

고 주파수 기반 선박중심 직접통신(MX-S2X) 물리계층 구현 및 성능분석

김혜진* · 류형직** · 장진영*** · 김원용**** · 김부영***** · † 심우성

*㈜코메스타 책임연구원, **㈜코메스타 수석연구원, ***㈜코메스타 부장, ****㈜코메스타 연구소장, *****선박해양플랜트연구소 해상디지털통합활용연계연구단 선임기술원, † 선박해양플랜트연구소 해상디지털통합활용연계연구단 단장

Implementation and Performance Analysis for MX-S2X, Ship Centric Direct Communication based on High-frequency

Hye-Jin Kim* · Hyung-Jick Ryu** · Jin-Yeong Chang*** · Won-Yong Kim**** · Bu-Young Kim***** · † Woo-Seong Shim

*, **, ***, ****Principal Engineer, COMESTA Ltd. Daejeon 34014, Republic of Korea

*****Senior Engineer, MDA unit, Korea Research Institute of Ships and Ocean Eng. Daejeon 34103, Republic of Korea

† Principal Researcher, MDA unit, Korea Research Institute of Ships and Ocean Eng. Daejeon 34103, Republic of Korea

요약 : 고 주파수 기반의 광대역 통신기술을 활용하는 선박중심 직접통신(MX-S2X)은 디지털 통신 연계기술 개발 및 실증을 통한 육상·선박·시설의 유기적 연결을 제공함으로써, 향후 도래할 자율운항선박 및 유·무인선 혼재 운항 상황에서 해상 통신 인프라로서의 효과적 활용이 가능하다. 본 논문은 해상 다중경로 페이딩 극복 가능한 선박중심 직접통신(MX-S2X) 시스템의 물리계층 설계 및 M&S(modelling & Simulation) 기반 성능 분석의 후속으로 설계 내역의 최적화 및 상세설계를 확정하고, 이를 하드웨어로 구현하여 성능을 검증 하였다. 구현한 하드웨어 성능 분석을 위해 시험환경을 구성하여 PER 성능을 측정한 결과, M&S 대비 AWGN 환경에서는 0.2dB, 해상 다중 경로 페이딩 환경에서는 1.2dB의 성능 열화를 확인하였으며, 이러한 수준의 성능 열화는 케이블 손실, 시험 오차 등에 의한 것으로 구현한 물리계층 하드웨어가 적절한 성능 수준을 보임을 확인하였다.

핵심용어 : 선박중심 직접통신, 다중경로 페이딩, 등화기, 해양 모빌리티, 해상이동업무용서비스

Abstract : The MX-S2X, utilizing high-frequency broadband communication technology, provides a reliable connection between land, ship, and facilities. This technology is expected to be effectively utilized as a future maritime communication infrastructure in the upcoming mixed navigational situation among autonomous and manned and/or unmanned ships. Following the physical layer design and M&S-based performance analysis of the MX-S2X system to overcome maritime multipath fading, this paper confirms the optimized and detailed design of physical layer hardware and implemented it to verify the performance. The PER(Packet Error Rate) performance was then measured by configuring a test environment to verify the implemented hardware. The results showed that the performance degradation was 0.2 dB in the AWGN environment and 1.2 dB in the Multi-path Fading on Sea Environment, thus confirming the successful implementation of the physical layer.

Key words : ship-centric direct communication, multi-path fading, equalizer, maritime mobility, maritime mobile service

1. 서 론

선박 운항과 관련된 통신 장비들은 IMO(International Maritime Organization)의 SOLAS(Safety Of Life At Sea) 협약에 따라 선박의 크기 또는 종류 기준에 맞춰 탑재되고 활용된다. 음성 중심의 통신에서 데이터 중심으로 이전되기 시

작한 것은 2004년 12월 31일부터 탑재 대상 선박에 탑재 의무화된 AIS(Automatic Identification System)라 할 수 있다.

