JPNT 15(2), 175-181 (2026)
https://doi.org/10.11003/JPNT.2026.15.2.175

JPNT Journal of Positioning, Navigation, and Timing

CDC/MDD 보정 알고리즘을 이용한 Eurofix 기반 eLoran LDC 복조 성능 향상

박소연[1], 손표웅[2†]

Performance Enhancement of Eurofix-Based eLoran LDC Demodulation Using a CDC/MDD Correction Algorithm

So-Yeon Park[1], Pyo-Woong Son[2†]

[1]School of Information and Communication Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea
[2]Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

ABSTRACT

Reliable symbol demodulation is essential in Eurofix-based eLoran Loran Data Channel (LDC) reception because Reed–Solomon coding RS(30,10) can tolerate only a limited number of symbol errors. However, in noisy environments, pulse position estimation errors can lead to invalid modulation pattern decisions and consequently increase the symbol error rate before RS decoding. To address this problem, this paper proposes a front-end demodulation algorithm that combines Correlation Difference Correction (CDC) and Minimum Distance Decision (MDD). The proposed algorithm reconstructs candidate pulse patterns using correlation differences and, when necessary, determines the final symbol by minimum-distance matching to valid Eurofix modulation patterns. Simulation results in an AWGN channel show that the proposed algorithm outperforms the baseline demodulator in Pulse Error Rate (PER), BER, and SER, providing approximately 4 dB gain at BER = 10^{-3} and about 1 dB improvement at the RS(30,10) correction threshold of SER = 1/3. Under skywave interference (SWI) conditions, the proposed algorithm reaches SER ≤ 1/3 at SNR ≈ +12 dB, achieving at least 4 dB SNR gain over the baseline demodulator, which fails to reach the threshold within the evaluated SNR range. The proposed method therefore improves symbol decision reliability and increases the likelihood of successful Eurofix LDC message decoding.

Keywords: eLoran, Eurofix, LDC, correlation difference correction, minimum distance decision
주요어: eLoran, Eurofix, LDC, 상관차 기반 보정, 최소거리 결정

1. INTRODUCTION

Enhanced Long Range Navigation (eLoran)은 높은 송신 전력과 장파 대역 특성으로 인해 재밍에 강인하며, Global Navigation Satellite System (GNSS)의 보조 항법 시스템으로 주목받는 지상파 항법 시스템이다. eLoran은 Loran Data Channel (LDC)을 통해 보정 정보를 전송함으로써 항법 성능을 향상시킬 수 있으며, 이에 따라 LDC 메시지의 안정적인 수신이 중요하다 (NMPNT 2026).

Eurofix는 eLoran LDC 전송을 위한 대표적인 Pulse Position Modulation (PPM) 기반 변조 방식으로 (Kim & Kim 2001), 수신 신호의 펄스 검출, 심볼 복조, Reed-Solomon (RS) 복호 및 메시지 복원 과정을 통해 데이터를 수신한다. Eurofix LDC 메시지는 오류 정정을 위해 RS(30,10) 부호를 사용하며, 하나의 코드워드는 총 30개의 심볼로 구성되고 최대 10개의 심볼 오류까지 정정 가능하다 (ITU 2001). 따라서 수신기 입장에서는 RS 복호기로 전달되는 오류 심볼 수를 10개 이하로 유지하는 것이 안정적인 메시지 복원의 핵심 조건이다.

Eurofix의 PPM 변조는 −1 μs, 0 μs, +1 μs의 미세한 펄스 위치 변화를 이용하기 때문에, 잡음 환경에서 발생하는 펄스 위치 추

Received Mar 29, 2026 **Revised** Apr 28, 2026 **Accepted** May 22, 2026

†**Corresponding Author** E-mail: pwson@cbnu.ac.kr

Creative Commons Attribution Non-Commercial License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © The Institute of Positioning, Navigation, and Timing

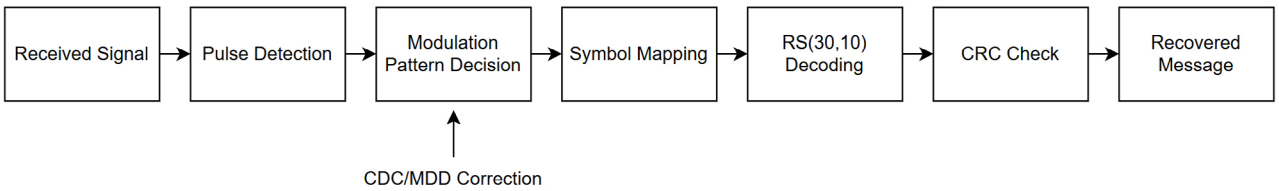

Fig. 1. Eurofix-based LDC message reception procedure and symbol decoding chain.

