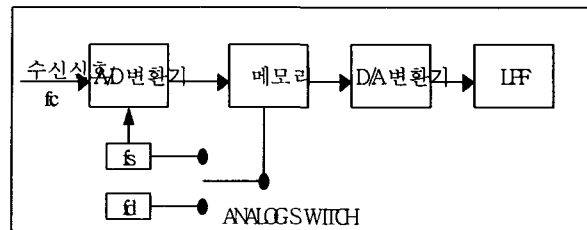
2.2.1 도플러 효과

소나의 움직임 또는 표적의 움직임에 의해 상대속도의 변화가 생기면 도플러 효과에 의해 수신주파수는 송신주파수와 달라진다. 서로 가까워질 때 송신주파수에 비해 수신주파수는 높아지고, 멀어질 때는 수신 주파수가 낮아지며, 주파수 편이량과 상대속도의 관계는 식(3)과 같다[1].

구현하고자 하는 수중 표적 시뮬레이터에서는 실 표적과 같이 도플러 주파수 편이량

예를 들면, 송신 주파수가 10 kHz 이고 상대속도가 10 knot 일 때 도플러 주파수 편이는 69 Hz가 된다.

도플러 효과를 모델링한 신호를 발생시키기 위하여 <그림 2> 와 같이 수신신호 f_c 를 일정한 주파수 f_s 로 샘플링한 다음 메모리에 저장하고 이를 읽기위한 클럭 주파수 f_d 를 변화시키는 방법을 이용하였다.



<그림 2> 도플러 효과 재현 방법

본 연구에 적용된 샘플링 주파수 f_s 는 512 kHz이고, 이를 기준으로 ± 1 kHz까지의 도플러 효과를 재현하기 위해 528 kHz ~ 496 kHz까지의 f_d 를 설정하였다.

2.2.2 하이라이트 및 일롱게이션 효과

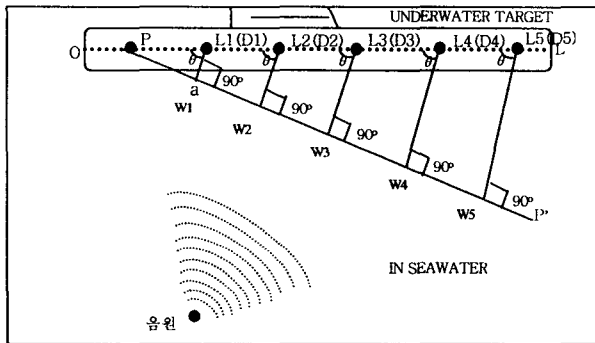
초음파 신호 $x_m(t, r)$ 이 어떤 표적 $h(t, r)$ 에 의해 반사된 신호를 $x_r(t, r)$ 라고 할 때, 단 여기서 t 는 시간이고 r 은 거리를 나타낸다. 반사신호는 식(4)와 같다[4]. 여기서 $X_r(f, r)$ 은 $x_r(t, r)$ 의 푸리에(Fourier)변환 결과이고

$H(f, r)$ 는 $h(t, r)$ 의 푸리에 변환 결과이다.

$$\begin{aligned} x_r(t, r) &= \int_{-\infty}^{\infty} x_m(t, r) h(t - \tau, r) d\tau \\ &= x_m(t, r) * h(t, r) \\ &= F^{-1}(X_m(f, r) H(f, r)) \quad \dots(4) \end{aligned}$$

$$X_r(f, r) = \int_{-\infty}^{\infty} x_r(t, r) e^{-j\omega t} dt$$

$$H(f, r) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, r) e^{-j\omega t} dt$$



<그림 3> 각 포인트에서의 초음파 반사

<그림 3>은 하이라이트 및 일롱게이션 현상을 하드웨어(hardware)로 구현하기 위한 반사표적을 모델링 한 것이다. <그림 3>에서 표적상의 각 지점 L_1, L_2, \dots 에서 W_1, W_2, \dots 크기의 반사가 발생하고, 음원에서 표적까지의 거리가 음원의 파장보다 훨씬 크다고 가정할 때 반사 표적의 임펄스 응답(impulse response)을 구할 수 있다.

