

큰 주파수 오프셋에 강인한 5G NR 동기화 알고리즘

김도원, 안재민*
충남대학교, *충남대학교

oouu010@o.cnu.ac.kr, *jmahn@cnu.ac.kr

A 5G NR Synchronization Algorithm Robust to Large CFO

Do Won Kim, Jae Min Ahn*
Chungnam National Univ., *Chungnam National Univ.

요약

본 논문은 5G NR(New Radio) 시스템에서 큰 주파수 오프셋(Carrier Frequency Offset, CFO)에 강인한 동기화 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 심볼 타이밍 오프셋(Symbol Timing Offset, STO)과 분수 주파수 오프셋(Fractional Frequency Offset, FFO)은 자기상관 기법을 통해 추정하고, FFO 보상 및 FFT(Fast Fourier Transform) 이후 정수 주파수 오프셋(Integer Frequency Offset, IFO)과 셀 섹터 아이디를 추정한다. 이때, IFO가 존재할 경우 PSS(Primary Synchronization Signal)가 주파수 영역에서 순환 이동(Circular Shift)된다는 특성과 섹터 아이디별로 서로 다른 순환 이동 패턴을 갖는다는 점을 이용하여, IFO와 섹터 아이디를 단 하나의 기준 신호에 대한 상관 연산만으로 동시에 추정한다. 모의 실험을 통해 제안된 알고리즘이 CFO의 크기와 상관없이 안정적인 동기 획득이 가능함을 입증한다.

I. 서론

5G NR(New Radio) 시스템에서 단말기는 초기 접속 및 안정적인 통신을 위해 정밀한 시간 및 주파수 동기화를 수행해야 한다[1]. 단말기는 PSS(Primary Synchronization Signal) 검출을 통해 심볼 타이밍 오프셋(Symbol Timing Offset, STO), 주파수 오프셋(Carrier Frequency Offset, CFO) 및 셀 섹터 아이디(Cell Sector ID)를 추정할 수 있으며, 이를 위해 대표적으로 상호상관(Cross-Correlation) 기반 기법과 자기상관(Auto-Correlation) 기반 기법이 사용된다. 이 기법들은 CFO가 큰 환경에서 성능이 크게 저하된다는 공통적인 한계를 가진다. 한편, 부반송파 간격으로 정규화된 CFO는 정수 성분인 IFO(Integer Frequency Offset)와 분수 성분인 FFO(Fractional Frequency Offset)로 구성되며, 큰 CFO에 대응하기 위해 IFO 후보 탐색 기법이 제안되었지만, 해당 기법은 설계자가 가정한 최대 주파수 오프셋 범위 내에서만 동작하며 IFO 후보의 개수가 증가할수록 계산 복잡도가 크게 증가한다는 한계가 있다.

본 논문에서는 단 하나의 기준 신호(Reference Signal)만을 이용하여 IFO 후보 탐색 과정 없이 동기화를 수행하는 알고리즘을 제안한다. 특히, IFO가 존재할 경우 PSS가 주파수 영역에서 순환 이동(Circular Shift)된다는 특성과 섹터 아이디에 따라 서로 다른 순환 이동 패턴이 나타난다는 점을 활용하여 IFO와 섹터 아이디를 동시에 추정한다. 실험 결과, 제안된 알고리즘이 큰 CFO 환경에서도 안정적으로 동기 획득이 가능함을 확인하였다.

II. 본론

5G NR 시스템에서 PSS 시퀀스 $p(n)$ 은 길이 127의 m-시퀀스 $x(m)$ 으로부터 생성되며, 셀 섹터 아이디 $N_{ID}^{(2)} \in \{0, 1, 2\}$ 에 따라 각각 0, 43, 86 만큼 순환 이동되어 서로 다른 세 개의 시퀀스로 다음과 같이 정의된다[2].

$$\begin{aligned} p(n) &= 1 - 2x(m), \\ m &= (n + 43N_{ID}^{(2)}) \bmod 127, \\ 0 \leq n &< 127, \end{aligned} \quad (1)$$

\bmod 은 modulo 연산자이다. 생성된 PSS는 240 개의 부반송파와 4 개의 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 심볼로 구성된 SSB (Synchronization Signal Block)에서 첫 번째 OFDM 심볼의 중앙에 위치한 127 개 부반송파에 배치된다. 이후 IFFT를 통해 시간 영역 신호로 변환한 뒤, CP(Cyclic Prefix)를 삽입하여 송신한다.

