다 채널 수중 초음파 전달 시뮬레이터 설계

박종원*, 임용곤*, 최영철*

An Acoustic Vector channel Simulator Design

Jong-won Park*, Yong-kon Lim*, Young-chol Choi*

요 약

본 논문에서는 수중에서 초음파를 이용한 디지털 통신 시스템의 성능평가를 위한 수중 초음파 벡터 채널 시뮬레이터를 설계하였다. 채널 시뮬레이터는 송신단, 수중 채널 모델, 수신단, 빔형성기, 적응등화기로 구성되어 있다. 사용자가 원하는 매개변수를 입력하면 이에 따른 QPSK 신호가 발생되어 전송되며, 전송된 신호는 수중 초음파 전달 채널에서 입력된 채널 매개변수에 따라 시간지연, 진폭 및 도플러 주파수가 서로 다른 다중경로 신호가 생성되고, 생성된 다중경로 신호는 수중 잡음과 더해져서 수신기에 수신되도록 하였다. 또한 수신단에서는 안테나 배열과 안테나 소자의 위치에 따라 각 안테나 소자에 위상이 서로 다른 신호가 수신되도록 하였으며, 이 신호를 이용하여 여러 가지 배열 안테나의 구조, 배열 안테나 시스템용 알고리즘 및 적응 등화기 알고리즘에 따른 시스템의 성능을 비교 분석할 수 있도록 설계하였다.[1)]

Abstract

This paper discusses the development of an acoustic vector channel simulator for the performance analysis of an acoustic digital communication system. The channel simualtor consists of transmission module, acoustic channel model, receiver, beamformer, and adaptive equalizer. QPSK source signal is generated by the parameters specified by a user. The transmitted signal generates multipath signals which have a different delay, amplitude, and dopper frequency. The multipath singnals with the acoustic noises are the received signal. This paper presents the performance analysis of an acoustic digital communication system according to the antenna structure and the various baseband signal processing techniques.

*한국해양연구소 선박해양공학분소

Ⅰ. 서 론

수중에서의 초음파 전달 채널은 시, 공간적으로 변하는 신호의 전달속도, 다중경로, 비 균질성 등에 의한 변화가 매우 심하다[2, 5]. 따라서 수중에서 수신되는 신호의 진폭, 위상 및 주파수는 시간적으로 변하는 요인들에 의해 많은 영향을 받게된다. 이런 수중 초음파 전달 채널의 특징 때문에, 현재 상용화되어 있는 cellular 혹은 PCS 통신 시스템의 채널은 비교적 정확한 채널모델이 많이 나와있으나, 수중 초음파 전달 채널은 이렇다 할 채널모델이 없으며 다만 선진 외국에서는 실해역 실험을 통해서 채널을 측정하고 기존의 채널 매개변수들을 추출해내고 있는 정도이다[1]. 수중 채널의 이러한 특성은 수중 채널 시뮬레이션을 유도했다.

디지털 수중 초음파 통신시스템은 초창기에는 noncoherent FSK(Frequency Shift Keying) 방법을 주로 사용하였으나, 고속의 데이터 통신을 하기위해 [1]을 시발점으로해서 coherent 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. coherent 시스템의 수중 초음파 모뎀 실해역 실험에는 많은 경비가 소요되므로 성공적인 실해역 실험을 위한 준비작업의 일환으로 채널 시뮬레이터가 많이 개발되고 있다. 이러한 채널 시뮬레이터는 주로 수중 초음파 모뎀의 성능분석을 위한 목적으로 사용되고 있다. 또, 실제 수중 채널의 특성에 근접하는 수중 채널의 물리적인 모델에 관한 연구가 Ray tracing 기법을 주축으로 해서 꾸준히 되고 있으나 수중 채널의 특성상 아직까지는 미흡하다[2]. 본 논문에서는 우리가 개발한 수중 초음파 모뎀의 알고리듬 성능분석을 위한 채널시뮬레이터 개발에 대해서 설명하도록 하겠다.

