

## 5G-Advanced Cell DTX/DRX 기반 네트워크 에너지 절감 연구

염화정, 박현우, 김선우

한양대학교 융합전자공학과

{ghkwjd47, stark95, remero}@hanyang.ac.kr

## 5G-Advanced Cell DTX/DRX-based Network Energy Saving

Hwajeong Yeom, Hyunwoo Park, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

## 요 약

본 논문은 다양한 트래픽 부하 조건과 duty cycle 조합에 따른 Cell DTX/DRX (discontinuous transmission/reception) 운용 시나리오를 비교분석하고, 그에 따른 에너지 절감 성능을 정량적으로 평가한다. 기지국의 슬롯 당 전력 소비를 계산하기 위하여 3GPP 에너지 모델을 활용하여 시뮬레이션 환경을 구축한다. 또한, PRB (physical resource block) 사용률을 기준으로 부하를 분류하고, 각 조건에서 에너지 효율 성능을 측정한다. 실험 결과, duty cycle이 0.5일 때 모든 부하 조건에서 가장 높은 NES (network energy saving) gain을 나타냈으며, low load 조건에서 최대 36.47%, light load 조건에서 31.32%, medium load 조건에서 27.65%의 절감 효과를 보였다.

## I. 서 론

최근 전세계적으로 5G 이동통신 네트워크 활성화가 진행되며 사용자들은 더 빠른 데이터 전송 속도와 안정적인 네트워크 환경을 경험할 수 있게 되었지만, 운영 비용 증가 및 5G 네트워크의 높은 에너지 소비로 인하여 탄소 배출량 증가 문제가 대두되었다[1]. 이를 해결하기 위하여 여러 연구에서 다양한 기술을 활용하여 전력 소비를 절감하고 환경적 영향을 최소화하는 방안을 모색해왔으며, 그 중 하나로 Cell DTX/DRX (discontinuous transmission/reception) 기반의 에너지 절감 기법이 활발히 연구되고 있다[2-4]. 하지만 기존 연구들은 Cell DTX/DRX 주기와 duty cycle을 고정값으로 설정하여 운용함에 따라, 시간에 따라 변화하는 트래픽 부하를 반영하지 못하고 에너지 절감 효율과 QoE (quality of experience) 간 균형을 적절히 달성하는 데 한계가 있다. 본 논문에서는 부하 수준에 따라 다양한 duty cycle을 적용하고, 각각의 조합에 대한 NES (network energy saving) gain을 비교분석함으로써 트래픽 조건별로 효율적인 Cell DTX/DRX 운용 전략을 도출한다.

## II. 에너지 모델

본 연구는 기지국의 슬롯 당 전력 소비를 계산하기 위하여 3GPP

표 1 기지국 전력 소비 모델에 대한 참조 구성

	Set 1 FR1	Set 2 FR1	Set 3 FR2
Duplex	TDD	FDD	TDD
System BW	100 MHz	20 MHz	100 MHz
SCS	30 KHz	15 KHz	120 KHz
Number of TRP	1	1	1
Total number of DL Tx RUs	64	32	2
Total DL power level	55 dBm	49 dBm	33 dBm
Total number of UL Rx RUs	64	32	2

에너지 모델을 활용한다[5]. 이 모델은 세 가지 참조 시나리오를 바탕으로 개발되었으며, 이는 표 1을 통하여 확인할 수 있다. 활성 상태의 기지국은 다운링크 송신 혹은 수신 작업을 위하여 모든 구성 요소가 완전히, 또는 부분적으로 작동 가능한 상태이다.

에너지 절약을 위하여 기지국은 특정 구성 요소를 비활성화하여 절전 모드로 전환한다. 절전 모드 상태의 기지국은 다운링크 송신이나 업링크 수신 작업을 진행할 수 없으며, 다른 절전 상태로의 전환도 불가능하다. 각 상태에서의 기지국 전력 값은 슬롯 단위로 산출되며, 딥 슬립 상태의 전력 수준을 기준으로 상대적으로 표현된다. 기지국은 성능을 기준으로 두 가지 카테고리로 분류되는데, 카테고리 1은 구현 난도가 높은 고급 기술을 가정한 모델, 카테고리 2는 최신 하드웨어 기술과 향후 기술 발전을 반영한 현실적인 모델로 여겨진다. 표 2에서는 각 기지국의 상대적인 전력 상태 값을 확인할 수 있다.