정 오차가 잘못된 심볼 판정으로 이어질 수 있다. 이러한 오판정은 RS 복호 이전 단계에서 심볼 오류 수를 증가시키고, 최종적으로 메시지 복호 성공률을 저하시킬 수 있다. 특히 Eurofix에서는 6개 펄스의 위치 조합이 하나의 데이터 심볼 결정으로 직접 연결되므로, 개별 펄스의 작은 위치 추정 오차라도 전체 심볼 오류로 확대될 수 있다. 따라서 Eurofix 기반 LDC 수신 시스템에서는 전단 복조 단계에서 펄스 위치 조합을 정확한 심볼로 판별하는 것이 전체 메시지 복원 성능에 직접적인 영향을 미친다 (Yang et al. 2020).

기존 연구에서는 이러한 오류를 완화하기 위해 LDC 메시지에 포함된 Cyclic Redundancy Check (CRC)를 이용한 오류 검출이나, 다수의 메시지를 누적하여 복조 정확도를 향상시키는 신호 누적(signal accumulation) 기법 등이 사용되어 왔다 (Yuan et al. 2020). 그러나 CRC는 메시지 무결성 검증을 위한 검출 메커니즘일 뿐, 복조 단계에서 발생한 심볼 오류를 직접 감소시키지는 못한다. 또한 신호 누적 기법은 복조 정확도 향상에는 도움이 될 수 있으나, 추가적인 수신 지연을 요구할 수 있어 실시간 수신 관점에서 한계가 있다. 따라서 RS 복호 이전 단계에서 잘못 결정된 변조 패턴을 직접 보정하고, 복호기로 전달되는 오류 심볼 수 자체를 줄일 수 있는 전단 복조 개선 알고리즘이 필요하다.

이에 이 논문에서는 Eurofix 기반 eLoran LDC 수신 체계에서 심볼 결정 신뢰성을 향상시키기 위한 CDC/MDD 기반 전단 복조 개선 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 초기 펄스 패턴 추정 과정에서 발생하는 유효하지 않은 변조 패턴을 보정하기 위해 상관 차이 기반의 Correlation Difference Correction (CDC)을 적용한다. 또한 CDC 단계에서도 유효한 패턴이 도출되지 않는 경우에는 변조 패턴 간 거리 기반 결정 방식인 Minimum Distance Decision (MDD)을 적용하여 최종 심볼을 결정한다. 이러한 2단계 보정 구조를 통해 제안 알고리즘은 Eurofix LDC 수신 과정에서 발생하는 심볼 오류를 감소시키고, 결과적으로 RS 복호기로 전달되는 오류 심볼 수를 줄여 메시지 복원 성능을 향상시키는 것을 목표로 한다.

2. EUROFIX LDC SYMBOL DEMODULATION AND PROPOSED CDC/MDD ALGORITHM

2.1 Eurofix Modulation Structure and Symbol Decision Problem

Eurofix 방식은 추가 펄스를 삽입하지 않고 기존 eLoran 펄스 구조를 유지한 상태에서 데이터를 전송하는 LDC 방식이며, 관련 수신 성능 또한 보고된 바 있다 (Son et al. 2022). Eurofix 기반 LDC 수신 절차와 심볼 복조 체인의 전체 흐름은 Fig. 1과 같다. Eurofix는 각 펄스 그룹의 3번째부터 8번째까지 총 6개의 펄스를 세 단계의 PPM으로 변조하므로, 이론적으로 가능한 전체 변조 조합 수는 $3^6 = 729$가지이다. 그러나 실제 Eurofix 시스템에서는 전체 변조량의 합이 0이어야 한다는 제약이 존재하므로, 이를 만족하는 141개의 패턴 중 128개의 패턴만이 데이터 심볼에 할당된다. 각 패턴은 7-bit 데이터 심볼과 일대일로 대응되며, 이러한 대응 관계는 ITU-R의 modulation pattern and data correspondence 표에 정의되어 있다 (ITU 2021). 이와 같은 구조에서는 6개 펄스의 위치 추정 결과가 하나의 데이터 심볼 결정으로 직접 연결되므로, 단일 펄스의 미세한 위치 추정 오차라도 잘못된 변조 패턴 판정으로 확대될 수 있다. 따라서 Eurofix LDC 수신에서는 초기 펄스 위치 추정 결과를 유효한 변조 패턴으로 안정적으로 연결하기 위한 추가 보정 절차가 필요하다.