두 개의 VHF 기반 AIS 1, 2 채널을 이용하며 각 채널에서 TDMA(Time Division Multiple Access) 방식으로 슬롯을 나눠 한 채널당 2,250개의 슬롯을 생성하고 여러 AIS기기가 슬롯을 나눠 데이터를 전송함으로써 채널을 공유한다.(ITU,

† Corresponding author : 종신회원, pianows@kriso.re.kr 042)866-3662

* 정희원, hjkim@comesta.com 042)863-5206, ** normalia@comesta.com 042)863-5206, *** wykim@comesta.com 042)863-5206

**** 종신회원, kby@kriso.re.kr 042)866-3142

(†) 이 논문은 “MX-S2X(선박중심직접통신) 물리계층 구현 및 성능분석” 제목으로 “2022 한국항해항만학회 추계학술대회 논문집(부산항국제 전시컨벤션센터, 2022.11.10.-11, pp. 96-98)”에 발표되었음

2014) 데이터 전송속도는 9.6kbps로 현 시대의 통신에 비해 현저히 낮은 수준이지만 선박 충돌 방지 및 VTS 업무에 필요한 기본적인 선박의 동적, 정적 정보를 선박 운항 환경에서 방송 또는 지정 송수신 방식 등으로 교환하는 데에는 충분한 정도로 인식되고 있다.

AIS는 자신의 위치와 선박 식별 관련 정보를 VHF를 기반으로 주위에 방송하는 것이 기본이다. 이런 특성으로 AIS는 선박에만 설치되어 활용되는 것이 아니라 선박 및 항공기의 수색 구조용 트랜스폰더, AMRD(Autonomous Maritime Radio Device), 항로표지용 등 해상에서의 안전을 확보하는 다양한 곳에 활용되고 있다. 이는 AIS가 기지국과 같은 육상 인프라에 의존하지 않고 SOTDMA(Self Organized TDMA) 방식으로 주변 AIS와 한정된 채널 자원을 공유하며 자율적으로 통신하는 방식을 갖는 방식 때문에 가능해진다.

유인 선박만 존재하던 선박의 운항 환경에서 무인, 자율운항선박이 등장하고 향후에는 모든 선박이 자동화, 자율화 되는 시대로 변모하는 과정에서 기존 AIS가 수행하던 역할을 어떤 통신 장비, 혹은 기술이 담당할 것인지를 고민할 필요가 있고 이는 자율운항선박, 무인선박의 통신 요구사항으로 귀결된다.

지능화, 자율화 및 무인화된 선박의 운항 환경에서 기존 AIS가 담당하던 기능과 그 이상의 대용량 데이터 및 정보 교환을 위해 새로운 통신 방식과 개념이 필요하고 AIS와 유사하게 중앙 제어국이 없이 선박을 중심으로 하여 주변 선박 및 인프라, 모빌리티 등과의 초고속 대용량 통신을 일컬어 선박 중심 직접통신(M-S2X)이라 하며 구현 가능한 주파수 중에서 GHz 대역의 고주파수 대역을 사용한 것을 MX-S2X라 한다.

이전 논문인 Ryu. et al.(2021)에서 수행한 비면허 대역인 2.4GHz 에서의 M-S2X 구현 가능성(Kang, et al., 2019)을 기반으로 MX-S2X 통신 설계와 해상 다중 경로 페이딩 환경에서의 가용성 검증에 이어 본 논문에서는 설계한 MX-S2X의 물리계층에 대한 하드웨어 구현을 통해 제안하는 통신 방식이 요구한 성능 기준을 상회하는 활용 가능성을 보였다. 2장에서는 설계한 물리계층의 상세를 보이고 3장에서는 구현한 하드웨어의 설계 내역을 설명한다. 4장에서는 설계에 대한 모의실험 결과와 실제 구현한 하드웨어에 채널 시뮬레이터를 인가하여 측정된 결과를 비교하여 5장에서 설계한 물리계층이 활용 가능성을 설명한다.

