Regular paper

Journal of the KIECS. pp. 917-926, vol. 14, no. 5, Oct. 31. 2019, t. 97, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2019.14.5.917

무선자원 운용방안에 따른 밀리미터파 대역에서의 드론형 기지국 성능분석

정민우*

Performance Analysis of Drone-type Base Station on the mmWave According to Radio Resource Management Policy

Min-Woo Jeong*

요 약

현재 군 지휘통제를 위한 통신용도로 전술정보통신망 TICN이 개발되어 양산 및 보급중이나, 3.5세대 이동통신기술인 WiBro를 기반으로 하고 있어 실제 운용상황에서 기술적 한계가 드러나고 있다. 이에 따라 통신 가시선 확보 어려움 및 신속한 통신망 구성 제한과 같은 기술적 한계를 극복하기 위한 대안으로 드론형 기지국 플랫폼이 주목받고 있다. 본 연구에서는 밀리미터파 대역 중 셀룰러 통신용도로 가장 적합하다고 판단되는 28GHz 대역에서 드론형 기지국 운용을 구현한 시뮬레이션 성능평가를 수행하였다. 구체적으로는 다중 셀 토폴로지 상에서 주파수 재사용 및 스케줄링과 같은 무선자원 운용방안에 따른 기지국 전송률 및 단말 간 전송률 공정성의 변화양상을 분석하였고, 이를 통해 드론형 기지국 운용에 대한 통찰을 제공하고자 하였다.

ABSTRACT

At present, TICN has been developed and distributed for military command control. TICN is known as the 3.5G mobile communication technology based on WiBro, which shows technical limitation in the field operation situation. Accordingly, the drone-type base station platform is attracting attention as an alternative to overcome technical limitations such as difficulty in securing communication LoS and limiting expeditious network configuration. In this study, we performed simulation performance evaluation of drone-type base station operation in 28 GHz that is considered most suitable for cellular communication within mmWave frequency band. Specifically, we analyzed the changes in throughput and fairness performance according to radio resource management policies such as frequency reuse and scheduling in multi-cell topology. Through this, we tried to provide insights on the operation philosophy on drone-type base station.

키워드

Drone-type Base Station, mmWave, Frequency Reuse, Scheduling
드론형 기지국, 밀리미터파, 주파수 재사용, 스케줄링

Ⅰ. 서 론

기술의 발전에 따라 전쟁양상이 재래식 화력전에서 네트워크 중심전으로 변화하면서 정보공유, 지휘 속도 향상, 신속한 작전 전개의 중요성이 부각되고 있다. 군 전술통신용으로 사용되던 아날로그 방식의 스파이

* 교신저자 : 국방기술품질원 품질경영본부
• 접 수 일 : 2019. 09. 02
• 수정완료일 : 2019. 09. 23
• 게재확정일 : 2019. 10. 15
• Received : Sep. 02, 2019, Revised : Sep. 23, 2019, Accepted : Oct. 15, 2019
• Corresponding Author : Min-Woo Jeong
Directorate of Quality Management, Defense Agency for Tech. and Quality
Email : mwjeong@dtaq.re.kr

더 체계에서는 제한된 수준의 데이터 통신을 지원하였으나 전장에서 요구하는 음성, 데이터, 영상 등의 대용량 정보처리가 제한되었기 때문에 이를 보완하는 TICN(전술 정보통신망, Tactical Information Communication Network)이 개발되었다. TICN은 망 제어 체계, 교환접속체계, 전술 이동통신체계, 소용량 무선전송체계로 구성되어 네트워크 중심 환경에서 C4ISR 통합전투능력을 보장하기 위한 지휘통제 통신을 지원한다. 하지만 15년 전 개발이 완료된 3.5세대 이동통신기술인 WiBro를 기반으로 하고 있기 때문에 현 시점의 이동통신 서비스에 비해 다음과 같은 기술적 한계점을 가지고 있다. 먼저 다단계 중계 노드로 인한 통신 지연 문제가 발생할 수 있고, 무선장비의 서비스 지역 이탈 시 통신이 불가능해지고 타 장비로의 핸드오버가 불가하다는 한계점이 있다. 또한 가시선(LoS, Line of Sight) 통신으로 데이터 교환이 이루어지는데 산악 지형이 많은 국내 지형으로 인해 통신 가시선을 확보하기 어려운 상황에 놓일 개연성이 크다. 그리고 신속한 노드 통신망 구성이 제한되고 기동간 환경적 요인으로 인한 노드접속에 어려움이 발생할 수 있어 전술단위 부대에 대한 적시적 전술통신 제공에 한계가 있다[1]. 이에 대해 유연한 망 설치 및 가시선 확보를 용이하게 하여 현재 발굴된 TICN의 운용상 한계점을 극복하기 위한 수단으로 드론형 플랫폼을 대안으로 제시할 수 있다.

