

논문 2017-54-6-17

통계적 수중음향 채널에서 트렐리스 부호화된 4-CPFSK의 성능분석

(Performance Analysis of a Trellis coded 4-CPFSK over
an Statistical Underwater Acoustic Channel)

강 희 훈*

(Hee-hoon Kang[©])

요 약

수중통신을 위한 채널환경은 매우 가혹하다. 주파수 대역폭의 효율적인 사용이 요구되는 수중음향통신에서는 주파수 대역특성이 좋은 변조 신호가 필요하다. 위상편이변조는 전송비트수가 1이나 2비트일 경우 수신측의 잡음에 대한 민감도는 양호한 편이지만 3비트 이상의 전송인 위상편이변조 방식은 스펙트럼 사용효율을 높일 수 있으나 잡음에 민감하게 된다. 1비트나 2비트 전송에 있어 CPFSK는 성능면에서 동기식 위상편이변조와 비슷하지만 스펙트럼의 고주파 성분을 작게 한다. 본 논문에서는 통계적 수중음향채널에서의 트렐리스 부호화 4-CPFSK방식에 대한 성능을 분석한다.

Abstract

A channel is very sever in an underwater acoustic communication. Therefore, a modulation method with high spectrum efficiency is needed in an underwater acoustic communication. PSK(phase shift keying) for transmitting 1 bit or 2 bits is robust to noise, but sensitive to noise about more than 3 bits. CPFSK error performance for transmitting 1 bit or 2 bits is similar to that of PSK and CPFSK decreases high frequency components in modulation signal. In the paper, I analyze the performance of trellis coded 4-CPFSK modulation.

Keywords : TCM(Trellis Coded Modulation), UWAC(UnderWater Acoustic Channel), PSK(Phase Shift Keying), CPFSK(Continuous Phase Frequency Shift Keying), Bellhop Ray Tracing

I. 서 론

수중 음향 통신 시스템은 해저 탐사부터 해난 사고 등의 다양한 분야에 필요한 요소이다. 해양 자원 보존과 개발, 수중 환경 감시 등을 위한 수중통신 시스템의 응용 분야가 증대됨에 따라, 다양한 수중통신 모델 연구 개발의 필요성도 함께 증가하고 있다.^[1~2]

수중음향통신에 따라 물리적 제약을 이기기 위해서

*정회원, 여주대학교 전자과 (Department of Electronics, Yeosu Institute of Tech.)

© Corresponding Author (E-mail : khh@yit.ac.kr)

Received ; February 5, 2017 Revised ; February 27, 2017

Accepted ; May 24, 2017

대역과 에너지 효율적인 변조 기술을 고려해야 한다. 위상편이변조(PSK:Phase Shift Keying)는 전송 비트수가 1비트나 2비트일 경우 수신측의 잡음에 대한 민감도는 양호한 편이지만 3비트 이상의 다중 비트 전송의 경우 스펙트럼 사용효율을 높일 수 있으나 잡음에 매우 민감하게 된다.^[3] 또 다른 디지털변조인 주파수 편이변조가 저속전송용으로 수중음향통신에서 개발되어 왔다.^[4] 주파수변조보다 대역 사용효율이 좋은 CPFSK (Continuous Phase Frequency Shift Keying)는 연속적인 위상과 일정한 포락선을 가지는 디지털 변조방식으로 주파수 변화로 정보를 전송한다. 특히, 2비트 이하의 전송에 있어서 CPFSK 방식은 성능면에서 동기식 위상편이변조 방식과 비슷하지만 주파수편이변조와 위상편

이변조에서 나타나는 큰 부대역(Sidelobe)을 억제한다는 장점을 가진다. 수중음향채널에서 TC-CPFSK를 적용하는 이유는 길쌈부호화된 트렐리스 부호화를 사용하여 대역 희생없이 전송율을 높을 수 있으며 CPFSK (Trellis coded CPFSK)로 수신 다이버시티를 얻을 수 있다.^[5]

