

# 5G NR 시스템을 위한 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법

소민석\*, 오왕록<sup>o</sup>

## Auto-Correlation Based Frequency Offset Estimation Algorithm for 5G NR System

Minseok So\*, Wangrok Oh<sup>o</sup>

요약

5G NR 시스템의 단말기는 SSB (synchronization signal block)를 활용하여 시간, 주파수 동기 및 셀 아이디 (cell ID) 검출을 수행하며 이중 초기 주파수 동기 획득에는 시간 영역 PSS (primary synchronization signal)가 사용된다. 5G NR 시스템의 기지국은 섹터 인덱스에 따라 세 개의 PSS 중 하나를 전송하므로 상호상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법의 경우 세 개의 상관기가 필요하고 주파수 오프셋 추정 범위를 증가시키기 위하여 주파수 오프셋 가설 기법과 함께 사용될 경우 구현 복잡도가 크게 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 시간 영역 PSS의 복소 공액 중심대칭 (complex conjugate centrally symmetric) 특성을 이용한 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 하나의 상관기를 이용하여 주파수 오프셋을 추정할 수 있어 상호상관 기반 기법 대비 낮은 계산 복잡도를 통해 구현이 가능하다.

**Key Words** : 5G NR, Primary Synchronization Signal, Carrier Frequency Offset

ABSTRACT

In 5G NR system, mobile stations should achieve cell identification and time, frequency synchronizations with periodically broadcasted synchronization signal block (SSB) which consists of primary and secondary synchronization signals and physical broadcast channel. Each SSB contains one of three possible primary synchronization signals which is used to estimate initial carrier frequency offset and thus, cross-correlation based frequency offset estimation algorithm requires three correlators. In addition, if a frequency offset hypothesis scheme jointly used to increase the range of frequency offset estimation, the required complexity for the cross-correlation based estimator increases drastically. In this paper, we propose an auto-correlation based frequency offset estimation algorithm which exploits the complex conjugate centrally symmetric property of time-domain primary synchronization signal. Unlike the cross correlation based estimator, the proposed algorithm requires only one correlator for frequency offset estimation and thus, requires relatively very low computational complexity.

\* First Author : Dept. of Information Communication Eng., Chungnam National University, 학생(석사), minseokso@o.cnu.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Dept. of Information Communication Eng., Chungnam National University, 정교수, kingrock@cnu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202007-145-A-RN, Received July 3, 2020; Revised July 22, 2020; Accepted July 22, 2020

## I. 서론

5G NR (new radio) 시스템의 단말기는 하향링크 (downlink)로 전송되는 SSB (synchronization signal block)를 이용하여 초기 접속 (initial access) 과정을 수행한다. SSB는 PSS (primary synchronization signal), SSS (secondary synchronization signal) 및 PBCH (physical broadcast channel)로 구성되며 시간 영역에서 4개의 OFDM 심볼과 주파수 영역에서 240개의 부반송파에 걸쳐 전송된다<sup>[1]</sup>.

5G NR 시스템의 셀 아이디 (cell ID)는 3개의 셀 아이디 섹터 (sector)와 336개의 셀 아이디 그룹 (group)을 조합하여 만들어지며 총 1008개의 셀 아이디가 존재할 수 있다<sup>[2]</sup>. 초기 접속 과정에서 가장 먼저 수행되는 것은 PSS 검출이며 이를 통해 시간, 주파수 동기 및 셀 아이디 섹터 인덱스를 획득한 후 주파수 영역에서 SSS를 검출함으로써 셀 아이디 그룹 인덱스를 획득한다.

5G NR 시스템에서 주파수 오프셋은 시간 영역 PSS 기준 신호 (reference signal)와 수신 신호 간 상호상관을 이용하여 추정할 수 있지만 이러한 기법은 주파수 오프셋이 클 경우 성능이 열화 되는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 시간 영역 PSS를 전반부와 후반부로 나눈 다음 이들 각각에 대응되는 기준 신호와의 상호상관을 취한 후 두 상호상관 값의 위상 차이로 주파수 오프셋을 추정하는 기법이 제안되었다<sup>[3]</sup>. 5G NR 시스템의 기지국은 섹터 인덱스에 따라 서로 다른 세 개의 PSS 중 하나를 전송한다. 따라서 상호상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법의 구현에는 세 개의 서로 다른 기준 신호들과 수신 신호 간 상호상관을 위한 세 개의 상관기가 요구된다. 또한 주파수 오프셋 추정 범위를 넓히기 위하여 후보 주파수 오프셋이  $m$ 개인 주파수 오프셋 가설 기법과 함께 사용될 경우 총  $3m$ 개의 상호상관기가 필요하여 구현 복잡도가 크게 증가하는 문제가 있다<sup>[4]</sup>.