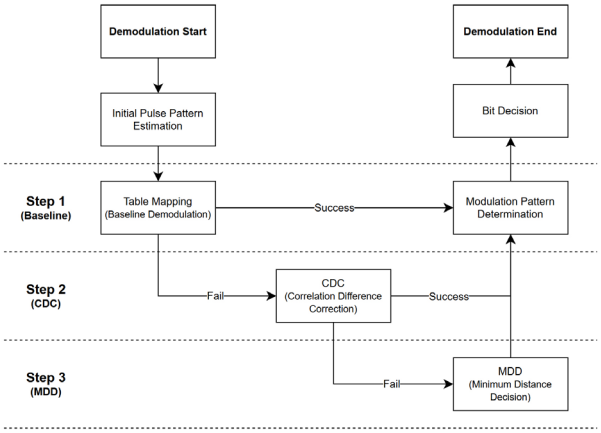

Fig. 2. Stepwise demodulation flow of the proposed CDC/MDD algorithm.

2.2 Proposed CDC/MDD-Based Symbol Decision Algorithm

Fig. 2는 이 논문에서 제안하는 CDC/MDD 기반 심볼 결정 알고리즘의 전체 동작 절차를 나타낸다. 본 알고리즘은 Eurofix LDC 수신 체인에서 전단의 변조 패턴 결정 단계에서 발생하는 심볼 오류를 줄이기 위한 보정 과정으로 동작한다. 먼저 초기 펄스 패턴 추정을 수행한 뒤, 그 결과가 변조 패턴 표에 직접 대응되는 경우에는 기준 방식 복조(Step 1)를 수행한다. 반면 초기 추정 결과가 비유효한 변조 패턴인 경우에는 CDC(Step 2)를 통해 국

소적인 후보 재구성을 수행하며, CDC 단계에서도 유효한 변조 패턴이 발견되지 않을 경우에는 MDD(Step 3)를 적용하여 최종 복조 결과를 결정한다. 즉, 제안된 알고리즘은 기준 방식 복조, 상관 차이 기반 보정, 그리고 최소거리 기반 최종 결정을 순차적으로 수행하는 단계적 구조를 가진다.

2.2.1 Initial pulse position estimation

먼저 수신 신호에 대해 포락선 검출을 수행한 뒤, 템플릿 신호와의 상관값을 계산한다 (Lo & Enge 2000, Son et al. 2021). 이후 Time of Arrival (TOA)를 기준으로 각 펄스의 예상 위치를 설정하고, 각 예상 위치 주변에서 가능한 펄스 위치 후보군을 식 (1)과 같이 정의한다. 이는 TOA 기준 예상 위치 부근에서 실제 펄스가 존재할 가능성이 있는 이산적인 위치 후보만을 탐색하기 위한 것이다.

$$s \in \{-1, 0, +1\} \tag{1}$$

각 i번째 펄스에 대해 후보군 내 모든 위치의 상관값 $C_i(s)$을 계산한 뒤, 식 (2)와 같이 최대 상관값($p_{est,i}$)을 갖는 후보를 해당 펄스의 초기 추정값으로 선택한다. 편의상 변조 대상인 3~8번째 펄스는 각각 i = 1, 2, 3, 4, 5, 6으로 표기한다.

$$p_{est,i} = \arg\max_{s} C_i(s) \tag{2}$$

즉, 각 펄스는 템플릿과의 유사도가 가장 큰 위치로 먼저 독립적으로 추정된다. 이후 이렇게 결정된 6개 펄스의 위치 추정값을 조합하여 초기 추정 변조 패턴을 구성한다. 이 초기 추정 패턴이 유효한 경우에는 Step 1의 기준 방식 복조를 수행하고, 유효하지 않은 경우에는 Step 2의 CDC 단계로 진행한다.

2.2.2 Correlation difference correction (CDC)

초기 추정된 변조 패턴이 변조 패턴 표와 일치하지 않을 경우, 각 펄스에 대해 초기 선택 후보와 유사한 상관값을 갖는 대체 후보를 추가로 탐색한다. 구체적으로는 각 i번째 펄스에 대해, 초기 선택된 후보 C_i ($p_{est,i}$)와 다른 후보 C_i (s) 사이의 상관값 차이가 임계값 ϵ이하인 경우를 식 (3)과 같이 추가 후보로 포함한다. ϵ는 경험적 실험을 통해 설정하였다.

$$\left|C_i(p_{est,i}) - C_i(s)\right| \le \epsilon, \quad (\epsilon = 0.001) \tag{3}$$

이는 초기 선택 후보와의 차이가 매우 작은 상관 피크(correlation peak)는 잡음에 의해 순위가 뒤바뀌었을 가능성이 있기 때문이다. 이후 이 조건을 만족하는 후보들을 이용하여 가능한 패턴 조합을 재구성하고, 상관값 차이가 작은 후보 조합부터 우선적으로 변조 패턴 표와 비교하여 유효한 변조 패턴을 탐색한다. 이러한 과정은 단일 펄스의 미세한 추정 오차로 인해 전체 패턴이 비유효가 되는 구조적 문제를 완화하기 위한 것이다. CDC 단계에서 유효한 변조 패턴이 발견되면 해당 패턴을 이용하여 심볼 및 비트 결정을 수행하고, 유효한 패턴이 발견되지 않으면 Step 3의 MDD 단계로 진행한다.