II. 수중음향 채널 모델

수중 음향 통신채널은 매우 복잡한 특성을 나타낸다. 이러한 복잡한 특성을 잘 나타내기 위해서 실측으로 얻어진 채널정보 이외에 다양한 방법들이 사용되고 있다. 이들 중 단일주파수 수중음향통신에서는 Bellhop와 같은 파동방정식에 의한 채널 모델을 많이 적용되고 있다. 그러나 본 논문에서의 CPFSK에는 적용이 적합하지 않다. 따라서 통계적 채널모델에는 얇은 수중환경에 적용하기 위한 Rayleigh 분포 확률을 적용한다. Rayleigh 페이딩 채널 모델은 짧은 구간 페이딩을 발생하는데 이는 난류에 의한 현상이며 위상의 변동은 가우시언 분포 모델을 사용한다.^[6~7] 얇은 수중환경에서 페이딩 채널 모델에 영향을 주는 요소들은 다음과 같은데 이 중 주요 원인은 다중경로 현상과 전송손실이며 이는 수중음파통신에 큰 영향을 미친다.

2.1 다중경로 현상

그림 1은 수중 음향 채널의 다중경로를 나타낸다. 해 표면과 해저바닥의 경계는 에너지를 반사한다. 이러한 반사파는 다양한 경로를 통해서 송신기에서 수신기에 도달한다. 이는 더 나아가 불완전한 경계에 의해서 보다 복잡해진다. 수중 경로의 전체적인 다중경로 현상은 신호의 시간 분산을 야기한다. 시간 확산은 깊은 수중의 수초에 비해서 얇은 수중에서 수백 밀리초 만큼 높을 수 있다. 높은 주파수에서, 전체 시간확산은 경계에서 흡수와 수중에서 감쇠로 인해서 적다. 다중경로 채널은 다중경로 전파전파에 의해서 영향을 받으며 또한 일시적인 변화를 야기하는 이동이나 다중접속에 의한 간섭등도 영향을 주게 된다.^[8]

2.2 전송 손실

음파의 세기는 기하학적 확산과 흡수 매커니즘에 의해서 수중을 전파하는 동안 감쇠된다. 수중에서 음파의

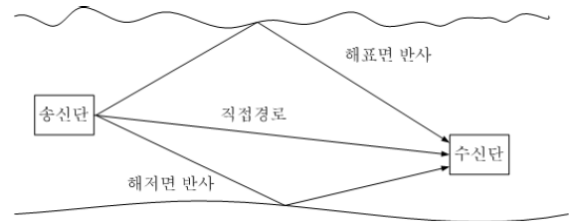


그림 1. 수중 음향 채널의 다중경로 모델
Fig. 1. Multipath model of an underwater acoustic channel.

감쇠는 RF(Radio Frequency) 전자기파에 비해서 무시될 수 있지만 수중에서 흡수되는 에너지의 손실은 상당하다. 기하학적 확산에 기인한 손실은 구형이거나 원통형 특성이다. 이는 TL(Transmission Loss: 전송손실)이라고 표기하며 식 (1)과 같다. 단위 범위 당 손실은 주파수 f 와 감쇠상수 α 의 함수이고 하며 단위는 dB이다.^[8]

$$TL(f) = 20 \times \log R + \alpha(f)R \quad (1)$$

여기서 R 은 방사원으로부터 복사 거리이다.

2.3 환경 잡음

환경 잡음(Ambient Noise)은 수신된 SNR에 영향을 주고 송신 전력을 조절하게 한다. 환경 잡음 관심 영역에 대해서 주파수에 따라 일반적으로 감소한다. 해변 환경이나 수중 작업장은 깊은 해저 환경보다 잡음이 더 많다.^[8]

2.4 도플러 영향

도플러의 영향은 송신기와 수신기 사이의 상대적인 이동이나 물의 이동에 의해서 나타난다. 한 방향에 대해서 1[knots.KHz]당 0.35[Hz]의 주파수 천이가 발생한다. 상대적인 이동이 양방향인 경우, 0.70[Hz/(knots.KHz)]의 주파수 천이가 발생한다. 흡수 손실과 송수신기 특성에 의해 야기되는 채널 대역의 부족으로 인해서, 도플러 확산은 가용 대역을 축소시킨다.^[8]

