

25 kHz 대역에서 PN 신호열을 이용한 거제 천해역 수중음향통신 채널 특성 분석

Shallow Water Acoustic Communication Channel Characteristic Analysis Using PN Sequence with 25 kHz Carrier at the Shore of Geojea Island

김 승 근*, 김 시 문*, 임 용 곤*
(Seung-Geun Kim*, Sea-Moon Kim*, Young-Kon Lim*)

*한국해양연구원

(접수일자: 2007년 8월 2일, 채택일자: 2007년 8월 23일)

본 논문에서는 천해역에서 PN 신호열의 자기상관특성을 이용하여 수중 초음파통신 채널 특성을 측정하는 방법과 수신 신호 샘플 데이터로부터 수중통신 채널 특성 분석 결과에 대하여 기술한다. 수중음향통신 채널의 특성을 측정하기 위하여 두개의 PN 신호를 I-채널 및 Q-채널 데이터로 사용하여 QPSK 심볼을 생성하고, 5 kHz 심볼율과 25 kHz 반송파를 갖는 신호로 변조하여 전송한다. 수신부는 송신기에서 675 m와 1492 m 떨어진 위치에서 수신 신호를 샘플링하여 저장한다. 저장된 샘플 데이터를 이용하여 산란 함수, 상관 시간, 지연전력 프로파일, spaced-tone 자기상관 함수, 지연 확산 및 상관 대역폭을 각각의 음파 전파 거리에 대하여 분석한다. 또한, 분석한 채널 특성을 토대로 수중 전송 시스템 설계 및 구현을 위한 설계 지침을 제안한다.

핵심용어: 채널 특성, 산란 함수, 지연전력 프로파일, Spaced-tone 자기상관 함수, 전송시스템 설계

투고분야: 음향신호처리 분야 (1,2)

In this paper, the measuring method of underwater acoustic communication channel characteristics in the shallow water using the autocorrelation characteristic of PN sequence and the underwater communication channel analysis results from the received signal sample data are described. For measuring the underwater acoustic communication channel characteristics, two PN sequences are used as a transmitted data of I-channel and Q-channel of QPSK symbol and QPSK signal is transmitted with symbol rate of 5 kHz and carrier frequency of 25 kHz. In the receiver, the received signal, which pass through 675 m and 1492 m, is sampled and then stored. Using the stored sample data, the scattering function, coherent time, delay power profile, spaced-tone autocorrelation function, delay spread, and coherent bandwidth of each propagation distance cases are analyzed. Based on the analysis results, several guidelines are suggested for the design and implementation of underwater transmission system.

Key words: Channel characteristics, Scattering function, Delay power profile, Spaced-tone autocorrelation function, Transmission system design

ASK subject classification: Acoustic Signal Processing (1,2)

I. 서론

초음파를 이용하여 정보를 전달하는 수중 무선통신은 1990년대 초반까지 수 bps (bits per second) 에서 수십

책임저자: 김 승 근 (sgkim@moeri.re.kr)
305-343 대전광역시 유성구 장동 171번지 한국해양연구원
해양탐사장비연구사업단
(전화: 042-868-7527; 팩스: 042-868-7503)

bps정도의 낮은 전송율을 갖고, 위상동기가 필요없는 FSK (Frequency Shift Keying) 등의 비위상동기 (Non-coherent) 전송이 주류를 이루었으나, 신호처리기술의 급격한 발전과 이블 뒷받침 할 수 있는 강력한 연산능력을 갖는 하드웨어의 발전에 힘입어 상대적으로 높은 전송 효율을 갖는 MPSK (M-ary Phase Shift Keying) 및 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 등의 위상

동기 (Coherent) 전송이 주류를 이루고 있다 [1]. 현재 수중 무선통신 기술은 위상동기 방식을 사용하여 200-20,000 bps사이의 전송율과 0.06-50 km 정도의 전송거리에서 사용가능한 시스템들이 개발되었으며 [1], 수중 무선통신시스템의 복잡도를 낮추는 동시에 전송거리의 증대 및 전송 속도의 증대 등 전송 시스템 성능을 향상시키기 위한 연구가 미국 등 수중통신기술 선진국을 중심으로 계속 진행중에 있다. 한편, 국내에서도 수중 통신을 위하여 변조기법에 따른 수중 데이터 통신 시스템의 성능을 분석하였으며 [2], 송신 하이드로폰 어레이를 이용하여 데이터 전송 속도를 향상시키는 연구를 진행하였다 [3]. 또한, 한국해양연구원에서는 DSP시스템을 이용하여 4.2 km거리에서 10,000 bps의 전송속도를 갖는 QPSK 송수신 시스템을 제작한 바 있다 [4].

효율적인 통신시스템 설계 및 구현을 위하여 시스템을 포설 및 운용하려는 해역에서 데이터 전송에 사용하는 주파수 대역에서 채널의 전파특성에 대한 분석이 필요하다. 채널의 전파특성에는 다중경로들의 도달 시간차, 큰 에너지를 갖는 다중경로 수, 순간응집 (Temporal Coherence), 도플러 (Doppler) 편이 범위 등이 있다. 수중채널환경에서 다중경로는 밀도의 변화에 의한 음파전달 매질의 굴절 계수 변화에 의한 회절 및 산란에 의해 발생하고, 해저와 해수면에서 발생하는 반사에 의해 발생한다 [5]. 일반적으로, 천해역 채널에서의 다중경로차는 수십 ms 정도 구간에 걸쳐 존재하는 것으로 알려져 있다 [6]. 채널의 다중경로를 분석하기 위하여 일반적으로 자기상관특성이 좋은 PN (Pseudo-Noise) 신호열을 이용한다. T.C. Yang은 PN신호열을 이용하여 2-5 kHz대역에서 채널의 순간응집이 고정된 노드의 경우 수십분간 다중경로 전달 특성이 유지됨을 관측하였으며 [7], 서석 등은 250.26 Hz 반송주파수와 511 신호열 주기 (16,335 초)를 갖는 PN신호열을 이용하여 동해연안의 수중음향채널 특성을 분석하였다 [8]. 그러나, 이러한 PN신호열을 이용한 다중경로를 갖는 수중음향채널 특성분석은 저주파수대역에 한정되어 있어, 우리가 관심을 갖는 25 kHz의 고주파대역에 적용하기에는 부적합하다. 이에 본 논문에서는 매우 낮은 수심을 갖는 천해역에서 25 kHz의 고주파대역에 대한 통신 채널특성을 PN신호열을 이용하여 분석하였으며, 분석 결과를 토대로 통신시스템설계의 지침을 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 II장에서는 수중음향통신 채널특성을 측정하기 위한 시험장치 및 방법에 대하여 기술하며, 제 III장에서는 실험역 시험 데이