예를 들어, Table 1의 후보별 상관값에 대해 식 (2)에 따라 각 펄스별 최대 상관값을 갖는 후보를 선택하면 초기 추정 패턴은 [+1, −1, −1, 0, −1, +1]로 구성된다. 이 패턴은 변조 패턴 표에 존재하지 않아 Step 2의 CDC로 넘어간다. CDC는 식 (3)을 만족하는 대체 후보를 추가하여 후보 집합을 확장하며, $|C_5(-1) - C_5(0)| = 0.0008$과 $|C_4(0) - C_4(+1)| = 0.0009$가 임계값 ϵ 이하로 조건을 만족하여 i = 5에서 s = 0이, i = 4에서 s = +1이 대체 후보로 추가된다. 이때 차이값이 더 작은 i = 5의 대체 후보가 먼저 반영되며, [+1, −1, −1, 0, 0, +1]이 유효한 패턴으로 발견되어 최종 심볼로 결정된다.

Table 1. Example of correlation values at each candidate position.

i	$C_i(-1)$	$C_i(0)$	$C_i(+1)$	$p_{est,i}$
1	21.4009	21.4122	21.4171	+1
2	21.2292	21.2242	21.2126	−1
3	21.2287	21.2271	21.2190	−1
4	21.2478	21.2533	21.2524	0
5	21.3028	21.3020	21.2949	−1
6	21.2965	21.3068	21.3108	+1

2.2.3 Minimum distance decision (MDD)

CDC 단계에서도 유효한 변조 패턴이 발견되지 않을 경우, 변조 패턴 표에 존재하는 모든 유효 패턴과 초기 추정 패턴 사이의 거리값을 계산한다. 패턴 간 거리 D_k는 식 (4)와 같이 정의하며, 이는 초기 추정 패턴과 각 유효 패턴 사이의 전체 변조 편차를 정량화하기 위한 것이다.

$$D_k = \sum_{i=1}^{6} \left| p_{k,i} - p_{est,i} \right| \tag{4}$$

여기서 $p_{k,i}$는 변조 패턴 표의 k번째 패턴에서 i번째 펄스의 PPM 변조 값을 의미하며, $p_{est,i}$는 식 (2)에서 정의된 초기 추정 변조 값을 의미한다. 계산된 거리값 D_k가 최소가 되는 변조 패턴을 최종 복조 결과로 선택하며, 동일한 최소 거리값을 갖는 복수의 패턴이 존재할 경우에는 변조 패턴 표에서 먼저 정의된 패턴을 선택한다. 이 단계는 상관값 기반 재탐색으로도 유효한 패턴을 찾지 못한 경우, 최종 심볼 판정을 수행하는 보완 단계로 동작한다.

2.3 Performance Evaluation Method

제안된 알고리즘의 성능은 비트 오류율(Bit Error Rate, BER), 심볼 오류율(Symbol Error Rate, SER), 그리고 펄스 오류율(Pulse Error Rate, PER)을 기준으로 평가하였다. 비트 오류율은 하나의 변조 패턴에 대응되는 7비트 데이터 중 잘못 복조된 비트의 비율을 의미한다. 심볼 오류율은 RS(30,10) 부호를 구성하는 30개의 심볼 각각을 단위로 하여 오류가 발생한 심볼의 비율을 나타내며, RS 복호기로 전달되는 심볼 오류 발생 가능성과 직접적으로 관련되므로 전단 복조 성능 평가의 핵심 지표로 사용하였다. 펄스 오류율은 펄스 패턴 추정 정확도를 직접 평가하기 위한 지표로, 실제 펄스 위치와 추정된 펄스 위치가 일치하지 않는 펄스의 비율을 의미하며 식 (5)와 같이 표현된다.