5G NR 시스템의 주파수 영역 PSS는 실수 시퀀스인  $m$ -시퀀스가 BPSK 변조되어 사용되며 이에 따라 시간 영역 PSS는 복소 공액 중심대칭 (complex conjugate centrally symmetric) 특성을 갖는다<sup>[5]</sup>. 본 논문에서는 이러한 특성을 이용한 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 수신 신호의 자기상관을 통해 주파수 오프셋을 추정하므로 한 개의 상관기로 주파수 오프셋을 추정할 수 있어 상호상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법 대비 낮

은 구현 복잡도를 갖는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 시스템 모델을 기술하고 III장에서 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법을 제안한다. IV장에서 제안하는 기법의 주파수 오프셋 추정 성능을 확인하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

5G NR 시스템의 PSS는 셀 아이디 섹터 인덱스에 따라 0, 43, 86만큼 원형이동 (circular shift)된 길이가 127인  $m$ -시퀀스가 BPSK 변조된 후 SSB 전송에 사용되는 240개의 부반송파 중 중심에 위치한 127개 부반송파를 통해 전송된다. 수신된 신호는 동기 획득을 위하여 SSB 신호가 기저 대역에 위치할 수 있도록 주파수 이동된 후 SSB 신호만을 분리하기 위하여 저역 통과 필터 (lowpass filter)를 통과하고 동기 획득 기법에서 요구되는 샘플율로 데시메이션 (decimation) 된다<sup>[6,7]</sup>. 본 논문에서는 CP를 제외한 OFDM 심볼당 256개의 샘플을 갖도록 데시메이션 되는 것을 가정하였다.

반송파 위상 오차를  $\theta$ , 부반송파 주파수 간격으로 정규화된 주파수 오프셋을  $\epsilon$ 이라 할 때 완벽한 심볼 타이밍 동기를 가정할 경우 수신된 시간 영역 PSS는 식 (1)과 같다. 이때  $\epsilon = \epsilon_I + \epsilon_F$  와 같이 나타낼 수 있으며  $\epsilon_I$ 와  $\epsilon_F$ 는  $\epsilon$ 의 정수 및 소수 부분을 각각 나타낸다.

$$\hat{p}[n] = p_i[n]e^{j(2\pi\epsilon\frac{n}{N} + \theta)} + \eta[n], \quad (1)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1.$$

여기에서  $p_i[n]$ 은 섹터 인덱스가  $i \in \{0, 1, 2\}$ 인 시간 영역 PSS,  $N$ 은 CP를 제외한 OFDM 심볼의 샘플 개수,  $\eta[n]$ 은 복소 가우시안 잡음 샘플을 나타낸다.

주파수 오프셋을 추정하기 위해 상호상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법을 사용할 경우 주파수 오프셋이 큰 경우에는 성능 열화가 발생한다. 이러한 성능 열화를 최소화하기 위해 PSS 검출 기법을 통해 검출된  $\hat{p}[n]$ 과 시간 영역 PSS 기준 신호를 각각 이등분한 후 서로 대응되는 신호들 간 상호상관 값을 구하고 두 상호상관 값 간의 위상차를 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 기법이 제안되었다. 해당 기법에서는 식 (2)를 통해 주파수 오프셋 추정값  $\hat{\epsilon}$ 을 구하며

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{\pi} \angle \left\{ \left( \sum_{n=0}^{N/2-1} \hat{p}[n] p_j^*[n] \right)^* \cdot \left( \sum_{n=N/2}^{N-1} \hat{p}[n] p_j^*[n] \right) \right\}, \quad (2)$$

여기에서 ‘\*’는 공액 복소수,  $\angle \{\alpha\}$ 는  $\alpha$ 의 위상,  $p_j[n]$ 은 섹터 인덱스가  $j \in \{0,1,2\}$ 인 시간 영역 PSS 기준 신호를 나타낸다.