터에 대한 분석결과에 대하여 설명하며, 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 수중음향통신 채널특성 측정

2.1. 측정 개요

본 논문에서 수중음향통신 채널이라 함은 송신 시스템의 전력증폭기와 트랜스듀서를 포함하는 이널로그 신호 발생기부터 수신 시스템의 트랜스듀서와 수신증폭기를 포함하는 수신 시스템의 전단 (front-end) 까지로 정의한다. 채널의 전파환경 측정을 위하여 자기상관특성이 좋은 PN 신호열 두개를 I-채널과 Q-채널의 데이터로 사용하여 QPSK 변조신호를 생성하고 이를 전송한다. 채널을 통과하여 수신한 신호와 전송 PN 심볼열과 상관값을 계산하여 채널의 전파특성을 측정한다. 각각의 PN신호열 발생에 사용한 메모리수를 m 이라할 때 신호의 주기가 $(2^m - 1)$ 인 경우 최장 신호열 (Maximum-length Sequence, m-sequence) 이라 불리운다 [9]. 주기가 N 인 PN 신호열 $\{c_n\}$ 의 자기상관값은 다음과 같이 정의된다.

$$R_k(k) = \sum_{n=1}^N c_n c_{n-k} = \begin{cases} N, & k=1N \\ -1, & k \neq 1N \end{cases}$$

여기서, c_n 은 +1 또는 -1의 값을 갖고, l 은 임의의 정수이다. 즉, $R_k(k)$ 는 주기가 N 인 주기함수이고, 한 주기 동안만 실패하면 $k=1N$ 이 되어 두 신호열이 일치하는 경우에만 N 이 되고, 한 심볼이상 두 신호열이 어긋나 있는 경우에는 -1의 값을 갖는다. 이러한 자기상관특성을 이용하여 한 심볼 길이의 분해능을 갖는 수중 음향 채널의 지연응답특성을 측정할 수 있다. 즉, 다중경로들의 도달 시간차가 한 심볼길이 보다 크게 되면 PN신호의 자기상관 특성에 의하여 경로들을 구분할 수 있으며, 상대적인 크기를 알 수 있다. 또한, 첫 번째로 도착하는 경로와 다중경로의 도달시간차가 PN신호열의 주기인 N 심볼시간 보다 크게 되면, 이러한 다중경로들은 N 보다 작은 경로 시간차를 갖는 것으로 판단되어 채널분석 오류가 발생한다. 이러한 오류를 막기 위하여는 예상되는 최대의 경로 시간차보다 긴 주기를 갖는 PN신호열을 선택하여야 한다. 그러나, 너무 긴 PN신호열을 선택하면 한 순간의 상관값을 계산하기 위하여 N 번의 곱셈이 필요하고, 이러한

곱셈이 한 주기동안 계산하기 위하여 심볼당 K 번 과샘플 하는 경우에 KM^2 의 곱셈이 필요하여 채널 분석시 추가적으로 얻는 정보 없이 필요 이상의 노력을 들여야 한다. 그러므로, PN 신호열의 길이는 예상되는 최대 경로시간 차보다 조금 더 큰 주기를 갖는 PN신호열을 선택하여야 한다.

본 논문에서 실시한 채널측정에서는 I-채널과 Q-채널에서 다른 PN신호열을 사용하므로 채널간 상호상관값이 존재하고, 이는 일정 크기 이상의 에너지를 갖는 다중경로 성분만을 찾을 수 있는 단점이 있으나, 상호상관값이 자기상관값에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 관심을 갖을 만한 에너지를 갖는 다중경로 성분은 모두 찾을 수 있어 채널간 상호상관값의 존재가 다중경로의 채널 특성 측정에 미치는 영향은 미미하다. 또한, 독립적인 두개의 PN신호열을 사용함으로써 I-채널과 Q-채널의 채널 전파 특성을 동시에 관찰할 수 있는 장점이 있다.

2.2. 측정 장치

수중음향통신 채널 특성을 측정하기 위하여 D/A (Digital-to-Analog) 변환 기능을 갖는 데이터 발생 시스템, 송신 증폭기, 송신 트랜스듀서, 수신 트랜스듀서, 수신증폭기, A/D (Analog-to-Digital) 변환 기능을 갖는 데이터 저장 시스템을 사용한다.

데이터 발생 시스템은 미리 생성하여 메모리에 저장한 신호를 차례로 읽어서 정해진 시간간격으로 D/A 변환기에서 아날로그 신호를 출력한다. 메모리에 저장된 신호 샘플의 마지막까지 전송 후 다시 메모리의 처음부터 전송하여 주기적인 아날로그 신호를 출력한다. 본 실험에서는 National Instrument사의 PXI-1013본체에 12bit 분해능을 갖고 최대 40 MHz의 변환속도를 갖는 NI PXI-5411을 이용하여 D/A 변환을 수행하였다.

데이터 저장 시스템은 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기능을 보유하고 있으며, 입력된 아날로그 신호를 정해진 샘플율로 샘플링하여 메모리에 저장한다. 본 실험에서는 12bit 분해능을 갖고, 최고 10 MHz의 샘플율을 갖는 NI PXI-6115를 이용하여 A/D 변환을 수행하였으며, 샘플데이터는 제어컴퓨터에 저장하였다.

