



Received: 2024/11/23
Revised: 2024/11/28
Accepted: 2024/12/17
Published: 2024/12/31

***Corresponding Author:**

Jaeryong Hwang

Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5350
E-mail: jhwang@navy.ac.kr

metalWave 기술을 이용한 함정 내 무선통신 성능 향상

Enhancing Wireless Communication Performance on Vessels Using Metal-Wave Technology

한민석¹, 이동호², 박태용³, 손민수⁴, 진경식⁵, 황재룡^{6*}

¹해군사관학교 전자제어공학과 부교수

²해군사관학교 사이버과학과 교관

³국립목포대학교 해군사관학부 부교수

⁴해군 중령/합동군사대학교 합동전력교관

⁵해군 대령/해군본부 정보보호기획참모부

⁶해군사관학교 사이버과학과 교수

Min-Seok Han¹, Dongho Lee², Tae-Yong Park³, Min-Su Son⁴, Kyongsik Jin⁵,
Jaeryong Hwang^{6*}

¹Associate professor, Dept. of Electronics and Control Engineering,
Republic of Korea Naval Academy

²Instructor, Dept. of Cyber Science, Republic of Korea Naval Academy

³Associate professor, Division of Naval Officer Science, Mokpo National
Maritime University

⁴CDR, ROK Navy/Instructor, Joint Force Development Study,
Joint Forces Military University

⁵CAPT/Office of DCNO for Information Planning, ROK Navy HQ

⁶Professor, Dept. of Cyber Science, Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

함정 내 무선통신은 승조원들의 안전과 효율적인 업무 수행을 위해 필수적이다. 그러나 금속 구조물로 둘러싸인 함정 환경의 특성상 통신 신호가 금속에 흡수되거나 반사되어 통신이 어려워지는 등 여러 가지 도전과제가 존재한다. 특히 밀폐된 공간이나 격벽으로 분리된 구역에서는 신호가 차단되어 일반적인 무선통신 방식으로는 원활한 통신을 기대하기 어렵다. 이로 인해 함정 내 무선통신 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다.

기존 연구들은 metalWave 기술의 전파 특성과 이를 활용한 통신 시스템의 가능성에 대해 다루어왔다. Huang et al.(2017)은 금속 구조물 내 전파 특성을 분석하여 metalwave 기술의 기초를 마

Abstract

본 연구는 metalWave 기술을 적용한 metalVox 시스템과 기존 워키토키 시스템의 함정 내 무선통신 성능을 비교하였다. 실제 함정 환경에서 테스트한 결과, metalVox는 기존 워키토키 대비 평균 15dB 높은 신호 강도를 보였으며, 3개 층 이상 떨어진 격실 간 통신에서도 안정적인 성능을 유지했다. 특히 수밀문이 닫힌 상태에서 metalVox는 -45 dBm의 평균 신호 감쇠를 기록해 워키토키의 -60 dBm보다 우수했다. Extender 사용 시 metalVox의 수신감도는 추가로 10 dB 개선되었으며, 소자장치 가동 시에도 통신 품질 저하가 미미했다. 본 연구는 metalWave 기술의 함정 내 무선통신 성능 향상 효과를 실증적으로 입증하였다.

This study compared the in-ship wireless communication performance of the metalVox system using metalWave technology with conventional walkie-talkie systems. Tests conducted in an actual ship environment showed that metalVox achieved an average signal strength 15 dB higher than conventional walkie-talkies and maintained stable performance across compartments separated by three or more decks. Notably, with watertight doors closed, metalVox recorded an average signal attenuation of -45 dBm, outperforming the walkie-talkie's -60 dBm. Using an extender further improved metalVox's reception sensitivity by 10 dB, and communication quality remained consistent even during equipment operation. This study empirically demonstrates the effectiveness of metalWave technology in enhancing in-ship wireless communication performance.

Keywords

금속파 기술(metalWave Technology),
메탈박스 시스템(metalVox System),
함내 무선통신(Intra-Ship Wireless Communication),
신호 강도(Signal Strength),
통신 신뢰성(Communication Reliability)

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 해군본부 전평단 과제를 통해 지엔테크놀로지의 metalVox 성능 평가 지원을 받아 수행된 논문임.

련하였으나, 실제 선박 환경에서의 적용 가능성에 대한 실험적 검증이 부족했다[1].