2. MX-S2X 물리계층 설계

2.1 MX-S2X 요구사항 및 설계 목표

MX-S2X 기술은 2.4GHz 비면허 ISM 대역에서 운항속도 최대 50km/h, 3Mbps 이상의 전송을 및 TDMA 방식으로 동작하는 해상 이동통신을 목표로 개발되고 있다. 2021년 Ryu. et al.(2021)에서 해상 무선통신 환경을 고려한 MX-S2X 설계 요

구사항을 정의하고, 실험 환경을 모델링하여 4-path의 다중경로 페이딩 채널을 정의하였다. 또한, MX-S2X 물리계층에 대한 설계를 수행하고, 모의실험을 수행하였으며 그 결과 MX-S2X 기술의 해상통신 가능성을 확인하였다.

전송하는 데이터의 용도에 따라 전송 슬롯의 길이가 각각 2ms, 20ms로 구분되며 그에 따라 MX-S2X 프레임 길이가 정해진다. 2ms의 경우 1초 500 슬롯을 1 프레임으로 정의하여 초당 500개의 슬롯 전송이 가능하고, 20ms의 경우 1초 50 슬롯을 1 프레임으로 정의하여 초당 50개의 슬롯 전송이 가능하다. 두 가지 슬롯 길이 중 2ms 슬롯은 빈번한 데이터 전송이 필요한 경우 상대적으로 빠르게 동작할 수 있으며, 20ms 슬롯은 영상통화와 같이 비교적 긴 연속 데이터의 전송이 필요한 경우 사용할 수 있다. 본 논문에서는 20ms 슬롯 방식을 기준으로 기술하였다.

2.2 프레임 구조

20ms의 프레임 구조는 데이터 전송 속도 3Mbps 이상, CP 길이 2.5 μ s 이상, 채널 추정 주기 3.8ms 이하 요구사항을 준수하여 설계한다.

이와 같은 요구사항을 만족하는 MX-S2X 프레임의 전송 구조는 Fig. 1과 같다. 하나의 프레임은 Preamble 192 심볼, 66개의 슬롯과 가드 구간으로 구성된다. 하나의 Slot은 Data SC-FDE 심볼 20개와 Pilot SC-FDE 심볼 1개로 구성되며, 각각 CP(Cyclic Prefix) 14 심볼과 FFT용 데이터 64 심볼로 구성된다.

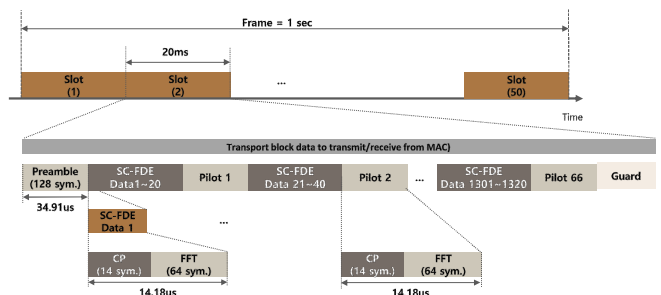


Fig. 1 20ms Slot Structure for MX-S2X

Table 1 20ms Slot parameters with QPSK 1/2 for MX-S2X

Parameter	value
Data rate [Mbps]	5.12
FFT size	64
CP duration [μ s]	2.55
Data SC-FDE duration [μ s]	14.18
Pilot SC-FDE duration [μ s]	14.18
Training sequence duration [μ s]	34.91
Symbol rate [Msps]	5.50
Bandwidth [MHz]	6.435
Guard time [μ s]	285.82

MX-S2X의 데이터 매핑은 QPSK 방식을 사용하며 매핑된 심볼의 심볼률은 5.5Msps 이다. CP 길이는 약 2.545 μ s이며, Pilot을 통한 채널 추정용 간격은 약 0.298ms이다. 그리고 부호율 0.606의 터보코드를 적용하면 사용자 데이터 전송율은 5.12Mbps가 된다. 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

2.3 MX-S2X 송수신 기능

MX-S2X 물리계층의 송수신 기능 블록은 Fig. 2와 같다. MX-S2X의 데이터의 처리는 크게 CRC-24를 사용하고, 부호율 0.606의 LTE-Turbo 코드를 사용하여 채널 부호화를 수행한다. FDE(Frequency Domain Equalizer) 등화기는 FFT를 수행하여 주파수 영역에서 MMSE 방식의 채널 추정 및 보상을 수행하고, 다시 IFFT하여 시간 영역 심볼을 출력하는 기능을 한다.

