

수중 음향 통신의 채널 특성

김영철*·오창현**·강희조***·조성준****

*인하공업전문대학 정보통신과 · **한국기술교육대학교 정보기술공학부

***목원대학교 IT공학부 컴퓨터·멀티미디어공학부

****한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터공학부

목 차

- I. 서 론
- II. 수중 음향 통신 채널
- III. 채널 특성을 고려한 수중통신 시스템 설계
- IV. 결 론

I. 서 론

초기의 수중 음향학(underwater acoustics)은 물리학의 한 분야로서 연구되었으며, 20세기에 들어오면서 그 영역은 음파(acoustic wave)를 이용한 수중 음향 통신(underwater acoustic communication)에 대한 연구로 확대되었다. 연구 분야에는 음파 발생기 및 수신기를 적절하게 배치하여 주기적으로 음파의 송수신을 반복하고 수신된 음향정보를 분석한 후 예측 모델에 의해 지구 온난화, 엘니뇨, 해수유동, 수온전선 등 해양 특성 파악을 목적으로 하는 시스템과 해양의 생태계, 해저 지형 등 해양 탐사 시스템 및 군사적 목적의 연구 등이 있다.

음파(acoustic wave)란 탄성매질, 즉 고체/액체/기체를 통해 전파되는 탄성파이다. 탄성파는 탄성 복원력이 없는 매질에서 전달이 불가능 할 뿐 아니라 전자파에 비해서 속도가 느리고 감쇄가 심하여 원거리를 신속하게 전달할 수 없어 지상이나 우주 공간 통신에 응용이 불가능하다. 따라서 일반적으로 지상통신에서는 전자파를 이용하며, 전자파는 비점 응력에 저항하는 복원력에 의하여 에너지가 전달된다. 그러나 전달응력(shear)이 존재하지 않는 유체에서는 파동이 전달되지 못하기 때문에 수중통신에서는 음파를 이용한다. 파장이 긴 음파일수록 쉽게 흡수되지 않기 때문에 수중통신에 사용되고 있으며

짧은 파장을 갖는 높은 주파수의 음파는 해수면, 해저면, 생물체, 선박, 잠수함 등에 쉽게 반사되거나 산란되므로 이러한 음파들을 이용하여 다양한 물체들을 식별하는데 이용하고 있다. 하지만 수중통신의 경우 경계면 결합(interface coupling)이 쉽고 비교적 균일한(homogeneous) 매질이 분포함에도 불구하고 수신과 해저상태 및 위도에 따라 음파의 속도나 진행통로(duct)가 달라지는데 이는 수중에서 음파의 전파는 음속분포에 따라 직접적으로 영향을 받으며, 음속은 수온, 염분 및 수심 혹은 압력에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 음파의 전달 메커니즘에 대한 모델의 연구, 즉 수중 음향 채널(underwater acoustic channel)의 물리적 특성에 대한 모델링 및 시뮬레이션은 수중통신 시스템의 성능 개선에 있어서 매우 중요한 부분으로써 연구되고 있다. 또한 채널을 통해 왜곡된 신호를 복구하기 위한 등화기술과 이를 극복하기 위한 적응 변조기법, 에러 정정코드, 다이버시티 기법 및 시스템 구조에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 기고에서는 문헌[1]의 내용을 중심으로 수중 음향 통신의 채널 특성에 대해 살펴본다.

II. 수중 음향 통신 채널

일반적으로 수중통신 시스템의 성능은 거리와 전송율의 곱으로 나타낸다. 그림 1은 학계와 업계에서 개발된 실험용 수중통신 모델들의 성능을 정리한 그림이다 [2]-[5]. 고속 전송율 혹은 장거리 성능은 deep-water 채널에서 실험한 것이며, 반대로 저속 전송율 혹은 단거리 성능은 shallow-water 채널에서 실험한 것이다. 그림에서 “◆”는 학계에서 개발한 모델의 실험 결과이며, “■”는 업계에서 개발한 모델에 대한 실험 결과이다. 포락선은 실험용 모델들의 성능 경계로 약 40 [Km·Kbps]이며, 이는 수중통신 시스템의 성능, 즉 전송율과 거리는 채널의 특성에 따라 결정됨을 의미한다. 또한 채널의 정확한 모델링을 통한 시스템의 성능을 개선하기 위한 적응 변조기법, 에러정정 코드, 다이버시티 등의 기술에 대한 연구의 필요성을 말하고 있다.