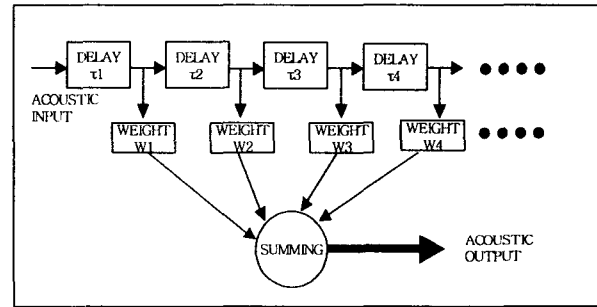
즉, 점선 $O \sim L$ 상의 반사점 L_1, L_2, \dots 가 P 지점에서 D_1, D_2, \dots 의 거리만큼 떨어져 있다고 가정할 때 반사파가 음원에 도달하기 까지 경로차 l_i 와 시간지연 τ_i 는 각각 식(5)와 같으며 여기서 c 는 음파속도이다.

$$l_i = D_i \cos \theta, \quad \tau_i = l_i / c \quad (i = 1, 2, \dots) \dots(5)$$

따라서 음원의 진행방향과 각도 θ 를 이루고 있는 직선표적의 임펄스 응답 $S(t)$ 는 식(6)과 같다.

$$S(t) = \sum_{i=1}^5 W_i \delta(t - \tau_i), \quad \tau_i = D_i \cos \theta / c \dots(6)$$

식(6)으로부터 직선표적의 자세를 고려한 표적 신호는 <그림 4>와 같이 구현될 수 있다. 다수 표적에 의한 신호는 각각으로부터의 신호를 중첩함으로써 구현할 수 있다.



<그림 4> 표적자세에 따른 신호의 구현방법

3. 시스템 설계 및 제작

3.1 설계변수 정의

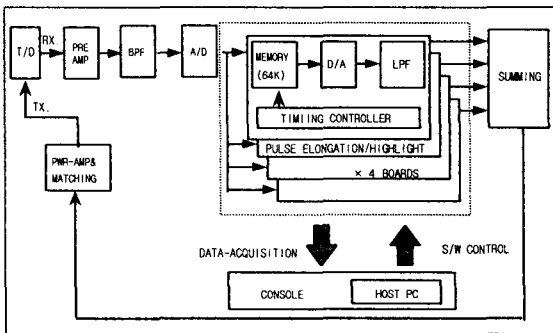
수중표적 시뮬레이터의 설계를 위해 최대송신 음압이 일정하고, 모의표적까지의 거리범위를 30 m ~ 3 km, 해상상태 II를 유지하고 모의표적의 속도가 수중 이동체의 속도에 비해 약 1.5 배 느리다고 가정하였다, 이러한 모의표적을 실제표적으로 인지하기 위한 시뮬레이터의 설계변수를 다음과 같이 정의하였다.

- . 초음파 센서 수신감도 : -190 dB이상
- . 초음파 센서 송신감도 : 157 dB이

- . 수평 빔패턴 : 전방향
- . 수직 빔패턴 : $\pm 20^\circ$ (-3 dB 기준)
- . 최대 송신 음압레벨 : 195 dB이상
- . 시스템 이득 : 표적강도가 0 dB일 때의 이득으로 33 dB
- . 초음파 센서 입력음압 범위 : 141 dB ~ 189 dB
- . 시스템 표적강도 범위 : -15 dB ~ 25 dB, 1dB 단위
- . 도플러 효과 주파수 범위 : $f_c \pm 1 kHz$, 10 Hz 단위
- . 하이라이트 재현포인트 : 4 포인트, 1 ms 단위

3.2 시스템 설계

시뮬레이터 시스템은 <그림 5>에 나타낸 바와 같이 운용자가 명령을 줄 수 있는 PC, 그리고 PC의 명령을 받아 수행하는 하드웨어 제어부, 그리고 음향신호 입출력을 담당하는 초음파 센서로 구성되어 있다.