Ⅱ에서는 채널 시뮬레이터의 구성 요소, 기능 및 목적에 대해서 설명하겠다. Ⅲ에서는 QPSK 변조기의 구성과 구조에 대해서 언급하고 Ⅳ에서는 수중 채널 모델링 방법에 대해서 구체적으로 설명하겠다. Ⅴ에서는 수신기의 구조와 주요 신호처리 기술인 빔형성 기법과 적응등화기에 대해 간략하게 설명을 하고, 결론과 향후계획으로 끝을 맺겠다.

Ⅱ. 채널시뮬레이터 개요

본 논문의 수중 채널 시뮬레이터는 AUV 등과 같은 송신단에서 영상 정보를 전송하였을 때, 전송된 신호가 수중 환경을 통과하면서 발생하는 채널 감쇄, 다중 경로 및 도플러 효과를 모델링하였다. 수신단에서는 배열 안테나를 사용하여 신호를 수신하도록 하였으며, 수신된 신호를 빔 형성시키고 적응 등화기 시스템을 통과시킴으로써 신호 대 잡음비의 개선 정도를 볼 수 있도록 설계하였다. 본 채널 시뮬레이터의 매개변수는 다음과 같다.

1. 배열 안테나의 종류 : 선형 등간격 구조, 원형 구조, 평면 구조, Hexa 구조 중 택일
2. 배열 안테나 소자의 수(Hexa 구조에서는 37로 고정)
3. 배열 안테나 소자의 간격 (선형 구조와 평 면 구조에서는 파장의 반)
4. 해저의 깊이
5. 송신단의 깊이
6. 수신단과 송신단 사이의 거리
7. 다중경로의 수
8. 배경잡음 신호의 전력
9. 송신단의 속도 및 이동방향
10. frame 수
11. 적응 등화기에서 tap-delay line(TDL)의 수 및 매개변수

또한 다음의 입력 매개변수는 시뮬레이터 내에 고정된 값이나 고정된 방식으로 저장되어있다.

1. 반송주파수 = 32 KHz
2. 신호대역폭 = 4 KHz
3. 변복조방식 : QPSK

채널 시뮬레이터의 블록도는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 수중채널 시뮬레이터는 송신기 블록, 수중 채널 블록, 수신기 블록 등으로 구성되어 있다. 송신단에서는 반송주파수가 32 KHz이고 대역폭이 4 KHz인 QPSK 신호를 발생시킨다. 수중 채널 블록에서는 송신한 신호의 다

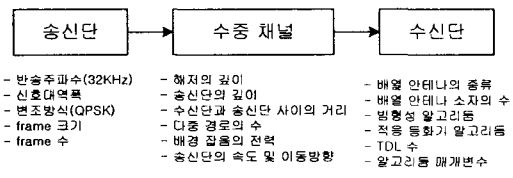


그림 1 채널 시뮬레이터 구조

중경로 신호와 도플러 효과, 채널 감쇄 등을 모델링 하였으며, 이 다중경로 신호와 수중잡음이 합해져서 QPSK 수신기에 수신되도록 하였다. 또한 각 배열 안테나 소자에 수신된 신호는 빔 형성기, 적응 등화기를 거쳐 복원된다. 그리고 적응 등화기 출력 신호에 대한 SNR (Signal to Noise Ratio)과, 이 신호에 대한 constellation plot이 출력되도록 하였다.

Ⅲ. 송신단 : QPSK 변조기

본 채널 시뮬레이터는 QPSK 변복조 방식을 채택하였다. QPSK 변조방식은 PSK 방식 중에서 같은 전력일 때 대역폭 효율성이 제일 좋다. 본 채널 시뮬레이터에서 사용된 QPSK 변조기의 구조는 그림 2와 같다.

