

LTE 시스템에서 Hard/Soft bit 을 혼용한 CFI 디코딩 성능 개선 기법

정시영, 여유진, 김주엽
숙명여자대학교

siyg021116@sookmyung.ac.kr, unyeo32@sookmyung.ac.kr, jykim@sookmyung.ac.kr

Performance Enhancement of CFI Decoding in LTE Systems by Combining Hard and Soft Bit Decisions

Siyeong Jeong, Yujin Yeo and Juyeop Kim
Sookmyung Women's Univ.

요약

본 논문은 LTE 시스템에서 SNR(신호대잡음비)에 따라 하드 디시전(Hard Decision)과 소프트 디시전(Soft Decision) 디코딩을 SNR 임계값에 따라 적용적으로 선택하는 하이브리드 디코딩 기법을 제안한다. 실험 결과, 저 SNR(<15dB)에서는 soft decision 이 52.44%, 고 SNR(≥ 25 dB)에서는 hard decision 이 70.83%의 우수한 peak-to-average 성능을 보였다. 제안 방식은 두 기법의 장점을 결합하여 전체 SNR 영역에서 최적의 디코딩 성능을 보장한다.

I. 서론

무선 통신 시스템에서 신호는 다양한 잡음과 간섭에 노출되어 전송 오류가 빈번하게 발생한다. LTE 시스템에서는 이러한 오류를 최소화하기 위해 채널 부호화 및 디코딩 기법이 필수적으로 적용된다. 특히 핵심 제어정보에 해당하는 CFI(Control Format Indicator)의 전송 과정에서 지정된 3 가지 codeword를 전송하는 형태로 부호화가 이루어진다. CFI는 LTE 시스템에서 각 서브프레임의 제어 채널 영역이 몇 개의 OFDM 심볼로 구성되는지를 알려준다. 단말은 PCFICH(Physical Control Format Indicator Channel)를 통해 CFI를 복원하며, 이를 기반으로 PDCCH(Physical Downlink Control Channel)와 같은 제어 채널의 위치와 범위를 정확히 파악할 수 있다.

CFI 디코딩 방식은 대표적으로 하드 디시전(Hard Decision)과 소프트 디시전(Soft Decision)을 들 수 있으며, 다만 각각의 방식은 SNR(Signal-to-Noise Ratio)에 따라 성능 및 자원 소모 특성이 상이하며, 한 가지 방법을 사용하는 것은 SNR 변화에 따른 성능 한계에 직면할 수밖에 없다. 이에 따라, 본 논문에서는 단일 방식의 한계를 극복하고 다양한 SNR 환경에서 CFI 복원 안정성을 극대화하기 위해 hard/soft bit 정보를 혼용하는 하이브리드 디코딩 기법을 제안한다.

II. 본론

1. CFI 검출 모델

LTE 시스템에서 CFI 검출은 PDCCH 등의 하향링크 제어 채널 구성을 결정하는 핵심 과정이다. CFI는 하나의 서브프레임 내 제어 채널이 점유하는 OFDM 심볼 수를 지시한다. CFI는 변조된 PCFICH의 매 서브프레임 첫 번째 OFDM 심볼에 전송된다. PCFICH는 부호화된

32bit 가 QPSK(Quadrature Phase Shift keying)로 변조된 신호로 전송된다.

CFI를 검출하기 위해서 우선 채널 주파수 응답을 아래와 같이 추정한다.

$$\hat{H}(k) = \frac{Y(k)}{X(k)}$$

여기서 $Y(k)$ 는 k 번째 부반송파에 대한 수신 신호, $X(k)$ 는 알려진 참조 신호이다. 추정된 채널 응답 $\hat{H}(k)$ 를 이용해 채널 등화를 수행하여 수신 신호를 보정한다고 가정한다.