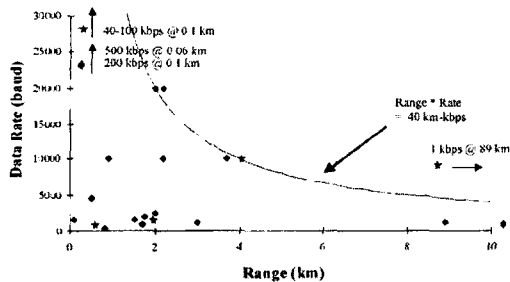


그림 1. 실험용 수중 음향통신 모델들의 성능

송/수신기 사이의 거리가 가깝고 (short range) 단일 경로를 통해 수신기에 도달되는 직접파 성분에 대한 채널 모델로서 AWGN(additive white Gaussian noise) 모델링을 사용하기도 하지만, 일반적인 수중통신 시스템에서 송신된 음파는 시간에 따라 랜덤하게 변화하는 채널 (random time-varying channel)을 통해 전파되기 때문에 수중통신 시스템 설계를 위해 적절한 모델링이 필요하며, 또한 시스템 설계에 있어서 주변 잡음환경 및 전파 손실(propagation loss)에 대한 분석이 필요하다[6].

랜덤하게 변화하는 채널(random time-varying channel)을 통한 신호의 전파에 관한 연구는 그 범위가 매우 넓기 때문에 여기서는 수중통신 시스템 채널의 물리적 특성에 대해 알아보려고 한다. 수중통신 채널의 특

성은 다음과 같다. 첫째, 일반적으로 30 [kHz] 이하에서 동작하는 대부분의 수중통신 시스템에 있어서 송신된 음파는 매질에서 감쇄 혹은 흡수되기 때문에 대역 제한된 시스템과 같으며, 둘째, AWGN 채널로 모델링되는 시스템을 제외한 모든 경우 송신된 음파는 매질에서의 반향에 의한 지연시간 확산(travel time spreading)과 Doppler 효과(frequency spreading)를 겪는다. 따라서 전자기파를 이용한 지상통신에서와 마찬가지로 시스템의 설계에 있어서 이러한 채널에 의한 영향을 보상하는 부분이 필요하다. 그러나 지상통신 시스템처럼 이러한 수중통신 채널의 모든 특성을 고려한 하나의 수중통신 시스템을 설계하는 것은 불가능하다.

수중통신 채널 모델링에 있어서 시뮬레이션을 통해 채널의 특성에 영향을 미치는 여러 요소들을 고려한 알고리즘에 대한 많은 연구가 발표되었다[7]-[13]. 그러나 보다 정확한 모델링은 거리, 반송파 주파수, 대역폭 등 관련된 요소에 따라 매우 복잡하며 시스템에 반영함에 있어서 많은 문제점을 지닌다. 그리고 ray 경로들의 분석을 통한 직접적인 모델링 방법은 경계면에서 결합조건, 많은 micro-path들, ray chaos 현상 등을 고려해야 하기 때문에 거리, 반송파 주파수, 대역폭 등에 따른 채널 모델을 결정하는 것은 쉽지 않다. 현재까지의 많은 수중통신 채널 모델들은(SAFARI¹⁾ 혹은 OASIS²⁾ 등 송신된 주파수와 다른 다중 경로를 통해 수신된 신호들 사이의 coherence를 기본적으로 가정하며, 낮은 주파수에 대한 채널 모델들을 시스템에 적용할 때는 채널의 spatial coherence 및 temporal coherence에 대한 가정과 시뮬변성에 대한 가정을 고려해야만 한다. 현재 유용한 수중통신 채널 모델링 기법으로 전송율의 변화에 따른 특성을 잘 나타낼 수 있는 채널 모델링 기법인 parabolic equation methods와 Gaussian beam ray methods, wavenumber integration methods 등이 있다[14],[15].