III. 수중 음향 통신용 TC-CPFSK 모델

3.1 시스템 블록도

그림 2는 수중음향통신을 위한 TC-CPFSK(Trellis Coded-Continuous Phase Frequency Shift Keying) 블록도를 나타낸다.^[9~11] 송신부에서 트렐리스 부호화된

CPFSK 변조방식을 사용하여 전송하고 수신부에서 길쌈부호기를 통해서 이를 복조한다.

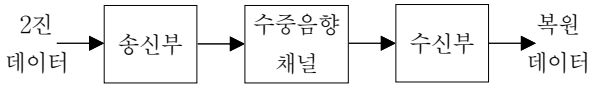


그림 2. 수중음향채널에서 TC-CPFSK 시스템
Fig. 2. The TC-CPFSK system under an underwater acoustic channel.

3.2 송신부 블록도

그림 3은 송신부의 블록도를 나타낸다.

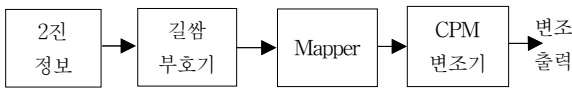
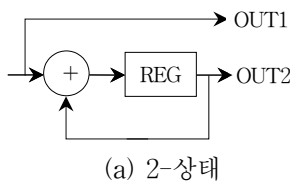
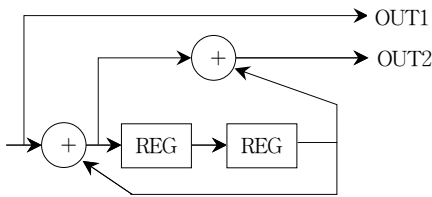


그림 3. 송신부 블록도
Fig. 3. A Transmitter block diagram.

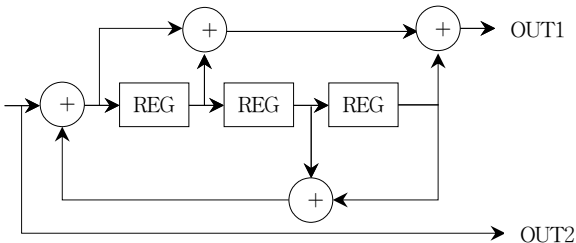
채널부호기는 메시지가 잡음 채널상에 전송될 때 오류를 줄이는데 사용된다. 본 논문에서는 2, 4, 8 상태의 부호율이 1/2인 길쌈부호기를 사용한다.



(a) 2-상태



(b) 4-상태



(c) 8-상태

그림 4. 재귀 시스템적 길쌈부호기 블록도
Fig. 4. A recursive systematic convolutional coder.

이 부호기의 코드를 트렐리스 부호화된 CPFSK에 적용한다. 사상기는 2개의 비트를 각각의 심볼로 표 1과 같이 변환한다.

표 1. 4진 CPFSK에 대한 사상기
Table1. Mapper for 4-ary CPFSK.

입력 비트	사상
00	-3
01	-1
10	1
11	3

$h=1/2$ 를 가지는 부호화하지 않는 4진 CPFSK에 대한 위상 트렐리스도는 그림 4와 같다.

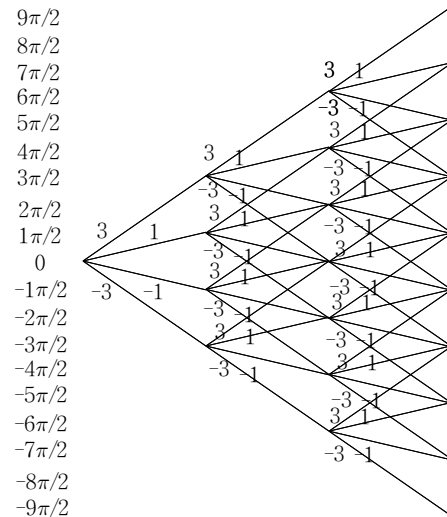


그림 5. 4진 CPFSK에 대한 위상 트렐리스
Fig. 5. Phase Trellis for 4-ary CPFSK.