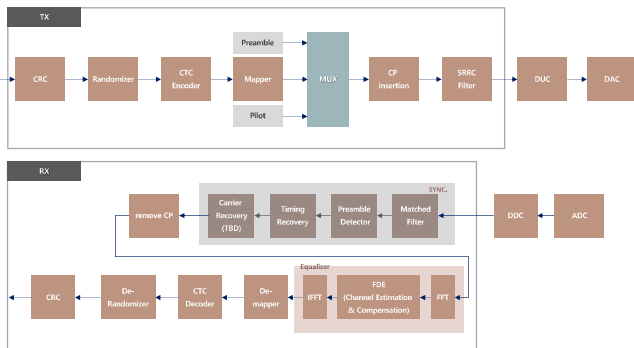


Fig. 2 Tx/Rx baseband block diagram for MX-S2X physical layer(Ryu. et al., 2021)

MX-S2X 기저대역 송신기와 수신기 블록의 주요 특징은 다음과 같이 요약 된다.

(1) 기저대역 송신기

- CRC24 - FEC 블록 단위로 수신한 패킷에 대해 에러 여부를 확인할 수 있도록 CRC 검사결과 추가
- Randomizer - Golden code 형태의 코드를 생성해 난수화 부호를 생성하여 XOR 수행
- 채널 인코더 - 부호율 0.606의 LTE-Turbo 방식의 코드를 통해 채널 인코딩 수행
- Mapper - 비트열을 QPSK 심볼로 변조
- 프레임 생성기 - 전송 규격에 따라 Sub-frame의 최초로 Preamble을 송신하고, 데이터용 SC-FDE 심볼과 채널 추정용 Pilot을 주기적으로 송신
- CP 추가 - 수신기에서 FFT 시 발생할 수 있는 심볼 단위 ISI 현상을 방지하기 위한 용도의 심볼 추가
- SRRC Shaping Filter - Roll-off factor 0.2의 SRRC (Square Root Raised-Cosine) filter를 통해 송신 스펙트럼 및 파형 성형한 신호를 출력

(2) 기저대역 수신기

- Matched Filter - 수신 신호에 대한 대역 외 신호의 제거를 수행하고 심볼 타이밍 기준으로 SNR 비를 향상시킨 신호를 출력
- 동기 - Preamble 검출, 심볼 시점으로 다운 샘플링하는 것에 대한 타이밍 복원, 주파수 오프셋 추적 및 보상 기능 수행
- CP 제거 - FFT할 수 있도록 FFT 크기에 맞춰 추가했던 CP 제거
- FDE(Frequency Domain Equalizer) 등화기 - FFT를 수행하여 주파수 영역에서 MMSE 방식의 채널 추정 및 보상을 수행하고, 다시 IFFT하여 시간 영역 심볼을 출력
- QPSK demapper - QPSK 심볼에 대하여 6비트 연관성 결과를 출력
- 채널 디코더 - LTE-Turbo 방식의 채널 디코딩을 통해 순방향 오류정정 수행
- De-randomizer - 역난수화를 수행하여 데이터를 복원
- CRC24 - FEC 블록 단위로 수신된 패킷에 대한 에러 비트 포함 여부 검사

2.4 모의시험 결과

본 절에서는 20ms 슬롯을 사용한 MX-S2X 물리계층에 대한 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 및 해상 다중경로 페이딩 환경에서의 PER(Packet Error Rate) 성능을 분석하였다. 해상 다중경로 페이딩 채널은 Rician K-factor 14dB, 이동속도 50km/h 및 4-path delay profile을 적용한다. 여기서 이동속도 50km/h는 MX-S2X 운용반경 2kmkm 근거리에서의 저속의 선박 이동속도를 가정한 것으로, 추후 고속의 해양 모빌리티를 고려한 설계 변경이 가능하다.