<그림 5> 시스템 블록도

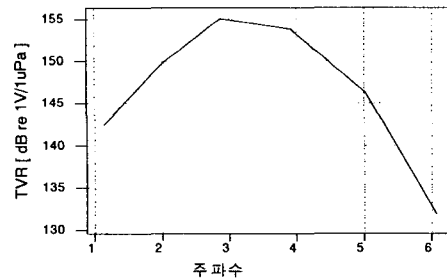
PC는 하드웨어 제어부에 도플러 효과를 구현하기 위한 주파수 편이, 일통게이션 효과를 구현하기 위한 시간 지연, 표적강도 조정 등의 명령을 PC 인터페이스를 통해 줄 수 있다. 그리고 하드웨어 제어부에는 같이 송신신

호를 수신하는 수신부, 또 수신된 신호를 디지털 신호로 변환하기 위한 A/D 컨버터, 모의 표적재현을 위한 디지털 회로부, 다시 아날로그 신호로 복구시켜주는 D/A 컨버터, 가공된 신호를 초음파 센서를 구동하기에 적절한 크기로 증폭시켜 주는 전력 증폭기 등으로 구성되어 있다.

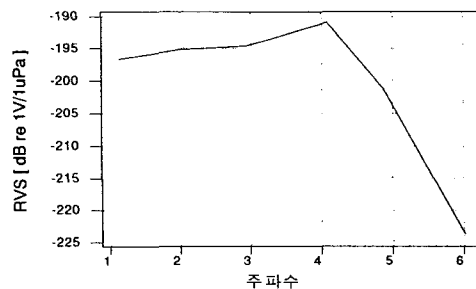
3.3 센서특성 및 시스템 타이밍 차트

초음파 센서는 음파를 전기적 신호로 변환하거나 역으로 전기적 에너지를 음파의 형태로 변환시켜주는 소자이다. 본 연구에서 사용한 초음파 센서의 수신감도 및 송신감도는 각각 <표 1> 및 <표 2>와 같으며, 사용 주파수 대역을 벗어나면 감도가 급격히 감소한다.

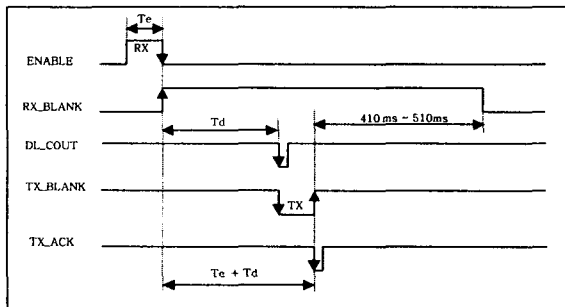
<표 1> 센서 송신감도



<표 2> 센서 수신감도



<그림 6>은 디지털 회로부와 PC간의 시스템 타이밍 차트를 보여주고 있으며, ENABLE 신호는 비교기의 출력으로서 수신신호의 펄스 폭 만큼의 T_e 시간이 발생된다. ENABLE 신호의 falling edge에서 수신신호의 비정상적인 입력을 방지하기 위해 RX_BLANK 신호가 high가 된다.



<그림 6> 시스템 타이밍 차트

DL_COUT 신호는 PC의 제어에 의해 일률 게이션 시간만큼을 유지하고 있다가 low가 되는 시점에서 TX_BLANK 신호도 동시에 low로 되어서 모의로 가공된 표적신호가 전력 증폭기를 거쳐 초음파 센서로 출력된다.

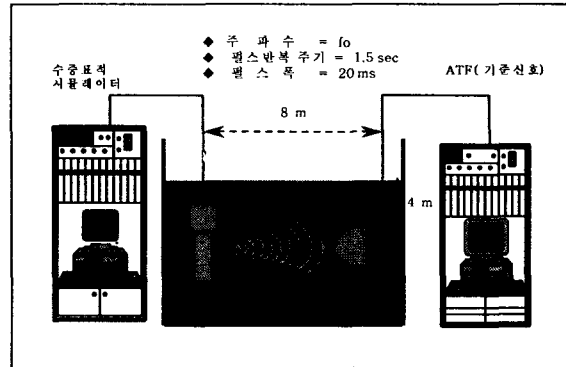
표적신호의 송신이 완료되면 TX_ACK 신호가 low로 되면서 이전까지 high 상태를 유지하고 있는 RX_BLANK 신호를 low로 떨어뜨려 다음의 입력되는 신호를 처리할 준비를 한다.