Yoon et al.(2019)은 metalWave 기술을 선박 내 무선통신에 적용하였으나, 주파수 대역에 따른 성능 차이에 대한 심층적인 분석이 미흡했다[2]. 또한 Zhang et al.(2020)은 다중 경로 전파의 특성을 조사하였지만, 선박 내 환경의 복잡성으로 인해 연구 결과의 일반화가 어려운 한계가 있었다[3]. Lee et al.(2021)은 metalWave 기반의 새로운 통신 프로토콜을 제안하였으나, 실제 선박 환경에서의 성능 검증이 부족하여 이론적 접근에 한정되었다[4]. Kim et al.(2022)은 전파 손실 모델을 개발하였으나, 다양한 환경적 요인에 대한 고려가 미흡하여 실제 적용에는 제약이 있었다[5]. 마지막으로 Chen et al.(2023)은 metalWave 기술의 상용화를 위한 경제적 분석을 수행했지만, 기술적 성능 향상에 대한 구체적인 사례가 부족하여 실질적인 기여가 제한적이다[6].

이러한 기존 연구들은 각각의 통신 방식에서 일정한 성과를 보였으나, 함정 내부의 복잡한 금속 구조물 환경에서 안정적인 무선통신을 제공하는 데는 한계가 있었다. 특히, 통신 신호의 감쇠, 장애물로 인한 신호 차단, 전자기 간섭 등에 의한 성능 저하가 주요한 문제로 지적되었다. 따라서 함정 내 무선통신의 근본적인 문제를 해결하기 위해서는 새로운 방식의 통신 기술이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 metalWave 기술을 기반으로 한 새로운 무선통신 시스템인 metalVox를 제안한다. metalVox는 함정의 금속 구조 자체를 통신 매체로 활용하여, 기존 무선통신의 신호 감쇠 및 차단 문제를 해결한다. 이 시스템은 000 MHz를 사용하여 금속 구조물을 통과하는 통신을 구현하며, 기존 워크토키 시스템에 비해 우수한 신호 강도와 통신 품질을 제공한다.

따라서 본 논문은 metalVox 시스템의 설계, 구현 및 성능 평가를 중점적으로 다루며, 함정 내 무선통신의 현황과 문제점을 분석한다. 이어서 metalWave 기술의 원리와 특징을 설명하고, metalVox 시스템의 하드웨어 구성과 안테나 설계에 대해 자세히 기술한다. 또한, 실제 함정 환경에서 수행한 성능 테스트 결과를 바탕으로 기존 통신 시스템과의 비교 분석을 통해 metalVox의 우수성을 입증한다. 마지막으로, 본 기술의 실용화 가능성과 향후 연구 방향에 대

해 논의하며, 이 연구가 함정 내 무선통신의 사각지대를 해소하고, 통신 품질을 크게 개선함으로써 선원들의 안전과 업무 효율성을 향상시킬 수 있음을 기대한다. 나아가, 시스템 단순화를 통한 탄소 저감 효과도 기대할 수 있어, 친환경 함정기술 발전에도 기여할 것이다.

2. 이론적 배경 및 방법론

2.1 연구 배경

함정 내 무선통신은 승조원들의 안전과 업무 효율성을 보장하는 데 필수적이다. 그러나 현재 사용되고 있는 VHF 라디오, 위성통신, Wi-Fi 등의 통신 방식은 함정의 금속 구조로 인해 여러 가지 한계점에 직면하고 있다. 금속 구조물은 전파의 투과를 어렵게 하여, 특히 격벽으로 분리된 구역이나 밀폐된 공간에서는 신호 감쇠가 발생해 통신이 불가능한 경우가 많다. 이러한 통신 음영 지역은 승조원들의 안전과 업무 효율성에 심각한 영향을 미친다.

기존 무선통신 시스템은 신뢰성이 높지만, 설치와 유지보수에 소요되는 비용과 시간이 상당하다. 대형 함정에서는 광범위한 케이블 설치가 필요해 비용 부담이 크고, 유지보수의 복잡성도 높다. 또한, 무선통신은 해킹이나 통신 방해에 취약하여 사이버 보안 문제가 대두되고 있다. 해상 통신 시스템은 대역폭이 제한적이어서 대용량 데이터 전송이나 실시간 통신에 제약이 따른다. 따라서, 이러한 문제를 해결할 수 있는 새로운 무선통신 기술이 필요하다.

2.2 함정 내 무선통신의 문제점 분석

무선통신의 핵심 문제 중 하나는 신호 감쇠로, 금속 구조물이 신호를 반사하거나 흡수하면서 발생한다. 신호 감쇠는 주파수와 금속 재질, 두께에 따라 달라지며, 감쇠 정도는 식 (1)을 통해 표현할 수 있다.

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) + \alpha \cdot d \quad (1)$$

여기서, L 은 신호 감쇠(dB), d 는 거리(m), λ 는 전파의 파장(m), 그리고 α 는 금속 구조물에 의한 감쇠계수이다.

