

신호 반전 기법을 통한 해밍 코드의 오류 탐지 성능 향상 및 채널별 오류 탐지 및 복구 시뮬레이션 연구

한채현, 이상현*

고려대학교, 고려대학교

Hanchae0418@korea.ac.kr, sanghyunlee@korea.ac.kr

A Study on Improving Error Detection Performance of Hamming Code using Signal Inversion Technique and Simulation of Error Detection and Recovery by Channel

Han Chae Hyeon, Lee Sang Hyeon*

Korea Univ., Korea Univ

요약

본 논문은 (7, 4) 해밍 코드의 한계를 극복하기 위해 '신호 반전 기법'을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 효용성을 검증하였다. 먼저 Binary Symmetric Channel(BSC)과 Binary Erasure Channel(BEC) 환경에서 해밍 코드의 기초 성능을 분석하여, 높은 오류 확률 구간에서의 급격한 성능 저하를 확인하였다. 이를 해결하기 위해 오류 확률이 0.5 보다 큰 환경에서 수신 신호를 반전 처리하는 기법을 도입하였으며, 시뮬레이션 결과 전 구간에서 안정적인 탐지율을 확보하는 'U 자형' 성능 곡선을 도출하였다.

I. 서론

해밍 코드(Hamming Code)는 데이터 전송 과정에서 발생한 오류를 스스로 감지하고 수정하는 오류 수정 코드(Error Correcting Code, ECC)의 한 종류로, 리처드 해밍에 의해 고안되었다. 통신 시스템에서는 전기적 신호에 대한 다양한 간섭이 일어나 데이터가 반전되거나 유실되는 현상이 발생하는데, 이러한 제약 속에서 데이터의 무결성을 보존하는 오류 수정 코드는 통신 공학에 중요한 기술이다.

그중에서 본 연구에서 채택한 (7, 4) 해밍 코드는 4 비트의 데이터 워드에 3 비트의 패리티 체크 비트를 추가하여 7 비트의 코드워드를 형성하며, 이를 통해 해밍 거리(Hamming Distance) 3 을 확보하는 구조를 가진다. 이러한 구조적 특징으로 수신 데이터 내의 1 비트 오류를 스스로 수정하고 최대 2 비트의 오류를 탐지할 수 있다[1].

그러나 이러한 고전적 오류 수정 코드는 채널의 오류 확률이 매우 높아지는 극한의 환경에서 한계를 가진다. 오류 확률이 특정 임계치를 넘어서면 정보의 왜곡이 심화되고, 유의미한 정보를 판별할 수 없는 급격한 성능 저하 문제가 발생한다. 본 연구는 이러한 성능적 한계를 극복하는 것을 목표로 하며, 오류 확률이 0.5 를 초과하여 수신 신호의 절반 이상이 반전되는 통계적 특성을 역이용해 탐지 성능을 안정적으로 유지할 수 있는 '신호 반전 기법'을 제안한다. 이어지는 본론에서는 BSC(Binary Symmetric Channel) 및 BEC(Binary Erasure Channel) 환경에서의 시뮬레이션을 통해 해밍 코드의 성능 한계를 확인하고, 제안 기법을 적용하여 실제적인 효용성을 검증하려 한다.

II. 시뮬레이션 환경 구축 및 결과 분석

2.1. 채널 모델 구현 및 실험 설계

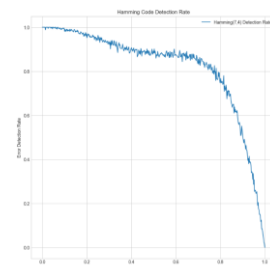
본 연구에서는 (7, 4) 해밍 코드의 성능을 다각도로 검증하기 위해 Python 을 활용하여 세 가지 주요 채널 환경을 모델링하였다. 첫째, BSC 는 이진 신호가 같은 확률 p 로 반전되는 환경을 가정한다. 본 연구에서는 rand 함수를 이용하여 생성된 난수가 설정된 p 값보다

작을 경우 데이터를 반전시키는 방식으로 구현하였다. 둘째, BEC 는 신호가 소실되는 채널로, 오류의 위치를 명확히 인지할 수 있다는 특징이 있다. 본 연구에서는 소실된 데이터를 -1 로 치환하여 표현하였다. 셋째, Asymmetric Channel 은 0 이 1 이 될 확률과 1 이 0 이 될 확률이 독립적으로 작용하는 환경을 모델링하였다.