드론 플랫폼은 높은 이동성과 운영의 간편함, 범용성이 장점으로 5G 기반 재난현장탐사 장치 및 MANET 라우팅 프로토콜을 적용한 교통위반 단속 장치와 같이 통신과 결합한 활용 가능성에 대해 활발히 연구되고 있다[2-3]. 그리고 군용 통신망에서 현재에 비해 높은 전송률을 보장하기 위해서는 넓은 대역폭 확보가 필수적인데, 밀리미터파와 같이 높은 주파수 대역을 채택 시 수백 MHz 이상의 주파수 대역폭을 수월하게 확보하여 고속 데이터 전송을 달성할 수 있다. 특히 공중과 지상 간의 통신에서는 가시선 확보가 용이하여 직진성이 강한 고주파 특성을 더욱 잘 활용할 수 있게 된다. 본 연구에서는 드론형 기지국 3차원 배치를 고려한 밀리미터파 통신망 시뮬레이터를 사용하여 주파수 재사용, 스케줄링 측면의 무선자원 관리방안에 따른 기지국 성능분석을 수행하였다. 이를 통해 밀리미터파 주파수 대역을 사용한 드론형 기지국의 복수 배치 시나리오에서 기지국 전송률 및 단말간 전송률 공정성이 접속 단말 수 및 무선자원 운용 정책에 따라 변화하는 양상에 대해 알아보았다.

II. 관련분야 연구현황

개념상에서만 존재했던 드론형 기지국이 실현가능하게 된 가장 큰 요인은 무선통신기술의 발전으로 기지국의 무게와 크기가 소형화되었고 안테나부와 트래픽 처리부의 분리가 가능해졌기 때문이다. 또한 통신기술 별로 자원할당방식이 다양하기 때문에 드론형 기지국에 적합한 통신기술을 선택하는 것 또한 중요한 연구 이슈가 되었다. Chandrasekharan 그룹은 공중 통신망 구현을 위해 LTE와 WiFi의 적용 가능성을 검토하였는데, 구체적으로는 Ray Tracing 방법을 통해 도출한 채널모델로 고도, 노드 수, 서비스, 기지국 간의 거리에 따라 전송실패율, 지연시간, 전송속도에 대한 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 그 결과 전송속도, 지연시간 등 전반적 성능이 WiFi에 비해 LTE가 우수하다는 것과 노드 수가 성능 양상에 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있었고, 이러한 결과는 무선자원 할당방식의 차이로 인한 것으로 분석되었다[4].

신호 송수신을 위해 고도의 안테나 지향성이 요구되는 밀리미터파 통신망 운용환경에서는 전파특성의 차이로 인하여 기존 마이크로파 이동통신망과 커버리지 및 통신속도 측면에서 극적인 변화가 있을 것으로 예상된다. 이와 관련하여 밀리미터파 셀룰러 통신망의 성능과 관련한 초기 연구들이 다양한 방면에서 수행되었다. 28 GHz 대역 주파수의 셀룰러 통신망 적용 가능성을 알아보기 위해 수행된 3섹터 형태의 기지국 환경 시스템 레벨 시뮬레이션 연구에서는 서비스 영역 상 SINR 측면의 성능분석만을 수행하였고 실제 전송속도 측면의 성능분석이 이루어지지 못했다는 것과 기존 LTE 망과 동일한 안테나 형태를 고수하였다는 한계점을 가진다[5]. 73 GHz 대역을 사용한 셀룰러 망 성능평가 연구에서는 신호전달이 양호한 영역에서는 높은 전송속도를 얻을 수 있으나, 높은 거리감쇄로 인하여 셀 외곽부에서는 전송속도가 상대적으로 낮게 측정되었다. 따라서 밀리미터파 등의 높은 주파

수 대역을 사용한 통신망의 원활한 운용을 위해서는 조밀한 기지국 배치가 필요하다는 결론을 도출하였다[6]. 기지국을 구성하는 안테나 빔 폭과 관련한 Nassar의 연구에서는 900 MHz, 2.65 GHz 주파수 대역에서 65°의 빔 폭으로 섹터와 기지국을 구성했을 때에 비하여 30° 빔 폭으로 구성했을 때 약 1.2 배의 전송률 증대가 있었으나, 밀리미터파 주파수대역에서는 약 3배가 증가하였음을 실험적으로 증명하였다. 그리고 셀 경계부에 있는 단말기의 QoS(: Quality of Service)가 좁은 빔 폭 기지국에서 개선되었음을 밝혔다[7]. 하지만 위 연구들에서는 주파수 재사용 및 스케줄링과 같은 무선자원 관리 요소를 고려하지 않고 Shannon-capacity 이론에 기반한 최대 전송 가능치를 전송용량으로 간주하였다. 이에 대비되는 Ford의 연구에서는 NS-3 LTE 모듈을 기반으로 밀리미터파 시뮬레이터를 구현하여 성능시험을 수행하였다. 해당 연구에서는 스케줄링 요소가 고려되었으나, 단말기 개수가 10개로 제한되었다는 한계점을 가진다[8]. 위 결과는 스케줄링이 합리적인 통신망 성능 측정을 위해 필수적인 무선자원 관리 요소이기 때문에 접속 단말의 수가 변화함에 따라 무선자원 운용 정책이 드론형 기지국 통신망 성능에 미치는 영향 분석이 필요하다는 것을 시사한다.