이 방정식에서 주파수가 높을수록(파장이 짧을수록) 감쇠가 커지기 때문에, 고주파 대역을 사용하는 무선통신은 금속 환경에서 더 큰 어려움을 겪게 된다. 특히, VHF 라디오나 Wi-Fi는 상대적으로 높은 주파수를 사용하므로, 함정의 금속 구조물 사이를 통과하기가 매우 어렵다.

2.3 metalWave 기술의 원리와 특징

앞에서 서술한 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 metalWave 기술을 적용한 무선통신 시스템인 metalVox를 제안한다. Table 1에서 제시한 metalWave를 활용해 함정의 금속 구조물 자체를 전파 경로로 활용하는 혁신적인 방식이다. metalWave 기술은 다음과 같은 수학적 모델로 설명될 수 있다. 먼저 metalVox가 금속 물질에 직접 전파를 발사하여 전자기적으로 결합한다. 이 과정은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

Table 1. Characteristics of metalWave

Property	Description
Propagation speed	Approaching the speed of light
Attenuation rate	Lower than typical wireless communication
Penetration	High penetration within metal structures
Frequency range	Primarily used at 1-○○○ MHz (can be adjusted according to the environment)
Polarization	Strong vertical polarization

$$P_{coupled} = \eta \cdot P_{transmitted} \quad (2)$$

여기서, $P_{coupled}$ 는 결합한 전력, $P_{transmitted}$ 는 전송된 전력, η 는 결합 효율 ($0 < \eta < 1$)이다.

다음으로 전자기적 결합으로 인해 금속 표면에 표면파가 생성된다. 이 표면파는 식 (3)과 같이 설명될 수 있다.

$$E(z) = E_0 e^{\alpha z} e^{-j\beta z} \quad (3)$$

여기서, $E(z)$ 는 금속 구조물 내부에서 전파되는 전기장의 세기, E_0 는 초기 전기장의 세기, α 는 금속 구조물에서의 신호감쇠계수, β 는 위상변화상수이다.

metalWave 기술은 금속체에 반사된 전파에서 발생하는 자기장을 금속 물질의 표면으로 흐르게 만들어 통신을 가능하게 한다. 금속 표면에서의 자기장 강도는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$H = \frac{1}{\eta_0} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} E \quad (4)$$

여기서, H 는 자기장 강도, E 는 전기장의 강도, η_0 는 자유공간의 특성 임피던스, μ_r 은 상대투자율, ϵ_r 은 상대 유전율을 나타낸다.

metalWave 기술은 전자기파가 금속 구조물 내부를 통과할 때 감쇠와 위상 변화가 최소화되도록 설계되어 함정 내 통신에 적합하다.

전자파는 식 (5)에 의해 전파 속도가 결정된다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

여기서, v 는 전파 속도, c 는 빛의 속도, ϵ_r 은 금속의 유전율이다.

metalWave 기술은 상대적으로 낮은 주파수를 활용하여 신호가 금속 구조를 더 잘 통과할 수 있도록 하며, 금속을 전파 매체로 사용해 신호 감쇠를 줄이고 통신 범위를 확장한다. 이는 기존의 무선통신이 금속 구조물에서 겪는 문제를 효과적으로 해결하는 방법이다.

2.4 metalVox 시스템 설계와 구현

metalVox 시스템은 metalWave 기술을 기반으로 함정 내부에서의 통신 음영 문제를 해결하고 통신 신뢰성을 높이기 위해 설계되었다. metalVox는 금속 구조물을 통해 신호를 전달하며, 기존 유선통신 대비 설치가 용이하고 유지보수가 간편하다. 신호 강도는 기존 위키토키 대비 평균 15 dB 이상 높고, 서로 3개 층 이상 떨어진 격실 환경에서도 안정적인 통신을 제공한다.

metalVox 시스템은 안테나 설계에서도 혁신을 도입하였다. 안테나는 함정의 금속 구조물과 공진 주파수를 맞추어 신호가 최대한 효율적으로 전달되도록

록 설계되었다. 이를 통해 안테나의 크기와 설치 위치와 관계없이 일관된 성능을 제공할 수 있다. 또한, metalVox 시스템은 Extender 모듈을 통해 수신 감도를 10 dB 추가로 개선할 수 있다. 이는 함정 내 넓은 범위에서 안정적인 통신을 구현하며, 다양한 전자 장비들이 가동되는 상황에서도 통신 품질이 저하되지 않도록 한다.

2.5 연구방법론

본 연구는 metalWave 기술의 원리를 바탕으로 metalVox 시스템을 설계하고, 실제 함정 환경에서의 성능을 평가하여 그 효과성을 검증하고자 한다. 연구 방법은 다음과 같다.

