

낮은 복잡도의 5G NR PSS 검출 기법

소민석*, 오왕록^o

Low-Complexity 5G NR PSS Detection Algorithm

Minseok So*, Wangrok Oh^o

요약

5G NR (new radio) 시스템은 초기 접속 과정에서 SSB (synchronization signal block)를 이용하여 셀 탐색과 시간 및 주파수 동기화를 수행한다. 이러한 동기화 과정 중 가장 먼저 수행되어야 하는 것은 PSS (primary synchronization signal) 검출이며 일반적으로 주파수 동기가 획득되지 않은 상태에서 수행된다. 상호상관 기반 PSS 검출 기법의 경우 주파수 오프셋으로 인한 성능열화가 발생하며 이러한 성능 열화를 최소화하기 위하여 주파수 오프셋 가설 (frequency offset hypothesis) 기법과 함께 사용될 수 있으나 복잡도가 증가하는 문제가 있다. 본 논문에서는 시간 영역 PSS의 복소 공액 중심대칭 (complex conjugate centrally symmetric) 특성을 활용한 자기상관 기반 PSS 검출 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 주파수 오프셋으로 인한 성능열화가 발생하지 않으며 낮은 복잡도로 구현이 가능하다.

Key Words : 5G NR, Primary Synchronization Signal, Synchronization

ABSTRACT

In 5G NR system, mobile stations should achieve cell identification and initial synchronization before being served by exploiting synchronization signal block transmitted periodically from base stations. To successfully achieve initial synchronization and cell identification, primary synchronization signal (PSS) detection must be preceded. Cross-correlation based PSS detection algorithm was proposed but its performance degradation due to frequency offset is severe. To remedy the performance degradation problem, cross-correlation based PSS detection algorithm combined with frequency offset hypothesis scheme was proposed but its computational complexity increases drastically. In this paper, we propose an auto-correlation based PSS detection algorithm which utilizes time-domain complex conjugate centrally symmetric property of the PSS. Unlike to the cross-correlation based PSS detection scheme, the performance of the proposed scheme is not affected by the frequency offset and thus, the PSS can be detected with relatively low computational complexity.

I. 서론

이동통신 분야에서 고속의 대용량 데이터 전송에 대한 요구가 점차 증대되고 있으며 이러한 요구사항

에 부응하기 위하여 5G 이동통신 기술이 도입되었다^[1]. 5G NR (new radio) 시스템의 기지국은 4개의 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 심볼로 구성된 SSB (synchronization signal block)를

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

^o Corresponding Author : Dept. of Information Communications Eng., Chungnam National University, kingrock@cnu.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : KICS2019-11-324, Received November 29, 2019; Revised January 30, 2020; Accepted February 6, 2020

주기적으로 송신하며 단말기는 해당 신호를 이용하여 셀 탐색과 시간 및 주파수동기를 획득한다. SSB는 GSCN (global synchronization channel number)에 지정되어 있는 주파수에 위치할 수 있으며 240개의 부반송파 (subcarrier)를 통해 전송된다²⁾. SSB의 첫 번째 OFDM 심볼을 통해 전송되는 PSS (primary synchronization signal)의 주파수 영역 신호는 길이가 127인 m-시퀀스로 구성되며 단말기에서는 PSS를 이용하여 시간동기 및 셀 아이디 (cell ID) 섹터 인덱스 (sector index)를 획득한다.

PSS 검출 기법으로 시간 영역 수신 신호와 수신부에서 저장하고 있는 시간 영역 기준 신호 (reference signal) 간의 상호상관 (cross-correlation)을 기반으로 한 PSS 검출 기법을 사용할 수 있으나 이 기법의 경우 주파수 오프셋 (carrier frequency offset)에 의한 검출 성능열화가 발생한다. 이러한 성능열화를 최소화하기 위해 다수의 후보 주파수 오프셋들로 선 보상된 수신 신호들과 기준 신호간의 상호상관을 통해 PSS를 검출하는 기법이 제안되었다³⁾. 성능열화를 최소화하기 위해서는 후보 주파수 오프셋 간의 차이가 작아야 하나 이럴 경우 후보 주파수 오프셋의 개수가 증가하여 복잡도가 크게 증가하는 문제가 있다.