$$PER = \frac{number\ of\ incorrect\ pulses}{6} \tag{5}$$

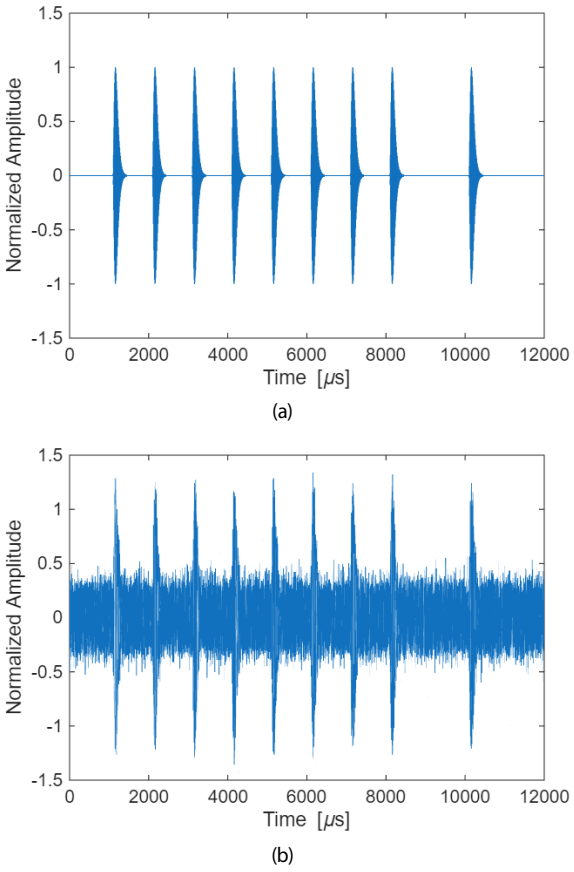

Fig. 3. eLoran pulse group examples. (a) Pure signal (b) Received signal with AWGN.

각 변조 패턴은 총 6개의 변조값으로 구성되므로, 펄스 오류율은 0에서 1 사이의 값을 가지며 1/6 단위로 증가한다. 펄스 오류율은 개별 펄스 위치 추정 오차를 직접 반영하므로, 펄스 수준의 오차가 심볼 수준의 복조 실패로 어떻게 확대되는지를 해석하는 데 유용하다. 기준 방식 복조에서는 초기 추정된 펄스 조합이 유효하지 않은 경우 복조 실패로 간주하고, 해당 심볼을 오류 심볼로 처리하여 비트 오류율 및 심볼 오류율 계산에 반영하였다.

3. SIMULATION RESULTS

3.1 Performance in AWGN Channel

제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 각 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 조건에서 1,000회의 반복 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 MATLAB 기반으로 구현하였으며, 채널 환경은 가산성 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN) 채널로 가정하였다 (Kim et al. 2018). 입력 신호는 GRI 9930 한국 eLoran 체인 기반의 송신국 신호를 모델링하여 생성하였으며, 이상적인 수신 신호와 AWGN이 적용된 수신 신호의 예시를 Figs. 3a,b에 각각 나타내었다. 또한 알고리즘 자체의 복조 성능을 독립적으로 평가하기 위하여 TOA는 오차 없이 정확히 추정된 것으로 가정하였고, 신호 누적 기법은 적용하지 않았다. 비교 기준인 기준 방식 복조는 Fig. 2의 Step 1만 수행한 경우로 정의하였으며, 제안 방식은 Step 1 이후 CDC (Step 2)와 MDD (Step 3)를 모두 포함한 전체 복조 구조를 기준으로 평가하였다.

