

## CP-OFDM 기반 통신 시스템을 위한 주파수 동기화 오차 추정 기법

정용안, 변상봉, 신한재, 한동철, 조수현, 이성훈

구미전자정보기술원

yajung@geri.re.kr, sbbyun@geri.re.kr, hjshin@geri.re.kr, cataegu07@geri.re.kr, shcho@geri.re.kr  
leesh@geri.re.krFrequency Offset Tracking Method  
for CP-OFDM based Communication System

Jung Yong An, Byun Sang Bong, Shin Han Jae, Han Dong Cheul, Cho Soo Hyun,

Lee Sung Hun

Gumi Electronics &amp; Information Technology Research Institute

## 요약

3GPP 5G NR 표준에서는 고속의 데이터 전송 및 주파수 선택적 페이딩 채널에 강건함을 위해 cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing (CP-OFDM)과 discrete Fourier transform spread OFDM (DFT-S-OFDM)을 채택하였다. OFDM 기반의 전송 방식은 각 서브캐리어들을 직교하게 중첩시켜 병렬전송함으로써 고속의 데이터 전송을 가능하게 하지만, 동기화 오차에 매우 민감하다. 특히 소수배 주파수 오차가 존재할 경우 직교성을 상실하게 되어 ICI가 발생하게 되고, 이는 시스템의 성능 저하를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 primary synchronization signal (PSS) 및 secondary synchronization signal (SSS)를 이용한 잔여 주파수 오차 추정기법을 제안한다. 컴퓨터 모의실험을 통해 5G NR의 채널 모델을 적용시키며 제안된 기법의 성능을 검증하였으며, 5G NR 시스템에 쉽게 적용할 수 있음을 확인하였다.

## I. 서론

3GPP 5G NR 표준에서는 상향링크와 하향링크에서 고속의 데이터 전송 및 주파수 선택적 페이딩 채널에서도 강건한 통신을 위해 cyclic prefix orthogonal frequency division multiplexing (CP-OFDM)과 discrete Fourier transform spread OFDM (DFT-S-OFDM)을 채택하였다 [1]. OFDM 기반의 전송 방식은 각 서브캐리어들의 직교성을 유지시키며 중첩시켜 전송함으로써 주파수 효율성 측면에서 매우 훌륭한 기법이지만, 주파수 오차 및 심볼 시간 오차와 같은 동기화 오차가 존재할 경우, inter symbol interference (ISI) 및 inter carrier interference (ICI)가 발생하여 직교성을 상실하게 됨으로써 시스템의 성능 저하가 발생하게 된다. 통상적으로 CP-OFDM 기반 통신시스템의 수신기에서 fast Fourier transform (FFT)가 수행되기 전 시간 영역에서 소수배 주파수 오차 및 심볼 타이밍 오차를 추정하고 FFT를 수행하게 되는데, 주파수 영역에서 미세한 잔여 주파수 오차가 남게 된다 [2]. 잔여 주파수의 존재는 본래의 신호가 위상이 회전된 형태를 띄게 되며, 이로 인해 인접한 부반송파간 간섭 성분이 발생하여 시스템의 성능저하를 유발시킨다. 이와 같은 현상 및 문제를 해결하기 위해, FFT 이후 주파수 영역에서 정수배 주파수 오차 및 셀탐색 절차가 수행된 이후 잔여 주파수 오차를 추정하기 위한 다양한 연구가 진행되었다 [3]. 본 논문은 5G NR 시스템에서 primary synchronization signal (PSS)와 secondary synchronization signal (SSS)를 이용한 잔여 주파수 오차 추정 기법을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다양한 5G NR 채널 모델을 고려하며 제안된 추정 기법의 성능을 측정하였으며, 5G NR 시스템에서 잔여 주파수 오차 추정 및 보상을 위해 제안된 기법이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 CP-OFDM 변조 기법을 이용하는 5G NR 수신기의 시간 영역에서 소수배 주파수 동기화 오차가 완벽하게 추정 및 보상되지 않은 상황을 고려하였으며, 이때, FFT 이후 주파수 영역에서 잔여 주파수 오차를 추정하는 방법을 제안한다. 5G NR의 수신기에서 수신받은  $l$ 번째 CP-OFDM 신호는 주파수 영역에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_l(k) = H_l(k)S_l(k)e^{j2\pi\delta_c l N_p / N} + I_l(k) + W_l(k) \quad (1)$$

