

해양 음향 토모그래피에서 M-시퀀스를 이용한 해양 음향 채널 분석

Analysis of the Ocean Acoustic Channel Using M-sequences in Ocean Acoustic Tomography

서 석*, 이 찬 길*
(Seok Seo*, Chan-Kil Lee*)

*한양대학교 전자컴퓨터공학부

(접수일자: 2003년 12월 5일; 채택일자: 2003년 12월 11일)

최근에 OAT (Ocean Acoustic Tomography) 분야에서 M-시퀀스를 이용한 펄스압축 (pulse compression) 기법을 이용하여 해양 구조를 분석하는 많은 연구가 이뤄지고 있다. M-시퀀스는 정합필터 (matched-filter)를 사용한 복조를 통해, 훌륭한 시간 분해능 (resolution) 및 도플러 분해능을 제공할 수 있다. 또한 수신 신호를 적절하게 처리함으로써 수신기 출력의 신호대잡음비 성능을 개선할 수 있으며, 수신 신호를 동기적으로 평균하는 것은 그것에 대한 좋은 예라고 할 수 있다. 그리고 데이터를 빠르고 효율적으로 처리할 수 있는 FHT (Fast Hadamard Transform) 또는 FFT (Fast Fourier Transform) 기법을 사용함으로써 처리 속도를 효율적으로 개선할 수 있다. 본 논문에서는 동해 연안에서 수집된 데이터를 이용하여 수중 음파의 다중경로 성분과 지연 시간을 분석하며, 송수신기 간의 샘플링 속도 오차에서 비롯된 현상을 설명하고 오차를 보상하는 방법을 제시한다. 그리고 채널의 scattering 함수, 지연 전력 프로파일 (delay power profile), 시간 확산 특성 등을 통하여 해양 음향 채널의 특성을 분석하도록 한다.

핵심용어: M-시퀀스, OAT, 위상 변조, 채널, 정합 필터

주요분야: 음향 통신기술 분야 (6.2)

In ocean acoustic tomography (OAT), the pulse compression techniques using M-sequences are employed in the many studies for investigating the ocean structures. M-sequences can provide the good time and Doppler resolution in the process of demodulation using matched-filter. The signal-to-noise (SNR) performance at the output of receiver may be improved by manipulating received signal, i.e. coherently averaging. The processing time can be significantly reduced by using fast hadamard transform (FHT) or fast Fourier transform (FFT). In this paper, we estimate the multipath arrival structures and delay times using the East Korean Sea experiment data and explore the compensation method for the detrimental effects on performance due to sampling rate error. We also analyze the characteristics of the ocean acoustic channels through scattering function, delay power profile, and time dispersions.

Keywords: M-sequence, OAT, Phase modulation, Channel, Matched-filter

ASK subject classification: Acoustic communication (6.2)

I. 서론

OAT는 수중 음파의 지연 시간이 음파를 전송하는 매질의 물리적인 특성 (수중 온도, 염도, 수압 등)에 따라 결정된다는 사실을 바탕으로 한 원거리 탐지 기법이다. 최근에 OAT 분야에서 M-시퀀스를 이용한 펄스압축

(pulse compression) 기술을 이용하여 해양 구조를 분석하는 많은 연구가 이뤄지고 있다. 해양 탐사에서의 OAT는 해양 구조의 시간적, 공간적 변화를 연구하는데 있어 유용한 기법이다. 펄스압축 기술은 레이다 응용분야에서 널리 사용되어지고 있으며 수중 음향 전송분야에서도 최근 활발하게 사용되고 있다. 송신기는 M-시퀀스에 의해 위상 변조된 신호를 전송하게 되며, 수신기는 정합필터를 이용하여 송신기에서 전송된 신호를 짧은 지속 시간을 갖지만 높은 에너지를 갖는 펄스로 압축하게 되는 것이며,

책임저자: 이찬길 (cklee@hanyang.ac.kr)
426-791 경기도 안산시 상록구 새1동 1271
한양대학교 전자컴퓨터공학부
(전화: 031-400-5294; 팩스: 031-419-3042)

OAT 분야에서는 이러한 M-시퀀스의 상관 특성을 이용하여 각각의 지연 시간을 갖는 다중경로 성분을 찾아내는 것이다.