송신 트랜스듀서는 경원웨어에서 제작하였으며, 7개의 트랜스듀서 유닛으로 구성되어 있으며, 육각형의 각 꼭지점과 중심에 각각 센서를 배치한 구조를 가지고 있다. 이웃하는 유닛 사이의 거리는 30 mm로서 25 kHz, 1,500 m/s를 기준으로 파장 60 mm의 1/2간격을 갖는다.

방사 빔 형상은 25 kHz에서 $\pm 15^\circ$ 의 원뿔형상이며 최대 송신음압 레벨은 190 dB이다. 트랜스듀서의 크기는 직경이 140 mm이고, 높이가 180 mm인 원통형이고, 공기중 무게는 약 5 kg 으로 20~30 kHz의 동작주파수 범위를 갖는다.

수신 트랜스듀서 또한 경원웨어에서 제작하였으며, 8개의 트랜스듀서 유닛으로 구성되어 있으며 선형구조를 갖는다. 유닛간 거리는 65 mm이고, 각 유닛의 방사 빔 형상은 $\pm 30^\circ$ 의 원뿔형상이며 수신감도는 약 -185 dB이다. 트랜스듀서의 크기는 길이가 555 mm, 너비가 282 mm, 높이가 90 mm이고, 공기중 무게는 약 15 kg으로 20~30 kHz의 동작주파수 범위를 갖는다.

송신 및 수신 증폭기 모두 20~30 kHz 범위에서 동작하도록 설계되었다. 송신 증폭기는 10배에서 20배까지 증폭을 조정할 수 있으며, 최대 400 W까지 출력을 낼 수 있으며, 30 dB의 증폭율을 갖는다. 수신 증폭기는 86 dB의 증폭율을 가지며 대역폭은 ± 9 kHz 이다.

2.3 측정 방법

실해역 채널의 응답특성을 파악하기 위하여 한국해양연구원 남해연구소 (경상남도 거제시 장목면) 부두에서 실해역 채널 측정시험을 수행하였다. 송신 시스템은 선박에 설치하여 바다에 정박시킨 후 신호를 발생시켰으며 수신 시스템은 부두에 고정시켜 데이터를 수집하였다. 실험해역은 수심이 약 10 m 이고, 바닥은 펄이였으며, 송신 및 수신 센서는 수심 4 m에 각각 설치하였다. 송수신 시스템 사이의 거리는 675 m와 1492 m 였다. 그림 1에 채널측정을 위한 시험 장치의 연결도를 표시하였다.

송신신호의 생성은 그림 2와 같이 이루어진다. I-채널과 Q-채널에서 전송하는 데이터는 같은 주기를 갖으면서 서로 다른 생성다항식을 갖는 두 개의 PN 신호열 발생기

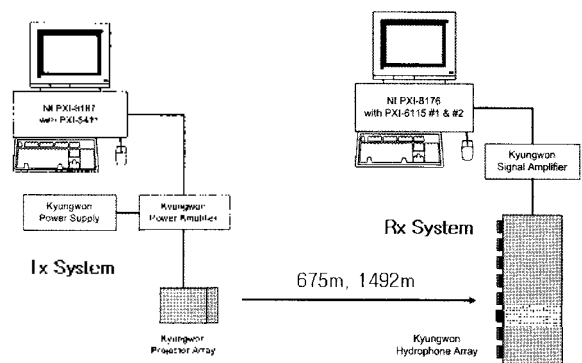


그림 1. 수중음향 채널 측정을 위한 시험장치 연결도
Fig. 1. Experiment setup for underwater channel measurement.

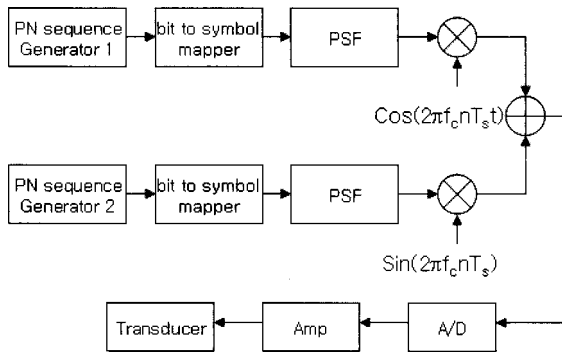


그림 2. 송신신호 생성 가능 블록도
Fig. 2. Block diagram of transmitting signal generation.

에서 생성한다. 실험에서 사용된 PN 신호열은 2047의 주기를 갖으며, I-채널의 생성다항식의 이진 부호는 8진수로 $(4005)_8$ 이며, Q-채널은 8진수로 $(4027)_8$ 이다 [10]. PN 신호열 발생기의 출력은 0 또는 1의 값을 가지므로 이를 QPSK전송을 위하여 0은 -1로 1은 +1의 값을 갖는 심볼로 변환한다. 변환된 심볼은 초과대역폭이 0.5인 Raised-Cosine 필터를 이용하여 펄스성형필터링 (PSF; Pulse Shaping Filtering)을 수행하고, I-채널은 $\cos(2\pi f_c nT_s)$ 와 곱하고, Q-채널은 $\sin(2\pi f_c nT_s)$ 와 곱한 후, 더하여 D/A 변환을 하여 아날로그 신호로 변환하고 송신증폭기에서 신호를 증폭하여 트랜스듀서를 통하여 채널로 송신된다. 여기서, 반송파 주파수인 f_c 는 25 kHz 이고, 심볼율은 5 kHz이고, 송신 신호 D/A 변환 주기인 T_s 는 $1 \mu s$ 이다. 실험에서는 한 PN 신호열 주기에 해당하는 변조신호 샘플열을 미리 계산하여 저장하고 이를 반복적으로 전송하였다.

수신부에서는 8개의 트랜스듀서에서 병렬로 수신되며 수신된 신호는 수신증폭기 통과 후 200 kHz의 샘플율로 동시에 샘플링되며, 샘플링한 데이터를 저장하였다. 저장한 데이터를 이용하여 연구실에서 측정데이터 분석을 수행하였다.