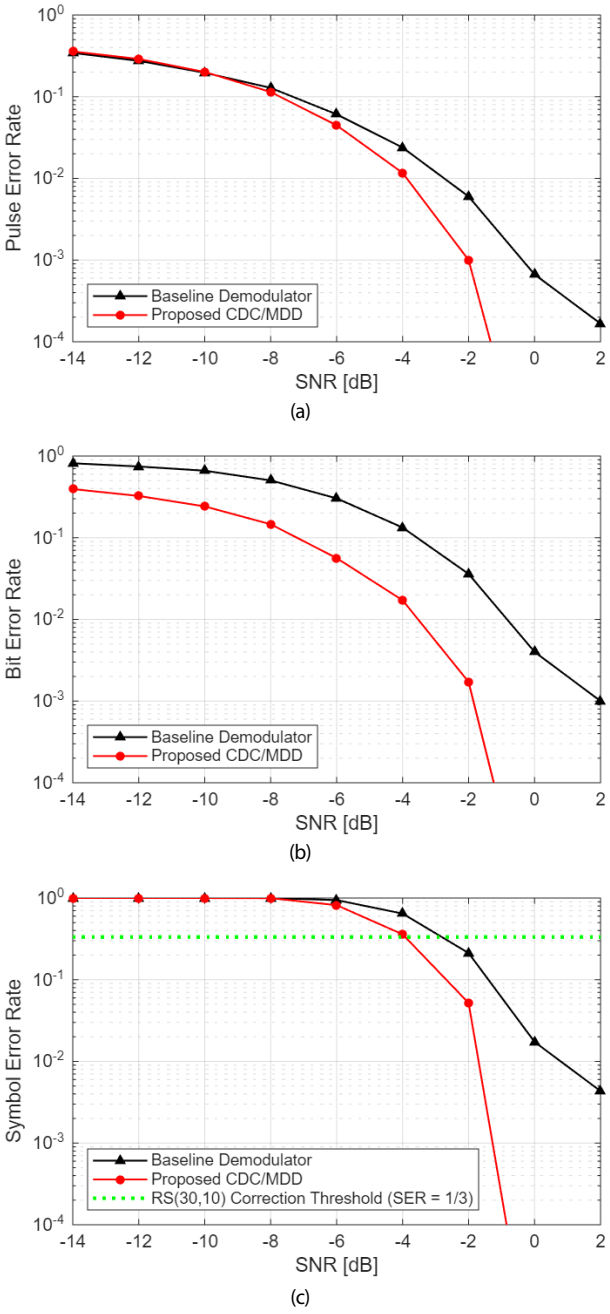

Fig. 4. PER, BER and SER performance comparison between the baseline demodulator and the proposed CDC/MDD demodulation algorithm. (a) PER (b) BER (c) SER.

Fig. 4a는 PER, Fig. 4b는 BER, Fig. 4c는 SER 성능을 나타낸다. 기준 방식 복조 방식의 경우 BER이 PER에 비해 상대적으로 높게 나타나는데, 이는 단일 펄스의 위치 추정 오류가 전체 데이터 복조 실패로 이어질 수 있는 Eurofix 구조의 특성을 반영한다. 반면,

https://doi.org/10.11003/JPNT.2026.15.2.175

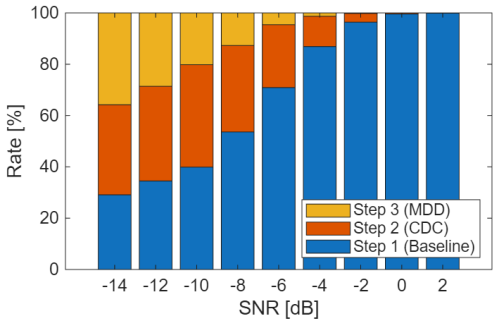

Fig. 5. Processing step distribution of the proposed CDC/MDD demodulation algorithm according to SNR.

Table 2. CDC/MDD step success rate at SNR = −8 dB.

Step	Number of invocations	Bit success rate
Step 1 (Baseline)	528	0.929
Step 2 (CDC)	341	0.801
Step 3 (MDD)	131	0.659

제안된 알고리즘은 CDC와 MDD 보정 과정을 통해 비유효하거나 오류가 포함된 변조 패턴을 유효한 패턴으로 복원함으로써 기준 방식 복조 대비 PER과 BER을 모두 감소시키는 것으로 나타났다. 특히 BER의 경우 낮은 SNR 환경에서 성능 개선이 두드러졌으며, 이는 잡음이 증가할수록 초기 펄스 위치 추정의 불확실성이 커지기 때문에 근접 후보를 재탐색하는 CDC와 최종 보완 단계인 MDD의 효과가 더 크게 나타나기 때문이다. BER = 10^{-3}에서 제안된 알고리즘은 기준 방식 복조 대비 약 4 dB의 성능 개선을 보였다.

Fig. 4c의 SER 성능과 관련해서는 RS(30,10) 부호의 오류 정정 임계값인 SER = 1/3을 함께 표시하였다. 제안된 CDC/MDD 알고리즘은 SER = 1/3 기준에서 기준 방식 복조 대비 약 1 dB의 성능 개선을 나타냈다. 이는 RS(30,10) 부호의 정정 가능 영역에 도달하기 위해 필요한 수신 SNR을 낮출 수 있음을 의미하며, 전단 복조 단계에서의 심볼 오류 감소가 최종 RS 복호 성공 가능성 향상으로 이어질 수 있음을 보여준다.

Fig. 5는 제안된 CDC/MDD 복조 알고리즘에서 각 단계의 수행 비율을 나타낸다. 비교적 높은 SNR 환경에서는 대부분의 데이터가 Step 1의 기준 방식 복조 단계에서 정상적으로 처리되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 SNR이 감소할수록 Step 2의 CDC 단계에서 복구되는 비율이 증가하는 경향을 보이며, 특히 −6 dB 이하의 낮은 SNR 환경에서는 Step 3의 MDD가 최종 복조 결정을 수행하는 비율도 함께 증가한다. 이는 제안된 알고리즘이 높은 SNR에서는 기존 방식과 유사한 구조로 동작하면서도, 낮은 SNR에서는 추가적인 보정 절차를 단계적으로 활성화하여 초기 변조 패턴 결정의 불확실성을 완화함을 보여준다. 또한, 단계별 복구 효과를 정량적으로 확인하기 위해 SNR = −8 dB 환경에서 각 단계의 비트 일치율을 측정한 결과를 Table 2에 나타내었다. CDC가 적용된 341회의 시행에서 비트 일치율이 80.1%, MDD가 적용된 131회의 시행에서 비트 일치율이 65.9%로 나타났으며, 해당 시행들은 Step 1만으로는 복조 실패로 처리되었을 것이므로 CDC와 MDD가 전체 BER 성능 개선에 기여함을 확인할 수 있다.