여기서  $\delta_c$ 는 주파수 오차 값,  $H_l(k)$ 는 채널의 주파수 응답,  $S_l(k)$ 는 송신기에서 전송한 송신 신호,  $I_l(k)$ 는 인접한 부반송파간 간섭 성분,  $W_l(k)$ 는 평균이 0인 AWGN (additive white Gaussian noise),  $N_p = N + N_g$ ,  $N_g$ 는 순환 보호 구간을 의미한다. 동기화 오차를 추정하기 위해 사용될 수 있는 PSS 및 SSS 신호는 synchronization signal block (SSB)의 첫 번째 심볼과 세 번째 심볼에 삽입되어 전송되며, 각각 m-sequence와 gold-sequence를 이용하여 주파수 영역에서 생성된다 [1].

## III. 제안하는 기법

본 논문에서 제안하는 잔여 주파수 오차 탐색 기법은 5G NR downlink 시스템을 고려하였으며, 채널과 전송 신호의 영향을 제거하기 위해 2가지 상관 함수를 적용하였다. [1]에 의하면 PSS 심볼과 SSS 심볼간 거리는 2이며, 인접한 심볼들이 겪는 채널이  $H_l(k) \approx H_{l+2}(k)$ 라고 가정했을 때, 채널의 영향을 없애기 위한 첫 번째 상관 함수에 대한 수식은 다음과

같이 나타낼 수 있다.

$$C_A(k) = R_l^*(k)R_{l+2}(k) \quad (2)$$

송신 신호의 영향을 제거하기 위한 두 번째 상관 함수에 대한 수식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_B(k) = S_l^*(k)S_{l+2}(k) \quad (3)$$

여기서  $S_l(k)$ 는 송신기에서 생성된 PSS 심볼에 해당하며,  $S_{l+2}(k)$ 는 SSS 심볼에 해당한다. 상기 (2)와 (3)을 이용한 잔여 주파수 오차 추정기법은 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_r(k) = \frac{1}{127} \frac{N}{4\pi N_p} \sum_{k=0}^{126} \arg\{C_A^*(k)C_B(k)\} \quad (4)$$

여기서  $\arg\{x\}$ 는  $x$ 의 위상 회전된 각도를 구하기 위해 사용된 함수이며, (4)를 이용하여 5G NR의 잔여 주파수 오차를 추정할 수 있다.

#### IV. 모의실험결과

컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안된 잔여 주파수 동기화 오차 추정 기법의 signal to noise ratio (SNR) 대비 mean square error (MSE) 성능을 측정하였다. 시뮬레이션을 위해 5G NR의 하향링크 시스템을 고려하였으며, 중심 주파수 대역은 6GHz, 대역폭은 20MHz, FFT 크기  $N=2048$ , 샘플링 간격은 15KHz, normal 순환 보호 구간의 길이  $N_g=144$ 를 고려하였다. 무선 채널 구간은 tapped delay line-A (TDL-A) 채널 모델을 고려하였으며, 지연 확산이 10ns인 very short delay spread, 30ns인 short delay spread, 100ns인 nominal delay spread, 300ns인 long delay spread, 그리고 1000ns인 very long delay spread 채널 지연 확산 모델이 고려되었다 [4]. 그림 1에서는 부반송파 간격으로 정규화된 잔여 주파수 오차  $\delta_c=0.01$  이고, TDL-A 채널모델의 각 지연확산모델을 적용시켰을 때 제안된 잔여 주파수 오차 추정기법의 SNR 대비 MSE 성능을 보여준다. 그림 2는 정규화된 잔여 주파수 오차  $\delta_c=0.1$ 의 값을 가지고 있는 상황을 고려하였으며, 그림 1의 결과와 같이 지연 확산 값이 큰 상황에서도 잔여 주파수 오차를 추정할 수 있다는 것을 확인하였다. 제안된 기법은 지연확산이 10ns ~ 1000ns인 무선 채널 환경에서 효율적으로 잔여 주파수 오차를 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### V. 결론