표 2 기지국 활성 및 수면 상태에 대한 상대 전력 값

	BS Category 1			BS Category 2		
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 1	Set 2	Set 3
Deep sleep	1			1		
Light sleep	25			2.1		
Micro sleep	55	50	38	5.5	5	3
Active DL	280	200	152	32	26	17.6
Active UL	110	90	80	6.5	5.8	4.2

이 모델은 스케일링 방식과 여러 파라미터에 의하여 결정되는 동적 전력 요소와 기지국의 전력 상태에 따라 달라지는 정적 전력 요소로 구성되어 있다. 활성 상태 다운링크 상태와 업링크 상태에서의 전력 소비는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$P^{DL} = s_a \cdot \frac{s_f \cdot s_p}{\eta(s_f \cdot s_p)} \cdot P_{dyn,joint} + s_a \cdot P_{dyn,ante}^{DL} + F \quad (1)$$

$$P^{UL} = s_a \cdot P_{dyn,ante}^{UL} + P_{static}^{UL} \quad (2)$$

위 식에서  $s_a$ 는 활성 송수신 장치의 비율,  $s_f$ 는 주파수 도메인에서의 자원 사용 비율,  $s_p$ 는 전송 중의 전력 밀도 비율을 의미하며, 연구된 기지국 구성과 기준 기지국 구성 간의 관계를 나타낸다.  $\eta(s_f, s_p)$ 는 전력 증폭기 계수로, 일반적으로 1이지만  $s_f \cdot s_p < 0.5$ 인 경우에는 0.76으로 설정된다.

### III. Cell DTX/DRX 알고리즘 설계

본 연구는 Cell DTX/DRX 방식을 통하여 에너지를 절감한다. Cell DTX/DRX는 셀 단위에서 에너지를 절감하기 위하여 특정 시간 동안 셀의 송수신 활동을 비활성화하는 기술이다. Cell DTX/DRX는 기지국의 활성 기간 및 비활성 기간으로 구성되며, 각각의 기간 동안 sleep mode가 다르게 적용된다. 활성 기간 동안 셀은 정상적으로 작동하며, 신호를 송수신한다. 이 기간에는 micro sleep mode는 가능하지만, 더 깊은 절전 모드는 활성화되지 않는다. 비활성 기간에는 셀이 신호를 송수신하지 않으며, 유휴 시간이 sleep mode의 transition delay 시간을 초과하면 더 깊은 절전 모드로 진입할 수 있다.

본 논문의 Cell DTX/DRX 알고리즘은 160ms의 주기를 기준으로 duty cycle을 변화시켜 각각의 traffic load에서의 NES gain을 확인하는 방식으로 구성된다. 기지국이 활성 상태일 경우, 트래픽을 요구하는 사용자에게 PRB (physical resource block)를 순차적으로 할당하며 데이터를 처리하고, PRB 사용량에 따라 전력 모델 기반의 소비 전력이 계산된다. 비활성 상태에서는 트래픽 처리가 중단되며, 고정된 sleep 전력이 사용된다. 알고리즘은 duty cycle에 따른 활성화/비활성화 구성과 사용자 트래픽 처리 절차를 반복하며, 이를 통해 총 에너지 소비량과 NES gain을 평가한다.

### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

제안한 알고리즘 성능을 검증하기 위해, 3GPP 에너지 모델을 기반으로 한 단일 셀 시뮬레이션 환경을 구성한다. 시뮬레이션 환경은 표 2의 BS Category 2 기지국을 기준으로 구성되며, 트래픽 모델은 FTP 3을 사용한다. 참조구조는 표 1의 Set 1 FR 1을 기반으로 한다. 전체 환경은 단일 셀 구조로 설정되며, 모든 사용자는 해당 셀 커버리지 내에 무작위로 위치한다.