3.4 수신부 블록도

그림 5는 수신부의 블록도를 나타낸다.

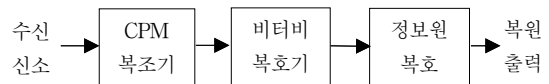


그림 6. 수신부 블록도
Fig. 6. A Receiver block diagram.

CPM(continuous phase modulation) 복조기 구조는 그림 6과 같다. 수신된 신호는 먼저 오프셋되고 4개의 상관기를 통과하게 된다.

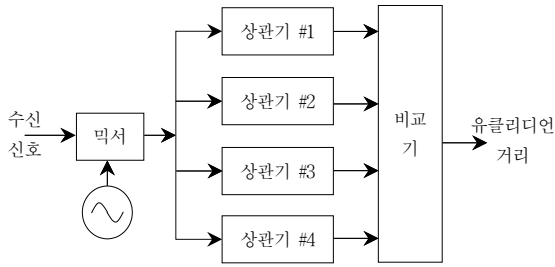


그림 7. 복조기 블록도
Fig. 7. A demodulator block diagram.

상관기의 출력은 식 (2)과 같다.

$$C_n = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} r^*(t) \cdot s_n(t) dt \quad (2)$$

상관기 출력의 실수부가 산출되고 이는 4차원 수신 신호벡터의 구성요소로 사용된다. 이 벡터의 유클리디언 요소는 신호의 격자점 내 각 벡터들로부터 비교기내에서 각각의 유클리디언 거리가 계산된다. 수신된 신호는 잡음이 없을 때 식 (3)과 같다.

$$r(t) = e^{j\theta_k} e^{(j\pi h I_k t / T_s)} \quad (3)$$

여기서 위상 상태 $\theta_k = (0, \pi)$ 이고 전송된 정보 시퀀스 $I_k = (-3, -1, 1, 3)$ 이다. 신호격자점의 8개의 벡터는 식 (4)에 의해서 결정된다.

$$C_{kn} = \frac{1}{T_s} \text{Re} \left[\int_0^{T_s} r^*(t) s_n(t) dt \right] \quad (4a)$$

$$C_{kn} = \frac{1}{T_s} \text{Re} \left[e^{(j\theta_k)} \int_0^{T_s} e^{(j\pi h (I_n - I_k) t / T_s)} dt \right] \quad (4b)$$

$$C_{kn} = \mp (1) \frac{1}{T_s} \text{Re} \left[\int_0^{T_s} e^{(j\pi h (I_n - I_k) t / T_s)} dt \right] \quad (4c)$$

$$C_{kn} = \Psi_{kn} \quad (4d)$$

표 2는 Ψ_{kn} 를 나타내며 각 열은 신호격자점 내 단일 점을 나타낸다.

표 2. 신호격자점 내 단일 점
Table2. Single point of signal constellation.

I_k / I_n	-3	-1	1	3
$-3(\theta_k=0)$	-	0	0	0
$-3(\theta_k=\pi)$	-1	0	0	0
$-1(\theta_k=0)$	0	1	0	0
$-1(\theta_k=\pi)$	0	-1	0	0
$1(\theta_k=0)$	0	0	1	0
$1(\theta_k=\pi)$	0	0	-1	0

$3(\theta_k=0)$	0	0	0	1
$3(\theta_k=\pi)$	0	0	0	-1

IV. 가상실험 결과

트렐리스 부호화된 CPFASK의 성능을 분석하기 위해서 트렐리스 부호화기는 구축장 2, 3, 4를 사용하며 변조방식은 4진 CPFASK를 적용한다. 가상실험을 위한 조건은 표 3에 나타낸다. 가상실험은 매트랩 2014a버전을 이용하여 수행하였다.

표 3. 가상실험을 위한 조건

Table3. Parameters for Simulation.