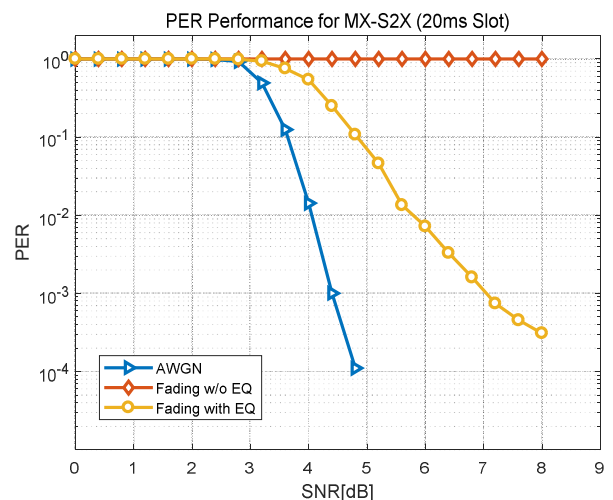


Fig. 3 M&S Result, PER Performance of MX-S2X (20ms Slot)

Fig. 3은 MX-S2X 물리계층의 PER 성능을 모의시험을 통해 확인한 결과이다. AWGN 채널에서는 SNR 4.4dB에서 PER

1×10^{-3} 의 성능을 확인하였다. 해상 다중경로 페이딩 환경에서는 등화기를 적용하지 않으면 PER 1.0에 근접한 수치로 정상적인 통신이 불가능 하다. 하지만, 등화기 적용 후, SNR 7dB에서 PER 1×10^{-3} 의 성능이 확인되었다.

위 결과로부터 해상 다중경로 페이딩 환경에서 등화기를 적용하지 않으면('Fading w/o EQ') 패킷 에러 100%로 통신 불가능한 상태가 되지만 해상 다중경로 페이딩 환경을 고려한 MX-S2X 물리계층의 설계를 통해 이와 같은 채널 환경에서도 AWGN 대비 2.5dB('Fading with EQ') 열화 범위 내에서 동작함을 알 수 있다.

3. MX-S2X 하드웨어 구현 및 제작

MX-S2X 하드웨어는 내부적으로 이더넷 PHY, Xilinx SoC 칩, GPS 모듈, RF Agile Transceiver 및 RF Tx/Rx Filter 모듈로 구성되며, 이와 같은 주요 부품 및 모듈 간 관계는 아래 Fig. 4와 같다.

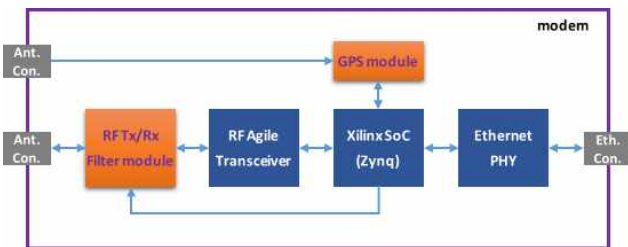


Fig. 4 MX-S2X Terminal Architecture & Functional Structure

이더넷 PHY는 영상 통화용 데이터와 같은 사용자 데이터에 대한 인터페이스를 제공한다. Xilinx SoC(Zynq)는 FPGA 방식으로 구현한 MX-S2X 물리계층의 변/복조 기능이 탑재되며, 또한 TDMA와 같은 전송 프로토콜 및 링크제어 등의 기능이 CPU 방식으로 구현되어 탑재된다. RF Agile Transceiver는 ADC/DAC 및 MX-S2X 기저대역 신호에 대한 2.4GHz ISM 밴드로의 직접 상/하향 변환을 수행하고, RF Tx/Rx Filter 모듈은 송/수신 각각의 경로에 대한 대역필터 기능을 수행한다. 그리고 TDMA 하향 및 상향의 송신 또는 수신 모드의 동작 시점 제어는 GPS 모듈의 1 PPS 신호에 동기된 신호를 RF Tx/Rx Filter 모듈로 전달하여 수행한다.