지상통신에서와 마찬가지로 송신된 음파는 수중통신 채널에서의 반향, 굴절, 산란 등에 의해 여러 경로를 거친 많은 파가 수신되며, 송/수신기의 이동과 송/수신기

- 1) Seismo-Acoustic Fast field Algorithm for Range-Independent environments
- 2) U.S. Navy Organic Airborne and Surface Influence Sweep

사이의 매개물의 시간에 따른 변화에 의해 채널이 시간에 따라 변화하기 때문에 송신된 신호는 다중경로에 의해 시간적으로 지연확산 되는 현상 및 시변성에 의해 대역폭이 변화하는 Doppler 현상이 발생한다. 따라서 적응적인 수중통신 시스템의 설계에 있어서 채널의 시변성에 대한 모델링과 scattering의 주파수 영역에서의 해석을 통한 채널의 임펄스 응답 혹은 주파수 응답에 대한 연구는 필수적이다.

일반적인 수중통신 시스템은 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$r(t) = s_r(t) + n(t). \quad (1)$$

여기서 $r(t)$ 는 수신 신호, $n(t)$ 는 Gaussian 잡음이며, $s_r(t)$ 랜덤 시변 시스템인 수중 음향 채널의 출력으로 다음과 같이 표현된다.

$$s_r(t) = \int b(t, x) s_i(t-x) dx. \quad (2)$$

여기서 $s_i(t)$ 는 시스템에 적합하게 변조된 송신 신호이며, $b(t, x)$ 는 채널의 임펄스 응답으로 Doppler 효과와 관련된 시간 t 와 전달시간과 관련된 거리 x 에 따라 채널의 특성이 변함을 나타낸다.

이 모델은 다중경로 현상을 겪는 통신에서 이를 극복하기 위한 기술로서 Rake 수신기가 소개된 이후 레이더에서 반향되어 수신되는 신호에 대한 모델링을 위해 처음으로 적용되었으며[16], 그 이후 전자기파 채널에 대한 연구는 많은 발전을 이룩하였다. 반면, 수중통신에서는 능동 소나(active sonar)에서 처음으로 적용되었지만[17], 지상통신에서의 비교하면 수중 음향통신 채널에 대한 최근까지의 연구 결과는 미비하며, 채널에 의한 영향을 표현하기 위해 다양한 접근 방법을 취한 연구결과가 있지만, 이들의 많은 부분이 특정한 변조기법에 국한된 내용이다. 따라서 다른 변조기법에 의한 신호에 대한 채널 응답을 추정하기는 어렵기 때문에 직접적으로 채널의 임펄스 응답을 측정하여 확률적 접근 방법을 시도하였으나 측정된 부분의 일부뿐만이 확률적 특성으로 나타났다.

결과적으로 임펄스 응답뿐만 아니라 전송 손실, coherence, fading에 대한 많은 모델이 개발되었으나 신뢰성 있는 수중통신 시스템을 설계하기 위한 모델로는 적합하지 않았다.

디지털 통신 시스템에서 채널 출력의 이산적인(discrete) 표현은 다음과 같다.

$$s_r[n] = \sum_m b[n, m] s_i[n-m]. \quad (3)$$

등화과정 혹은 Doppler 효과를 보상하기 위해 등화기가 동적으로 조정되는 경우 샘플링 rate은 symbol rate의 정수배가 되어야 한다.

$b(t, x)$ 의 이차 모멘트는 Doppler 스펙트럼과 전달 시간에서 신호의 전력 분포를 나타내며, 채널의 물리적 현상에 대한 확률적 모델이 된다.