III. 실험역 측정 데이터 분석

저장된 수신 데이터는 25 kHz를 중심으로 ± 5 kHz의 통과 대역폭을 갖는 대역통과 FIR필터를 통과시키고, 신호를 기저대역으로 변환하여 대역폭이 5 kHz인 저역통과 FIR 필터를 통과시킨 후 채널 분석을 수행하였다. 본 논문에서는 8개의 수신 데이터 중에서 첫 번째 트랜스듀서에서 수신한 데이터만을 이용하여 분석한 결과에 대하여 논한다. III장에서 표시하는 분석결과 그래프의 가장 빠

른 경로의 지연시간은 송신기부터 수신기까지의 실제 전파지연 시간을 의미하지 않고, 분석의 편의성을 위하여 임의로 설정한 값이다.

3.1. 675 m 거리의 수중음향통신 채널 특성 분석

II장에서 설명한 바와 같이, PN 신호열의 자기상관 특성을 이용하여 채널의 특성을 분석하였다. 먼저 675 m 전송거리에 대하여 측정시간에 따른 다중경로의 지연 전력 프로파일을 계산한 결과가 그림 3에 있다. 그림에서 40 ms까지의 지연시간차를 갖는 다중경로의 지연 분포를 나타내며 10초 동안의 측정 데이터에 대하여 1초 간격으로 채널 지연 프로파일을 정규화하여 표시한 것이다. 1.5-3 ms 사이에 큰 에너지를 갖는 신호 경로들이 존재하고, 약 30 ms까지 의미있는 에너지를 갖는 다중경로들이 분포함을 알 수 있고, 20 ms 근처에 상대적으로 큰 에너지를 갖는 다중경로가 있음을 확인할 수 있다.

큰 에너지를 갖는 다중경로성분들을 보다 자세히 관찰하기 위하여 그림 3에 나타난 채널 지연 프로파일들을 중첩하여 0-5 ms까지의 지연시간 구간만 확대한 것을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 큰 에너지를 갖는 경로가 3개가 있음을 확인할 수 있고, 이들 세 경로는 약 1 ms의 시간차를 가지므로, 전송경로는 약 1.5 m 정도의 차이가 있는 경로를 거쳐 도달함을 알 수 있다. 그리고, 10초 동안의 채널응답을 겹쳐표시한 것이지만, 시간흐름에 대하여 거의 동일한 채널지연 응답 특성을 보임을 알 수 있다.

채널의 임펄스 응답을 WSSUS (Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 랜덤프로세스로 가정하고, 취득 데이터를 이용하여 지연시간 τ 와 도플러 주파수인 ν 를 두 개의 변수를 갖는 산란 (Scattering) 함수 $S_b(\tau, \nu)$

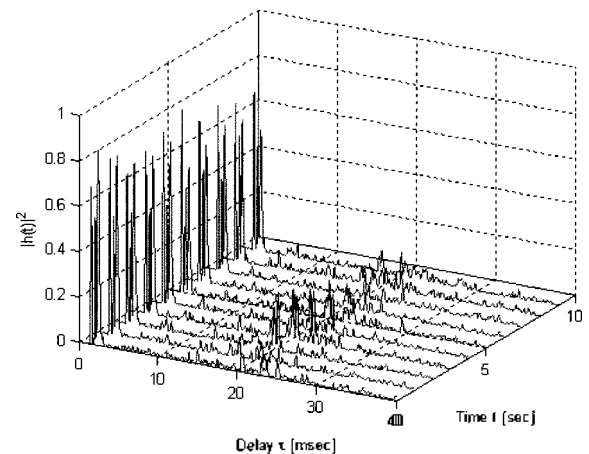


그림 3. 675m 전송거리에서 시간에 따른 지연 프로파일 분석
Fig. 3. Delay profile analysis result for the 675 m transmission distance according to the time.

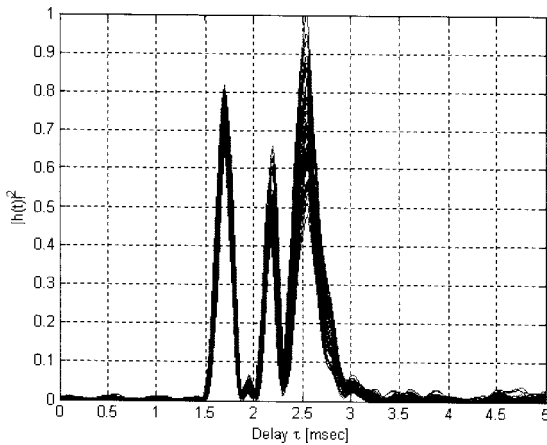


그림 4. 675m 전송거리에서 0-5ms 지연시간에서 중첩된 채널 지연 프로파일
 Fig. 4. Overlapped delay profile for the 675 m transmission distance upto 5ms delay.

를 계산한 결과가 그림 5와 그림 6에 있다. 산란 함수에 대하여 보다 자세한 내용을 원하는 독자는 [11] 및 [12]를 참고하기 바란다. 그림 5는 산란 함수를 지연과 도플러 주파수에 대하여 -20 dB까지 윤곽선으로 표시한 것이고, 그림 6은 3차원 그래프로 표시한 것이다. 그림 5에서 보

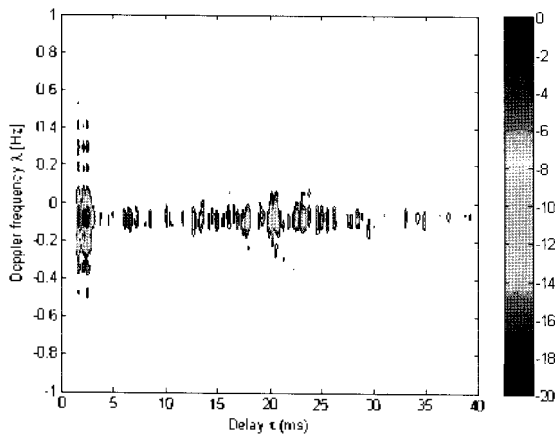


그림 5. 산란 함수의 윤곽선도
 Fig. 5. Contour diagram of scattering function.