섹터 인덱스 검출을 성공적으로 수행하였을 때 식 (2)를 통해 추정할 수 있는 주파수 오프셋의 범위는  $\pm f_{sc}$ 이며 여기에서  $f_{sc}$ 는 부반송파 주파수 간격을 의미한다. 부반송파 주파수 간격보다 큰 주파수 오프셋을 추정하기 위해서는 주파수 오프셋 가설 기법이 함께 사용되어야 하며 주파수 오프셋 가설 기법에서 사용하는 후보 주파수 오프셋의 개수가 증가함에 따라 해당 기법의 구현 복잡도가 크게 증가하는 문제가 있다.

### III. 제안하는 기법

주파수 영역 PSS로 실수 시퀀스가 사용됨으로 인하여 시간 영역 PSS는 복소 공액 중심대칭 특성을 지니며 PSS 샘플들 중 서로 공액 복소수 관계에 있는 샘플들을 도식화하면 그림 1과 같다. 그림 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 시간 영역 PSS는 식 (3)과 같은 복소 공액 중심대칭 특성이 존재한다.

$$p_i[n] = p_i^*[N-n], n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1. \quad (3)$$

또한, 식 (3)과 같은 시간 영역 PSS의 복소 공액 중심대칭 특성으로 인하여 CP 샘플의 개수가  $L$ 이라 하였을 때 식 (4)와 같은 또 다른 복소 공액 중심대칭 특성이 존재한다.

$$p_i[n] = p_i^*[-n], n = 1, 2, \dots, L. \quad (4)$$

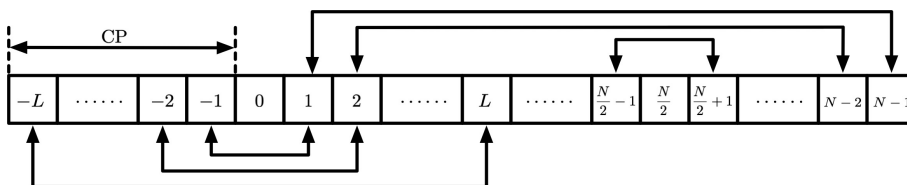


그림 1. 5G NR 시간 영역 PSS 샘플들의 복소 공액 중심대칭 관계  
Fig. 1. Complex conjugate centrally symmetric relations in time domain 5G NR PSS

식 (3)의 특성을 이용한  $\hat{p}[n]$ 의 자기상관 값  $R_p$ 를 식 (5)와 같이 계산할 수 있으며 여기에서 주파수 및 위상 오프셋만을 살펴보기 위하여 잡음의 영향은 무시하였다.

$$\begin{aligned} R_p &= \sum_{n=1}^{N/2-1} \hat{p}_i[n] \hat{p}_i[N-n] \\ &= e^{j(2\pi(\epsilon_f + \epsilon_f) + 2\theta)} \sum_{n=1}^{N/2-1} |p_i[n]|^2 \\ &= e^{j(2\pi\epsilon_f + 2\theta)} \sum_{n=1}^{N/2-1} |p_i[n]|^2. \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 볼 수 있는 바와 같이  $R_p$ 의 위상을 읽어냄으로써 주파수 오프셋에 대한 추정값을 얻을 수 있지만 이 경우 반송파 위상 오차  $\theta$ 의 영향을 받는다. 식 (4)의 특성을 이용한  $\hat{p}[n]$ 의 자기상관 값  $R_c$ 를 식 (6)과 같이 계산할 수 있으며

$$\begin{aligned} R_c &= \sum_{n=1}^L \hat{p}_i[n] \hat{p}_i[-n] \\ &= e^{j2\theta} \sum_{n=1}^L |p_i[n]|^2, \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 이용하여  $\theta$ 의 영향을 받지 않고 식 (7)과 같이 소수배의 주파수 오프셋  $\epsilon_F$ 에 대한 추정값  $\hat{\epsilon}_F$ 를 구할 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_F = \frac{1}{2\pi} \angle (R_p \cdot R_c^*). \quad (7)$$

제안하는 기법의  $\epsilon_F$  추정 성능은  $\epsilon_f$ 의 값의 크기에 무관하며 상호상관 기반 추정 기법들과 달리 하나의 상관기만 필요하므로 구현 복잡도가 낮은 장점이 있다.