OAT에서 수신 신호 처리의 기본 목적은 토모그래피 신호를 수신하고, 수신된 신호에 대한 각각의 다중경로 성분을 찾아내고, 이러한 다중경로 성분의 지연 시간을 추정하는 것이다. 또한 수신 신호를 적절히 처리함으로써 수신 신호의 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio)를 개선할 수도 있다. 대표적인 예로서 M-시퀀스를 반복적으로 전송함으로써 수신기로 하여금 이러한 연속적인 시퀀스들을 동기적으로 평균하게 함으로써 부가적인 신호 처리 이득 (signal processing gain)을 얻을 수 있다[1]. 수신 신호의 신호대잡음비는 다중경로 성분의 지연 시간 추정치의 정확성을 결정짓는 중요한 파라미터이기 때문에 신호대잡음비를 개선하는 것은 매우 중요한 문제이다.

전통적으로 OAT 신호 설계 및 처리는 T. Birdsall 등에 의해 제안된 접근 방법을 사용해 왔으며, self-clutter을 제거하기 위해서 위상 변조된 주기 신호를 사용한다[2]. PN (Pseudo-Random) 이진 시퀀스 (binary sequence)를 사용하여 반송파의 위상을 변조함으로써 토모그래피 신호를 쉽게 발생시킬 수 있다. PN 시퀀스에는 M-시퀀스, Gold 시퀀스, 그리고 Kasami 시퀀스 등의 여러 가지 종류가 있다[3]. 특히 M-시퀀스는 구현이 용이하고 상관 특성이 좋은 이유로 OAT 분야에서 많이 사용되고 있다. 또한 OAT에서는 장시간에 걸쳐 데이터를 수집하게 되는데, 이러한 이유로 처리해야 할 데이터 양이 매우 많아지게 된다. 따라서 데이터를 빠르고 효율적으로 처리할 수 있는 FHT (Fast Hadamard Transform) 또는 FFT (Fast Fourier Transform) 기법을 사용함으로써 처리 속도를 효율적으로 개선할 수 있다.

본 논문에서는 1999년 9월 13일부터 10월 23일 사이에 동해 연안에서 수집된 데이터를 이용하여 수중 음파의 다중경로 성분과 지연 시간을 분석하였으며, 다중경로 전력 프로파일 (profile), 지연 전력 프로파일, 그리고 신호의 시간 확산 특성 등을 통하여 해양 음향 채널의 특성을 분석하였다. 또한 송수신기간의 오차에서 비롯된 현상을 설명하고 오차를 보상하는 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 송수신 모델에 대해서 설명하고, 3장에서는 송수신기 간의 시스템 오차로 인해 발생하는 현상과 그 해결 방안에 대해서 기술한다. 4장에서는 실측한 데이터를 이용하여 해양 음향 수중 채널의 특성을 이론과 실측 결과를 토대로 알아보고, 5장에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

II. 송수신 모델

이진 PN-시퀀스 (binary pseudo-random noise sequence)를 사용하여 반송파의 위상을 변조함으로써 토모그래피 신호를 쉽게 발생시킬 수 있다. 여러 가지 PN-시퀀스 중에서 M-시퀀스는 구현이 용이하고 상관 특성이 좋은 이유로 OAT 분야에 많이 사용되고 있다.