그림 2의 QPSK 변조기에서 data 신호는 보통 송신단 데이터를 압축하고, FEC (Forward Error Correction) coding을 한 신호이다. 이 data는 MUX에서 training sequence 신호와 주기적으로 time multiplexed 된다. 여기서 training sequence 신호는 송신 단에서 이미 알고 있는 신호로써, 송신 단에서 신호원의 방향 추정, 적응 등화기에서의 다중경로 추정 및 수신 신호의 무선채널 매개변수 추정용으로 사용된다. time multiplexed된 데이터의 프레임 구조는 그림 3과 같다.

frame의 구조는 시뮬레이터의 구조에 크게 영향을 끼치지 않으므로 우선은 아주 간단하게 잡았다. time multiplexed된 디지털 신호는 serial-to-parallel

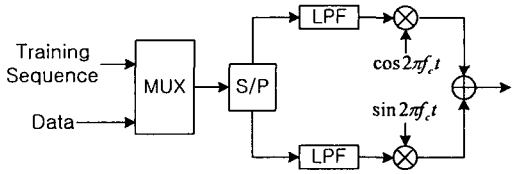


그림 2 QPSK 변조기의 구조

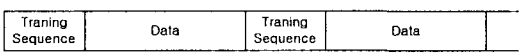


그림 3 frame 구조

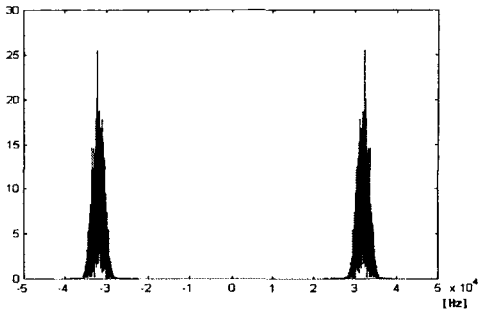


그림 4 송신 신호의 주파수 스펙트럼

변환기에서 각각 in-phase(I) 채널 및 quadrature-phase(Q) 채널의 신호로 분리되며, 분리된 I 채널 및 Q 채널 신호는 각각 LPF를 통과한 후에 QPSK 변조되어 전송된다. 따라서 송신 신호는 아래 식과 같고, 송신 신호의 주파수 스펙트럼은 그림 4와 같다.

$$s(t) = b_{ILPF}(t)\cos(2\pi f_c t) + b_{QLPF}(t)\sin(2\pi f_c t)$$

여기에서 $b_{ILPF}(t)$, $b_{QLPF}(t)$는 각각 I 채널과 Q 채널의 LPF 출력이고 f_c는 반송주파수이다.

그림 4를 보면 그림 3의 프레임 신호는 4 KHz로 대역 제한되고 32 KHz의 반송주파수에 QPSK 변조되어 전송됨을 알 수 있다.

Ⅳ. 수중 채널 모델링

수중에서 신호는 기하학적 발산 및 흡수 등에 의해서 경로 손실이 발생한다. 본 시뮬레이터에서는 수중에서의 음향 전달 손실 [3]을 다음과 같이 고려하였다.

$$\rho = 20\log r + \alpha(f)r$$

여기서 r 은 송신기와 수신기 사이의 거리이고, $\alpha(f)$는 수중에서의 흡입상수 이다.

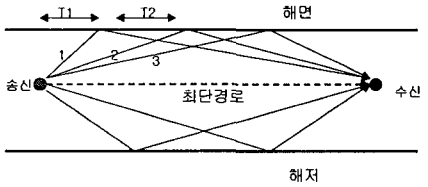


그림 5 다중경로

신호는 수중에서 전파되면서 그림5와 같이 해수면과 해저면 등에 의해 반사되어 다중경로로 전송된다[5]. 다중경로만을 고려한 수중 초음파 전달 채널은 다음과 같다.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L} \rho_l \delta(t-\tau_l)$$

여기서 ρ_l 은 l 번째 다중경로 신호의 음향 전달 손실이고, τ_l 은 l 번째 다중경로 신호의 시간 지연이며, L은 다중경로의 수이다.

송신단과 수신단 의 상대적인 이동과 해수의 유동에 의해 도플러 편이가 발생하는데, 도플러 편이가 고려된 수중 초음파 전달 채널은 다음과 같다.