Table 2 Physical Specification for MX-S2X Terminal

Item	Value	Comments
Size	80.6mm x 81.6mm x 17mm	± 1mm
Weight	200g below	-
Power Consump.	14W below	-

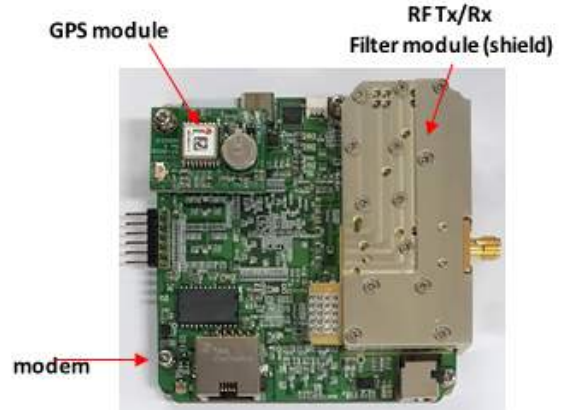


Fig. 5 MX-S2X Hardware

제작된 MX-S2X 하드웨어는 Fig. 5와 같다. 모뎀 하드웨어에 RF Tx/Rx 필터 모듈과 GPS 모듈을 실장하는 형태로 구현하였고 하드웨어 제원은 Table 2에 나타내었다.

4. MX-S2X 하드웨어 시험 및 결과 분석

4.1 시험 환경 구성

채널 시뮬레이터를 활용하여 MX-S2X 하드웨어에 대한 AWGN 및 해상 다중경로 페이딩 채널에서의 PER 시험을 수행하였다. 그리고 2장에서 분석한 모의시험 결과와 비교하여 구현한 MX-S2X 하드웨어 PER 성능을 비교 분석한다.

다음 Fig. 6은 PER 측정을 위한 MX-S2X 하드웨어 시험 구성도이다.

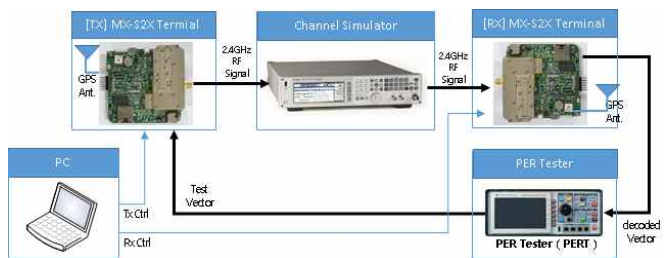


Fig. 6 Testbed diagram for MX-S2X PER test

시험에는 2대의 MX-S2X 하드웨어를 사용하여 독립적으로 송/수신을 수행하도록 시험환경을 구성하고 PC는 각 송/수신 하드웨어 제어에 사용한다. PER은 송/수신 하드웨어 각각을 이더넷으로 PER Tester 장비와 연결하여, 송신 하드웨어에 Test vector를 보내고 수신 하드웨어로부터 decoded vector를 받아 측정 하였다. AWGN 및 다중경로 페이딩 채널 시험은 Channel Simulator를 통해 수행하였다. 송신 전력은 -15 dBm을 기준으로 하며 SNR에 따라 잡음을 부가하여 PER을 측정 하였다. 해상통신용 다중경로 페이딩 채널의 설정은 2장의 모

의시험에서 설정한 것과 동일하게 채널 시뮬레이터에 설정 하였다.