본 논문에서는 위의 과정을 통해 복조한 수신 신호를 원본 비트열로 복원하는 과정에서 hard decision/soft decision 방식을 적용하는 것을 가정한다. Hard decision에서는 수신된 아날로그 신호를 아래와 같이 1bit로 양자화한다.

$$\hat{b}(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } y(k) < a \\ 1, & \text{if } y(k) \geq a \end{cases}$$

이 방식은 단순 비교 연산으로만 이루어져 있으므로, 계산 복잡도가 낮고 지연이 적어 실시간 처리에 유리하다. 다만 저 SNR에서 오류율이 급증하는 단점을 가진다. 반면, soft decision에서는 수신 신호의 정보를 그대로 보존하여 디코딩한다. 오류 정정 성능이 우수하나, 부동소수점 연산이 필요하여 계산 복잡도가 높은 단점이 존재한다.

이후, hard/soft decision 방식으로 복원된 수신 신호(비트열)을 3 개의 후보 codewords에 대한 상관관계를 각각 계산하며, 아래와 같이 **arg max** 연산을 통해 최대 상관값을 갖는 codeword에 대한 CFI를 검출한다.

$$\widehat{\text{CFI}} = \arg \max_{c \in \{1,2,3\}} \left| \sum_{i=1}^{32} y_i \cdot c_i^* \right|$$

여기서 y_i 는 복원된 i 번째 수신 신호(비트), c_i 는 CFI 후보 codeword의 i 번째 비트값이다.

2. Hard/Soft bit decision 성능 비교

본 논문에서는 앞서 제안한 hard/soft bit 혼용 CFI 디코딩 기법의 유효성을 검증하기 위하여 동일한 신호에 대해 hard decision 과 soft decision 방식을 각각 적용한 후 SNR 구간별로 성능을 비교하였다. 실제 신호는 실외에서 USRP 를 이용해 수집하였으며, 수집된 신호는 sampling 하여 dump file 로 저장한 뒤, 매트랩 환경 상에서 총 938 개의 dump file 에 대해 CFI 검출 실험을 진행하였다. 실험은 SNR 구간을 15dB 미만, 15-25dB, 25dB 이상인 세 구간으로 나누어 분석하였고, 각 방식의 Peak-to-Average 값을 산출하여 성능을 비교하였다. 그 결과 그림 1 과 같이 Peak-to-Average 의 평균이 저 SNR(<15dB)에서는 soft decision 방식이 3.2256 으로 hard decision 방식 3.1955 보다 높았고, 고 SNR(≥ 25 dB)에서는 hard bit decision 방식이 2.8083 으로 soft bit decision 방식 2.6759 보다 높았다.

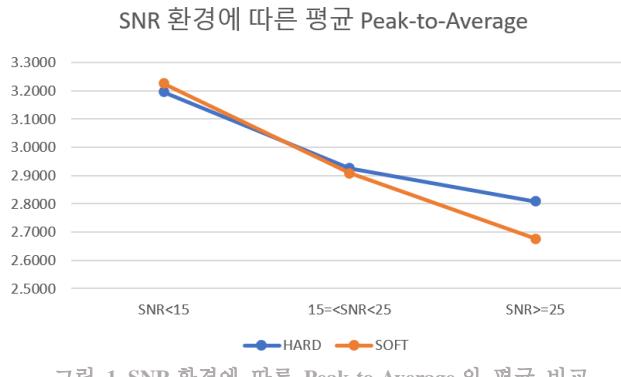


그림 1. SNR 환경에 따른 Peak-to-Average 의 평균 비교

또한 동일한 신호에 대해 hard decision 과 soft decision 의 Peak-to-Average 을 비교하여 더 높은 값을 가지는 방식의 비율을 비교하였다. 그 결과, 그림 2 와 같이 낮은 SNR 환경(<15dB)에서는 soft decision 방식이 52.44%로 hard decision 방식보다 높았고, 높은 SNR 환경(≥ 25 dB)에서는 hard decision 방식이 70.83%로 soft decision 방식보다 높게 나타났다.