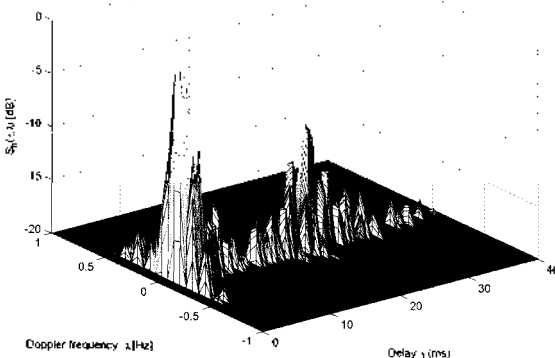


그림 6. 3차원 산란 함수
 Fig. 6. Mesh diagram of scattering function.

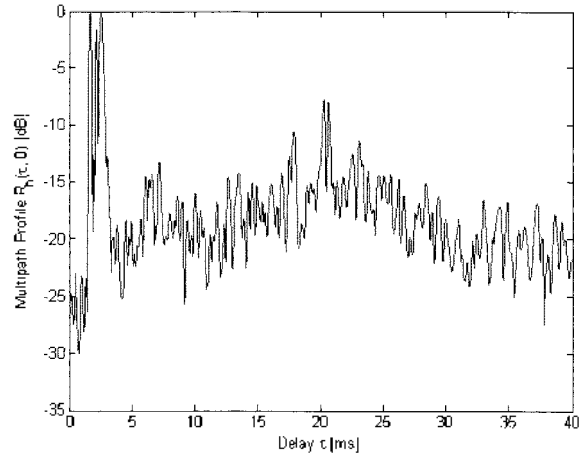


그림 7. 지연 전력 프로파일
 Fig. 7. Delay power profile.

면, 약 -0.05 Hz의 도플러 주파수를 중심으로 산란함수가 분포하고, 최대 0.5 Hz의 도플러 주파수 성분까지 분포함을 알 수 있다. 채널 측정에서 수신 시스템은 부대에 고정하고, 송신 시스템도 범추어진 선박에서 전송하였기 때문에 도플러 편이가 -0.05 Hz인 매우 작은 값을 갖는다. 또한, 도플러 편이를 이용하여 채널의 순시응답이 통계적으로 동일하다고 생각할 수 있는 시간간격인 상관 시간 (Coherent Time) 을 근사적으로 계산할 수 있다. 이는 도플러 편이와 근사적으로 역수의 관계가 있어 상관 시간은 약 20 초 ($=1/0.05\text{Hz}$)로 계산된다 [12].

또한, 다중 경로가 존재할 때 관찰구간에서 지연시간 τ 에 따른 다중경로의 평균 전력을 나타내는 지연전력 프로파일은 산란 함수를 도플러 주파수 ν 에 대하여 적분한 값으로 그림 7과 같은 지연 전력 프로파일을 갖는다 [11, 12]. 이는 그림 3에 나타난 채널지연 프로파일의 평균값이 되고, 그림 3과 그림 4에서 설명한 바와 같은 다중 경로 성분을 가지고 있음을 알 수 있다.

지연 전력 프로파일을 지연시간 τ 에 대하여 FT (Fourier Transform) 을 취한 함수인 spaced-tone 자기 상관 함수를 이용하여 떨어진 두 주파수간의 채널응답이 통계적으로 동일하다고 생각할 수 있는 주파수 거리인 상관 대역폭 (Coherent Bandwidth) 을 결정할 수 있다 [12]. 그림 8에 spaced-tone 자기상관 함수를 계산한 결과이다. 그림에서 보면 상관 대역폭은 매우 작은 것 (수십 Hz)을 알 수 있다. 또한, 지연 전력 프로파일을 이용하여 채널의 지연 확산 (Delay Spread) 특성을 구할 수 있다. 일정한 분턱값 이상의 다중경로성분들의 지연시간에 대한 일차 및 이차 모멘트를 이용하여 계산한다. 지연 시간을 측정할 때는 수신기에 가장 먼저 도착한 신호 성분을 기준으로 하여 상대적인 지연시간으로 측정된다. 정

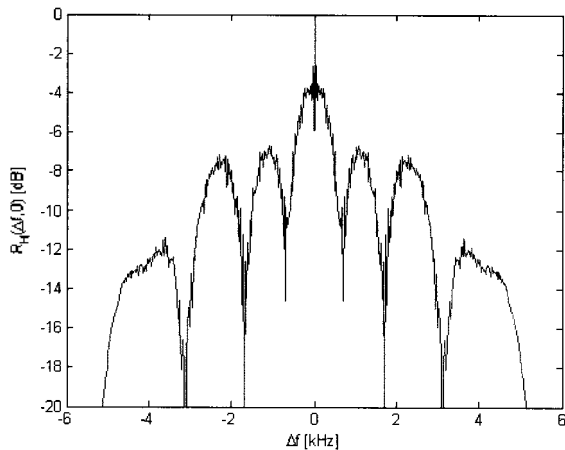


그림 8. Spaced-tone 자기상관 함수
Fig. 8. Spaced-tone autocorrelation function.

규화 지연 전력 프로파일의 문턱값을 -10 dB로 하였을 경우, 지연 확산은 5.6 ms이었고, -20 dB로 하였을 경우, 10.3 ms로 분석되었다. 문턱값을 -20 dB로 하였을 경우, 계산한 지연 확산을 이용하여 주파수간 상관이 0.5 이상의 경우에 대하여 근사적으로 상관 대역폭은 근사적으로 $1/(지연확산 \times 5)$ 임을 이용하여 계산하면, 약 19 Hz이다 [12].