파라미터 명	환경
반송파주파수	25[KHz]
채널 길이	100[m]
송수신기의 깊이	50[m]
해수면과 해저면에 의한 손실	3[dB]
송수신기 이동속도	5~10[km/h]
최대 도플러 천이	3[Hz]
표본주파수	55[kHz]
트렐리스 부호화기	2, 4, 8 상태
변조방식	4진 CPFASK

TC-4CPFASK 시스템에 대한 가상실험 결과를 나타낸다.

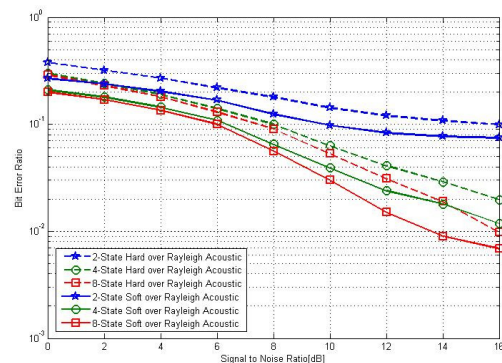


그림 8. 레일리 수중 채널에서 TC-4CPFASK의 경판정과 연판정 성능

Fig. 8. Hard and Soft Decision BER Performance of TC-4CPFASK for Rayleigh underwater channel.

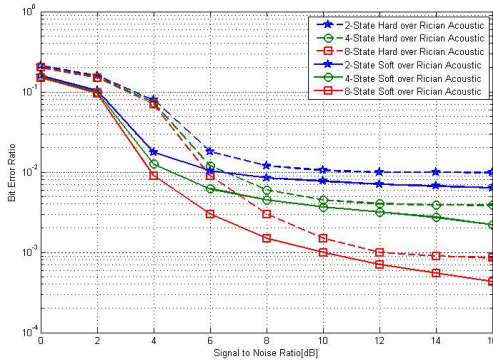


그림 9. 리시안 수중 채널에서 TC-4CPFSK의 경판정과 연판정 성능

Fig. 9. Hard and Soft Decision BER Performance of TC-4CPFSK for Rician underwater channel.

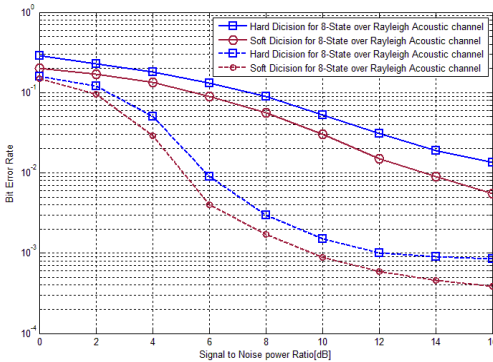


그림 10. 레일리과 리시안 수중 채널에서 8-상태 TC-4CPFSK의 경판정과 연판정 성능

Fig. 10. Hard and Soft Decision BER Performance of 8-state TC-4CPFSK for Rayleigh and Rician underwater channel.

그림 8은 통계적 레일리 수중 채널에서 BER 성능을 나타낸다. 2상태, 4상태, 8상태 연판정과 경판정에 대한 성능을 비교하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 8상태 연판정의 성능은 8상태 경판정에 비해서 대략 BER 10^{-2} 에서 3[dB] 정도의 성능 차이를 보였다. 그러나 전반적으로 레일리 수중 채널에서는 제안한 TC-4CPFSK가 좋은 BER 나타내지 않았음을 알 수 있다. 그림 9은 통계적 리시안 수중 채널에서 BER 성능을 나타낸다. 2상태, 4상태, 8상태 연판정과 경판정에 대한 성능을 비교하였다. 그림 9에서 알 수 있듯이 8상태 연판정의 성능은 8상태 경판정에 비해서 대략 BER 10^{-3} 에서 4[dB] 정도의 성능 차이를 보였다. 그림 10은 레일리 수중채널과 리시안 수중채널에서는 제안한 8상태 TC-4CPFSK의 성능을 비교한 것이다. 레일리 수중 채널에서 보다

는 좋은 BER 성능을 나타냈고 경판정보다는 연판정 성능이 좋음을 알 수 있다.