채널의 출력 $s_r(t)$ 의 시간에 따른 상관도(correlation)는 다음과 같다.

$$K_{S_r}(t) = \int \int K_{b(t_1, t_2, x_1, x_2)} s_i(t_1-x_1) s_i^*(t_2-x_2) dx_1 dx_2 \quad (4)$$

여기서,

$$K_{b(t_1, t_2, x_1, x_2)} = E[b(t_1, x_1) b^*(t_2, x_2)], \quad (5)$$

는 채널 임펄스 응답의 공분산(co-variance)이다.

수중 음향 채널의 랜덤과정(random process)은 WSSUS(wide sense stationary and uncorrelated scattering)라고 가정할 수 있다. 수중통신에서 사용되는 주파수 대역에서 다른 전달시간에서 수신된 신호는 송신된 신호가 각기 독립적인 경로, 즉 서로 다른 물리적 현상을 겪고 수신된 파들의 합성으로 구성되기 때문에 uncorrelated scattering에 대한 가정은 가능하지만, 파도의 움직임 현상들에 대한 분석이 중요하게 되는 낮은 주파수 대역을 사용하는 시스템 혹은 전달시간간의 이격거리가 매우 짧은 경우 이 가정은 성립되지 않을 수 있다. 다음으로 채널의 시변성은 surface 혹은 internal wave와 같은 wave motion과 송/수신기 간의 평균 거리 변화에

따른 평균 Doppler 편이 정도로 특성화되며, 수신되는 신호의 크기는 시시각각 변화하지만 그 통계적 특성인 평균 및 확률분포는 일정하기 때문에 채널의 랜덤과정은 정상과정이라 가정할 수 있다. 위 두 가지 가정에 따라 식 (5)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{b(t_1, t_2, x_1, x_2)} \rightarrow K_{b(t_1 - t_2, x_1)} \delta(x_1 - x_2) = K_{b(\tau, x_1)} \delta(x_1 - x_2). \quad (6)$$

여기서 $\tau = t_1 - t_2$ 이다. $K_{b(\tau, x)}$ 는 전달시간 지연 x 에서 복소 전송손실을 갖는 진폭변조 시스템이라 말할 수 있으며, 물리적으로 송신신호의 대역폭과 같은 주파수로 표본화된 경우 동일 전달시간을 갖는 경로들의 중첩을 의미한다.

수중 채널을 모델링하기 위해 채널 임펄스 응답의 공분산 함수 $K_{b(\tau, x)}$ 를 채널 응답의 시변성과 관련된 인자 τ 의 영역에서 주파수 영역으로 변환하면, Doppler 전력 스펙트럼이라 하는 산란함수(scattering function)를 얻을 수 있으며, 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_b(f, x) = \int K_{b(\tau, x)} e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

이 산란함수는 주파수 f 와 거리 혹은 전달시간을 나타내는 x 에 따른 전력 분포를 나타내는 함수이며, 다음과 같이 두 형태로 표현할 수 있다.

$$S_b(x) = \int S_b(f, x) df \quad (8)$$

$$S_b(f) = \int S_b(f, x) dx \quad (9)$$

신호의 전달시간 확산 정도는 등화기에서 요구되는 tap 수를 결정하며, 또한 각 거리에서 Doppler spread는 적응 등화기에서 요구되는 대역폭을 결정하기 때문에 동기 수신기에서 이 함수는 매우 중요하다.

그러나 광대역 수중통신 시스템의 경우 WSSUS를 가

정한 채널 모델링을 사용함에 있어서 송/수신기의 이동성에 의한 영향이 단지 간단한 Doppler shift에 의해 표현될 수 없다는 것을 고려하여야 한다. 이에 대한 common criterion은 다음과 같다.

$$(WT)^{-1} \gg \frac{v}{c} = M \quad (10)$$

여기서 WT 는 수신기의 정합필터에서 신호 대역폭 시간 곱을 말하며, v/c 는 송/수신기의 이동속도와 음파의 마하수 (Mach number)의 비를 나타낸다. 수중통신 시스템에서 $c=3000$ [knot] 경우 v/c 는 약 10^{-3} 정도이기 때문에 상대적으로 WT 는 매우 큰 값이 되어 광대역 시스템에서는 이와 같은 사항이 고려되어야 한다.