오류 확률에 따른 오류 탐지율을 보기 위해 오류 확률 p 를 0 에서 1 까지 500 개의 구간으로 세분화하였으며, 실험의 신뢰성 확보를 위해 각 구간당 1,000 회의 시뮬레이션을 수행했다.

2.2. 채널별 탐지 성능 분석

BSC 환경에서의 시뮬레이션 결과, 해밍 코드의 탐지율은 오류 확률 p 가 증가함에 따라 [그림 1]과 같이 하락하는 양상을 보였다. 오류 확률 $p=0.5$ 부근에서는 약 87.5%의 탐지율을 기록하며 비교적 안정적인 성능을 보였으나, p 가 0.9 를 초과하는 지점부터는 성능이 급격히 하락하는 현상을 확인했다.

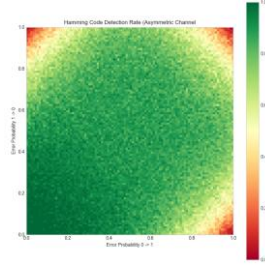


[그림 1] BSC 환경 탐지율 곡선

BEC 환경에서는 비트의 값이 반전되는 대신 신호가 소실되어 수신자가 해당 비트의 위치를 명확히 인지할 수 있다. 본 연구에서는 소실된 비트를 -1 로 처리하였기 때문에, 수신 측에서는 데이터 내에 -1 이 존재하면 즉각적으로 오류의 발생을 인지할 수 있다. 따라서 BEC 환경에서의 해밍 코드의 탐지율은 오류 확률 p 와 관계없이 이론적으로 항상 100%에 수렴하게 된다.

Asymmetric Channel 에서의 시뮬레이션은 0 이 1 이 될 확률과 1 이 0 이 될 확률을 각각 변화시켜 2 차원 히트맵을 생성했다. [그림 2]와 같이 중앙 영역은 두

확률이 모두 낮거나 균형을 이룰 때 높은 탐지율을 보였으나, 가장자리 영역은 특정 확률이 1에 가까워질수록 탐지율이 급격히 감소하였다.



[그림 2] Asymmetric Channel 탐지율 히트맵

III. 신호 반전 기법을 통한 성능 향상

3.1. 신호 반전 기법의 제안 배경 및 원리

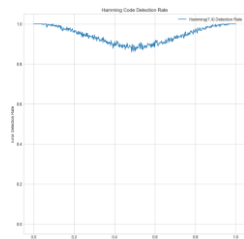
앞선 시뮬레이션을 통해 (7, 4) 해밍 코드는 오류 확률 p 가 0.5를 초과하는 열악한 채널 환경에서 탐지율이 급격히 하락하는 한계를 보였다. 이는 전송된 비트 중 절반 이상이 반전되기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 통계적 특성을 역이용하여 성능을 개선하는 신호 반전 기법을 제안한다.

핵심 원리는 채널의 상태 정보를 활용하는 데 있다. 오류 확률 p 가 0.5보다 크다는 것은 0이 1로, 1이 0으로 바뀔 확률이 더 높음을 의미한다. 따라서 수신된 모든 비트를 반전 처리하면, 실제 오류 확률은 $1-p$ 가 되어 다시 오류 확률 0.5 이하의 안정적인 탐지가 가능하다.