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L} \rho_l \delta(t-\tau_l)\, e^{-j2\pi\Delta ft} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

여기서 도플러 편이 Δf 는 아래와 같다.

$$\Delta f = -\frac{v}{c}\cos\theta$$

여기에 θ는 송신단과 수신단이 이루는 각도이고, v는 송신단과 수신단의의 상대속도로써 본 시뮬레이터에서는 해수의 유속은 고려하지 않았다. 또한 c는 해저에서의 음속이고, 본 수중채널 시뮬레이터에서는 해저의 깊이에 따른 온도차이, 염도 등에 의한 속도의 차이를 고려하지 않았으므로, 해저에서의 음속은 1500 m/sec로 일정하게 하였다.

식 (1)의 수중 초음파 전달 모델은 수신단에서 배열 안테나를 사용하면, 송신단의 위치에 의해 수신기의 배열 안테나의 기준선을 기준으로 방향과 높이가 결정된다. 따라서 수중채널 시뮬레이터에 송신단의 이동 속도와 이동 방향이 입력되면, 송신단의 이동으로 인한 수중 채널 (즉, 수신 방향, 채널 감쇄, 시간지연, 도플러 주파수, 다중경로의 방향, 수신 방향, 수신 높이 등)의 변화가 발생하도록 하였으며, 이들 매개변수는 매 frame 마다 갱신되도록 하였다. 그러므로 채널 시뮬레이터에서 QPSK 신호가 발생되면, 발생된 QPSK 신호는 위에서 설명한 수중 채널을 통과하여 수신된다. 또한 수신된 신호에는 수중 잡음이 부가되도록 하였다. 본 수중 채널 시뮬레이터에서 고려한 수중 초음파 전달 모델이 그림 6에 보여진다.

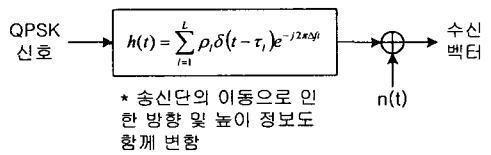


그림 6 수중 초음파 전달 모델

V. 수신단

수중 채널을 통과한 신호는 수신단의 배열 안테나에 수신된다. 수신 신호는 수신단의 배열 안테나의 구조에 의해 결정되며, 본 시뮬레이터에서는 선형 등간격 구조, 원형 구조, 평면 구조, Hexa 구조 등[6, 9, 10] 4가지 안테나 구조를 고려하여 수신 신호 벡터를 모델링하였다. Hexa 구조는 그림 7과 같이 원형 구조의 합으로 해석할 수 있다.

QPSK 변조 방식에 따른 Quadrature 수신기를 채택하였고 구조는 아래 그림과 같다. 수신기를 거친후 신호는 반송주파수가 제거된 기저대역 신호가 생성되는데, 이 신호를 이용해서 우리는 기저대역 신호처리 방법을 통하여 채널의 왜곡을 보상해서 전송한 신호를 복원한다.

수중 채널은 물이라는 매질의 특성, 해수면 및 해저면의 특성 등에 의해서 채널의 특성이 형성되는데, 시간에 따라서 빠르게 변화하고 왜곡 특성들이, 예를 들면 다중 경로나 fading, 공기 중의 그것과는 비교할 수 없을 정도로 빠르게 변화하고 편차도 크다. 따라서 수중 통신 시스템은 반드시 채널의 왜곡을 보상할 수 있는 기법이 필요한데, 우리는 기저대역 신호처리 방법으로 빔형성 기법과 적

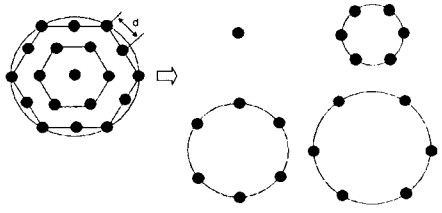


그림 7 Hexa 구조 해석

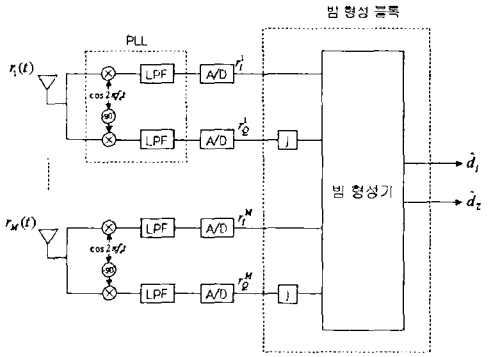


그림 8 Quadrature 수신기 구조

응 등화기를 사용하였다. 본 채널 시뮬레이터는 여러 가지 기저대역 신호처리 기법에 대해서 성능분석을 수행하는 것을 주 목적으로 한다.