산란함수와 마찬가지로 채널 임펄스 응답의 공분산 함수 $K_{b(\tau, x)}$ 를 다중경로에 의한 전달시간과 관련된 인자 x 의 영역에서 주파수 영역으로 변환하면, 두 주파수 상관함수(two-frequency correlation function)를 얻을 수 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$H_b(\tau, \nu) = \int K_{b(\tau, x)} e^{j2\pi\nu x} dx \quad (11)$$

$H_b(\tau, \nu)$ 는 시간이 τ 만큼 지연된 두 채널 응답 간에 ν 로 구분되는 주파수 상호 상관함수 나타낸다. 특별한 경우로 $H_b(0, \nu)$ 는 임의의 시간에서 채널 임펄스 응답의 주파수 자기상관 함수이며, $H_b(\tau, 0)$ 는 시간이 τ 만큼 지연된 두 채널 응답 간에 동일한 주파수 성분에 대한 상관도를 나타낸다. 특히 두 주파수 상관함수 (two-frequency correlation function)는 MFSK 시스템에서 최소 톤(tone) 간의 이격 거리를 결정하는 중요한 파라메타가 된다.

결과적으로 위에서 제시한 두 함수에 의한 채널 모델링은 정해진 반송파 및 신호 대역폭에서 송신된 신호, 즉 변조기법에 대해 독립적인 모델이기 때문에 변조 기법에 따른 시스템의 성능 평가를 위한 시뮬레이션 모델로 적용할 수 있다[18].

III. 채널 특성을 고려한 수중통신 시스템 설계

수중 음향통신 시스템의 설계에 있어서 가장 중요한 문제는 채널의 물리적 특성에 따라 적절한 시스템 파라미터를 결정하는 것이며, 이를 위한 몇 가지 고려사항을 제시한다.

이미 잘 알려진 주파수에 따른 신호의 감쇄특성 및 성능 제한에 대한 기준을 설정하는 것이 필요하며, 연구된 결과는 다음과 같다 [19],[20].

$$\alpha(f_0) R < 10 \text{ [dB]} \quad (12)$$

여기서 $\alpha(f_0)$ 는 반송파 주파수 f_0 에서의 신호 감쇄이고 R 은 거리이며, 일반적으로 산란함수와 두 주파수 상관함수는 음파가 수중에서 전파하면서 발생하는 많은 물리적 현상에 영향을 받는다.

수중통신 채널은 전달시간 확산 채널(travel time spreading channel), 도플러 확산 채널(Doppler spreading channel), 혹은 2중 확산 채널(doubly spreading channel) 등으로 분류되지만 일반적인 채널은 2중 확산 채널로 모델링 된다.

전달시간 확산(travel time spreading)은 다중경로에 따른 시간지연으로 결정된다. Shallow-water 채널에서는 약 100 [ms] 정도로 주파수 상관범위는 10 [Hz] 정도이며, 해저(seafloor) 지형의 특성에 많은 영향을 받는다. 해저에서 효율적으로 전파되는 신호성분은 grazing angle(스침각) 아래로 도착하는 성분들이기 때문에 늦게 도착하는 큰 angle 신호는 감쇄가 크며, 또한 10~20 [KHz]의 주파수 대역에서는 해저 지질의 구조에 의해 크게 영향을 받는 경계면 상호작용 때문에 흡수(absorption)에 의한 손실은 지수 함수적으로 증가한다. Deep-water 채널에서 전달시간 확산(travel time spreading) 특성은 거리/심도의 비율 R/d 에 따라 두 부분으로 구분된다. 우선 R/d 가 작은 경우 다중경로 확산은 매우 짧으며 주파수 상관범위는 수 [KHz] 정도가 된다. 이 경우 채널은 memoryless AWGN 채널에 가깝다고 말

할 수 있으며, 최근에 발표된 고속 데이터 시스템은 이 채널 모델을 통해 얻은 결과라 할 수 있다.