4.2 기능 검증 및 성능 분석 결과

아래 Fig. 7은 잡음 없이 다중경로 페이딩 채널 모델만 적용한 경우, Falconer, et al.(2002)에 따라 주파수 영역 등화기를 사용하여 MX-S2X 하드웨어의 FDE 등화기 입력 심볼과 출력 심볼을 정상도로 도시한 결과이다.

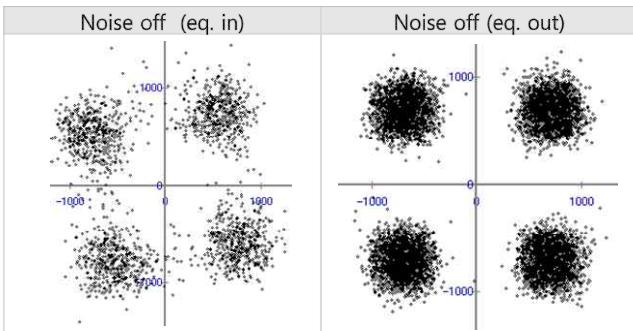


Fig. 7 Constellation of In/Out of FDE Equalization of MX-S2X Terminal in Multipath environment

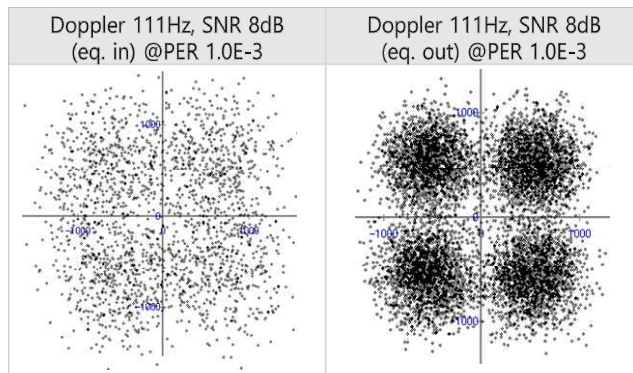


Fig. 8 Constellation of In/Out of FDE Equalization of MX-S2X Terminal in AWGN & Multipath environment

그에 반해 Fig. 8은 잡음이 존재하고 다중경로 페이딩 채널 모델이 적용된 환경에서 FDE 등화기 입력 심볼과 출력 심볼을 정상도로 도시한 결과이다. Fig. 7과 8의 정상도 QPSK 정상점 확인을 통해 MX-S2X 단말기의 동기 및 FDE 등화기가 적절하게 구현되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 9의 그래프는 MX-S2X 하드웨어에 대한 AWGN 및 해상 다중경로 페이딩 환경에서의 PER 성능을 분석한 결과이다. 편의상 MX-S2X 하드웨어 시험 결과에 대해 'HW'로, 모의시험 결과에 대해 'M&S'로 표기하여 도시하였다.

MX-S2X 하드웨어의 PER 성능을 분석한 결과, PER 1×10^{-3} 에 도달하기 위한 SNR은 AWGN 채널에서 약 4.6dB로 확인되었다. 다중 경로 페이딩 환경에서는 모의시험 결과와 마찬가지로 등화기를 적용하지 않으면 PER 1.0의 Error-floor

가 확인되었고, 등화기를 적용하면 SNR 8.2dB로 확인되었다.