빔형성 기법은 한 개의 안테나를 사용하는 것이 아니라 여러 개의 안테나를 사용하여 공간 diversity를 얻는 방법이다[6, 10]. 우리가 사용하는 신호는 광대역 신호이므로 광대역 빔형성 기법을 사용해야 한다. 그림 9와 10에 협대역 빔형성기와 광대역 빔

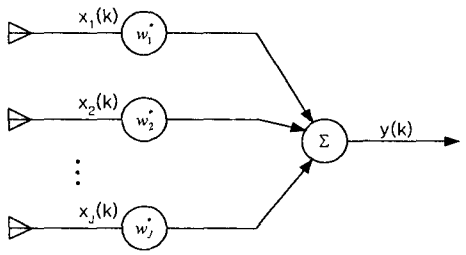


그림 9 협대역 빔형성기 구조

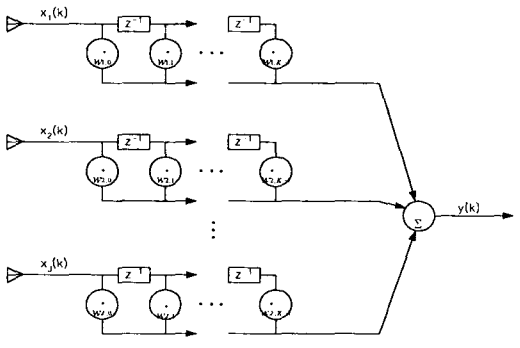


그림 10 광대역 빔형성기 구조

형성기를 보였다[6, 7, 8, 10].

협대역 신호의 경우 빔형성기의 구조는 각각의 안테나에 weight를 곱하는 간단한 구조이다. 광대역 신호의 경우 훨씬 더 복잡한데, 광대역 빔형성기는 주파수 특성을 형성해야 하므로 각 안테나에 FIR 필터를 첨가했다. 광대역 빔형성기의 FIR 필터의 tap 수를 결정하는 방법은 [7, 8]에 잘 나와있으나 수중 환경 적용가능여부 검증이 필요하다. 수중 채널은 시변채널이므로 빔형성기의 weight도 시간에 따라서 변화해야 한다. 따라서 우리는 신호 설계시 채널 특성을 고려하여 채널 특성이 한 frame 내에서는 크게 변화하지 않도록 해야한다. 이러한 frame 설계가 수중 통신 시스템 설계의 가장 중요한 부분이다. 이렇게 하면 매 frame에 training sequence를 삽입하여 적응 빔형성 기법을 사용할 수 있다. 적응 빔형성 기법의 경우 weight를 결정하는 방법은 LMS, RLS, fast RLS 등이 있고 각각의 특성은 잘 알려져 있다[4, 10].

등화기는 채널의 왜곡을 보상하는 역할을 한다. 적응 등화기는 적응 빔형성기처럼 training sequence를 이용하여 채널을 추정한 후 채널 전달함수의 역함수를 구현한다[4]. 빔형성기와 마찬가지로 적응 등화기의 weight를 결정하는 방법도 LMS, RLS, fast RLS 등이 있다.

적응 등화기와 적응 빔형성기를 동시에 사용할 경우 한 가지 중요한 점이 있다. 빔형성기의 경우 광대역 빔형성기를 사용하므로 각 안테나마다 FIR 필터를 첨가하는데, tap 개수가 하나 증가하면 안테나 개수만큼 tap 수가 증가하게 된다. 반면 적응 등화기의 경우 빔형성기의 출력신호는 하나이므로 적응 등화기 tap 수가 1개 증가하면 전체 tap 수가 1개 증가하는 것으로 끝난다. 따라서 빔형성기 FIR 필터의 tap 수와 적응 등화기 tap 수를 시스템의 성능과 복잡도를 고려하여 최적설계를 해야한다.

