

LTE 수신기에서 CFI 검출에 대한 주파수 오프셋 영향 분석

박스완, 여유진, 김주엽

숙명여자대학교

pswan0103@sookmyung.ac.kr, jykim@sookmyung.ac.kr

Analysis on the Effect of Frequency Offset to CFI Detection in LTE Systems

Seuwan Park, Yujin Yeo and Juyeop Kim

Sookmyung Women's Univ.

요약

LTE 수신기에서 상관 분석 기반의 Control Format Indicator 추정은 Carrier Frequency Offset의 영향을 받아 왜곡이 일어날 수 있다. 본 논문은 SK Telecom의 879MHz 대역 신호를 대상으로 MATLAB 모의실험을 통하여 CFI Correlation에 대한 Carrier Frequency Offset(CFO)의 영향과 허용 오차 범위를 검토하였으며, 상관도 저하의 영향 아래에서 성공적으로 CFI를 검출하는 LTE 수신기의 특성을 분석하였다.

I. 서론

Carrier Frequency Offset(CFO)은 송수신단 간의 주파수 오차로 인하여 발생한다. OFDM system은 채널 대역폭과 비교해 각 subcarrier들이 좁은 주파수 간격으로 위치하여 offset에 민감하게 반응하므로, ICI 제거와 직교성의 유지를 위해 적절한 보상 처리가 요구된다. 한편, LTE에서 기본 제어정보에 해당하는 Control Format Indicator(CFI)는 스케줄링 제어정보가 전달되는 OFDM symbol 수를 알려주는 2bit 정보로, 부적절한 복호화가 이루어질 시 전체 제어정보 수신 실패에 이르게 된다. 따라서 CFI에 대한 검출 과정에서 CFO가 미치는 영향을 분석하여 이를 보호할 수 있는 메커니즘을 고안해야 한다. 본 논문에서는 CFO 환경하의 CFI 검출 결과를 바탕으로 허용되는 Offset의 범위와 상관 분석 기반 CFI 검출 기법의 장인함을 확인하고 그 양상을 실제 sampling된 LTE 신호를 통하여 분석한다.

II. 본론

1. CFI 검출 과정

2bit의 CFI는 32bit의 고정된 codeword로 mapping된다. 이 codeword는 전용 채널인 Physical CFI Channel (PCFICH)에 의해 전달되며, 이 물리 채널은 Downlink(DL) subframe에서 첫번째 OFDM symbol에 할당된다. PCFICH는 QPSK 변조 방식을 통해 생성되며, 16개의 Resource element(RE)에 전송된다.

수신 처리 과정에서 Cell-specific Reference Signal(CRS)을 이용한 채널 추정과 보상을 진행하여 equalization을 마친 PCFICH를 추출하고 CFI

를 검출한다. CRS는 0번째와 4번째 OFDM symbol에 할당되며, 해당 OFDM symbol들을 추출하여 주파수 측 신호로 변환을 거친다. 이후 아래와 같이 zero-forcing을 통해 채널 응답을 추정한다.

$$H(f) = R(f) \cdot T^*(f) \quad (1)$$

여기서 $H(f)$ 는 채널 응답, $R(f)$ 와 $T(f)$ 는 각각 수신 CRS symbol, 송신 CRS symbol을 의미한다. 송신단의 CRS symbol은 CRS 값이 셀 번호에 따른 초기값에 의한 gold sequence 기반으로 정해짐을 이용하여 생성한다. 이후 SK Telecom 기지국 특성 상 2 TX 안테나 송신 특성을 고려하여 아래와 같은 equalization을 진행하여 채널 응답에 대한 보상을 진행한다.

$$\begin{aligned} r_{comb}(k) &= H_{p0}^*(k)r(k) + H_{p1}(2i)r^*(2i) \\ r_{comb}(2i) &= H_{p0}^*(2i)r(k) - (k)r^*(2i) \\ k &= 2i - 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, 8 \end{aligned} \quad (2)$$

이때 H_{p0} , H_{p1} 는 각각 port 0의 채널 응답, port 1의 채널 응답을 의미하고, $r(k)$ 는 보상 이전의 수신 신호를 의미한다. 이어서 r_{comb} 로부터 data bit를 추출하고 descrambling을 진행한다.

$$d_{rx}(t) = c(t) \oplus b_{rx}(t) \quad (3)$$

이때 $d_{rx}(t)$ 와 $b_{rx}(t)$ 는 각각 descrambled bit와 수신 bit를 의미한다. 이 과정에서 scrambling sequence $c(t)$ 는 셀 번호를 이용해 gold sequence 기반으로 생성한다. 최종 CFI는 고유 codeword에 대한 상관 분석을 기반으로 도출한다.

$$c_{max} = \arg \max_{i \in \{1, 2, 3\}} \sum_{k=0}^{31} b(k) \cdot c_i(k) \quad (4)$$

이때 $b(k)$ 는 수신 CFI bit, $c_i(k)$ 는 CFI code word를 의미한다. correlation 연산 이후 가장 높은 값을 갖는 codeword의 CFI를 검출한다.