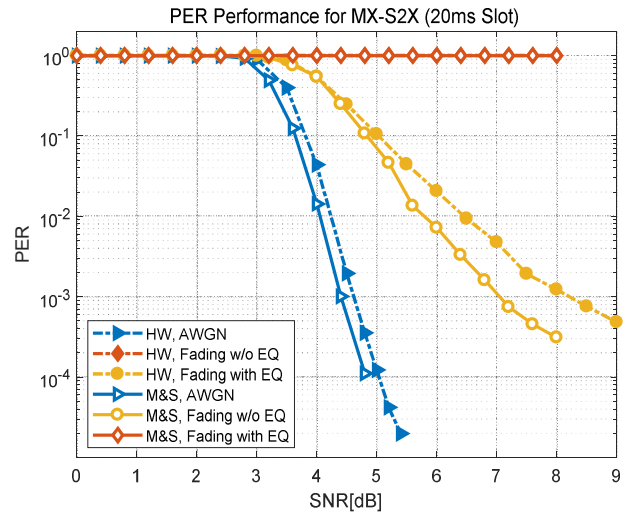


Fig. 9 PER Performance of MX-S2X Terminal in Multipath environment

모의시험 결과 대비 MX-S2X 하드웨어의 PER 성능은 AWGN 환경에서는 0.2dB, 해상통신 환경에서는 1.2dB의 성능 열화를 보였다. 이와 같은 성능 열화 수치는 시험 오차, 케이블 손실 등에 의한 것으로 하드웨어 제작 시 정의한 구현 마진 2dB 내의 값을 만족하여, 설계한 MX-S2X 하드웨어가 양호하게 구현되었음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

고 주파수 기반으로 광대역 통신기술을 활용하는 MX-S2X는 해상에서 발생하는 해수면에 의한 다중경로 페이딩 영향을 최소화하기 위한 물리계층 설계가 필요하다. 이전 연구에서 해상 무선통신 환경에서 존재하는 다중경로 페이딩의 영향을 확인하고 이를 극복하기 위한 물리계층 설계 및 모의시험을 수행하였다.

본 논문에서는 이를 토대로 MX-S2X에 대한 상세설계를 확정하고 이를 하드웨어로 구현/제작하여 성능분석을 수행하였다. 제작한 하드웨어의 성능 검증을 위해 시험환경을 구성하고 PER을 측정하여 M&S 결과와 비교한 결과, MX-S2X 하드웨어의 PER 성능은 M&S 결과 대비 AWGN 환경에서는 0.2dB, 해상 다중경로 페이딩 환경에서는 1.2dB의 성능 열화를 보이는 것으로 확인하였다. 이와 같은 성능 열화는 시험 오차, 케이블 손실 등을 포괄하는 구현 마진 2dB 내의 수치이며 이를 통해 MX-S2X 물리계층의 설계와 구현한 하드웨어가 적절한 성능 수준을 갖는 것으로 판단할 수 있다.

앞으로, 비면허대역과 같은 고 주파수 기반 광대역 통신기술을 사용하는 MX-S2X 하드웨어를 탑재한 해양 모빌리티가

주변의 객체(선박, 해양 모빌리티, 해양 시설 등)와 직접 통신할 수 있게 된다면 MX-S2X는 향후 도래할 해상통신 기술 인프라로서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 논문은 해양수산부 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행하는 “초고속해상무선통신망 무선설비 다각화 및 통신연계 기술개발 연구”(1525011565)의 일부 내용임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- [1] Falconer, David. et al.(2002) "Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems." IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, pp. 58-66.
- [2] ITU(2014), "Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band", Recommendation ITU-R M.1371-5.
- [3] ITU(2022), "Technical characteristics for a VHF data exchange system in the VHF maritime mobile band", Recommendation ITU-R M.2092-1(02/2022)
- [4] Kang, W. S. and Park, Y. S.(2019), "A basic study on the application of wireless communication technology in vehicular environment(V2X) for maritime autonomous surface ships" Korean Association of Maritime Police Science, Vol. 9, No. 2, pp. 267-288.
- [5] K. Yang. et al.(2010) "Land-to-ship radio channel measurements over sea at 2 GHz." 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM). IEEE, 2010.
- [6] Ryu, H. J., Yoo, H. S., Kim, W. Y., Kim, B. Y. and Shim, W. S.(2021), "Design of physical layer and performance analysis for MX-S2X, ship centric direct communication with the mitigation of multi-path fading on sea environment", Vol. 45, No. 6, J. Navig. Prot Res., pp. 352-359.
- [7] Yuan, Yang. et al.(2007) "Frequency-domain equalization in single-carrier transmission: Filter bank approach." EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2007, pp. 1-16.

Received 30 November 2022

Revised 15 December 2022

Accepted 26 December 2022