- 실험 환경 설정: 대형 함정 내부의 다양한 구역에서 metalVox 시스템을 설치하고, 기존의 통신 시스템과 비교하여 성능을 평가한다.
- 신호 강도 측정: 함정 내 다양한 위치에서 신호 강도(dBm)를 측정하고, 통신 범위를 비교 분석한다.
- 통신 품질 분석: 패킷 손실률, 통신 안정성, 전자기 간섭 저항성 등을 평가하여 통신 품질을 분석한다.
- 에너지 효율성 평가: metalVox 시스템의 전력 소비를 기존 시스템과 비교하여 에너지 효율성을 분석한다.

이 연구를 통해 metalWave 기술을 기반으로 한 metalVox 시스템이 함정 내 통신 음영 문제를 해결하고, 승조원들의 안전과 업무 효율성 향상에 기여할 수 있음을 확인할 것이다.

3. 시스템 설계 및 모델링

3.1 metalVox 시스템의 하드웨어 구성

metalVox 시스템은 함정의 금속 구조를 통신 매체로 활용하는 혁신적인 무선통신 시스템이다. 이 시스템은 함정 내의 다양한 통신 음영 구역에서 원활한 통신을 가능하게 하며, 주요 하드웨어 구성 요소는 다음과 같다.

3.1.1 안테나

metalVox의 ○○○ MHz에서 작동하는 특수 설계된 안테나이다. 이 안테나는 금속 구조물을 통해 신호를 전달하는 역할을 하며, 시스템의 통신 성능을 크게 좌우한다.

3.1.2 송수신기

음성신호를 수신 및 송신하는 전용 모듈로, 금속 구조물을 경로로 한 통신이 원활하게 이루어지도록 설계되었다.

3.1.3 제어 유닛

metalVox 시스템의 전반적인 작동을 관리하는 마이크로컨트롤러로, 통신 경로의 설정, 신호 처리, 시스템 상태 모니터링 등을 담당한다.

3.1.4 전원 공급 장치

시스템의 안정적인 작동을 보장하기 위해 일관된 전원을 제공하는 장치로, 해양 환경에서도 신뢰성 있는 운영을 지원한다.

3.1.5 사용자 인터페이스

음성 입출력 장치 및 통신 상태를 제어하기 위한 사용자 인터페이스로, 함정 내에서 편리한 무선통신을 가능하게 한다.

3.2 metalVox 안테나 설계

metalVox 시스템의 안테나는 통신 성능을 극대화하기 위해 함정의 금속 구조에 최적화되어 있다. 이 안테나는 신호를 송수신하며, 금속 구조를 통해 신호를 전달하는 특징을 가진다. metalVox 안테나는 여러 설계적 요소들이 조화를 이루어 함정 내부 통신을 극대화한다.

3.2.1 안테나 구조

metalVox 안테나는 세 가지 주요 레이어로 구성된다.

- 패턴 레이어: 동판으로 제작된 평면 구조로, 금속판에 슬릿이 형성되어 있다. 이 슬릿들은 신호 전달 효율을 극대화하는 데 중요한 역할을 하며, 안테나의 공진 주파수와 통신 대역폭에 영향을 미친다.
- 그라운드 레이어: 패턴 레이어와 평행하게 배치된 금속판으로, 금속 구조물과 전파를 상호 작용하게 하여 신호 전송 효율을 높인다.
- 유전체 레이어: 패턴 레이어와 그라운드 레이어 사이에 위치하여 신호 전파 시 안정성을 제공하며, 금속 구조와의 전파 간섭을 줄이는 역할을 한다.

3.2.2 슬릿 설계 및 크기

안테나의 슬릿 설계는 metalVox 시스템에서 매우 중요한 요소이다. 슬릿은 신호 전송 경로를 확보하고 공진 주파수를 조정하는 데 결정적인 역할을 한다.

- 슬릿 개구부: 적어도 두 개 이상의 이웃한 슬릿이 서로 다른 면에 형성되어 있으며, 슬릿 사이의 간격은 신호 전달의 효율성을 높이고 공진 주파수에 직접적인 영향을 미친다.
- 크기 및 치수: 안테나의 전체 높이(H)는 공진 주파수와 대역폭에 영향을 주며, 급전 위치(F)는 50Ω 의 임피던스 매칭을 가능하게 하여 통신 품질을 높인다. 슬릿 간격(W)은 공진 주파수를 미세 조정할 수 있는 중요한 변수이다.