본 논문에서는 5G NR 하향링크 시스템에서 FFT 수행 이후 주파수 영역에서 미세하게 남아있는 잔여 주파수 오차를 추정할 수 있는 동기화 기술을 제안하였다. 제안된 잔여 주파수 오차 추정 방법은 수신기에서 수신받은 PSS와 SSS간 상관 연산을 수행한 값과 본래의 PSS와 SSS간 상관 연산을 취한 값을 다시 한번 상관 연산을 취함으로써 효율적으로 잔여 주파수 오차를 추정할 수 있다는 장점이 있다. 제안된 기법은 컴퓨터 모의실험을 통해 TDL-L 채널의 다양한 지연 확산 값에서 좋은 추정 성능을 갖는다는 것을 확인하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (2019-0-00068, Development of Millimeter Wave 5G Components Using Compound Semiconductor Process).

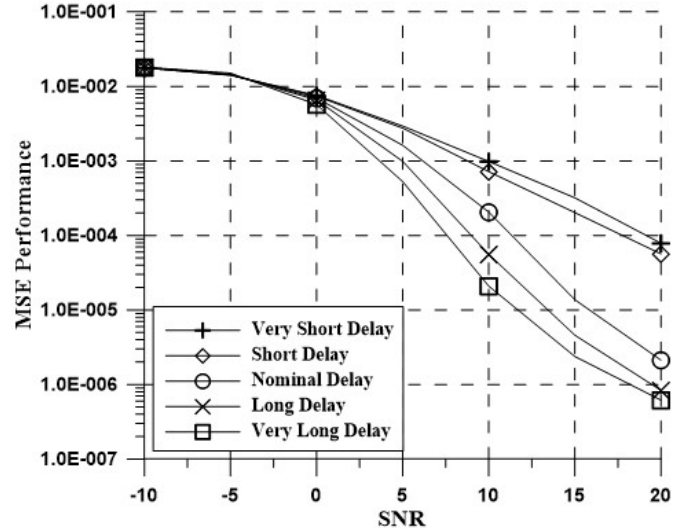


그림 1. TDA-A 채널에서 RFO=0.01일 때 제안된 기법의 MSE 성능

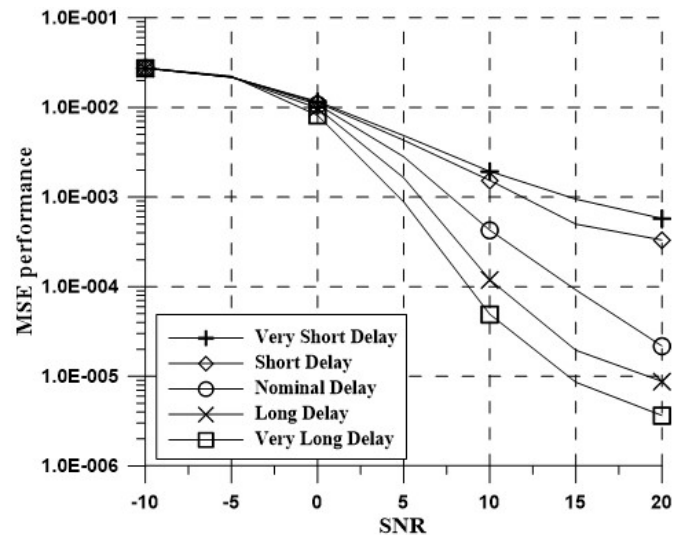


그림 2. TDA-A 채널에서 RFO=0.1일 때 제안된 기법의 MSE 성능

#### 참고 문헌

- [1] 3GPP, "Physical channels and modulation (release 16)," TS38.211 V.16.0.0, 3GPP, Mar., 2020.
- [2] M. Morelli and M. Moretti, "Fine carrier and sampling frequency synchronization in OFDM system," IEEE Trans. Wireless commun. vol. 9, no. 4, pp. 1514-1524, Apr. 2010.
- [3] Y. Jung, M. Kim, H. Song, and Y. You, "Blind Weighted Least-Squares Frequency Offset Estimation Method for LTE Machine Type Communications," IEEE Internet Things J., vol. 6, no. 6, pp. 9806-9815, Dec. 2019.
- [4] 3GPP, "Study on channel model for frequency spectrum above 6GHz (release 15)," TS38.900 V.15.0.0, 3GPP, Jun. 2018.