다음으로 R/d 가 큰 경우 R/d 비율 자체가 시간 확산(time spreading) 정도를 나타내기 때문에 그 값은 송/수신기 간의 심도차이에 의해 크게 영향을 받는다. 이와 같은 큰 시간 확산이 발생하는 채널의 주파수 상관범위는 1 [Hz] 정도이다. 다음으로 해수면 혹은 해저면의 상태가 거친 경우 송신된 신호는 전달시간 확산을 겪는다. 이러한 표면의 거침의 정도(roughness) h_w 에 따른 비교의 척도는 Rayleigh 파라메타 s 이다.

$$s = 2\pi \frac{h_w}{\lambda} \sin \theta_0 \quad (15)$$

θ_0 는 grazing angle이며, $s \ll 1$ 경우 표면은 평탄하고 "acoustic mirror"와 같다. $s \gg 1$ 경우 표면은 거칠고 거리에 따라 전달시간 확산이 다르게 발생하며, 또한 Doppler spreading이 발생한다.

대역폭 B (maximum Doppler shift)로 Doppler spreading되는 채널의 경우 coherence time, 즉 채널 환경이 동일하다고 가정할 수 있는 시간은 $1/B$ 이 된다. 심벌 구간 T 을 갖는 시스템에서 $T \ll 1/B$ 인 경우 지상통신의 slow fading과 같은 의미로 "underspread"라고 하며, 이 경우 Doppler 효과는 무시될 수 있다. 그러나 $T \gg 1/B$ 인 경우 지상통신의 fast fading과 같은 의미로 "overspread"라고 하며, 수신에서 적응 등화기법에 의한 보상이 필요하다. 또 다른 메커니즘인 해수면의 상태 변화에 따른 변동(fluctuation) 대역폭은 다음과 같다[21].

$$B_w = 2f_w \left[1 + \frac{4\pi f_0 \cos \theta_0}{c} h_w \right] \quad (16)$$

여기서, 주요 인자는 풍속 w [m/s], 파도의 진동수 $f_w = 2/w$ [Hz], 파고 $h_w = 0.005w^{5/2}$

[m], 반송파 주파수 f_0 [Hz], 입사 grazing angle θ_0 , 음속 c [m/s]이다.

시스템의 변조기법에 영향을 주는 파라메타는 일반적으로 대역폭과 SNR의 관점에서 이루어진다. 그림 2는 AWGN 채널에서의 적절한 변조기법의 선택에 대한 기준을 보여준다[22]. 또한 신호의 SNR, 즉 E_b/N_0 에 따른 채널용량 및 심벌 에러확률 $P_M=10^{-5}$ 에 대응되는 E_b/N_0 에서 각 변조기법들의 대역효율(bandwidth efficiency)을 나타낸다. Orthogonal signaling(FSK)의 경우 대역효율이 1 보다 작지만 PAM, QAM, PSK 변조기법은 대역효율이 1 보다 크다는 것을 알 수 있다.

채널용량 C 는 아래로 같이 표현된다.

$$\frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{C}{W} \frac{E_b}{N_0} \right) \quad (13)$$

W 는 신호의 대역폭, E_b 는 비트 에너지, N_0 는 AWGN의 전력 스펙트럼 밀도이다.

R [bits/s]의 데이터 전송속도를 가지는 시스템에서 $R < W$ 경우, 즉 그림 2에서 가로축 아랫부분에 해당하는 영역으로 변조된 신호가 넓은 대역을 차지 하지만 요구되는 성능을 만족하기 위해 최소의 전력 (약 $E_b/N_0 = -1.6$ [dB])으로 동작되기 때문에 FSK는 전력 제한된 채널에 적합한 변조기법이다. 반면 $R > W$ 경우, 즉 가로축 윗부분의 영역에서 동작하는 시스템으로 PAM, QAM, PSK 변조기법들이 있으며, 대역효율이 좋은 변조기법들의 경우 요구되는 신호의 전력은 커지기 때문에 대역 제한된 채널에 적합한 변조기법이다.