위와 같은 분석결과를 25 kHz 반송주파수와 5 kHz 심볼율을 갖는 통신시스템 설계에 다음과 같이 이용할 수 있다. 먼저, 일반적인 디지털 통신 시스템을 설계하는 경우, 다중경로의 신호성분들은 수신신호 복조시 심볼간 잡음이 되므로 이를 효과적으로 제거해 주어야 한다. 다중 경로 지연 프로파일 분석결과 30 ms (150 심볼) 정도까지 의미 있는 다중경로가 존재하므로 이를 최대한 제거하기 위해 매우 복잡하고, 많은 양의 신호처리가 필요하다. 다중 경로 성분들을 효과적으로 제거하지 못하는 경우에는 수신 신호의 전력이 배경잡음에 비하여 매우 크더라도 그림 4와 같이 다중 경로 성분들의 크기가 비슷한 경우 다중 경로 성분에 의해 신호대 잡음비가 0 dB 보다 작은 값이 될 수 있어, 수신기의 복조 성능이 현저히 떨어진다. 또한, 상관 대역폭이 수십 Hz로 제한되기 때문에 매우 효율적인 채널등화기가 반드시 필요하다. 버스트 전송에서 프레임 길이를 정함에 있어, 상관 시간보다 작은 길이로 정하면 한 프레임 내에서는 통계적으로 채널의 순시응답이 동일하다고 생각할 수 있어 한 프레임 수신시 동일한 채널파라미터를 이용하여 수신할 수 있다. 또한, 연속된 프레임 전송 사이의 휴지기간이 상관 시간보다 작은 경우에는 이전 프레임동안 채널등화기에서 추정된 채널을 다음 프레임동안의 초기값으로 사용하여 추정 채널을 갱신할 수도 있을 것이다.

두 번째로, CDMA 시스템을 설계하는 경우, 한 심볼구간 이상의 도달 시간차를 갖는 다중경로는 자기상관특성에 의하여 제거할 수 있는 특성이 있고, 한 심볼구간 이상의 경로차를 갖고 있는 큰 에너지를 갖는 다중 경로가 $1.5\text{--}3$ ms 구간에 3개가 존재하므로, 레이크 (Rake) 수신기의 핑거수를 3개까지 증가할 때는 큰 수신 성능 개선이 이루어지나, 4개부터는 성능 개선이 미미함을 예측할 수 있어, 최적의 핑거수가 3개임을 추정할 수 있다. 또한, 30 ms까지 다중 경로 신호가 수신기에 도달하므로, 이를 자기상관 특성에 의해 효과적으로 줄이기 위하여 PN신호 열의 주기는 30 ms보다 커야함을 알 수 있다.

3.2. 1492 m 거리의 수중음향통신 채널 특성 분석

1492 m 전송거리에 대한 채널분석에서는 앞 절에서 675 m 전송거리에 대하여 채널분석한 것과 동일한 순서로 채널특성을 분석한다. 먼저, 1492 m 전송거리에 대하여 측정시간에 따른 다중경로의 지연 전력 프로파일을 계산한 결과가 그림 9에 있다. 2 ms 근처에만 큰 에너지를 갖는 다중 경로 성분들이 존재하고, 그 크기가 시간에 따라 변화가 많음을 확인할 수 있다. 이는 그림 9에 표시한 지연 전력 프로파일을 5 ms까지의 지연시간에 대하여 지연 전력 프로파일을 중첩하여 나타낸 그림 10에서 보다 명확히 확인할 수 있다. 그림 10에서 보면 $1.5\text{--}3$ ms 사이의 지연시간에서만 의미 있는 크기를 갖는 다중 경로가 3개 분포함을 알 수 있고, 이들의 크기와 지연 변화가 그림 4와 비교할 때 시간에 따라 크게 변하고 있음을 확인할 수 있다. 앞의 675 m 전송거리의 경우 30 ms까지 의미 있는 다중 경로성분들이 존재하는 것과는 매우 다른 채널 지연 응답특성을 보임을 알 수 있다. 이는 채널을 측

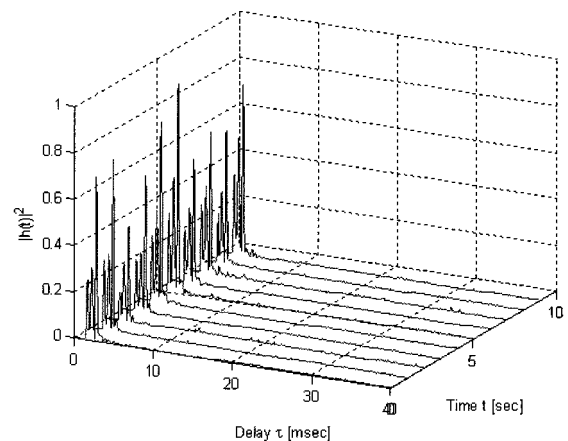


그림 9. 1492m 전송거리에서 시간에 따른 지연 프로파일 분석
Fig. 9. Delay profile analysis result for the 1492m transmission distance according to the time.

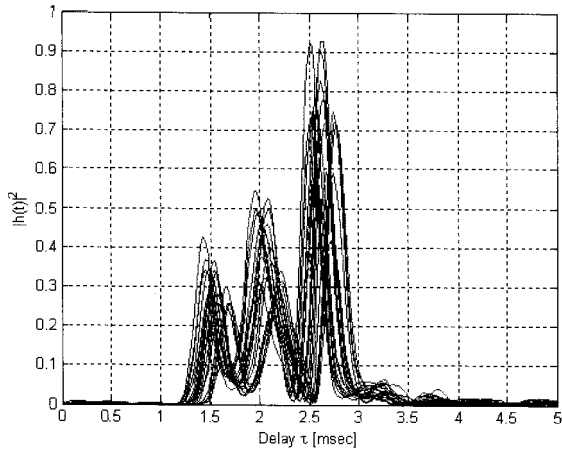


그림 10. 1492m 전송거리에서 5ms까지 지연시간에서 중첩된 채널지연 프로파일

Fig. 10. Overlapped delay profile for the 1492m transmission distance upto 5ms delay.

정한 해역이 천해역이기 때문에 채널에서 전파하는 도중 많은 해저면반사와 수면반사에 의하여 다중경로성분들이 제거되기 때문으로 추정된다.