3.2. 성능 개선 결과 및 시각적 분석

신호 반전 기법을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 기존의 하향 곡선과 대비되는 성능 향상을 확인하였다. $p=0.5$ 를 기점으로 수신 신호를 반전 처리했을 때, 탐지율 그래프는 좌우가 반전된 형태를 띠며 높은 오류 구간에서도 다시 100%에 근접하게 됐다.

결과적으로 [그림 3]와 같이 전 구간에서 약 87.5%에서 100%까지의 높은 탐지율을 유지하는 U자형 성능 곡선을 도출하였다. 이는 극한의 노이즈 환경에서 통신 신뢰성을 확보할 수 있음을 실증한다.



[그림 3] 신호 반전 기법 적용 후 탐지율 곡선

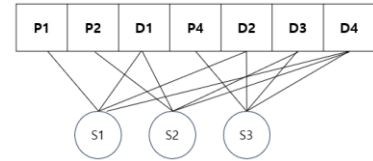
IV. BEC 환경에서의 오류 복구

4.1. 소실 오류 복구 알고리즘

BEC 환경은 오류가 발생한 위치를 정확히 인지할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 가시성을 활용하여 신드롬 식을 순차적으로 해결하는 복구 알고리즘을 구현하였다.

- 1 비트 소실 복구: 데이터 중 단 하나의 비트가 소실된 경우, 해당 비트가 포함된 신드롬 식 중 하나를 사용하여 나머지 비트들의 XOR 합으로 값을 찾아낸다.

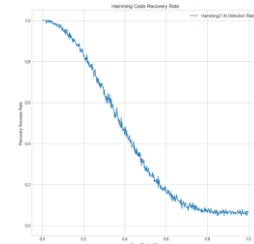
- 2 비트 소실 복구: 두 개의 비트가 동시에 소실된 경우, 순차적으로 복구한다. 예를 들어 [그림 4]에서 D1과 D2가 동시에 소실되었다면, 두 변수를 모두 포함하는 S1 대신 D1 하나만 포함하는 S2를 먼저 해결하여 D1을 복구한다. 이후 복구된 D1 값을 S1에 대입하여 남은 D2를 최종적으로 찾아낸다.



[그림 4] (7, 4) 해밍 코드 구조 도식

4.2. 복구 성공률 분석

시뮬레이션 결과, 오류 확률 p 가 증가함에 따라 성능이 급격히 하락하는 양상을 보였다. 이는 소실 비트가 3개 이상이 되는 시점부터 어떠한 신드롬 식도 단일 변수만 남기지 못하게 되어 논리적 추론이 불가능해지기 때문이다.



[그림 5] BEC 환경 복구 성공률 곡선

V. 결론

본 논문은 (7, 4) 해밍 코드의 한계를 채널별 시뮬레이션을 통해 확인하고, 한계를 극복하기 위해 신호 반전 기법을 제안하였다. 오류 확률 $p > 0.5$ 구간에서 수신 신호를 반전 처리하는 기법을 통해, 기존의 급격한 성능 하락을 해결하고 전 구간에서 안정적인 탐지율을 확보하는 성능 곡선을 도출하였다. 또한 BEC 환경에서는 소실 위치를 알 수 있음을 활용해 최대 2비트까지 복구하는 알고리즘을 구현했다.

이 기법은 저전력 IoT 기기 및 자원이 제한적인 임베디드 시스템의 데이터 신뢰성 문제를 해결하는 데 대안이 될 수 있다. 향후 채널 상태 정보(CSI) 추정 기술과의 결합을 통해 가변적인 에러 환경에 유연하게 대응함으로써, 통신 시스템의 기능을 더욱 개선할 수 있을 것이라 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 고려대학교 차세대통신학과 진리장학 프로그램의 지원을 받아 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] R. W. Hamming, "Error detecting and error correcting codes," in The Bell System Technical Journal, vol. 29, no. 2, pp. 147-160, April 1950
- [2] T. C. Maxino and P. J. Koopman, "The Effectiveness of Checksums for Embedded Control Networks," in IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 6, no. 1, pp. 59-72, Jan.-March 2009