식 (7)을 통해 추정된  $\epsilon_F$ 를 이용하여 주파수 오프셋을 보정한 수신 신호는 FFT를 이용해 주파수 영역 신호로 전환된 후 기준 신호들과의 상호상관을 통해

부반송파 간격의 정수배에 해당하는 잔여 주파수 오프셋  $\epsilon_I$ 를 추정할 수 있으며 추정된 잔여 주파수 오프셋  $\hat{\epsilon}_I$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\epsilon}_I = \underset{m}{\operatorname{argmax}} \left| \sum_{k=f_0}^{f_0+126} \hat{P}[k] P_j[k+m] \right|, \quad (8)$$

$$-\epsilon_I \leq m \leq \epsilon_I.$$

여기에서  $f_0$ 는 PSS에 사용된 m-시퀀스의 첫 번째 값이 실린 부반송파 인덱스이며  $\hat{P}[k]$ 는 소수배의 주파수 오프셋을 보정한 주파수 영역 수신 신호,  $P_j[k]$ 는 섹터 인덱스가  $j \in \{0,1,2\}$ 인 주파수 영역 PSS 기준 신호를 나타낸다. 추정하고자 하는 주파수 오프셋의 최대 범위에 따라  $m$ 의 값의 범위를 결정할 수 있으며 m-시퀀스가  $\pm 1$ 의 값을 가지므로 식 (8)을 곱셈 없이 구현이 가능하여 구현 복잡도가 낮은 장점이 있다.

상호상관 및 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법의 구현 복잡도를 요약하면 표 1과 같다. 표 1에서  $S$ 는 셀 아이디 섹터 인덱스 개수,  $C$ 는 주파수 오프셋 가설 기법에서 고려한 시간 영역 후보 수신 신호의 개수,  $F$ 는 제안하는 주파수 오프셋 추정 기법에서 정수배의 잔여 주파수 오프셋을 추정하기 위하여 구한 상호상관 값의 개수를 나타낸다. 반송파 주파수가 4 GHz, 기지국과 단말기의 오실레이터 안정도가 각각  $\pm 10$  ppm, 부반송파 주파수 간격이 30 kHz일 경우 발생할 수 있는 주파수 오프셋의 범위는 약  $\pm 1.33f_{sc}$ 가 되어  $C=3$ 이 되며 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법을 사용할 경우 소수배의 주파수 오프셋을 추정할 후 남아있는 정수배 주파수 오프셋  $\epsilon_I \in \{-1,0,1\}$ 이 되어  $F=3$ 이 된다. 5G NR 시스템에서 CP의 길이  $L$ 은 CP를 제외한 OFDM 심볼의 7%에 해당하는 길이를 가지며 본 논문에서는  $L=18$ 로 설정하였다. 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 제안하는 자기상관 기반 추정 기법은 상호상관 기반 기법 대비 각각 6.31%와 55.86%의 복소 곱셈 및 복소 덧셈을 통해 구현이 가능하여 반송파 주파수 오프셋

추정에 요구되는 구현 복잡도를 크게 낮출 수 있다.

#### IV. 전산실험 결과

제안하는 주파수 오프셋 추정 기법들의 성능을 확인하기 위한 전산 실험에 사용된 파라미터들을 표 2에 나타내었다. 시간 동기 및 셀 아이디 섹터 인덱스를 성공적으로 검출하였다고 가정하였으며 기지국과 단말기의 오실레이터 안정도를 각각  $\pm 10$  ppm으로 설정하여 주파수 오프셋은  $-40$  kHz에서  $40$  kHz의 범위에서 균등하게 분포하는 것을 가정하였다.

그림 2는 상호상관 및 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법들의 RMSE (root mean squared error) 추정 성능을 나타낸 것이다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이  $-9$  dB 이상의 SNR에서 두 기법의 RMSE는 각각  $0.1f_{sc}$ ,  $0.25f_{sc}$  이하가 되는 것을 확인할 수 있다. 잔여 주파수 오프셋은 추후 PSS와 SSS 간 위상차를 이용하여 정밀하게 추정할 수 있으며 이러한 기법을 사용하기 위해서는 잔여 주파수 오프셋으로 인한 OFDM 심볼당 위상 회전의 양이  $\frac{\pi}{4}$  이하가 되어야 한다<sup>[4]</sup>. 이와 같은 조건에 부합되는 잔여 주파수 오프셋의 크기는  $0.25f_{sc}$  이하가 되어야 하며  $-9$  dB 이상의 SNR에서 제안하는 기법은 요구되는 잔여 주파수 오프셋 허용치를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 제안하는 기법은 상호상관 기반 기법 대비 약 6.31%의 계산 복잡도로 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