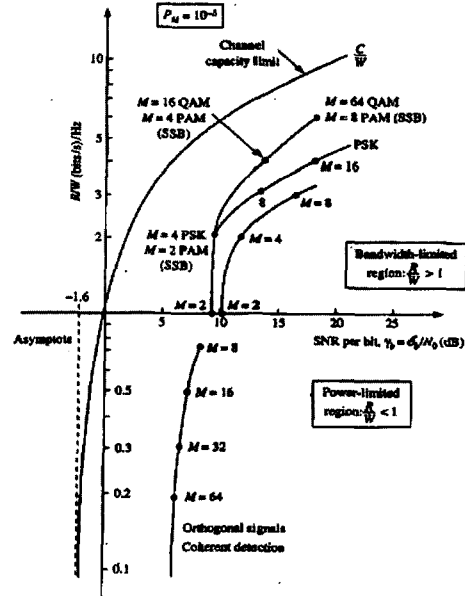


그림 2. 대역효율 대 SNR

IV. 결론

수중 음향통신은 음파를 이용한 해저탐사, 해양상태 관측 및 군사 작전의 목적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 지상통신과는 달리 아직은 특수한 목적을 지닌 분야에서 제한적으로 운영되고 있지만 앞으로 다양한 분야에 적용될 것으로 예상된다. 수중통신 시스템의 발전은 1980년대 초반 0.5 [Km · Kbps] 정도에서 1990년대 중반까지 shallow-water 채널에서 약 40 [Km · Kbps], deep-water 채널에서 약 100 [Km · Kbps] 정도로 발전하였다.

수중통신 시스템은 현재 중점 연구되고 있는 적응 변조기법, 에러 정정코드, 다이버시티 기법, 적응 등화기법 등 고속 디지털 통신 기술을 기반으로 발전하고 있으며, 시스템 설계에 있어서 중요한 문제는 수중 음향 채널의 물리적 특성에 따라 변조기법 등 적당한 시스템 파라메타를 결정하는 것이다. 이에 본 기고에서는 수중 음향통신의 채널 특성인 임펄스 응답에 대해 검토하였다. 이 모델은 기존에 연구된 여러 모델이 특정 변조기법에 국한되는 문제를 극복한 scattering