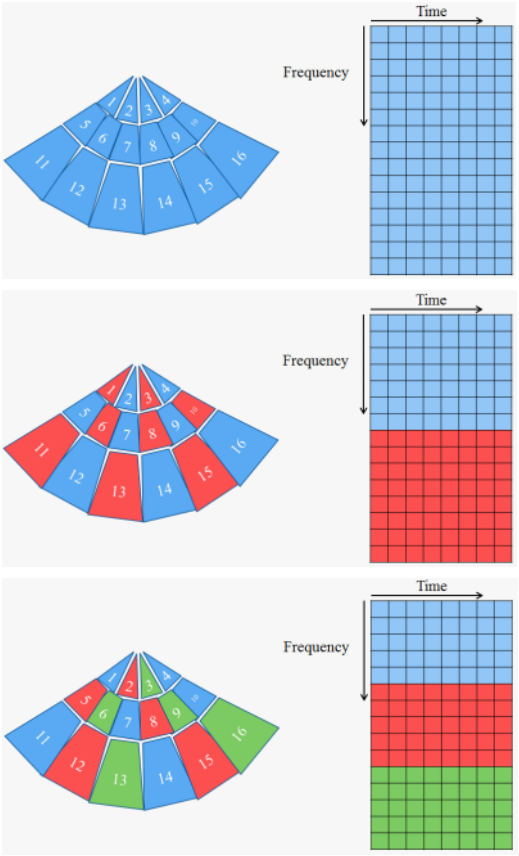

그림 1. 순환적 주파수 재사용(계수 1,2,3)
Fig. 1 Recursive beam-based frequency reuse (BRFR1, BRFR2, BRFR3)

III. 무선자원 운용방안

3.1 순환적 주파수 재사용

셀룰러 통신 시스템에서는 하향링크 송수신의 핵심 기술인 OFDMA(: Orthogonal Frequency Division Multiple Access)의 부반송파 간 직교특성으로 인해 셀 내부간섭을 원천적으로 방지할 수 있다. 하지만, 밀집 셀 배치환경에서는 셀 간 간섭이 시스템 성능을 제한하는 주요 요소로써 작용하게 되는데, 특히 셀 경계지점에 위치한 단말의 성능 저하에 큰 영향을 준다. 셀 간 간섭 조정기술의 일환으로 개발된 주파수 재사용 기법은 기지국 내에서 영역에 따라 사용 주파수대역을 분할함으로써 간섭을 경감시켜 SINR을 개선시키는 효과가 있다. 하지만 전체 주파수 대역을 분할하는 주파수 재사용 계수가 증가할수록 단일 셀 내 가용 무선자원이 감소하기 때문에 SINR 측면의 이득과 가용 무선 자원량 간의 균형을 고려해야 한다.

밀리미터파 주파수 대역에서 드론형 기지국 운용 시 현재 상용 이동통신망의 주파수 대역에 비해 큰 거리감쇄가 발생한다. 이를 극복하기 위해 좁은 빔 폭을 이용한 안테나를 다수 배치하는 기지국을 설계해야 하고, 기지국 간 간격 또한 더 조밀하게 배치함으로써 셀 간 간섭이슈가 크게 작용할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 총 48개 빔이 3계층으로 적층된 드론형 기지국 설계안을 사용하였으며 이는 일반 상용 이동통신망의 3섹터 구조에 비해 좁은 공간에 빔이 밀집한 구조에 해당한다. 기존 주파수 재사용방안과 같이 빔 수만큼 전체 가용 주파수 대역을 나누어 할당하면 각 빔에서 활용 가능한 무선자원의 양이 과도하

게 줄어들게 되므로, 재사용 계수 N으로 분할된 주파수 할당대역을 빔 인덱스에 따라 순환적으로 할당하는 빔 기반 순환적 주파수 재사용 방안(BRFR: Beam-based Recursive Frequency Reuse)을 그림 1과 같이 제시하였다. 전체 주파수 대역을 나누는 재사용 계수 N에 따라 각각 BRFR N 형식으로 명명하고, N에 따른 전체 주파수 자원 분할 방식과 순환적 주파수 할당 패턴을 그림으로 나타내었다. 제시된 주파수 재사용 방안을 이용하면 빔 단위 가용 무선 자원량을 과도하게 감소시키지 않으면서도 인접 빔과 차별적인 주파수 대역을 사용할 수 있기 때문에 빔 간 간섭량을 크게 경감시킬 수 있다. 본 연구에서는 SINR 증가와 가용 무선 자원량 간의 트레이드오프를 고려하여, 주파수 재사용 계수를 1,2,3으로 제한하고 시뮬레이션을 진행하였다.