Table 3. Performance comparison under skywave interference condition ($\alpha = 0.5, \tau = 1$ ms).

SNR [dB]	Baseline Demodulator			Proposed CDC/MDD		
	PER	BER	SER	PER	BER	SER
−8	0.8048	0.8179	1.000	0.3165	0.3543	1.000
−4	0.6623	0.6784	1.000	0.1853	0.2371	1.000
0	0.5000	0.5043	1.000	0.08717	0.1143	0.9654
+4	0.3313	0.3329	0.9697	0.03533	0.04914	0.7749
+8	0.2070	0.2077	0.8355	0.01567	0.02371	0.5022
+12	0.1810	0.1810	0.7359	0.01000	0.01443	0.3377
+16	0.2070	0.2070	0.7446	0.003667	0.005	0.1429

3.2 Performance under Skywave Interference

보다 현실적인 수신 환경에서의 성능을 평가하기 위해, 스카이웨이브 간섭(Skywave Interference, SWI)이 존재하는 환경에서 제안 알고리즘의 성능을 추가로 분석하였다. SWI는 식 (6)과 같이 지상파 신호 $s_{gw}(t)$와 지연 및 감쇠된 스카이웨이브 $\alpha \cdot s_{gw}(t-\tau)$의 합으로 모델링하였다 (Mohammed & Last 1998).

$$r(t) = s_{gw}(t) + \alpha \cdot s_{gw}(t-\tau) \quad (6)$$

이번 연구에서는 스카이웨이브 진폭 비율을 α = 0.5로 설정하였으며, 전파 지연 τ의 경우 RTCM 수신기 규격이 정의하는 스카이웨이브 지연 범위(37.5 μs ~ 1500 μs) 내에서 eLoran 펄스 간격과 일치하는 τ = 1 ms를 설정하였다 (Yan et al. 2022). 이를 통해 스카이웨이브 성분이 후속 펄스의 기준 도착 시점에 중첩되어 PPM 상관 판정에 직접적인 간섭을 유발하는 조건을 구성하였다. 그 외 시뮬레이션 조건은 3.1절의 AWGN 환경과 동일하게 설정하였다.

Table 3은 SNR = −8 dB부터 +16 dB까지 기준 방식 복조와 제안 알고리즘의 PER, BER, SER을 비교한 결과이다. 전 SNR 구간에서 제안 알고리즘이 세 지표 모두에서 기준 방식 대비 일관된 성능 개선을 나타냈으며, 특히 SER 관점에서 기준 방식 복조는 평가 구간 전체에서 SER = 1/3 임계값에 도달하지 못하여 SNR = +16 dB에서도 SER = 0.7446 수준에 머문 반면, 제안 알고리즘은 SNR = +12 dB에서 SER = 0.3377, SNR = +16 dB에서 SER = 0.1429로 임계값 이하에 진입하여 기준 방식 대비 최소 4 dB 이상의 SNR 이득을 보였다.

4. CONCLUSION

이 논문에서는 Eurofix 기반 eLoran LDC 수신 과정에서 발생하는 심볼 오류를 줄이기 위해 CDC/MDD 기반 복조 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 변조 패턴 결정 과정에서 발생할 수 있는 비유효 또는 모호한 패턴을 보정함으로써, RS 복호 이전 단계에서의 심볼 결정 신뢰성을 향상시키는 전단 복조 개선 방법이다.

AWGN 환경에서 수행한 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 기준 방식 복조에 비해 PER, BER, SER 전반에서 성능 개선을 나타냈다. 특히 BER = 10^{-3} 기준에서 약 4 dB의 성능 향상을 확인하였으며, SER 성능에서도 RS(30,10) 부호의 오류 정정 임계값

인 SER = 1/3 기준으로 약 1 dB의 개선을 보였다. SWI 환경에서도 SNR ≈ +12 dB에서 SER = 1/3 임계값 이하에 진입하여 기준 방식 대비 최소 4 dB 이상의 SNR 이득을 달성하였다. 이는 제안한 방법이 RS 복호기로 전달되는 심볼 오류 수를 감소시켜 Eurofix LDC 메시지 복호 성공 가능성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