산란 함수를 계산한 결과가 그림 11과 그림 12에 있다. 그림 11은 산란 함수를 지연과 도플러 주파수에 대하여 -20 dB까지 윤곽선으로 표시한 것이고, 그림 12는 3차원 그래프로 표시한 것이다. 그림 11에서 보면, 약 0.7 Hz의 도플러 주파수를 중심으로 산란함수가 분포하고, 최대 2 Hz의 도플러 주파수 성분까지 분포함을 알 수 있다. 그러므로, 도플러 편이는 약 0.7 Hz이고, 상관 시간은 약 1.4 초로 계산되어 675 m 경우에 비하여 채널이 약 7배정도 빠르게 변하고 있음을 알 수 있다. 675 m의 경우에 비하여 상대적으로 큰 도플러 편이가 발생하고, 그림 10에서 예측된 바와 같이 상관 시간 또한 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 긴거리인 채널을 통과하면서 채널에서 발생하는 변화가 더 많음을 쉽게 추측할 수 있다.

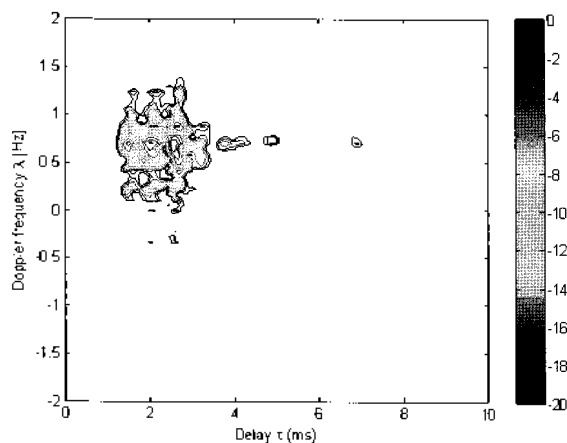


그림 11. 산란 함수의 윤곽선도
Fig. 11. Contour diagram of scattering function.

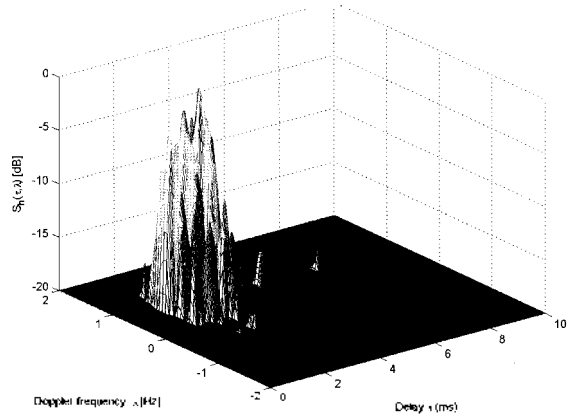


그림 12. 3차원 산란 함수
Fig. 12. Mesh diagram of scattering function.

산란 함수로부터 지연 전력 프로파일을 계산한 것이 그림 13에 있다. 그림 9와 그림 10에서 알 수 있듯이 큰 에너지를 갖는 세 개의 다중경로가 2 ms 근처에 존재하고, 나머지 다중경로들은 존재하지 않음을 확인 할 수 있다. 지연 전력 프로파일을 이용하여 spaced-tone 자기상관 함수를 계산하면 그림 14와 같다. 그림에서 보면 상관 대역폭은 -3 dB를 기준으로 약 400 Hz 정도임을 알 수 있다. 또한, 지연 전력 프로파일을 이용하여 지연 확산을 계산하면, 문턱값을 -10 dB로 하였을 경우 0.43 ms이고, 문턱값을 -20 dB로 하였을 경우 0.60 ms이었다. 문턱값이 -20 dB인 경우의 지연 확산을 이용하여 근사적으로 상관 대역폭을 계산하면 약 333 Hz이다.

위와 같은 분석결과를 25 kHz 반송 주파수와 5 kHz 심볼율을 갖는 통신 시스템 설계에 다음과 같이 이용할 수 있다. 먼저, 일반적인 디지털 통신 시스템을 설계하는 경우, 의미있는 다중경로가 3개가 존재하고 이의 최대 지연시간은 약 2 ms (10 심볼) 이므로, 다중경로 신호를 제거하기 위한 부분의 설계가 675 m거리에서 전송하는 시

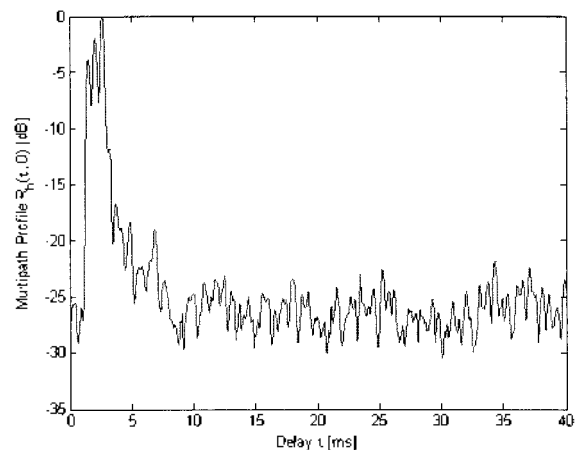


그림 13. 지연 전력 프로파일
Fig. 13. Delay power profile.

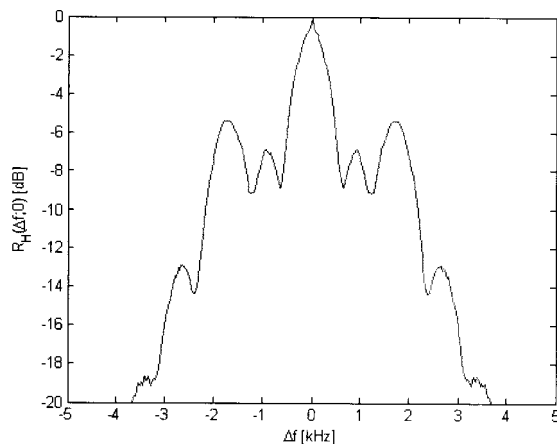


그림 14. Spaced-tone 자기상관 함수
Fig. 14. Spaced-tone autocorrelation function.