function과 two-frequency correlation function에 근거한 모델링 기법으로 정해진 반송파 및 신호 대역폭에서 변조기법에 대해 독립적인 모델이기 때문에 변조기법에 따른 시스템의 성능 평가를 위한 시뮬레이션에 적용 가능하다. 수중 음향통신 채널은 굴절, 반향, 산란 등의 메커니즘에 의한 수신 신호의 전달시간 확산(travel time spreading)과 송/수신기 간의 거리 변화 및 surface 혹은 internal wave 등 매체의 이동 등의 메커니즘에 의한 도플러 확산(Doppler spreading) 현상이 나타나기 때문에 수신기에서 적응 등화기법에 의한 채널의 영향에 대한 보상이 필요하며, 이를 위해서는 보다 정확히 수중 음향 채널을 모델링 하기 위한 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no.1, pp. 4-27, January 2000.
- [2] A. Baggeroer, "Acoustic telemetry—an overview," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. OE-9, pp. 229 - 235, 1984.
- [3] J. Catipovic, "Performance limitations in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 15, pp. 205 - 216, 1990.
- [4] M. Stojanovic, "Recent advances in high-speed underwater acoustic communication," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 21, pp. 125 - 136, 1996.
- [5] R. Coates, "Underwater acoustic communications," presented at the Oceans'93, Victoria, BC, Canada, 1993.
- [6] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*. Woodbury, NY: AIP Press, 1994.
- [7] S. Appleby and J. Davies, "Time, frequency, and angular dispersion modeling in the underwater communications channel," presented at the Oceans'98, Nice, France, 1998.
- [8] C. Bjerrum-Niese and R. Lutzen, "Stochastic simulation of acoustic communication in turbulent, shallow water," *IEEE J. Oceanic Eng.*, submitted for publication.
- [9] A. Essebbbar, G. Loubet, and F. Vial, "Underwater acoustic channel simulations for communication," presented at the Oceans'94, Brest, France, 1994.
- [10] A. Essebbbar and E. Vercelloni, "Simulation of communication system for underwater acoustics," presented at the Oceans'95, San Diego, CA, 1995.
- [11] A. Zielinski, Y.-H. Yoon, and L. Wu, "Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 20, pp. 293 - 299, 1995.
- [12] Q. Wen and J. A. Ritcey, "Spatial diversity equalization applied to underwater communications," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 19, pp. 227-240, 1994.
- [13] T. H. Eggen, "Underwater acoustic communication over doppler spread channels," *Joint Program in Oceanography/Applied Ocean Science and Engineering*, p. 307, 1997.
- [14] H. P. Bucker, "A simple 3-D Gaussian beam sound propagation model for shallow water," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 95, 1994.
- [15] H. Weinberg and R. E. Keenan, "Gaussian ray bundles for modeling high-frequency propagation loss under shallow water conditions," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 100, 1996.
- [16] J. V. Evans and T. Hagfor, *Radar Astronomy*. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [17] E. C. Westerfield, R. H. Prager, and J. L. Stewart, "Processing gains against reverberation (clutter) using matched filters," *IRE Trans. Information Theory*, vol. IT-6, pp. 342-348, 1960.
- [18] P. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Trans. Commun. Syst.*, vol. CS-11, pp. 360-393, 1963.
- [19] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*. 3rd ed. Los Altos, CA: Peninsula Publishing, 1983.
- [20] I. Dyer, Class notes for subject 13.85, *Fundamentals of Underwater Acoustics*. Massachusetts Institute of Technology.
- [21] D. Dowling and D. R. Jackson, "Coherence of

acoustic scattering from a dynamic rough surface," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 93, pp. 3149-3157, 1993.

[22] J. G. Proakis, *Digital Communications*. 3rd ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 1995.

저 자 소 개



김영철

1993년 2월 동신대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
1995년 2월 동신대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
2002년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과(공학박사)

2003년 3월 ~ 현재 인하공업전문대학 정보통신과 초빙교수

※관심분야: 무선통신, 이동통신, 정보이론, 수중통신



오창헌

1988년 2월 한국항공대학교 항공통신공학과 졸업(공학사)
1990년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 졸업(공학석사)

1996년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과(공학박사)

1990년 2월 ~ 1993년 9월 한진전자(주) 기술연구소 근무

1993년 10월 ~ 1999년 2월 삼성전자(주) CDMA 개발팀 근무

1999년 3월 ~ 현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수

※관심분야: 이동통신, 무선통신, SDR



강희조

1994년 2월 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과 졸업(공학박사)

1994년 7월 ~ 1995년 12월 전자통신연구원 위성망연구소 초빙연구원

1996년 8월 ~ 1997년 8월 오사카대학교 공학부 통신공학과 객원교수

1998년 3월 ~ 1998년 8월 전자통신연구원 무선이동위성 통신시스템 연구소 초빙연구원

1990년 3월 ~ 2003년 2월 동신대학교 전기전자공학부 교수

2003년 3월 ~ 현재 목원대학교 컴퓨터공학과 조교수

※관심분야: 무선통신, 이동통신 및 위성통신, 멀티미디어 통신, 환경전자공학, 무선광통신, 밀리미터파, 전자발광(Electro Luminescence) 디스플레이



조성준

1969년 2월 한국항공대학교 항공통신공학과 졸업(공학사)

1975년 2월 한양대학교 대학원 졸업(공학석사)

1981년 3월 일본 오사카대학교 대학원 통신공학과 졸업(공학박사)

1972년 8월 ~ 현재 한국항공대학교 전자·정보통신·컴퓨터공학부 교수

※관심분야: 이동통신, 무선통신, 위성통신, 환경전자공학