LTE 시스템의 주파수 영역 PSS는 Zadoff-Chu 시퀀스로 구성되어 있으며 시간 영역 중심대칭 (central symmetric) 특성을 가진다. 이를 활용한 낮은 구현 복잡도의 자기상관 기반 PSS 검출 기법이 제안되었으나 주파수 오프셋으로 인한 성능열화가 발생하는 문제가 있다. 이를 개선하기 위해 수신 신호의 자기상관 결과와 기준 신호와의 추가적인 연산을 통한 PSS 검출기가 제안되었으나 구현 복잡도가 증가하는 문제가 있다⁴⁾. LTE 시스템과 달리 5G NR에서는 주파수 영역 PSS로 실수 시퀀스인 m-시퀀스가 사용되며 이로 인하여 시간 영역 복소 공액 중심대칭 (complex conjugate centrally symmetric) 특성을 가진다. 본 논문에서는 시간 영역 PSS의 복소 공액 중심대칭 특성을 이용한 자기상관 (auto-correlation) 기반 PSS 검출 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 주파수 오프셋으로 인한 성능열화가 발생하지 않는 특성을 지니며 낮은 복잡도를 통하여 구현이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 상호상관 기반 PSS 검출기법의 구조와 문제점에 대해 기술하고 III장에서 제안하는 기법인 자기상관 기반 PSS 검출 기법을 기술한다. IV장에서 제안하는 기법의 성능을 확인하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 본 론

5G NR 시스템의 SSB는 PSS, SSS (secondary synchronization signal), PBCH (physical broadcast channel)로 구성되어 있으며 시간 영역에서 4개의 OFDM 심볼과 주파수 영역에서 240개의 부반송파에 걸쳐 전송된다. PSS와 SSS는 SSB의 첫 번째와 세 번째 심볼에 각각 위치하며 BPSK (binary phase shift keying) 변조된 후 127개의 부반송파에 실려 전송된다. PSS가 전송되는 부반송파 양쪽으로 각각 56개 및 57개의 부반송파가 보호대역으로 사용되며 셀 아이디 섹터 인덱스에 따라 0, 43 및 86만큼 원형이동 (circular shift)된 주기가 127인 m-시퀀스가 BPSK 변조된 후 127개 부반송파에 실려 전송된다⁵⁾.

그림 1은 상호상관 기반 PSS 검출 기법의 시간동기 검출 과정을 나타낸 것이다. 수신된 신호 $r[l]$ 은 상호상관 검출기에 입력되기 전 기저대역으로 이동되며 이때 PSS가 할당된 부반송파 중 중심에 위치한 부반송파가 DC에 위치하도록 주파수 이동된 후 저역통과 필터 (lowpass filter)를 통과한다^{6,7)}. 저역통과 필터 출력에는 PSS만 남아있게 되며 적절한 데시메이션 (decimation)을 통해 표본화율이 조정된 후 검출기에 입력된다. 본 논문에서는 OFDM 심볼당 샘플의 개수 N 을 256으로 가정하였다. 검출기의 출력 신호 $d_c[l]$ 은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며

$$d_c[l] = \max(|c_i[l]|), i = 0, 1, 2 \tag{1}$$

이때 식 (1)의 $c_i[l]$ 은 식 (2)와 같다.

$$c_i[l] = \sum_{n=0}^{N-1} y[l+n]p_i^*[n], i = 0, 1, 2. \tag{2}$$

여기에서 l 은 수신 신호의 샘플 인덱스, $y[l]$ 은 검출기 입력 신호, $p_i[n], n = 0, 1, \dots, N-1$ 은 셀 아이디 섹터 인덱스가 i 인 경우에 해당하는 PSS의 시간 영역 기준 신호, '*'는 공액 복소수를 나타낸다. 검출기 출력 $d_c[l]$ 이 미리 설정된 임계값 (threshold)을 넘을 경

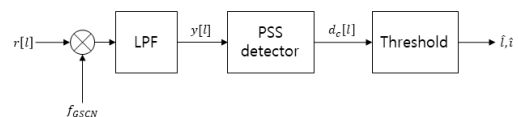


그림 1. PSS 검출기 구조
Fig. 1. Block diagram of PSS detector

우 해당 수신 신호 샘플 인덱스 l 을 PSS의 시작 샘플 인덱스 \hat{l} 으로 추정하며 식 (3)과 같은 과정을 통해 송신 PSS 셀 아이디 섹터 인덱스 \hat{i} 를 추정한다.

