

간섭 환경에 강인한 LTE 시스템의 반송파 주파수 오프셋 추정 기법

여유진, 김주엽

숙명여자대학교

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

An Enhanced Carrier Frequency Offset Estimation Scheme Robust to Interference in LTE system

Yujin Yeo, Juyeop Kim

Sookmyung Women's Univ.

요약

SK Telecom LTE 주파수 대역 중 Guard band에 해당하는 고주파수 대역에 LTE-M 신호를 송수신하는 과정에서 LTE 시그널과 LTE-M 시그널 간 간섭이 발생하여 OFDM 심볼 동기화 과정에서 carrier frequency offset 추정의 정확성이 떨어질 수 있다. 본 논문은 주파수 축 상에서 LTE-M 신호를 무효화한 후 Carrier Frequency Offset (CFO)를 추정하는 방식을 제안하였다. 이를 통해 LTE 동기화 및 CFO 추정의 정확도를 끌어올렸으며, MATLAB 모의실험을 통해 제안 기법의 성능 개선에 대한 기여도를 확인하였다.

I. 서론

사물 인터넷(IoT)의 출현과 부상에 따라 IoT 상용을 위한 주파수 자원의 필요성이 대두되었다. LTE-M 기술은 기존의 LTE 망을 사용하되 면허대역 주파수를 사용하여 주파수 대역이라는 한정된 자원을 최대한 활용한다. 이를 통해 기존의 자원만으로도 새로운 서비스를 상용화하였지만, 서로 다른 기지국 신호의 공존으로 인하여 단말 측의 CFO 추정에서 정밀도가 떨어지는 문제 상황이 발생한다. 본 논문에서는 LTE-M 신호 무효화를 통해 LTE 신호에 있어 CP 기반 CFO 추정 방식의 정확도를 높이는 방안을 제안하고 실험을 통해 그 효과를 입증한다.

II. 본론

1. OFDM System Model

OFDM 전송 방식은 직렬의 N개 데이터열을 병렬로 변환하여 서로 직교하는 여러 개의 subcarrier에 각각 실어 전송하는 신호 처리 기법이다. OFDM 시스템에서 채널을 전후로 송신단과 수신단으로 나누어 표현한다. OFDM 시스템에서는 guard interval을 도입하여 심볼 간의 간섭을 예방하는데, OFDM 프레임의 후반 일부분을 복제하여 심볼의 시작 부분에 붙이는 구조의 cyclic prefix를 삽입하는 구조이다. E-UTRA 타입 1 RF를 기준으로 하나의 라디오 프레임은 20개의 슬롯으로 이루어져 있고, 각각의 슬롯은 7개의 CP와 7개의 OFDM 심볼 구간으로 이루어진다.

2. CFO Estimation

OFDM 시스템은 주파수 오차에 아주 민감하여 심볼의 정확한 시작 타이밍과 CFO를 찾는 것이 중요하다. 심볼의 타이밍과 위치에 대한 검출은 심볼 동기화 과정을 통해 수행하는데, 이 과정에서 CFO에 대한 추정이 동시에 이루어진다. 동기화 과정에서의 CFO 추정은 preamble 신호를 사용하는 방식과 CP를 사용한 방식이 존재하며, 본 논문에서는 CP를 사용하는 방식을 가정한다.

CP 기반 CFO 추정 방식은 CP가 OFDM 프레임의 후반 부분의 반복인

것을 활용한다. OFDM symbol에서 구간 내에서 CP에 대해 아래 수식과 같은 auto correlation을 도출하여 prefix 신호와 OFDM symbol의 뒷부분 신호의 위치를 검출하고 심볼 구간의 시작 타이밍을 산출할 수 있다.

$$\gamma(m) = \sum_{k=m}^{m+L-1} r(k)r^*(k+FFTsize)$$

여기서 $r(k)$ 는 수신 신호, $FFTsize$ 는 FFT 크기이자 OFDM 심볼의 길이, 그리고 $\gamma(m)$ 는 correlation 결과이다. $\gamma(m)$ 을 최대로 하는 m 값을 시작 타이밍 θ 으로 추정할 때, 추정된 시작 타이밍을 기반으로 CFO를 아래와 같이 $\epsilon(\theta)$ 로 추정할 수 있다.

$$\epsilon(\theta) = -\frac{1}{2\pi} \angle \gamma(\theta) + n$$

LTE의 guard band에서 LTE-M 기지국 신호를 송출하는 경우, 수신 말은 LTE 기지국과 LTE-M 기지국의 신호를 동시에 수신하게 된다. CP 기반 CFO 추정 과정에서 그 영향을 관찰하기 위해서, LTE 기지국으로부터의 송신 신호를 $r_1(n)$, LTE-M 기지국에서 송신하는 신호를 $r_2(n)$ 로 정의한다. 이때, CP 기반 방식에서의 auto-correlation은 아래와 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} r(\theta) \cdot r(\theta + N_F) &= (r_1^*(\theta + N_F) + r_2^*(\theta + N_F) \\ &\quad + n^*(\theta + N_F))(r_1(\theta) + r_2(\theta) + n(\theta)) \\ &= r_1(\theta)r_1^*(\theta + N_F) + r_2(\theta)r_2^*(\theta + N_F) \\ &\quad + r_1(\theta)r_2^*(\theta + N_F) + r_2(\theta)r_1^*(\theta + N_F) + N \\ &\quad + n(\theta)(r_1^*(\theta + N_F) + (r_2^*(\theta + N_F) \\ &\quad + n^*(\theta + N_F)(r_1(\theta) + (r_2(\theta)) + n(\theta)n^*(\theta + N_F)) \end{aligned}$$

$r_1(\theta)r_1^*(\theta + N_F)$ 에 의해 원하는 CFO의 값이 추정될 수 있다. 하지만 위의 수식에서 볼 때, 인접 기지국의 간섭 신호의 영향에 해당하는 $r_2(\theta)r_2^*(\theta + N_F)$ term에 의해 정확한 CFO 추정이 어렵게 된다. 또한, 본 신호와 간섭 신호의 조합 term들 역시 영향을 미치면서 결과적으로는 noise가 커지는 효과가 발생한다. 따라서 본 term에 의해 시작 타이밍

및 CFO 추정 오차가 크게 발생하게 된다.