3.2.3 재질 및 부착 방식

metalVox 안테나는 두께 0.5 mm 의 동판을 사용하여 제작되며, 안테나와 금속 구조물 사이의 적정 간격을 유지하기 위해 PC 재질의 기구를 사용한다. 이를 통해 금속 벽면과의 간섭을 줄이고, 안정적인 통신 품질을 확보할 수 있다. 또한, 설계 단계에서 컴팩트한 크기와 구조를 채택하여 함정 내 다양한 위치에 설치가 용이하도록 설계되었다.

3.3 안테나 설계 시 주요 고려사항

metalVox 시스템의 안테나 설계는 몇 가지 중요한

요소를 고려하여 최적화되었다.

- 공진 주파수 조정: 안테나의 높이(H)를 조절하여 목표 주파수인 $○○○ \text{ MHz}$ 에 맞추었으며, 슬릿의 간격(W)을 조정하여 공진 주파수를 미세하게 튜닝하였다.
- 임피던스 매칭: 급전 위치(F)를 조정하여 50Ω 임피던스 매칭을 실현하였으며, 스미스 차트를 활용하여 최적의 위치를 선정하였다. 이를 통해 금속 구조물에서 발생하는 신호 반사를 최소화하고, 안정적인 신호 전달을 구현하였다.
- 대역폭 확보: 다중 슬릿 구조를 통해 충분한 대역폭을 확보하였다. 이로 인해 다양한 주파수 대역에서도 안정적인 통신이 가능하며, 금속 구조물로 인한 신호 감쇠를 최소화할 수 있다.
- 금속 환경 대응: 함정의 금속 구조를 고려한 안테나 성능을 최적화하였다. 금속 벽면과의 이격 거리를 조정함으로써 통신 성능 저하를 방지하였고, 다양한 해양 환경에 견딜 수 있도록 견고하게 설계되었다.
- 소형화 및 견고성: 함정 내 제한된 공간에 설치할 수 있도록 안테나를 소형화하였으며, 해양 환경에서 요구되는 내구성을 갖춘 견고한 구조로 설계되었다.

3.4 안테나 성능 검증

안테나 설계 후, 성능을 검증하기 위한 일련의 테스트와 시뮬레이션을 진행하였다.

3.4.1 EM 시뮬레이션

안테나 설계 단계에서 전자기파(EM) 시뮬레이션을 사용하여 성능을 예측하고 최적화하였다. 이를 통해 안테나가 금속 구조물에서 발생하는 전자기 간섭에 어떻게 반응하는지 분석하였으며, 다양한 환경에서의 성능을 미리 평가하였다.

3.4.2 실제 함정 환경에서의 테스트

EM 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 함정 환경에서 성능을 검증하였다. 함정 내부의 다양한 구조

적 환경에서 통신 품질을 평가하였으며, 신호 강도, 통신 범위, 신호 감쇠 등을 측정하였다. 특히 수밀문이 닫힌 상태에서 metalVox 시스템은 안정적인 통신 성능을 유지하였다.

3.4.3 성능 지표

- 신호 강도: 기존 위키토키 대비 평균 15 dB 높은 신호 강도를 기록하였다.
- 통신 범위: 3개 층 이상 떨어진 격실 환경에서도 안정적인 통신이 가능함을 확인하였다.
- 신호 감쇠: 수밀문이 닫힌 상태에서 측정된 평균 감쇠는 -45 dBm로, 이는 기존 무선통신 시스템과 비교하여 현저히 낮은 수준이다.

결론적으로, metalVox 시스템의 안테나 설계는 함정 내 특수한 금속 환경에 맞춰 최적화되었으며, 이를 통해 통신 성능이 크게 향상되었다. 금속 구조를 통신 매체로 활용하는 혁신적인 설계를 통해 함정 내 통신 음영 구역 문제를 해결하고, 함정 운영의 안전성과 효율성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 실험 결과 및 분석

본 장에서는 실제 함정 환경에서 metalVox 시스템의 성능을 평가하고, 기존 통신 시스템과의 비교 분

석을 통해 그 우수성을 입증하고자 한다. 성능 테스트는 대형 함정에서 다양한 환경 조건 및 위치에서 수행되었으며, 신호 강도, 통신 품질, 전자기 간섭 저항성, 에너지 효율성, 설치 및 유지보수 효율성 등의 주요 성능 지표가 분석되었다.

4.1 신호 강도 및 통신 범위

metalVox 시스템의 신호 강도는 기존 위키토키 대비 전반적으로 우수한 결과를 보였다. 실제 함정 환경에서 수행한 테스트에 따르면, metalVox는 평균적으로 기존 위키토키보다 15 dB 높은 신호 강도를 기록하였다. 이는 metalWave 기술을 활용하여 함정의 금속 구조물을 통해 통신 성능을 향상시킨 결과로 해석된다.