2.1. 송신 신호

M-시퀀스 발생기에 의해 생성된 코드 시퀀스는 전송되기 전에 반송파를 위상 변조하게 된다. 발생된 코드는 0 또는 1로 표현되는 이진 코드이며, 반송파 변조에 앞서 1 또는 -1의 값으로 매핑된다. 이렇게 발생된 M-시퀀스는 반송파를 위상 변조하고, 변조된 신호는 채널을 통해 전송되게 되며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + c_i \theta) \tag{1}$$

여기서 A 와 f_c 는 각각 반송파의 진폭과 주파수를 나타내고, $c_i \in \{+1, -1\}$ 는 이진 코드를 +1과 -1로 매핑한 i -번째 M-시퀀스를 나타낸다. 또한 θ 는 반송파 변조 위상을 나타내며 다음과 같이 결정된다[4].

$$\theta = \tan^{-1}(\sqrt{N}) \tag{2}$$

여기서 N 은 M-시퀀스의 주기를 나타낸다. 수식 (2)와 같이 θ 을 선택함으로써 다중경로 성분의 시간 분해도 (resolution)을 높일 수 있으며 수신기 출력에서 최대의 신호대잡음비를 얻을 수 있다. 표 1은 1999년 동해 연안에서 OAT 실험에 사용된 전송 신호의 재원을 보인 것이며, 본 논문에서는 실험을 통해 수집된 데이터를 분석하고 해양 음향 채널의 여러 가지 특성들을 알아본다.

2.2. 수신기

수신된 신호는 복조기의 하향변환을 통해 기저대역의 동위상 및 직교 신호 성분을 얻는다. 복조기의 동위상 및

표 1. 전송 신호의 재원
Table 1. Specifications of transmission signal.

반송파 주파수 (Hz)	250.26
M-시퀀스 주기	511
반송파 변조 위상 (degree)	86.4167
시퀀스 칩당 지속시간 (ms)	31.967
시퀀스 한 주기 지속시간 (s)	16.335

직교 성분 출력 신호는 M-시퀀스 발생기 출력 신호와 더불어 상관기의 입력 신호가 된다. 복조기 출력 신호는 샘플수가 필요 이상으로 많기 때문에 상관기 입력으로 주어지기 전에 계산량을 줄이기 위해 데시메이션(decimation) 될 수 있다. 상관값 계산은 FHT(Fast Hadamard Transform) 또는 FFT 기법을 사용함으로써 처리 속도를 효율적으로 개선할 수 있다. 상관기 출력은 기저대역 복소 신호이며 복소 신호의 크기를 구함으로써 원하는 최종 결과를 얻을 수 있다.

III. 오차 분석 및 신호대잡음비 개선

3.1. 시퀀스 주기 불일치

일반적으로 동기적 평균 이득을 얻음으로써 신호대잡음비를 개선하기 위하여 일련의 수신된 다중경로 시퀀스를 주기적으로 평균을 하게 된다. 그러나 수신 신호를 샘플링 할 때 하드웨어적인 정확성의 한계에 기인하여 M-시퀀스의 칩 당 샘플수가 정확하게 정수가 될 수 없다.

이러한 이유 때문에 샘플링 된 수신 신호의 시퀀스 주기는 전송 신호의 시퀀스 주기와 불일치가 발생한다. 이러한 시퀀스 주기 불일치는 결국 다중경로 도착 구조의 기울어짐(skew) 현상으로 나타나게 되고, 수신 신호의 주기적 평균과 정합 필터 설계 측면에서 어려움을 야기시키게 된다. 그림 2는 이러한 샘플링 오차에서 비롯된 기울어짐 현상을 보인 것이다.

이러한 기울어짐으로 인해 지연시간 예측 오차가 발생하고 동기적 평균을 통한 신호대잡음비 개선을 얻기 힘들게 된다. 기울어짐 현상은 샘플링 속도 변환기를 통해 M-시퀀스의 칩당 샘플수를 정수가 되도록 함으로써 기울어짐의 영향을 보상할 수 있다. 그림 3은 샘플링 속도 변환을 통해 기울어짐 현상을 보정한 후의 다중경로 성분 구조를 보인 것이다.