표 2. 전산실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Parameters	Value
Carrier frequency	4 GHz
Subcarrier spacing	30 kHz
Maximum frequency offset	40 kHz
Channel model	AWGN channel

표 1. 주파수 오프셋 추정 복잡도  
Table 1. Computational complexity for frequency offset estimation

Estimation method	Complex addition	Complex multiplication	Relative complexity (complex multiplication)
Cross correlation based scheme	$(N-2) \times S \times C$	$(N+1) \times S \times C$	100 %
Auto correlation based scheme	$0.57N - 3 + 126 \times S \times F$	$0.57N$	6.31 %

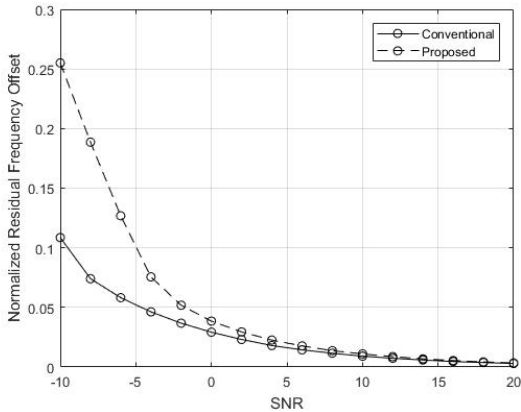


그림 2. 잔여 주파수 오프셋의 RMSE  
Fig. 2. RMSE of residual frequency offset

V. 결 론

본 논문에서는 시간 영역 PSS의 복소 공액 중심대칭 특성을 활용한 자기상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 하나의 상관기를 이용하여 주파수 오프셋을 추정하므로 상호상관 기반 주파수 오프셋 추정 기법 대비 낮은 복잡도를 통해 주파수 오프셋을 추정할 수 있으며 -9 dB 이상의 SNR에서 잔여 주파수 오프셋 요구 조건을 만족시킬 수 있다.

References

[1] S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskär, and M. Frenne, "NR: The new 5G radio access technology," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 1, pp. 24-30, Dec. 2017.

[2] 3GPP TS 38.211 v15.5.0, "NR Physical channels and modulation(release 15)," Mar. 2019.

[3] S. Huang, Y. Su, Y. He, and S. Tang, "Joint time and frequency offset estimation in LTE downlink," *7th Int. Conf. Commun. and Netw. in China*, Kun Ming, China, Aug. 2012.

[4] Z. Lin, J. Li, Y. Zheng, N. Irukulapati, H. Wang, and H. Sahlin, "SS/PBCH Block design in 5G new radio(NR)," *2018 IEEE Globecom Workshops*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Dec. 2018.

[5] 3GPP TSG RAN WGI Meeting #89

R1-1708160, "Remaining details for synchronization signals," May 2017.

[6] Y. Jeon, H. Park, and E. Choi, "Synchronization and cell search procedure in 3GPP 5G NR systems," *2019 21th Int. Conf. Advanced Commun. Technol.*, pp. 475-478 Feb. 2019.

[7] C. Kim, "A synchronization parameter detection scheme using the time-domain PSS signal for 5G-NR initial cell search," *J. KICS*, vol. 44, no. 2, pp. 244-251, Feb. 2019.

소민석 (Minseok So)



2019년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 학사  
2019년 3월~현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 석사과정  
<관심분야> 통신시스템 설계 및 구현, 디지털 통신

[ORCID:0000-0002-5886-1394]

오왕록 (Wangrok Oh)



1994년 2월 : 포항공과대학교 학사  
1997년 2월 : 포항공과대학교 석사  
2003년 8월 : 포항공과대학교 박사  
1997년~2000년 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원  
2003년~2006년 : 포항공과대학교 정보통신연구소 전임연구원  
2006년~2010년 : 충남대학교 정보통신공학과 조교수  
2010년~2015년 : 충남대학교 정보통신공학과 부교수  
2015년~현재 : 충남대학교 정보통신공학과 교수  
<관심분야> 통신시스템 설계 및 구현, 오류정정부호, MIMO 시스템

[ORCID:0000-0001-8205-5432]