4. 실험결과 및 고찰

<그림 7>은 구현된 수중표적 시물레이터를 이용하여 실제 해상시험을 하기 전에 수조에서의 성능 확인시험을 위한 시험환경과 시험장비를 도식적으로 보인 것이다.

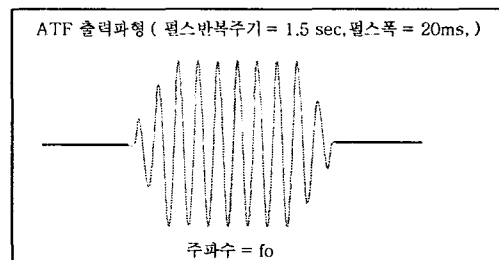
수조의 ATF(Acoustic Test Facility)에서 발생된 송신신호가 수중표적 시물레이터의 초음파 센서로 수신되면, 운용프로그램을 통해서 운용자가 지정한 형태의 일률게이션 파라

미터, 도플러 파라미터 및 하이라이트 파라미터에 의해 구현된 모의 표적신호를 발생시켜 출력한다.



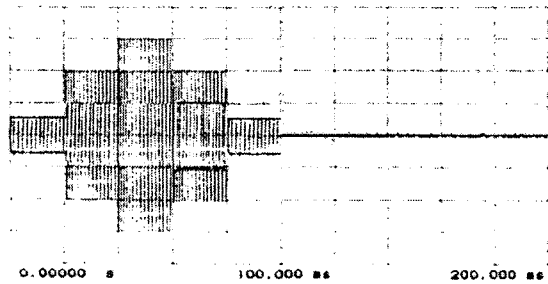
<그림 7> 수조시험 환경

<그림 8>의 신호가 본 연구에서 개발된 수중표적 시물레이터의 초음파 센서에 의해 수신된 다음 A/D 변환되어 메모리에 저장된다. 또한 시물레이터는 PC를 통하여 사용자가 설정한 파라미터를 기준하여 메모리에 저장된 데이터를 읽어내는 방법을 결정하고, 이에 따라 모의 표적신호를 구현하여 출력하게 된다.



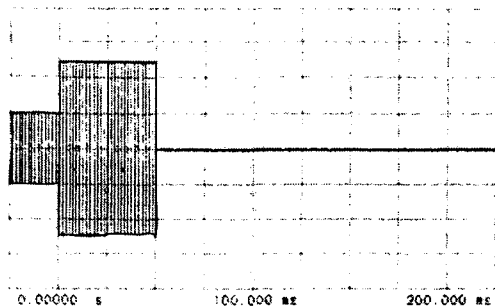
<그림 8> 송신 기준신호

<그림 9>는 시간지연 τ_i 를 20ms로 고정하고 도플러 주파수를 200 Hz, 표적 반사점의 반사강도를 W_1, W_2, W_3, W_4 로 하였을 때 표적 시물레이터의 출력을 전력 증폭기 입력단에서 측정된 파형이다.



<그림 9> 표적 시뮬레이터의 출력파형1

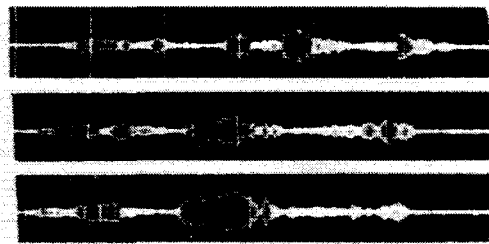
<그림 10>은 <그림 8>의 송신 준신호를 수중표적 시뮬레이터의 초음파 센서로 수신하여, A/D 변환 후 저장된 신호를 기준으로 일롱게이션 현상 구현을 위해서 포인터 딜레이를 20 ms, 40 ms로 설정하고, 도플러 주파수를 400 Hz로, 하이라이트 현상 구현을 위한 반사점의 반사강도를 파라미터를 W_1 , W_2 로 구현된 출력파형을 보인 것이다.