제안하는 알고리즘은 먼저 자기상관 기반 기법을 이용하여 STO와 FFO를 추정한 뒤, FFO 보상을 수행한다. STO와 FFO가 완벽히 추정 및 보상되었다고 가정하면, i 번째 OFDM 심볼에 대해 FFT 출력 $Y_i(k)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_i(k) &= H_i(k - \epsilon_i) X_i(k - \epsilon_i) e^{j\phi_i} + W_i(k), \\ \phi_i &= \frac{2\pi\epsilon_i(N_{cp} + (i-1)N_{total})}{N_{FFT}}, \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $H_i(k)$ 는 k 번째 부반송파의 채널 계수, $X_i(k)$ 는 송신 신호, $W_i(k) \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ 은 복소 가우시안 잡음, N_0 는 잡음 신호의 분산, ϵ_i 는 IFO, $e^{j\phi_i}$ 는 현재 잔여 주파수 오프셋인 IFO에 의해 유도되는 심볼 단위의 상수 위상 성분이다. 또한, N_{cp} 는 CP 길이, N_{total} 은 CP를 포함한 OFDM 심볼 전체 길이, N_{FFT} 는 FFT 크기를 의미한다.

PSS 가 존재하는 대역만을 추출하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tilde{Y}_i(m) \triangleq Y_i(k_0 + m), \quad (3)$$

$$m = 0, 1, \dots, 126,$$

k_0 는 CFO 가 존재하지 않을 때 PSS 가 부반송파에 매핑되기 시작하는 인덱스를 나타낸다. 한편 PSS 는 m-시퀀스이고, 제안하는 기준신호

$$d_p(m) \triangleq p_0((m + 1) \bmod 127)p_0(m) \quad (4)$$

역시 m-시퀀스이며, $p_0(m)$ 은 $N_{ID}^{(2)} = 0$ 에 해당하는 PSS 시퀀스를 의미한다. 이를 활용하여 식 (2)의 위상 성분 $e^{j\phi_i}$ 를 상쇄하고 인접 부반송파 간 채널 영향을 완화하기 위해, 수신 차분곱을 다음과 같이 정의한다.

$$d_y(m) \triangleq \tilde{Y}_i((m + 1) \bmod 127) \tilde{Y}_i^*(m), \quad (5)$$

여기서 $(\cdot)^*$ 는 복소수 켤레(complex conjugate) 연산이다. 이때 $d_p(m)$ 과 $d_y(m)$ 사이의 순환 상관 $D(\tau)$ 는 우수한 상관 특성을 가질 수 있다.

$$D(\tau) = \sum_{m=0}^{126} d_y(m) d_p((m - \tau) \bmod 127), \quad (6)$$

$$\tau = 0, 1, \dots, 126$$

이에 따라 피크 위치는 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{q} = \arg \max_{q \in \{0, 1, \dots, 126\}} |D(q)| \quad (7)$$

기준 신호가 $N_{ID}^{(2)} = 0$ 으로부터 생성된 경우 송신 PSS 의 $N_{ID}^{(2)} \in \{0, 1, 2\}$ 값에 따라 상관 피크가 나타나는 기준 인덱스 $\kappa_{N_{ID}^{(2)}}$ 가 서로 다르게 나타난다. 여기서 $\kappa_{N_{ID}^{(2)}}$ 는 IFO 가 없는 이상적인 상황에서의 피크 인덱스이며,

$$\kappa_0 = 0, \kappa_1 = 84, \kappa_2 = 41 \quad (8)$$

로 주어진다. 또한, IFO 가 존재할 경우 이 피크가 주파수 영역에서 ϵ_I 만큼 순환 이동한다. 상관 피크가 올바르게 검출되었다면, 그 위치는 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\hat{q} = (\kappa_{N_{ID}^{(2)}} + \epsilon_I) \bmod 127 \quad (9)$$

따라서, \hat{q} 이 속하는 구간을 이용하여 $N_{ID}^{(2)}$ 를 먼저 추정하고, 선택된 $\kappa_{N_{ID}^{(2)}}$ 와 \hat{q} 의 차이를 통해 식 (9)를 이용하여 IFO 를 추정한다. 이를 통해 별도의 IFO 후보 탐색 과정 없이, 단 하나의 기준 신호에 대한 상관 연산만으로 $N_{ID}^{(2)}$ 와 IFO 를 동시에 추정할 수 있다.