시뮬레이션은 전체 시간 동안 duty cycle에 따라 활성화/비활성화 주기를 반복하며, 각 시나리오는 PRB 사용률을 기준으로 부하 수준을 low ( $\leq 15\%$ ), light ( $\leq 30\%$ ), medium( $\leq 50\%$ )으로 구분한다. 사용자 트래픽은 FTP (file transfer protocol) 모델을 사용하여 생성하며, 이는 포아송 분포를 따른다. 각 사용자 당 전송해야 할 데이터는 0.5 MB로 설정된다. 각 부하 조건에 대하여 duty cycle을 0.5, 0.75, 0.9로 설정한 세 가지 시나리오를 구성하고, 총 에너지 소비량을 측정한 뒤 baseline(duty cycle이 1인 경우)와 비교하여 NES gain을 계산하였다. NES gain은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{NES gain} = 1 - \frac{\text{EC}_{\text{DTX}}}{\text{EC}_{\text{baseline}}} \quad (3)$$

그림 1은 각 트래픽 부하 조건에서 duty cycle 값에 따른 NES gain 변화를 시각적으로 나타낸 것이다. Low load에서는 duty cycle이 0.5일 때 NES gain이 36.47로 제일 높았으며, duty cycle이 0.75와 0.9인 경우 각각 18.39%, 7.31%로 감소하는 경향을

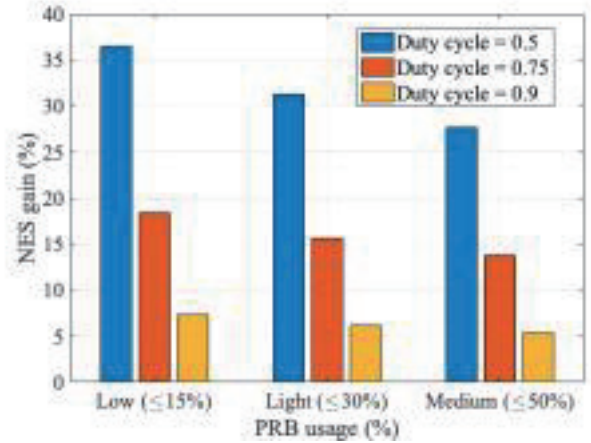


그림 1 Cell DTX/DRX 기반 NES gain

보였다. Light Load( $\leq 30\%$ ) 조건에서도 유사한 패턴이 나타났으며, duty cycle이 0.5일 때 31.32%, 0.75일 때 15.69%, 0.9일 때 6.24%의 NES gain이 측정되었다. Medium Load( $\leq 50\%$ ) 조건에서는 NES gain이 전반적으로 더 낮게 나타났으며, duty cycle이 0.5, 0.75, 0.9인 경우 각각 27.65%, 13.83%, 5.42%로 측정되었다. 이처럼 모든 부하 조건에서 duty cycle이 낮을수록 NES gain이 증가하는 명확한 추세를 보였다.

### V. 결론

본 논문에서는 다양한 트래픽 부하 조건과 duty cycle 조합에 따른 Cell DTX/DRX 운용 시나리오를 비교분석하고, 에너지 절감 성능을 정량적으로 평가하였다. 실험 결과, duty cycle이 낮을수록 NES gain이 증가하는 경향을 보였으며, 동일한 duty cycle에서도 부하 수준이 높아질수록 절전 효과는 감소하였다. 이는 sleep 구간의 길이가 deep sleep 진입 가능성에 직접적인 영향을 미친다는 구조적 특성에 기인한다. 이러한 결과는 Cell DTX/DRX 운용 시 트래픽 부하와 duty cycle을 함께 고려하여 운용 전략을 설계해야 함을 시사하며, 조건에 따라 유의미한 에너지 절감 효과를 기대할 수 있음을 보여준다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00396828, AI 기반 저전력 5G-A O-DU/O-CU기술 개발)

### 참고 문헌

- [1] GSMA, "5G energy efficiencies: Green is the new black," 2020.
- [2] S. Tombaz et al., "Energy Efficient Network Deployment With Cell DTX," *IEEE Commun. Letters*, 2014
- [3] G. Andersson et al., "Energy efficient heterogeneous network deployment with cell DTX," *IEEE Int. Conf. Commun.*, 2016
- [4] J. G. Borja et al., "Towards 6G: Leveraging Advanced Sleep Modes to Improve Energy Performance," *IEEE Int. Conf. 6G Net.*, 2024
- [5] 3GPP, "Study on network energy savings for NR," 3GPP TR 38.864, vol. 18.1.0, 2024