시스템에 비하여 매우 간단하게 설계되어도 됨을 알 수 있다. 그러나, 다중경로의 특성이 시간에 따라 상대적으로 빠르게 변하므로 이러한 변화를 추적할 수 있는 기능이 필요하게 된다. 또한, 상관 시간이 1초 내외이므로 프레임 길이는 1초보다 작게 설계하는 것이 바람직할 것이다. CDMA시스템을 설계하는 경우 의미있는 다중경로를 갖는 경로가 3개이므로, 675 m에서 CDMA시스템 설계와 마찬가지로 레이크 수신기의 최적 핑거수는 3개로 예측되나 경로들간 시간차가 2 ms로 커짐에 따라 지연경로를 찾아내는 로직의 탐지 구간이 675 m에서 설계된 시스템에 비해 약 2배정도 넓어짐을 알 수 있다. 또한, 채널이 빠르게 변화함으로 인하여, 일반 통신 시스템에서와 같이 적응 채널등화기가 필요할 수도 있다.

IV. 결론

수중 무선 통신에서는 송신기에서 발생한 초음파가 채널을 거쳐 수신기에 도착을 한다. 이때, 송신 신호는 채널을 거치면서 반송주파수, 위상 및 크기가 변할 수 있고, 특정 주파수 성분이 채널 특성에 의해 감소될 수 있으며, 다중경로를 거쳐 수신기에 도착 할 수도 있다. 이러한 채널파라미터들을 반영하여 통신 시스템을 설계하여야 효율적인 시스템을 설계·구현할 수 있다. 본 논문에서는 수중음향통신 채널의 특성파악을 위하여 25 kHz에서 5 kHz의 심볼율을 갖는 QPSK 변조 신호를 이용하여 전파거리가 675 m와 1492 m 인 천해역 채널에 대하여 PN신호열의 자기상관특성을 이용하여 통신채널의 특성을 분석하였다. 통신채널분석을 위하여 산란 함수를 계산하고, 이를 근거로 도플러 편이와 상관 시간, 지연 전

력 프로파일, spaced-tone 자기상관 함수, 지연 확산 및 상관 대역폭을 분석하였다. 산란 함수를 분석하여 675 m 전송거리인 경우 1492 m에 비하여 약 7배정도 긴 상관 시간을 갖음을 알 수 있었다. 채널 지연 전력 프로파일 분석한 결과 675 m 전송거리에서는 약 30 ms까지 의미 있는 다중경로 신호가 존재함을 확인하였고, 1492 m 전송거리에서는 약 2 ms의 매우 작은 지연 시간구간에서만 의미 있는 다중경로 신호가 존재함을 분석하였으며, 두 경우 모두 큰 에너지를 갖는 다중경로는 3개가 존재함을 알 수 있었다. 또한, 이러한 채널 분석결과를 디지털 통신시스템 설계에 적용하는 방안을 제시하였다.

감사의 글

본 연구결과는 해양수산부의 “수중 무선통신 시스템 개발” 및 한국해양연구원의 “수중 탐사선단의 스마트 네트워크 및 운용기술 개발” 의 연구 성과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사한다.

참고 문헌

1. D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, 25 (1), 4-27, Jan. 2000.
2. 손근영, 노용주, 윤종락, "수중 데이터 통신 시스템 개발-변조방식의 성능비교," *한국음향학회 학술발표회논문집*, 281-284, 2000.
3. 이외형, 손운준, 김기만, "하이브리드 송신 어레이를 이용한 수중음향 통신 시스템의 성능 향상," *한국음향학회지*, 21 (7), 606-613, 2002.
4. 임용근 외, *수중무선통신 시스템 개발 보고서*, (한국해양연구원, 2005.12)
5. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, (McGraw-Hill Inc., 1983) 3rd Ed., Chap. 6.7
6. M. Stojanovic, "Recent advances in high-speed underwater acoustic communications," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, 2, 125-136, April 1996.
7. T.C. Yang, "Temporal fluctuations to broadband channel impulse functions and underwater acoustic communications at 2-5 kHz," *Proc. of OCEANS 2002*, 2395-2400, 2002.
8. 서석, 이찬길, "해양 음향 토모그래피에서 M-시퀀스를 이용한 해양 음향 채널 분석," *한국음향학회지*, 23 (1), 24-29, 2004.
9. 진년강, *아날로그와 디지털통신*, (철문각, 1994) 제 15장
10. S. Wicker, *Error Control Systems For Digital Communication and Storage, Appendix A*, (Prentice-Hall, 1995)
11. J.G. Proakis, *Digital Communications*, (McGraw-Hill Higher Education, 2000) 4th Ed., Chap. 14.
12. T.S. Rappaport, *Wireless Communications*, (Prentice-Hall Inc., 1996) Chap. 4.

저자 약력

• 김 승 근 (Seung-Geun Kim)



1995년 2월 : 인하대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)
 2002년 8월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)
 2002년 12월 ~ 현재 : 한국해양연구원 선임연구원
 ※ 주관심분야: 수중음향 통신 시스템 설계 및 구현, 채널 동화기술, 적응변조기법, 수중 네트워크

• 김 시 문 (Sea-Moon Kim)



1992년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
 1994년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
 2001년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양연구원 선임연구원
 2006년 2월 ~ 2007년 2월 : UCSD SIO 박사후연구원
 ※ 주관심분야: 수중음향 채널 모델링, 수중음향 통신, 수중 위치 탐지

• 임 용 곤 (Young-Kon Lim)



1979년 2월 : 충남대학교 전기공학과 (공학사)
 1984년 2월 : 충남대학교 전력전자공학과 (공학석사)
 1994년 2월 : 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
 1980년 7월 ~ 현재 : 한국해양연구원 책임연구원
 ※ 주관심분야: 수중음향 통신 시스템 및 네트워크, 네트워크 프로토콜