함수 metalVox(2nd deck)에서 전부 격실 통신 신호 세기를 측정된 결과, 전 구역에서 통신 가능한 수신 레벨로 측정되어 수신감도가 양호한 것으로 나타났다. 소자 장치 작동에 의한 통신 영향은 미비했으며, 대부분의 위치에서 소자 장치 작동 전후의 신호 차이가 크지 않았다. 일부 위치에서는 소자 장치 작동 시 오히려 신호가 개선되는 경우도 있었다.

함미 metalVox(2nd deck)에서 후부 격실 통신 신호 세기를 측정된 결과, 대부분의 구역에서 통신 가능한 수신 레벨로 측정되어 전 구역 수신

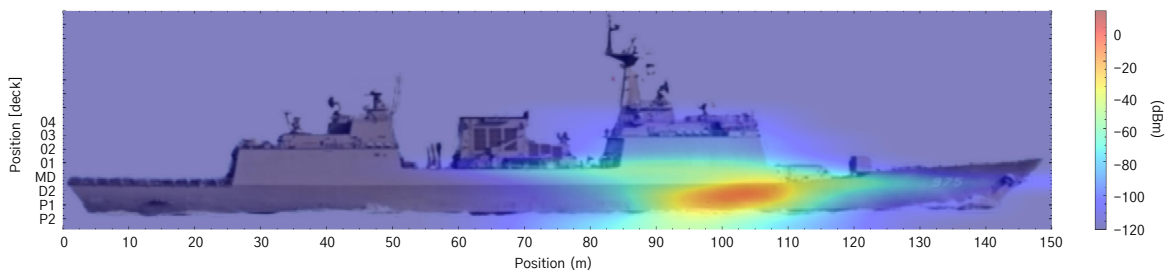


Fig. 1. Communication signal strength (bow at the front of the ship)

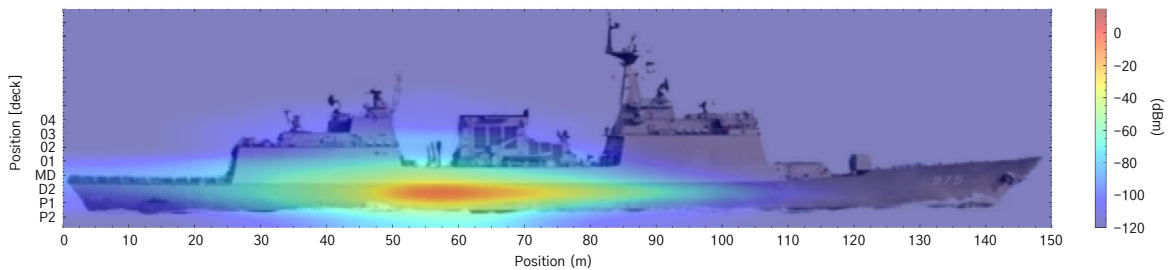


Fig. 2. Communication signal strength (stern at the rear of the ship)

감도가 양호한 것을 확인하였다. 가스터빈실, 감속기 어실, 디젤기관실, 후부보기실, 제2배전반실 등에서 양호한 신호 강도가 측정되었다. 다만, 제2공기조화기실과 후타실에서는 신호가 약하거나 없는 것으로 나타났으며, 특히 후타실 제일 안쪽에서는 신호가 없었다.

개방된 갑판에서는 metalVox가 -35 dBm의 신호 강도를 기록하였으며, 엔진룸에서는 -45 dBm, 화물창에서는 -50 dBm의 신호 강도를 보였다. 같은 환경에서 위키토키는 훨씬 더 낮은 신호 강도를 기록하였으며, 특히 화물창에서는 통신이 거의 불가능한 상태로 나타났다.

통신 범위에 있어 metalVox는 5개 층 이상 떨어진 격실 환경에서도 안정적인 통신을 유지하였다. 반면, 위키토키는 2개 층을 초과하면 통신 품질이 급격히 저하되었고, 통신이 완전히 끊기는 경우도 빈번하였다. 이는 metalVox 시스템이 대형 함정 내 여러 층에 걸친 통신 음영 지역을 해소할 수 있음을 보여준다.

metalVox 대 metalVox 및 위키토키 대 위키토키 간 신호감쇠를 측정한 결과 전반적으로 metalVox가 위키토키보다 더 나은 신호 강도를 유지하는 것으로 나타났다. 특히 거리가 멀어질수록 두 시스템 간의 성능 차이가 더 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있었다.