V. 결론

수중음향채널에서 통신을 수행하기에는 매우 열악하다. 본 논문에서는 기존의 통신 방법을 수중음향 채널에 적용하기 위해서 통계적 수중 채널 모델 방법을 채택하고 그에 대한 CPFSK의 성능을 분석하여 타당성을 제시하고자 하였다. 해양 탐사나 해난에 대해서 수중통신의 중요성이 계속 대두되고 있고 해양 분야의 각 적용에 따라 적합한 통신의 적용은 매우 중요하다. 이에 따라 다양한 통신채널을 지속적으로 모델링하고 실험적인 데이터를 기반으로 최적화된 통신방식을 사용하면 더 개선된 해양 통신을 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서 알 수 있듯이 수중음향채널에의 다중경로에 영향을 줄여 오류를 줄일 수 있는 통신방식의 선택과 오류정정부호의 선택이 매우 중요하다. 따라서 다중경로에 의해서 발생하는 심볼간 간섭을 줄일 수 있는 통신방법과 해양 분야의 어플리케이션에 최적화된 통신 시스템이 연구되어야 한다. 수중음향 채널은 모델링이 매우 어렵기 때문에 다양한 방법을 이용하여 통신 채널을 적용하고 있다.

REFERENCES

- [1] A. Baggeroer, "Acoustic telemetry—an overview," IEEE J.Oceanic Eng. 9, 229-235, 1984.
- [2] H.G. Urban, "Handbook of Underwater Acoustic Engineering", STN Atlas Elektronik GmbH, Bremen, 2002.
- [3] A. Falahati, B. Woodward, and S. C. Bateman, "Underwater acoustic channel models for 4800 b/s QPSK signals," IEEE J. Oceanic Eng. 16, 12-20, 1991.
- [4] Jelle Stuyvaert, "Underwater Modem", Report of the nal year project submitted to obtain the degree of Integrated Master in Electrotechnical Engineering and Computers Major in Telecommunications, June, 2008.
- [5] Gottfried Ungerbieck, "Trellis-Coded Modulation with Redundant Signal Sets Part I and II" vol. 25, no. 2, Feb. 1987.
- [6] Jie Huang, "Simulation And Modelling of Underwater Acoustic Communication Channels with Wide

- Band Attenuation And Ambient Noise”, Master paper, Ottawa, Ontario September, 2015
- [7] Michael B. Porter, La Jolla, “The BELLHOP Manual and User’s Guide: PRELIMINARY DRAFT”, Heat Light and Sound Research Inc., CA, USA, January 31, 2011
- [8] Francisco J. Cañete, Jesús López-Fernández, Celia García-Corrales, Antonio Sánchez, Encarnación Robles, Francisco J. Rodrigo and José F. Paris, “Measurement and Modeling of Narrowband Channels for Ultrasonic Underwater Communications”, www.mdpi.com/journal/sensors Sensors 2016, 16, 256; doi:10.3390/s16020256
- [9] L. Venkata Subramaniam, B. Sundar Rajan and Rajendar Bahl, “Trellis Coded Modulation Schemes For Underwater Acoustic Communication”, 0-7803-5045-6/98/, p800~804 IEEE, 1998.
- [10] Júlio Diogo Miranda Xavier, “Modulation Analysis for an Underwater Communication Channel”, Ph.D Paper, 31 October 2012.
- [11] Surajkumar Harikumar, Manikandan S, “Performance Evaluation of Convolutional Codes : A MATLAB implementation”, ERROR CONTROL CODING PROJECT, MAY, 2014.

저 자 소 개



강 희 훈(정희원)

1997년 2월 서울과학기술대학교 전기공학과 학사 졸업.

1999년 8월 광운대학교 전자공학과 석사 졸업.

2003년 8월 광운대학교 전자공학과 박사 졸업.

2002년~현재 여주대학교 전자과 교수

<주관심분야: 유무선 통신시스템, 수중음향통신시스템, USN>