3.2. 신호대잡음비 개선을 위한 동기적 평균

해양 토모그래피 실험에서는 신호대잡음비 개선을 위해서 다수의 다중경로 도착 구조를 동기적으로 평균한다. 그러나 최적의 성능을 얻기 위한 동기식 평균에 사용될

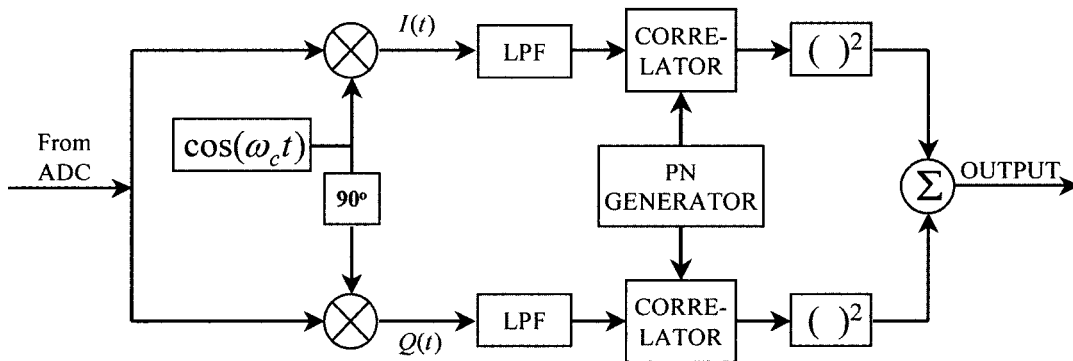


그림 1. 수신기 블록 다이어그램
Fig. 1. Receiver block diagram.

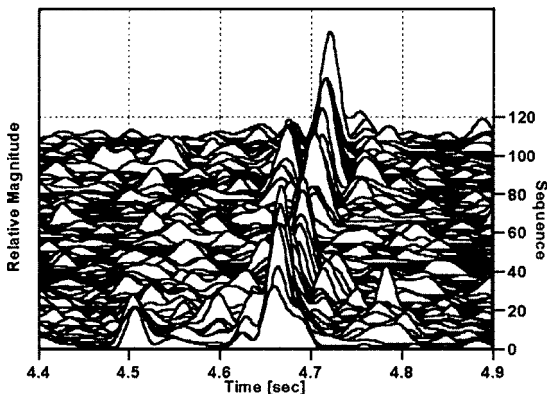


그림 2. 샘플링 오차에 의한 skew 현상
Fig. 2. Skew due to sampling rate error.

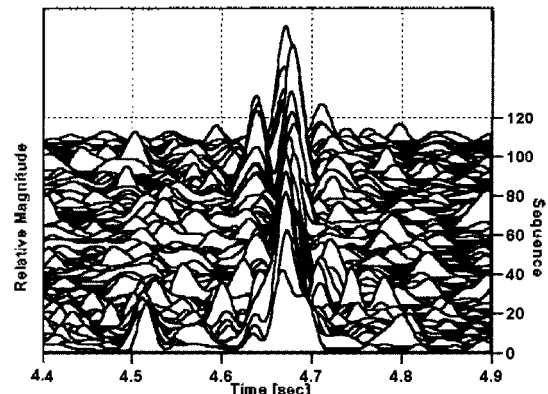


그림 3. skew 보상후의 다중경로 구조
Fig. 3. Multipath structure after compensation for skew.

다중경로 시퀀스의 개수를 결정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 해양 채널의 변화는 신호의 도착 구조를 변화 시키게 되며, 해양의 변화율은 최대 평균 이득을 얻기 위해 도착 구조들을 동기식으로 평균하는데 사용되어야 할 시간을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 최대 신호대잡음비를 얻기 위해 사용될 다중경로 도착 구조의 개수를 결정하는 방법에는 순간 응집 (temporal coherence)을 이용하는 것과 채널의 응집 시간 (coherence time)을 이용하는 방법 등이 있다.