주파수 영향을 비교하기 위해 함미에서 양묘기실 방향으로 이동하며 위키토키 간 신호 감쇠도 측정하였다. 거리가 멀어질수록 신호 강도가 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 통로 ○○-○○-○(○-○○-○-L) 문 뒤부터는 신호 강도가 급격히 떨어져 -109.96 dBm 이하로 측정되었으며, 양묘기실 근처에서는 신호가 완전히 없어졌다.

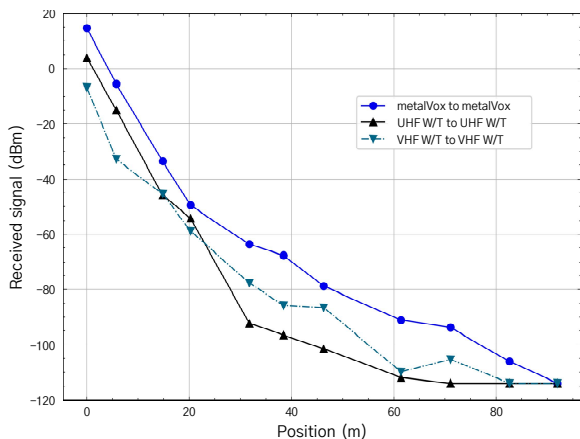


Fig. 3. Communication signal attenuation comparison

4.2 통신 품질 및 안정성

통신 품질과 안정성 측면에서도 metalVox는 우수한 성능을 발휘하였다. 함정 내 통신 음영 지역에서 metalVox는 평균 -45 dBm의 신호 감쇠를 기록했으며, 패킷 손실률은 2 % 미만으로 나타났다. 이는 위키토키의 평균 -60 dBm 신호 감쇠 및 30 %에 달하는 패킷 손실률에 비해 현저히 개선된 수치이다.

metalVox는 수밀문이 닫힌 상태에서도 안정적인 통신 성능을 유지하였으며, 특히 데이터 전송 시 패킷 손실이 거의 발생하지 않아 함정 내 중요한 통신에서 신뢰성 높은 시스템을 입증하였다.

4.3 전자기 간섭 저항성

metalVox 시스템은 함정 내 전자기 간섭에 대한 저항성도 뛰어났다. 다양한 전자 장비가 가동 중인 환경에서도 metalVox의 신호 강도는 변동 폭이 1 dB 미만으로 유지되었다. 특히, 레이더나 소자 장치 등의 주요 전자 장비가 작동 중인 상황에서도 안정적인 통신 품질을 보였다. 반면, 위키토키는 레이더 가동 시 신호 강도가 5 dB 감소하고, 소자 장치 작동 시에도 3 dB 정도의 변화를 보였다. 이는 metalVox 시스템이 기존 무선통신 장비에 비해 함정 내 전자기 간섭에 훨씬 더 강한 저항성을 가지고 있음을 시사한다.

4.4 확장성 및 성능 개선

metalVox 시스템은 extender 장치를 사용하여 통신 성능을 추가로 개선할 수 있었다. Extender 사용 시 metalVox의 수신 감도는 평균 10 dB 이상 향상되었으며, 이를 통해 더 넓은 범위에서 통신이 가능해졌다. 특히, 대형 함정이나 통신이 어려운 구역에서 이러한 성능 개선은 큰 장점으로 작용할 수 있다. 확장성 측면에서 metalVox는 추가 장비를 통해 성능을 보완할 수 있는 유연한 시스템 구조를 가지고 있으며, 이는 함정의 크기나 통신 요구에 따라 다양한 방식으로 적용될 수 있음을 보여준다.

4.5 에너지 효율성

metalVox 시스템은 에너지 효율성 면에서도 기존

위키토키 대비 뛰어난 성능을 발휘하였다. 24시간 연속 사용 시 metalVox는 평균 0.8 W/h의 전력을 소비한 반면, 위키토키는 1.2 W/h의 전력을 소비하였다. 이는 metalVox가 기존 시스템에 비해 30 % 낮은 전력 소비를 보였으며, 장시간 운영 시에도 전력 소모가 적어 효율적임을 의미한다. 에너지 효율성의 개선은 대형 함정에서 통신 장비를 장시간 운영할 때 비용 절감과 더불어 친환경적인 함정 운영에도 기여할 수 있다.

4.6 종합 분석

본 연구에서 실제 함정 환경에서 진행한 성능 테스트 결과, metalVox 시스템은 기존 통신 시스템 대비 다음과 같은 주요 우수성을 입증하였다.