$$\hat{i} = \underset{i}{\operatorname{argmax}} |c_i[\hat{l}]|, i = 0, 1, 2 \quad (3)$$

PSS 검출 과정은 주파수동기가 획득되지 않은 상태에서 수행된다. 주파수 오프셋이 Δ_f 만큼 존재 할 경우 $c_i[l]$ 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며

$$\begin{aligned} c_i[l] &= \sum_{n=0}^{N-1} y[l+n]p_i^*[n] \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \left(s_j[l+n]e^{j2\pi\Delta_f\frac{T_s}{N}(l+n)} + \eta[l+n] \right) p_i^*[n], \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $s_j[l]$ 은 PSS의 셀 아이디 섹터 인덱스가 $j \in \{0, 1, 2\}$ 인 경우에 해당하는 송신 신호 샘플, T_s 는 OFDM 심볼 길이, $\eta[l]$ 은 복소 가우시안 잡음 샘플을 나타낸다. 식 (4)에서 볼 수 있는 바와 같이 상호상관 기반 PSS 검출기 출력 $d_c[l]$ 은 주파수 오프셋의 영향을 받게 되며 PSS의 실제 시작 샘플 인덱스가 l_{opt} 일 때 잡음의 영향을 무시하고 $l = l_{opt}$, $j = i$ 일 경우 부반송파 주파수 간격으로 표준화 한 주파수 오프셋에 따른 $|c_i[l]|$ 값의 변화는 그림 2와 같다. 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 주파수 오프셋 값에 따라 $|c_i[l_{opt}]|$ 값이 크게 변하며 이로 인하여 PSS 검출 성능이 나빠질 것임을 확인할 수 있다.

주파수 오프셋으로 인한 성능열화를 최소화하기 위하여 주파수 오프셋 가설 기법을 사용할 수 있다. 주

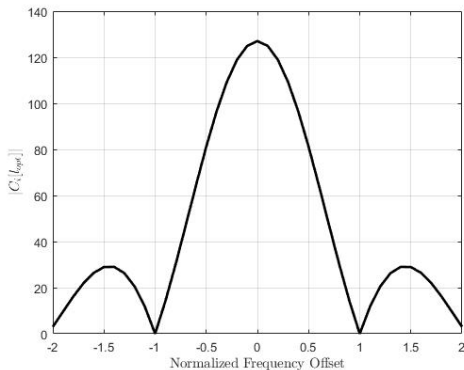


그림 2. 주파수 오프셋에 따른 상호상관기 출력
Fig. 2. Cross-correlation output versus frequency offsets

파수 오프셋 가설 기법은 수신 신호를 다수의 후보 주파수 오프셋 값으로 보상한 후 각각의 보상된 신호들에 대해 앞에서 기술한 PSS 검출 과정을 각각 수행한다. 이때 후보 주파수 오프셋의 개수는 고려해야 하는 최대 주파수 오프셋과 이후 신호 처리 과정에서 요구되는 잔여 주파수 오프셋의 최대 허용치 등을 고려하여 결정된다. 그러나 후보 주파수 오프셋 수가 증가할 수록 구현 복잡도가 크게 증가하는 문제가 있다.

III. 제안하는 기법

5G NR 시스템의 주파수 영역 PSS는 주기가 127인 m -시퀀스로 이루어져 있다. m -시퀀스는 실수(real) 시퀀스이므로 시간 영역 PSS는 식 (5)와 같이 복소 공액 중심대칭 특성을 가진다.

$$p_i[n] = p_i^*[N-n], \begin{cases} n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}-1 \\ i = 0, 1, 2 \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)와 같은 시간 영역 PSS의 특성을 이용하여 자기상관 기반 PSS 검출기를 설계할 수 있으며 자기상관 기반 PSS 검출기의 출력 신호 $d_a[l]$ 은 식 (6)과 같다.

$$d_a[l] = \left| \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} y[l+n]y[l+N-n] \right| \quad (6)$$