L 개의 연속적인 시퀀스에 대해 순간 응집은 다음과 같은 방법으로 얻어 질 수 있다[1].

$$C_{L,k} = \frac{\max_i \left| \sum_{n=k}^{k+L-1} S_{i,n} \right|}{\frac{1}{L} \left[\sum_{n=k}^{k+L-1} \max_i |S_{i,n}| \right]} \quad (3)$$

여기서 $S_{i,n}$ 은 상관기 출력에서의 n -번째 시퀀스의 i -번째 복소 샘플을 의미한다. 완벽한 코히어런트 (coherent) 신호에 대해서 $C_{L,k} = L$ 이 된다. 그러므로, $C_{L,k}$ 는 k -번째 시퀀스에서 시작하는 L 개의 연속적인 시퀀스를 동기적으로 더함으로써 얻어지는 이득의 척도이다.

채널의 응집 시간은 채널이 근본적으로 변하지 않는 시간이므로, 응집 시간 정보를 이용하면 최대 신호대잡음비를 얻기 위해 사용될 시퀀스의 개수를 얻을 수 있다. 즉 채널 응집 시간을 시퀀스의 지속 시간으로 나누면 사용될 시퀀스의 개수를 얻게 된다. 그림 4는 토모그래피 신호의 순간 응집의 예를 보인 것으로, 점선은 완벽한 코히어런트 경우에 대한 순간 응집을 보인 것이고, 직선은 실측 데이터를 통해 얻어진 결과이다. 이와 같은 채널 환경에서는 연속적인 시퀀스의 동기적 평균을 통해 훌륭한 신호대잡음비를 얻을 수 있게 된다.

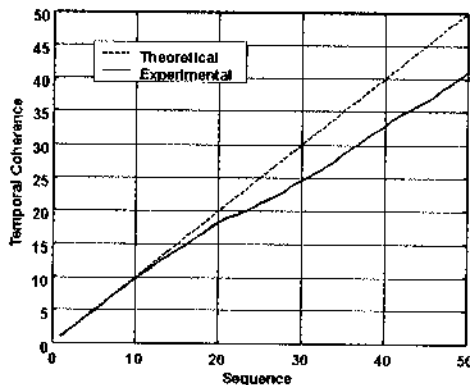


그림 4. 채널의 순간 응집
Fig. 4. Temporal coherence of channel.

IV. 채널의 특성

4.1. Scattering 함수

일반적으로 다중 경로 채널은 복소 기저 대역 임펄스 응답으로 나타내어지는 시변 선형 모델로 표현될 수 있다. 따라서 채널을 통과한 출력 신호는 전송 신호와 채널의 임펄스 응답과의 컨볼루션 (convolution)으로 주어진다. 이산적 기저 대역 복소 채널 임펄스 응답 $\alpha(\tau, t)$ 는 다음과 같은 식으로 주어진다[5].

$$\alpha(\tau, t) = \sum_n a_n(t) \exp(-j2\pi f_c \tau_n(t)) \delta(\tau - \tau_n(t)) \quad (4)$$

여기서 $a_n(t)$ 와 $\tau_n(t)$ 는 각각 n -번째 경로의 복소 이득과 전파 지연을 나타낸다. 만약 채널 임펄스 응답 $\alpha(\tau, t)$ 을 WSSUS (wide-sense stationary uncorrelated scattering) 랜덤 프로세스로 가정한다면, $\alpha(\tau, t)$ 의 자기 상관 함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_c(\tau, \Delta t) = \frac{1}{2} E[c^*(\tau_1, t) c(\tau_2, t + \Delta t)] \quad (5)$$

여기서 *는 켈레 복소수 (complex conjugation)을 의미한다. scattering 함수는 $\alpha(\tau, t)$ 의 자기상관 함수 $R_c(\tau, \Delta t)$ 의 푸리에 변환을 통해 얻을 수 있다.

$$S_c(\tau, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} R_c(\tau, \Delta t) \exp(-j2\pi \nu \Delta t) d\Delta t \quad (6)$$

$S_c(\tau, \nu)$ 는 scattering 함수라고 불리며, 랜덤 다중경로 채널의 가장 중요한 통계적인 특성 중의 하나이다. 이 함수는 지연 변수 τ 와 도플러 주파수라고 불리는 주파수 영역 변수 ν 의 두 개의 변수를 갖는 함수이다.