2. CFO에 따른 CFI 검출 성능 분석

OFDM 수신 신호 $r_{Rx}(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{Rx}(t) = (r_I(t) + j r_Q(t))(\cos(2\pi f_e t) - j \sin(2\pi f_e t)) \\ = (r_I(t) + j r_Q(t)) \cdot e^{-j2\pi f_e t} \quad (5)$$

여기서 $r_I(t)$ 와 $r_Q(t)$ 는 I-Channel과 Q-Channel의 수신 신호를 의미한다. OFDM symbol이 시간 축에서 순차적으로 전송되므로, 시간의 흐름에 따라 Offset에 의한 위상 회전이 누적되어 redundant term으로 남는 것을 확인할 수 있다. CFI 검출은 CFI data 전송 symbol로부터 복호된 bit와 고유한 CFI codeword간의 correlation을 통하여 이루어진다. 따라서 CFI symbol에 대하여 적절한 CFO 보상 처리가 수행되지 않을 시 bit 왜곡이 발생한다.

위와 같은 CFO의 영향에 대하여 실제 샘플링된 LTE 신호를 이용해 분석을 진행하였다. 실험은 USRP를 이용해 SK Telecom의 879MHz 대역 신호를 수신하여 샘플 데이터로 저장한 후, 총 405개의 샘플 데이터를 MATLAB으로 불러와 cell search 및 CFI 검출을 진행하였다. 이 과정에서 잔여 오프셋 보정을 거치지 않은 신호를 대상으로 $-3000\text{Hz} \sim 3000\text{Hz}$ 범위의 주파수 오프셋을 부여하며 CFI detection을 진행하는 동시에, 동일한 신호에 대한 올바른 CFI detection을 함께 수행하여 각 결과의 비교를 통해 CFO의 영향을 분석하였다.

CFO를 보정하기 전의 CFI correlation과 보정 이후의 CFI correlation을 비교한 결과, 그림 1과 같이 상정한 오프셋의 범위에서 CFO가 $-1000\text{Hz} \sim 1000\text{Hz}$ 사이의 값으로 제한될 때에 Correlation Loss가 -0.2dB 이내의 값을 나타내며 성능 저하가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 그림 2와 3은 offset 보정 전후 CFI correlation peak 대비 나머지 두 값의 평균과 그에 대한 Loss, 오프셋 환경하의 최종 CFI 검출 성공 확률을 나타낸다. 특정 오프셋 구간에서 Correlation Loss가 발생하였음에도 최종적인 CFI detection은 성공적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

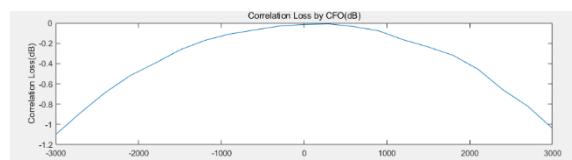


그림 1 correlation loss(dB) by CFO

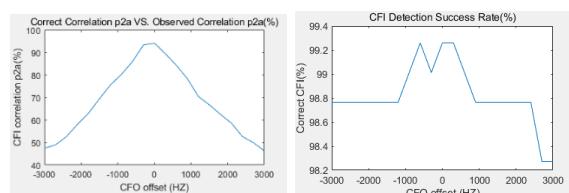


그림 2 CFO 보상 전후 p2a 비교 (%)

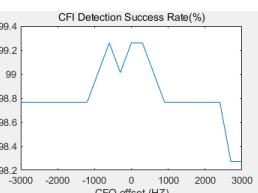


그림 3 CFI 검출 성공률 (%)

3. CFI 검출 과정의 CFO에 대한 강인성 분석

CRS는 채널 응답 추정에 사용되는 기준 신호로, 수신단은 CRS로부터의 추정 값을 한 프레임 전체에 적용하여 채널 응답을 해석한다. symbol의 위치가 변화하면 CFO의 시간 term으로 인하여 그 양상 역시 변화하므로, 심볼 위치가 CRS 할당 symbol과 벗어날수록 채널 추정의 정확도가 감소한다. CFI는 CRS와 동일한 symbol에 위치하는 물리 채널을 통하여 전송되기 때문에 왜곡 추정에 사용한 신호와 추정치를 적용할 대상인 RE가 동일한 시간의 symbol에 위치한다. 따라서, 채널 응답이 동일하게 적용되므로 채널 추정 정확도 측면의 이득을 얻는다.

송수신 과정 중 CFI는 32bit codeword에 mapping되어 전용 채널을 통해 전송된다. 기존의 2bit data는 error bit에 대한 오류 정정 능력을 갖추지 못하나, 32bit로 이루어진 data는 수신단에서 bit 순서가 발생하더라도 유효한 3개의 code word 중 유사도가 높은 경우를 판단할 수 있어 error bit에 대한 오류 정정이 가능하다. 각 code word간의 Hamming distance가 16이므로, 최대 8bit의 error bit가 발생하여도 비교적 적절한 복호화가 가능하다.

III. 결론

CFO에 의한 bit 왜곡으로 CFI 검출 과정의 상관도가 감소한다. 그러나 CRS가 CFI symbol과 같은 시간상에 위치하여 채널 추정치 적용에 대한 정확도 측면의 이득이 존재하고, 2bit data를 32bit로 Repetition하여 전송하므로 Channel Coding Gain을 얻기 때문에, CFI 최종 검출은 CFO에 대해 장인하게 이루어진다.

acknowledgement

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.

참고 문헌

- [1] P. H. Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction", IEEE Transactions on Communication, vol. 42, no.10, pp. 2908–2914, Oct. 1994.
- [2] Wang Dan, Jia Haifeng, "Research of calculating CFI value used in LTE System", IEEE 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2012)
- [3] ETSI TS 136 211 V8.5.0 (2009-02) Technical Specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 8.5.0 Release 8)