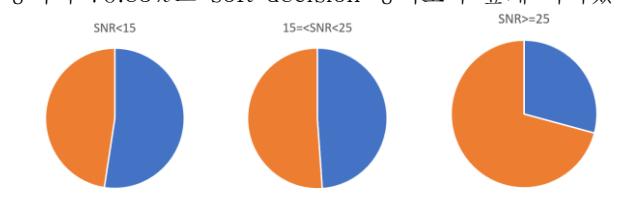


그림 2. SNR 환경에 따른 더 높은 Peak-to-Average의 방식 비교

따라서, 두 가지 방법의 지표를 통해 낮은 SNR 환경에서는 soft decision 방식이, 높은 SNR 에서는 hard decision 방식이 유리함을 확인할 수 있었다. 이에 본 논문에서는 SNR 이 임계값 미만(저 SNR)일 때는 soft decision 방식을, 임계값 이상(고 SNR)일 때는 hard decision 방식을 선택적으로 사용하는 하이브리드 CFI 디코딩 기법을 제안한다. 이 때, 중간 SNR 환경에 대해서는 두 방식에 대해 그 성능의 차이가 미미하므로 계산 복잡도가 낮고 실시간 처리에 유리한 hard bit decision 방식을 적용한다.

본 실험을 통해 SNR 환경에 따라 hard/soft bit decision 방식의 성능이 상이함을 확인할 수 있었다. 즉, 저 SNR 구간에서는 soft decision 방식이, 고 SNR 구간에서는 hard decision 방식이 각각 더 우수한 복원 성능을 나타냈다. 이는 무선 채널 환경의 변동성에 따라

적응적으로 디코딩 방식을 선택하는 것이 전체 시스템 성능 향상에 효과적임을 시사한다.

마지막으로, 제안하는 하이브리드 CFI 디코딩 기법의 가장 최적인 SNR 임계값을 확인하기 위해 hard/soft bit decision 방식으로 전체 SNR 영역의 dump file 에 대해 CFI 검출 실험을 진행한 결과 peak-to-average 의 평균이 SNR=13dB 일 때 그 성능의 차이가 가장 뚜렷했다. 이는, 전체 SNR 영역에서 제안한 방식의 Peak-to-Average 평균이 3.0527 로, hard decision 방식 3.0295 나 soft decision 방식 3.0283 보다 개선된 것을 확인할 수 있다.

각 디코딩 방식 성능 비교

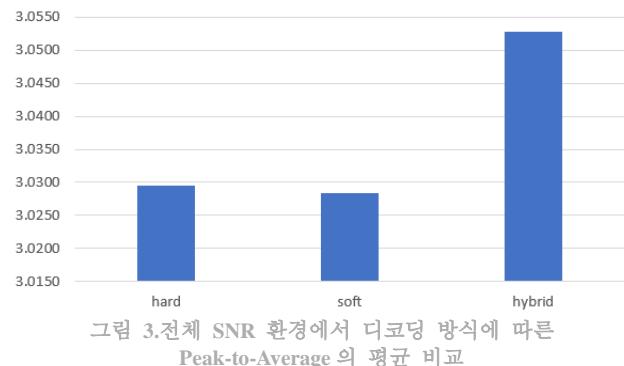


그림 3.전체 SNR 환경에서 디코딩 방식에 따른 Peak-to-Average 의 평균 비교

III. 결론

본 논문을 통해 제안하는 hard/soft bit decision 혼용 디코딩 기법은 다양한 무선 환경에서 CFI 복원 성능을 개선할 수 있는 실질적인 방안임을 실험적으로 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원 No.2021-0-00874, 시공간 선부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] 3GPP TS 36.211, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation," v8.9.0, 2010-01, pp. 57-58.
- [2] GaussianWaves, "Hard and Soft decision decoding," 2023.