다만 이번 연구는 정확한 TOA 추정을 가정한 조건에서 수행되었으며, 실제 eLoran 수신기의 신호 누적, RS 복호, CRC 검증, 환경 보정 절차 등은 분석 범위에 포함하지 않았다. 또한 SWI 시뮬레이션은 RTCM 규격이 제시하는 지연 범위 내에서 τ = 1 ms인 특정 조건에 한정하여 수행되었다. 이는 본 시뮬레이션의 PPM 복조기가 펄스 전 구간의 인벨롭을 사용하기 때문이며, 지상파 펄스 내부에 스카이웨이브 성분이 중첩되는 수십 μs 수준의 현실적 지연 조건에 대해서는 SZC 기반 복조 구조 등 실제 수신기 처리 방식을 반영한 재설계와 검증이 필요하다. 향후 연구에서는 제안한 전단 복조 성능 개선이 전체 수신 처리 과정에서 어떻게 반영되는지를 분석하고, Continuous Wave Interference (CWI), TOA 추정 오차 및 현실적 SWI 환경에서의 간섭 제거 기법 등을 고려하여 제안 알고리즘의 메시지 수준 복호 성능을 확인할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the (Chungbuk Regional Innovation System & Education Center), funded by the Ministry of Education (MOE) and the (Chungcheongbuk-do), Republic of Korea (2025-RISE-11-014-03). This research was supported by Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST) funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (RS-2024-00407003).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S.Y.P.; methodology, S.Y.P.; software, S.Y.P.; validation, S.Y.P.; formal analysis, S.Y.P.; investigation, S.Y.P.; data curation, S.Y.P.; writing—original draft preparation, S.Y.P.; visualization, S.Y.P.; writing—review and editing, P.W.S.; supervision, P.W.S.; project administration, P.W.S.; funding acquisition, P.W.S.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

ITU 2001, Technical Characteristics of Methods of Data Transmission and Interference Protection for Radionavigation Services in the Frequency Bands between 70 and 130 kHz, Recommendation ITU-R M.589-3.

ITU 2021, Protection criteria for systems in the standard frequency and time signal services, Report ITU-R TF.2487-0.

Kim, M.-J. & Kim, K.-T. 2001, The Construction of EUROFIX system into the Korean Loran-C Chain (9930), Journal of the Korean Institute of Navigation, 25, 335-345. https://koreascience.kr/article/JAKO200111921429489.page

Kim, Y.-S., Kim, Y.-B., & Kim, J.-B. 2018, Implementation and Verification of eLoran Receiving System Using M&S, 2018 IPNT Conference Proceedings, Jeju, Korea, Nov 7-9 2018, pp.236-241. https://ipnt.or.kr/2018proc/49

Lo, S. C. & Enge, P. 2000, Data Transmission Using LORAN-C, Proceedings of the International Loran Association 29th Annual Meeting, Washington, D.C., Nov. 2000.

Mohammed, A. & Last, D. 1998, Loran-C skywave delay detection using ARMA algorithm, Electronics Letters, 34, 1654-1655. https://doi.org/10.1049/el:19981180

National Maritime PNT Office, eLoran Signal [Internet], cited 2026 Mar 10, available from: https://www.nmpnt.go.kr/home/sub.do?menukey=4209

Son, P.-W., Seo, K., & Fang, T. H. 2021, eLoran Signal Standard Inspection Process Development, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 10, 153-158. https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.2.153

Son, P.-W., Lee, S., Fang, T. H., & Seo, K. 2022, Analysis of LDC Message Reception Performance of Korean eLoran Pilot Service according to Modulation Methods, Journal of Navigation and Port Research, 46, 525-529. https://doi.org/10.5394/KINPR.2022.46.6.525

Yan, W., Dong, M., Li, S., Yang, C., Yuan, J., et al. 2022, An eLoran Signal Cycle Identification Method Based on Joint Time–Frequency Domain, Remote Sensing, 14, 250. https://doi.org/10.3390/rs14020250

Yang, C., Wang, Y., Li, S., & Yan, W. 2020, Experimental Study of a Signal Modulation Method to Improve eLORAN Data Channel Communications, Sensors, 20, 6504. https://doi.org/10.3390/s20226504

Yuan, J., Yan, W., Li, S., & Hua, Y. 2020, Demodulation Method for Loran-C at Low SNR Based on Envelope Correlation–Phase Detection, Sensors, 20, 4535. https://doi.org/10.3390/s20164535

So-Yeon Park is expected to receive the B.S. degree in information and communication engineering from Chungbuk National University, Cheongju, South Korea, in 2027. Her research interests include eLoran signal processing, LDC demodulation, and resilient positioning, navigation, and timing (PNT).

Pyo-Woong Son received the B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2012, and the Ph.D. degree in integrated technology from Yonsei University, Incheon, South Korea, in 2019. He is currently an Associate Professor with Chungbuk National University, Cheongju, South Korea. His research interests include resilient positioning, navigation, and timing (PNT), complementary navigation systems such as eLoran, GNSS interference and spoofing detection, ionospheric monitoring, and software-defined radio (SDR)-based navigation signal processing.