그림 5는 실측 데이터를 통해 얻은 scattering 함수를

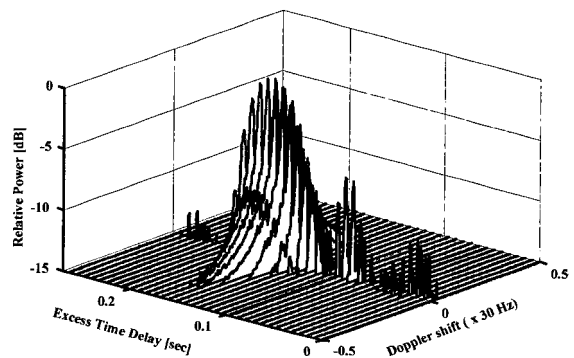


그림 5. Scattering 함수
Fig. 5. Scattering function.

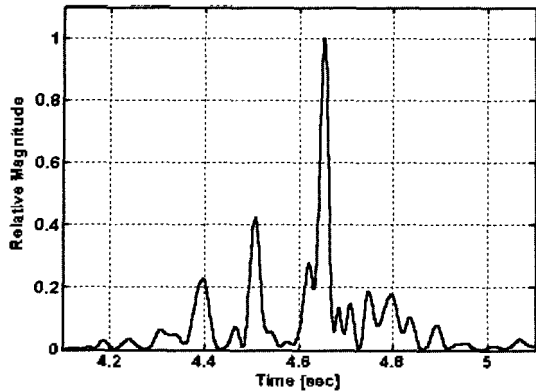


그림 6. 지연 전력 프로파일
Fig. 6. Delay power profile.

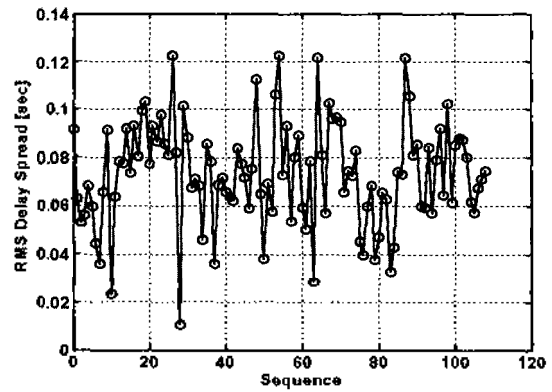


그림 7. RMS 지연 확산
Fig. 7. RMS delay spread.

보인 것이다. 사용된 반송파 주파수가 250.26 Hz로 낮고 수신 안테나의 이동 속도가 느리기 때문에 도플러 변이가 적은 것으로 해석될 수 있다. 또한 음파의 속도가 느린 이유로 초과 시간 지연이 일반적인 무선채널 (radio channel)에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있다.

4.2. 지연 전력 프로파일 (delay power profile)

지연 전력 프로파일은 $p(\tau) = R_c(\tau, 0)$ 로 주어진다. 그리고 지연전력 프로파일은 시간 지연 τ 에 따른 수신된 평균 전력을 나타낸다. 또한 아래 식은 $p(\tau)$ 와 scattering 함수와의 관계를 보여준다.

$$p(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, \nu) d\nu \tag{7}$$

그림 6은 실측 데이터를 통해 얻어진 해양 수중 채널의 지연 전력 프로파일의 예를 보인 것이다.