VI. 채널 시뮬레이터 GUI

그림 8은 개발한 채널 시뮬레이터 외관이다. 송신단과 수신단 등의 위치를 임의로 지정해 줄 수 있으며 각종 채널 및 알고리듬 관련 매개변수 들을 사용자가 직접 입력할 수 있도록 GUI를 설계하였

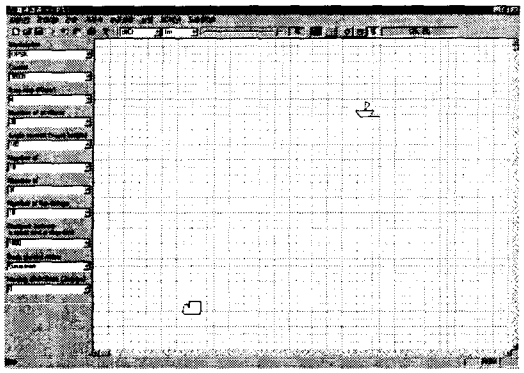


그림 11 채널시뮬레이터 외관

다. GUI 외관은 C++로 코딩하였고 주요 알고리듬은 Matlab을 사용하여 구현한 후 링크시켰다.

그림 12는 채널 시뮬레이터의 출력이다. 그림 12-(a)는 배열 안테나를 사용하지 않은 경우의 SNR과 수신 신호의 성상도이고, (b)는 배열 안테나를 사용하여 LCMV 빔형성 기법을 사용한 경우(적응 등화기는 없음), (c)는 적응 등화기까지 사용한 경우이다. (d)는 빔패턴을 보여주고 있다.

VI. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 수중에서 초음파를 이용한 디지털 통신 시스템의 성능평가를 위한 수중 초음파 벡터 채널 시뮬레이터를 설계하였다. 채널 시뮬레이터는 송신단, 수중 채널 모델, 수신단으로 구성되어 있다. 사용자가 원하는 매개변수를 입력하면 이에 따른 QPSK 신호가 생성되어 채널 모델에 따라서 도플러 효과, 다중경로, fading을 갖고 잡음과 더해져 수신된다. 수신단에서는 배열 안테나를 이용한 Quadrature 수신기 구조를 채택하였다. 수신된 신호를 사용하여 여러 가지 배열 안테나의 구조, 배열 안테나 시스템용 알고리즘 및 적응 등화기 알고리즘에 따른 시스템의 성능을 비교 분석할 수 있도록 설계하였다.

본 논문의 채널 시뮬레이터는 아직 수정, 보완해야 할 사항이 많다. 먼저 복잡한 수중 채널의 특성을 단순히 도플러 효과와 다중경로만으로 모델링하였는데, 좀 더 실제 수중채널과 유사한 채널 모델링 방법이, 예를 들면 Ray-tracing 기법을 이용한