- 높은 신호 강도와 넓은 통신 범위: metalVox는 함정 내 금속 구조물을 효과적으로 활용하여 기존 위키토키 대비 우수한 신호 강도와 통신 범위를 제공하였다.
- 안정적인 통신 품질과 낮은 패킷 손실률: metalVox는 함정 내부의 복잡한 금속 구조 환경에서도 안정적인 통신 품질을 유지하였으며, 패킷 손실률이 낮아 중요한 데이터 전송에 적합하다.
- 전자기 간섭 저항성: 다양한 전자 장비가 가동 중인 환경에서도 metalVox는 높은 전자기 간섭 저항성을 보여, 통신 품질이 쉽게 저하되지 않았다.
- 확장성과 성능 개선 가능성: Extender 장치를 통해 통신 성능을 추가로 개선할 수 있어, 대형 함정에서도 확장 가능한 통신 솔루션을 제공한다.
- 에너지 효율성: metalVox는 기존 위키토키보다 30 % 더 낮은 전력 소비로 장시간 운용 시에도 비용 절감과 환경 보호에 기여할 수 있다.

결론적으로, metalVox 시스템은 함정 내 통신 문제를 효과적으로 해결하며, 승조원들의 안전과 업무 효율성을 크게 향상시킬 수 있음을 본 연구를 통해 확인하였다. 이 시스템은 또한 탄소 배출량을 줄이는데 기여할 수 있어, 친환경 함정 기술의 발전에도 중

요한 역할을 할 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서 개발한 metalVox 시스템은 함정 내 무선통신의 혁신적인 해결책으로서 높은 실용화 가능성을 보여주었다. 실제 함정 환경에서 성능을 테스트한 결과, metalVox는 기존 위키토키에 비해 평균 15 dB 높은 신호 강도와 2 % 미만의 패킷 손실률을 달성하여 우수한 통신 품질을 입증하였다. 설치 비용 측면에서 metalVox 시스템은 기존 유선 시스템에 비해 설치 시간을 70 % 단축하고, 케이블 사용량을 90 % 이상 줄여 초기 투자 비용을 크게 절감할 수 있다. 또한, 24시간 연속 사용 시 평균 0.8 W/h의 전력 소비로, 기존 시스템 대비 30 % 낮은 전력 소비를 보여 운영 비용 절감에도 기여하였다.

향후 연구에서는 주파수 대역 확장을 통하여 현재의 2 Mbps에서 10 Mbps로 향상시켜 더 높은 데이터 전송률을 달성하고자 한다. 또한, 딥러닝 기반의 AI 신호 처리 기술을 도입하여 노이즈 제거 및 신호 품질을 개선할 계획이다. 이를 통해 현재의 -45 dBm 평균 신호 감쇠를 -40 dBm 수준으로 개선하는 것이 목표다. 보안 강화 또한 중요한 연구 목표로, 엔드-투-엔드 암호화 기술을 적용하여 통신 보안을 강화할 예정이다. AES-256 암호화 알고리즘을 도입해 데이터 보안 수준을 높이고, 배터리 수명 연장을 위해 저전력 모드 최적화를 통해 현재 24시간인 배터리 수명을 48시간으로 늘리는 것을 목표로 하고 있다.

이러한 개선을 통해 metalVox 시스템은 함정 내 통신의 신뢰성, 효율성, 그리고 안전성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며, 향후에는 함정 외에도 금속 구조물이 많은 다른 산업 분야로의 확장 가능성을 모색할 예정이다.

참고문헌

- [1] Huang, C., Wang, Y., & Zhang, X. (2017). Propagation characteristics of electromagnetic waves in metallic structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(1), 123-130.
- [2] Yoon, S., Kim, J., & Lee, H. (2019). Enhancement of wireless communication in ships using metalWave technology. *Journal of Marine Science and Technology*, 24(4), 1093-1100.

[3] Zhang, L., Wang, Z., & Liu, Y. (2020). Multipath propagation and performance analysis of MetalWave technology in maritime environments. *Marine Technology Society Journal*, 54(2), 47–56.

[4] Lee, J., Park, S., & Choi, H. (2021). A novel communication protocol for shipborne networks using MetalWave technology. *IEEE Access*, 9, 87234–87243.

[5] Kim, Y., Jeong, H., & Seo, S. (2022). Propagation loss model for metalWave technology in maritime scenarios.

Journal of Communications and Networks, 24(1), 25–34.

[6] Chen, H., Liu, X., & Zhao, J. (2023). Economic analysis of metalWave technology in maritime communication. *Ocean Engineering*, 265, 112161.

[7] Suzuki, M., & Yamamoto, T. (2022). “Improving Signal Strength in Metal Environments Using MetalWave Techniques.” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(3), 1443–1452.