검출기 출력 신호 $d_a[l]$ 값이 미리 설정된 임계값을 넘는 경우의 수신 신호 샘플 인덱스 l 을 PSS 시작 샘플 인덱스 \hat{l} 으로 추정한다. 주파수 오프셋이 Δ_f 만큼 존재 할 경우 $d_a[l]$ 은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며

$$\begin{aligned} d_a[l] &= \left| \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} y[l+n]y[l+N-n] \right| \\ &= \left| e^{j2\pi\Delta_f\frac{T_s}{N}(2l+N)} \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} s_j[l+n]s_j[l+N-n] \right| \\ &= \left| \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}-1} s_j[l+n]s_j[l+N-n] \right|, \end{aligned} \quad (7)$$

이때 주파수 오프셋의 영향만을 살펴보기 위하여 잡음의 영향은 무시하였다. 식 (7)에서 볼 수 있는 바와 같이 $d_a[l]$ 은 주파수 오프셋의 영향을 받지 않아

표 1. 검출기 입력 샘플 당 요구되는 계산 복잡도
Table 1. Required computational complexity per input sample

Detection scheme	Complex multiplication	Complex addition	Relative complexity
Cross correlation based scheme	$N \times S$	$(N-1) \times S$	100%
Cross correlation with CFO Hypothesis	$N \times S \times C$	$(N-1) \times S \times C$	300%
Auto correlation based scheme	$\frac{N}{2} - 1$	$\frac{N}{2} - 2$	16.54%

복소 공액 중심대칭 특성을 이용한 자기상관 기반 PSS 검출 기법의 검출 성능은 주파수 오프셋의 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다.

자기상관 및 상호상관 기반 PSS 검출 기법에 대한 수신 신호 샘플 당 계산 복잡도를 요약하면 표 1과 같다. 표 1에서 S 는 셀 아이디 섹터 인덱스의 수, C 는 주파수 오프셋 가설 기법에서 고려한 후보 주파수 오프셋의 개수를 나타낸다. 5G NR 시스템에서 $S=3$ 이며 기지국과 단말기의 오실레이터 안정도를 $\pm 5\text{ppm}$, 반송파 주파수는 4 GHz, 부반송파 주파수 간격 (subcarrier spacing)은 30 kHz, 후보 주파수 오프셋 보상 후 잔여 주파수 오프셋의 최대 허용치를 부반송파 주파수 간격의 $\frac{1}{4}$ 로 가정할 경우 $C=3$ 이 된다.

표 1에서 볼 수 있는 것과 같이 제안하는 기법은 상호상관 기반 PSS 검출 기법과 주파수 오프셋 가설 기법을 이용한 상호상관 기반 PSS 검출 기법 대비 각각 16.54% 와 5.51%의 계산 복잡도를 갖는다.

IV. 전산실험 결과

PSS 검출 기법들의 성능을 비교하기 위한 전산실험을 수행하였으며 이때 사용한 파라미터들은 표 2와 같다. CP (cyclic prefix)의 샘플 개수를 L 이라 할 경우 모든 검출 기법들에 대하여 추정된 PSS 시작 샘플 인덱스 \hat{l} 이 $\hat{l} \in \left[l_{opt} - \left(\frac{L}{2} - 1 \right), l_{opt} \right]$ 일 때 PSS 검출을 성공적으로 수행했다고 가정하였다^{8,9)}. 주파수 오프셋은 -20 kHz 에서 20 kHz 내에서 균등하게 분포

표 2. 전산실험 파라미터
Table 2. Simulation parameters

Parameters	Value
Carrier frequency	4 GHz
Subcarrier spacing	30 kHz
Maximum frequency offset	20 kHz
Channel model	AWGN channel

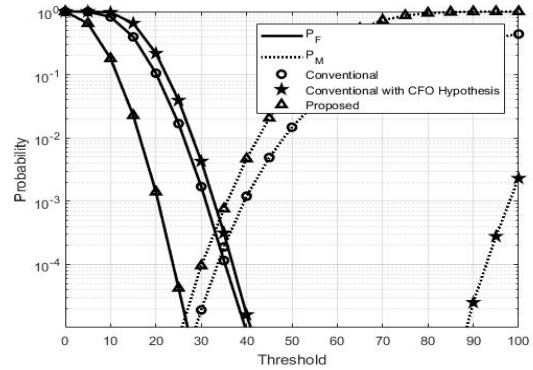


그림 3. PSS 검출 기법들의 오경보 및 검출 실패 확률 (SNR=-3 dB)
Fig. 3. False alarm and missing probabilities of the PSS detection schemes (SNR=-3 dB)