3. CFO Estimation with Interference Nulling



그림 1 LTE-M Nulling Procedure

Preamble 신호 기반 방식과 다르게 CP를 이용한 동기화 방식은 수신 신호 간의 auto correlation을 이용하기 때문에 간섭 지국 신호의 영향이 비교적 크다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같은 과정을 통해 문제를 해결하고자 한다. 우선 찾아낸 CP 신호를 FFT를 통해 주파수축 상의 신호로 변환한다. 이후 LTE-M 신호가 수신될 수 있는 guard band 영역의 symbol 값을 0으로 치환하여 무효화한다. 예를 들어, 10MHz 대역폭의 경우 고주파수 신호는 프레임 후반의 840~1024번째 subcarrier에 대해 무효화를 한다. 무효화를 거친 신호를 IFFT를 통해 다시 시간축 상의 신호로 변환한 후, 앞에서 언급한 CP 기반의 CFO 추정 방식을 수행한다.

III. 성능 분석 및 결론

본 실험은 앞서 언급한 제안 기법을 적용하기 전과 적용한 후의 매트랩 프로그램 상의 CFO 추정 정확도를 대조하였다. USRP를 이용하여 실제 SK Telecom에서 사용하는 band 5 주파수인 879MHz에 대해 10MHz 대역폭으로 신호를 sampling하여 dump file로 저장한 뒤, dump file을 매트랩 상에서 load하여 CFO 추정 및 cell search 절차를 진행하였다. 총 270개의 dump file에 대하여 Physical Broadcast Channel (PBCH)를 복호하고 이 대한 Cyclical Redundancy Check(CRC)를 진행하였다. 그 결과에서 CRC를 통과하는 경우 (즉, CRC result = 1)를 CFO 값을 성공적으로 추정했을 경우로 간주하고, CRC를 통과하지 못하는 경우 (즉, CRC result = 0) CFO 값을 성공적으로 추정하지 못한 경우로 간주하였다. 좌측의 그래프는 제안 기법을 적용하기 전의 CRC 결과이고, 우측의 그래프는 제안 기법을 적용한 이후의 CRC 결과이다. 각 dump file에 대한 각 시도를 비교할 때 제안 기법의 CFO 추정이 더 정확한 경우가 눈에 띄게 높은 것이 관찰된다.

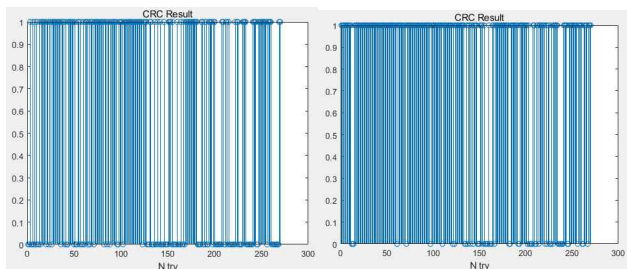


그림 2 실제 LTE 신호 CFO 추정에 대한 CRC 결과
(LTE-M Nulling 적용 전후)

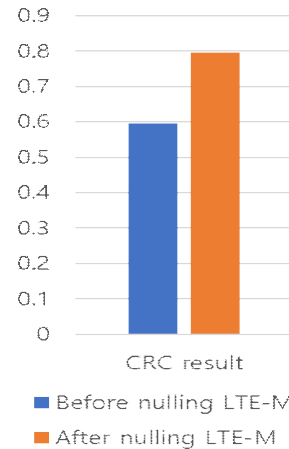


그림 3 CRC Result Mean Comparison

270개의 모든 경우에 대해서 CFO 추정 성공률을 계산하면, 제안 기법을 적용하기 전에는 0.5963, 제안 기법을 적용한 후에는 0.7963이다. 약 20% 가량의 확률로 더 정확한 CFO 추정이 가능한 것을 확인할 수 있었다. LTE 신호에서 FFT size는 1024이지만 전체를 활용하지 않고 프레임에서 가운데 600개의 subcarrier만을 사용한다. 따라서 남은 bandwidth를 활용하고자 고주파수 대역에 LTE-M 신호를 할당하여 통신한다. 본 논문에서는 이 LTE-M 신호로 인해 CFO 추정에서 오차율이 증가하는 문제 상황이 발생하였으며 특히 CP 간의 auto correlation을 통해 신호를 동기화하는 방식에서 노이즈가 두드러졌다고 분석하였다. 그리고 제안 기법을 통해 이 문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No.2021-0-00874, 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발)을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] J. J. van de Beek, M. Sandell, P. O. Borjesson, "ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 45, no.7, pp. 1800-1805, July. 1997.
- [2] P. H. Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction," IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no.10, pp. 2908-2914, Oct. 1994.