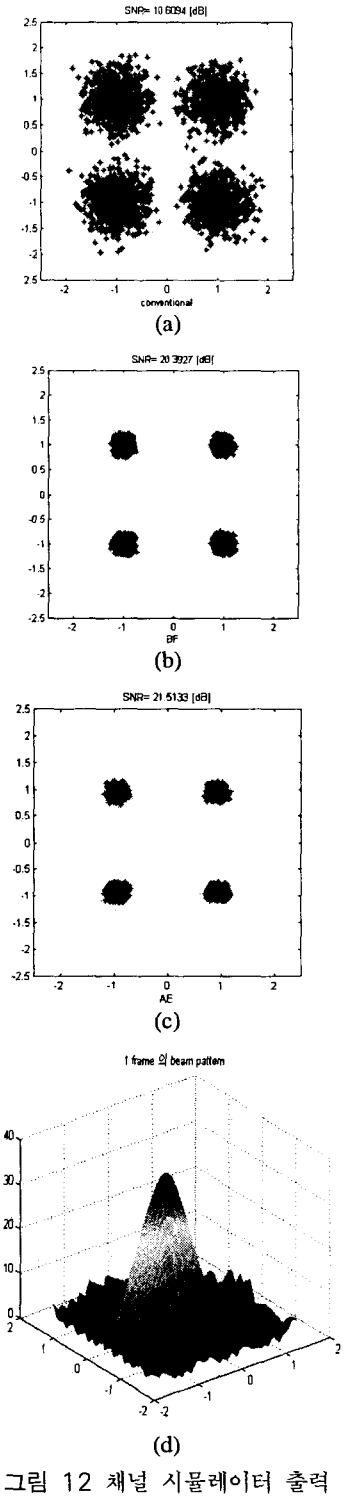


그림 12 채널 시뮬레이터 출력

채널 모델링, 필요하다. 또, 여러 가지 빔형성 기법이나 적응 등화기 알고리듬을 구현하여 성능분석을 수행해야한다.

후 기

본 연구결과는 산업자원부의 민군겸용기술 과제 "초음파를 이용한 수중영상 전송기법 개발"의 연구결과의 일부임을 밝혀 둔다.

참고문헌

[1] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 19, pp. 100-111, Jan. 1994.

[2] D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the Art in Underwater Acoustic Telemetry," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 25, pp. 4-27, Jan. 2000.

[3] Willam Burdic, Underwater Acoustic System Analysis, 2nd Edition, Prentice Hall, 1991

[4] J. G. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill, 1983

[5] 임용곤, 박종원, "AUV용 수중 초음파의 통신 환경의 Multipath 해석", 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, 1997.5

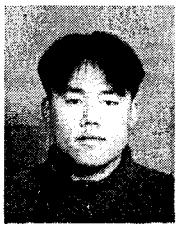
[6] J. Litva and T. Lo, Digital beamforming in wireless communications, Artech House, 1996

[7] F. Vook and R. Compton, "Bandwidth performance of linear adaptive arrays with tapped delay-line Processing," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 28, No. 3, pp. 901-908, July 1992.

[8] W. Rodgers and R. Compton, "Adaptive array bandwidth with tapped delay-line processing," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 15, No. 1, pp. 21-27, Jan. 1979.

[9] L. Godara, "Application of antenna arrays to mobile communications, Part II: Beam-forming and direction-of-arrival considerations," Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997

[10] B. Van Veen and K. Buckley, " Beamforming: A versatile approach to spatial filtering," IEEE ASSP Magazine, pp. 4-24, April 1988.



박 종 원

1995년 아주대학교 학사 - 전자공학

1997년 아주대학교 석사 - 전자공학

1997.3 - 1999.3 : 한국기계연구원 연구원

1999.4 - 현재 : 한국해양연구소 연구원

주요관심분야 : 수중 초음파 통신 시스템 개발, DSP 신호처리 및 시스템 개발, 시험조사선의 종합정보통신망 시스템 개발

임 용 곤

1979년 충남대학교 학사 - 전기공학

1984년 충남대학교 석사 - 전기공학

1994년 아주대학교 박사 - 전자공학

1980.7 - 1980.12 : 한국선박연구소 연구원

1981.1 - 1989.11 : 한국기계연구소 대덕선박분소 선임연구원

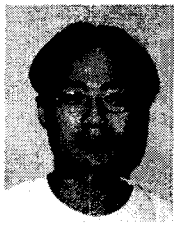
1989.12 - 1993.4 : 한국기계연구소 부설 해사기술연구소 선임연구원

1993.4 -1999.3 : 한국기계연구원 책임연구원

1999.4 - 현재 : 한국해양연구소 책임연구원

1997.6 - 현재 : 한국해양정보통신학회 이사

주요관심분야 : 수중 초음파 신호처리 및 DSP 신호처리 개발, 선박 설계 및 시험조사선의 종합정보통신망 시스템 개발, 수중 로봇 시스템(AUV, ROV, SAUV, MDV) 개발, ISDN 네트워크 통신망 기법 개발



최 영 철

1999년 한국과학기술원 학사 - 전자공학

2000년 한국과학기술원 석사 - 전자공학

2000.3 - 현재 : 한국해양연구소 연구원

주요관심분야 : 통신 및 디지털 신호처리, 강인 추정이론, 강인 필터이론, 수치 해석