본 실험에서는 5G NR 채널 모델인 TDL-A 모델을 사용하였으며, 반송파 주파수는 3 GHz, 부반송파 간격은 15 kHz, FFT 크기는 1024, 지연확산(Delay Spread)은 100 ns 로 설정하였다. 오실레이터 안정도는 ± 10 ppm 으로 가정하여 최대 주파수 오프셋은 30 kHz 가 되며, IFO 후보 탐색 기법에서 IFO 후보를 $-1, 0, 1$ 로 설정하였다.

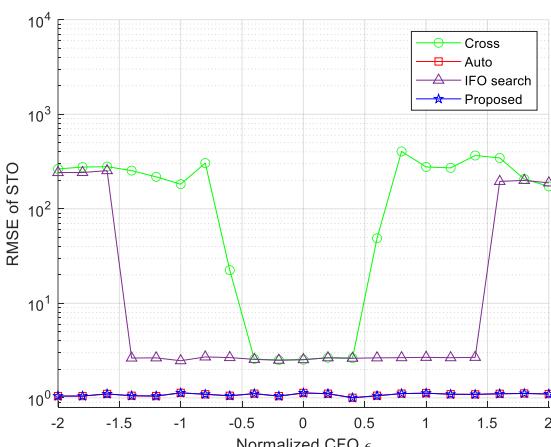


그림 1. 타이밍 오프셋 추정 오차의 RMSE 비교

그림 1 은 상호상관 기반 기법, 자기상관 기반 기법, IFO 후보 탐색 기법, 제안하는 기법의 동기화 성능을 비교하기 위한 타이밍 오프셋 추정 오차의 RMSE(Root Mean Square Error)를 나타낸다. 이때 SNR(Signal to Noise Ratio)은 10 dB 로 설정했다. 그 결과, 제안된 알고리즘의 타이밍 오프셋 추정 성능은 자기상관 기반 기법과 동일하며, 상호상관 기반 기법 및 IFO 후보 탐색 기법에 비해 항상 더 높은 시간 동기 정확도를 보인다. 또한 CFO 가 증가하더라도 안정적인 성능을 유지한다.

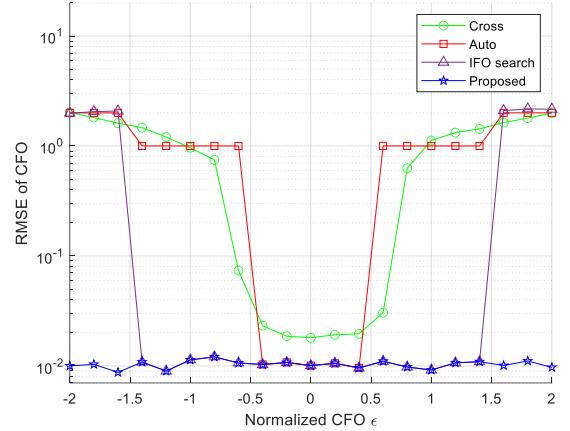


그림 2. 주파수 오프셋 추정 오차의 RMSE 비교
그림 2 는 각 기법별 주파수 오프셋 추정 오차의 RMSE 를 비교하여 나타낸 것이다. 정규화된 CFO 의 크기가 0.5 미만일 때 상호상관 기반 기법의 성능이 가장 열세이고 이외의 기법들은 동일한 성능을 보인다. 그러나 CFO 가 증가함에 따라 기존 기법들의 성능은 급격히 저하되는 반면, 제안된 알고리즘은 안정적으로 동작함을 확인할 수 있다. 이는 제안된 알고리즘을 통해 셀 아이디와 IFO 가 정확히 추정되었음을 의미한다.

III. 결론

본 논문에서는 5G NR 시스템에서 CFO 가 큰 환경에서도 안정적으로 동작 가능한 새로운 동기화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 자기상관 기반 기법으로 STO 와 FFO 를 추정하고, 별도의 IFO 후보 탐색 과정 없이 단 하나의 기준 신호에 대한 상관 연산만으로 IFO 와 셀 아이디를 동시에 추정할 수 있다. 모의 실험 결과, 제안된 알고리즘은 기존 기법들과 달리 큰 CFO 환경에서도 안정적으로 동기 획득이 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] S. Parkvall et al., "NR: The new 5G radio access technology," IEEE Commun. Stand. Mag., vol. 1, no. 4, pp. 24–30, Dec. 2017.
- [2] D. Wang et al., "A novel PSS timing synchronization algorithm for cell search in 5G NR system," IEEE Access, vol. 9, pp. 5870–5880, Jan. 2021.