<그림 10> 표적 시뮬레이터의 출력파형2

<그림 9> 및 <그림 10>에서 보는 바와 같이 수중표적 시뮬레이터는 <그림 8>의 신호를 기준으로 직선표적 선상의 4개 혹은 2개 지점에서의 반사 신호가 순차적으로 연결되어 나타나는 일롱게이션 현상, 그리고 4개 혹은 2개 반사지점에서의 반사강도에 의해 신호의 크기 변화로 나타나는 하이라이트 현상이 구현하고 있음을 확인 할 수 있었다.

<그림 11>은 펄스 반복주기: 1[sec], 펄스 폭 15[ms]의 송신 기준신호를 표적으로 전송하여, 선체 표면에서 반사된 파형을 오실로스코프로 관측한 파형을 보여준다[1]. 수신파형에서 볼 수 있듯이 15[ms]의 짧은 펄스를 송신하여, 표적의 현재 자세에 의해서 펄스폭이 변화되고, 선체의 각 부위 표적강도 차이 및 수신 시간 차이에 따라서 포락선이 상당히 변화된 것을 관측할 수 있다.



<그림 11> 표적신호 파형

<표 3>에서는 <그림 9, 10> 및 <그림 11>에서 볼 수 있듯이 시뮬레이터와 표적신호에서 재현되는 도플러효과 범위, 하이라이트 개소 및 일롱게이션 변화비율을 비교 분석하였다.

<표 3> 시뮬레이터와 표적신호 비교

	시뮬레이터	표적
도플러효과 범위	± 1 KHz	± 0.5 KHz
하이라이트 개소	4 개소	10 개소 이상
일롱게이션	4 배	—

5. 결론

수중 이동체의 개발단계에서 잠수함 및 수상함과 같은 실제표적을 매번 동원하여 해상시험을 수행한다면 실험환경 구축을 위한 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 본 논문에서는 이와 같은 해상 시험환경을 고려한 수중 표적 시뮬레이터를 개발하였다. 성능검증을 위해 해

상시험을 수행하기 전에 수조에서 파라메타 설정에 따라 수신신호를 가공하여 발생시키는 파형을 관측함으로써 제대로 동작되는지 확인할 수 있었다. 향후 반사 포인터를 더욱 세밀하게 분해하고 자체 프로세싱 시간을 최소화하여 더욱 실제 상황에 가까운 시험 환경을 구현할 수 있도록 하는 연구가 필요하다.

[2] 초음파연구회, 「쉬운 초음파의 응용」, 기전연구사, pp. 367-400, 1992

[3] Williams S. Burdic, *Under Acoustic System Analysis*(2nd edition), pp. 149-188, 1991

[4] 이충웅, 「통신 방식의 기초」, 홍은출판사, pp. 110-125, 1983

참고문헌

[1] Robert J. Urick, *Principles of Underwater sound*(3rd edition), McGraw-Hill, pp.17~33, pp. 110-115, 1967

주 작 성 자 : 조 내 현

논문투고일 : 2003. 07. 07

논문심사일 : 2003. 09. 03(1차), 2003. 09. 03(2차)

심사판정일 : 2003. 09. 03

● 저자소개 ●



조내현

1987.2 금오공과대학 전자공학과(학사)
2001.2 경희대학교 산업정보 대학원(석사)
2003.9 - 현재 경희대학교 대학원 전자공학과 박사과정
1987.2 - 1992.3 한진중공업(마산) 특수선 설계
1992.4 - 현재 LG 이노텍 연구소(책임연구원)
관심분야 : 수중 신호처리, 전력전자, SOC 설계



예윤해

1980.2 경북대학교 전자공학(학사)
1982.2 서울대학교 전자공학과(공학석사)
1991.8 Texas A&M University, EE, Ph.D
1982 - 1987 금성사 중앙연구소
1992 - 현재 경희대학교 전자정보대학 교수
관심분야 : 광섬유 광학(통신용 부품, 광섬유 센서)



정연모

1980.2 경북대학교 수학과 졸업(학사)
1982.2 KAIST 전산과 졸업(공학석사)
1992.3 Michigan State University, EECS, Ph.D.
1982 - 1987 경제기획원 전산처리관
1992 - 현재 경희대학교 전자정보대학 교수
관심분야 : VLSI설계 및 CAD, 병렬처리 시뮬레이션, 컴퓨터구조 등