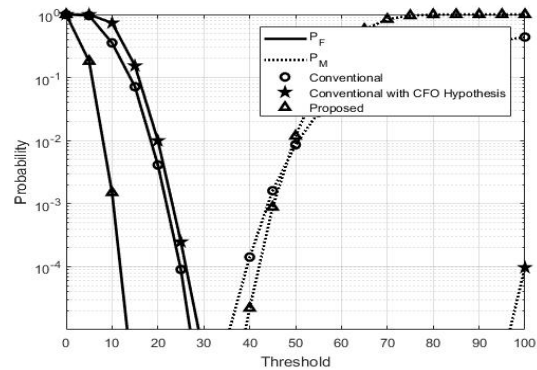


그림 4. PSS 검출 기법들의 오경보 및 검출 실패 확률 (SNR=0 dB)
Fig. 4. False alarm and missing probabilities of the PSS detection schemes (SNR=0 dB)

하는 것을 가정하였다. 그림 3과 그림 4는 SNR이 각각 -3 dB , 0 dB 일 때 검출 기법들의 오경보율 (false alarm probability) P_F 와 검출실패율 (missing probability) P_M 을 나타낸 것이다. -3 dB SNR에서 P_F 가 10^{-4} 의 성능을 달성하도록 임계값을 설정할 경우 제안하는 검출 기법과 상호상관 기반 검출 기법

은 각각 약 10^{-5} 과 10^{-4} 의 P_M 값을 가져 제안하는 검출 기법은 상호상관 기반 검출 기법 대비 약 10배 향상된 검출 성능을 달성할 수 있다. 가장 좋은 성능을 보이는 것은 주파수 오프셋 가설 기법과 같이 사용된 상호상관 기반 PSS 검출 기법이지만 다른 기법 대비 복잡도가 너무 높은 단점이 있다. 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 SNR이 0 dB인 경우에는 P_F 가 10^{-4} 의 성능을 달성하도록 임계값을 설정할 경우 모든 기법의 P_M 이 10^{-5} 이하가 되어 세 기법 모두 충분히 좋은 성능을 보인다. 이 경우 제안하는 검출 기법은 상호상관 기반 및 주파수 오프셋 가설 기법을 이용한 상호상관 기반 PSS 검출 기법 대비 각각 16.54%와 5.51%의 구현 복잡도를 가져 낮은 복잡도로 PSS 검출을 수행할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 시간 영역 PSS의 복소 공액 중심대칭 특성을 이용한 자기상관 기반 PSS 검출 기법을 제안하였다. 자기상관 기반 PSS 검출 기법은 상호상관 기반 PSS 검출 기법과 달리 주파수 오프셋으로 인한 PSS 검출 성능연화가 발생하지 않는다. 제안하는 자기상관 기반 PSS 검출 기법은 상호상관 기반 및 주파수 오프셋 가설 기법을 이용한 상호상관 기반 검출 기법 대비 16.54%와 5.51%의 낮은 계산 복잡도를 갖는 장점이 있다.

References

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

[2] 3GPP TS 38.104 v15.6.0, "NR Base station(BS) radio transmission and reception(release 15)," Jun. 2019.

[3] 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.

[4] Z. Zhang, J. Liu, and K. Long, "Low-complexity cell search with fast PSS identification in LTE," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no.

4, pp. 1719-1729, Feb. 2012.

[5] 3GPP TS 38.211 v15.5.0, "NR Physical channels and modulation(release 15)," Mar. 2019.

[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.

[8] 3GPP TSG RAN WGI Meeting #89 R1-1708160, "Remaining details for synchronization signals," May 2017.

[9] 3GPP TS 38.101-1 v15.5.0, "NR User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone(release 15)," Mar. 2019.

소민석 (Minseok So)



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

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]