4.3. 채널의 시간 분산 특성

다중 경로 채널에서 다중경로 성분들의 시간 분산 특성은 평균 초과 지연 (mean excess delay)과 RMS (root-mean square) 지연 확산에 의해서 정량화 된다. 평균 초과 지연은 지연 전력 프로파일의 일차 모멘트 (moment)이며 다음과 같이 정의된다[6].

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_n p(\tau_n) \tau_n}{\sum_n p(\tau_n)} \tag{8}$$

그리고 RMS 지연 확산은 다음과 같이 정의된다[6].

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - \bar{\tau}^2} \tag{9}$$

여기서 $\overline{\tau^2} = \sum_n p(\tau_n) \tau_n^2 / \sum_n p(\tau_n)$ 이다.

이러한 지연 특성은 수신기에 가장 먼저 도착한 신호 성분을 기준으로 하여 상대적인 지연 시간으로 측정되며, 절대적인 전력 레벨에 의존하지 않고 단지 다중경로 성분의 상대적인 크기에 의존한다. 그림 7은 그림 6에서 보인 지연 전력 프로파일에 대응하는 RMS 지연 확산을 나타내었다.

V. 결론

본 논문에서는 동해 연안에서 수집된 데이터를 이용하여 수중 음파의 다중경로 성분과 지연 시간을 분석하였으며, 송수신기 간의 오차에서 비롯된 현상을 설명하고 오차를 보상하는 방법을 제시하였다. 그리고 scattering 함수, 지연 전력 프로파일, 채널의 시간 확산 특성 등을 통하여 해양 음향 채널의 특성을 분석하였다. 또한 기울어짐 현상은 샘플링 속도 변환을 통해 정확하게 보상될 수 있음을 실측 데이터 분석을 통해 알 수 있었으며, 해양 수중 채널은 도플러 변이가 작다는 것을 볼 수 있었다. 이는 일반적으로 수중 음향 통신에 사용되는 반송파 주파수가 낮고 송수신기의 이동 속도 및 주위 환경의 변화율이 낮다는 것을 의미한다. 또한 음파의 속도가 느린 이유로 초과 지연 시간이 일반적인 무선채널 (radio channel)에 비해 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Robert C. Dees, "Signal processing and preliminary results in the 1988 monterey bay tomography experiment," Naval Postgraduate School, Master's Thesis, 1989.
2. T. G. Birdsall and K. Metzger, "Factor inverse matched filtering," *J. Acoust. Soc. Am.*, 79, 1986.
3. R. L. Peterson, R. E. Ziemer and R. E. Borth, *Introduction to Spread Spectrum Communications* (Prentice-Hall, 1995), Chap. 3, 90-135.
4. T. G. Birdsall, K. Metzger, and R. C. Spindel, "Signal processing for ocean tomography with moving ships," *Signals, Systems and Computers*, 23-th Asilomar Conference, 1, 1988
5. J. G. Proakis, *Digital Communications* (McGraw-Hill, International Editions, 1995), Chap. 14, 758-767.
6. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: principles and Practice* (IEEE Press, New York, 1996), Chap. 4, 139-172.

저자 약력

• 서 석 (Seok Seo)



1997년: 한양대학교 전자공학과 졸업 (학사)
 1999년: 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1999년~현재: 한양대학교 대학원 박사과정

• 이 찬 길 (Chan-Kil Lee)



1981년: 한양대학교 전자공학과 졸업 (학사)
 1983년: 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1992년: Georgia Inst. Tech. 전기공학과 졸업 (공학박사)
 1983년~1985년: 한국전자통신연구소 TDX 개발팀 연구원
 1992년~1994년: 한국전자통신연구원 이동통신기술 연구소 선임연구원
 1994년~1995년: 경북대학교 전자공학과 전임강사
 1995년~현재: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 부교수

※ 주관심분야: 디지털통신, SDR 시스템, CDMA 모델, 페이딩 채널 모델링, 무선 센서망