3.2 스케줄링 방식

무선자원 관리방안의 핵심요소인 스케줄링 과정에서는 기지국이 단말에게 어떤 무선자원을 얼마나 할당할지를 결정하기 위해 주파수 효율과 단말 간 전송률 공정성(이하 공정성), 복잡도 및 QoS 등을 고려한다. 또한 스케줄링 우선순위를 결정하기 위한 기준값(m) 산출을 위해 전송 큐 상태, 채널상태, 자원할당 이력, 버퍼 상태 등을 추가적으로 고려할 수 있다. 스케줄링 방식은 목적에 따라 그 구현방향이 망 운영자의 철학과 정책에 따라 다양할 수 있기 때문에 엄격하게 표준으로 제정되지는 않는다. 본 절에서는 다섯가지 대표적인 스케줄링 방식인 round robin, max throughput, best CQI, proportional fair, resource fair 스케줄러에 대해 알아본다. t는 스케줄링이 수행된 시점, k는 무선자원의 인덱스, i는 단말의 인덱스를 의미한다.

먼저 round robin(이하 RR) 스케줄러는 채널 상태와는 무관하게 단위 무선자원을 단말들이 순차적으로 점유하는 스케줄링 방식이다. 자원분배 측면에서 단말들에게 높은 공정성을 제공할 수 있지만, 순서대로 임의의 무선자원이 배분되므로 시스템 용량이 감소하게 된다. round robin 스케줄링 방식은 세부적으로는 시간영역 기준[9], 또는 시간/주파수 영역 기준[10]의 무선자원 분배 방식으로 구분할 수 있다.

초기의 max throughput(이하 MT) 스케줄러는 비선형 계획법을 사용하여 OFDM 시스템 상에서 용량을 최대화하기 위해 고안되었으나 높은 계산 복잡도로 인해서 짧은 시간 내에 자원할당을 완료해야 하는 실시간 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다는 단점을 가지고 있었다[11]. 이와 같은 복잡도 문제를 개선하기 위해 단말 피드백에 포함된 SINR 맵핑 정보를 사용한 차선적 선형모델이 제시되었고, 셀 용량과 공평도 측면에서도 기존의 비선형 MT 스케줄러에 근접한 성능을 보였다[12]. MT 스케줄링 기준값은 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{t,k,i}^{MT} = r_{k,i}(t) = \log_{10}\left[1 + SINR_{k,i}(t)\right] \quad (1)$$

Best CQI 스케줄러에서는 기지국이 단말로부터 수신한 CQI(: Channel Quality Indicator) 피드백들을 비교하여 각 무선자원에 대해 가장 높은 CQI 피드백을 송신한 단말의 채널상태가 가장 우수하다고 판단하고 해당 단위자원을 할당한다. 이는 셀 중앙에 위치해서 무선채널 상태가 우수한 단말이 무선자원들을 독점하는 경향이 있으므로 셀 용량 측면에서 우수한 성능을 보이지만 공평도 측면에서 타 스케줄링 방식에 비해 떨어진다. 단말에서 측정된 CQI는 0~15 범위 내 정수로 표현되고, 단말이 파일럿 참조신호를 수신한 시점으로부터 피드백 지연시간 t_d 이후에 기지국에서 자원을 할당하기 위한 변수로 사용되게 된다. Best CQI 스케줄링 기준값은 수식 (2)와 같이 표현된다.

$$m_{t,k,i}^{BestCQI} = CQI_{k,i}(t - t_d) \quad (2)$$

Proportional Fair(이하 PF) 스케줄러는 다수의 단말이 운용되는 통신시스템 상에서 무선자원을 효율적으로 공유하기 위해 설계되었다. 초기에 시간영역 만을 고려한 스케줄링 시스템 상에서 구현되었으나, 이후 시간/주파수 영역 상에서 OFDMA를 활용하는 LTE 시스템에 널리 적용되었다. PF 스케줄링 방식의 주된 목표는 다중 사용자 다이버시티 특성을 활용해 전반적인 시스템 용량과 공정성의 양 측면 모두 우수한 성능을 달성하는 것이다. PF 스케줄링 방식의 기준값은 수식 (3),(4) 같이 표현할 수 있다. $R_{k,i}$는 (1)에서 표현된 현재 전송가능 용량 $r_{k,i}$값의 평균치를 의미하며 업데이트 윈도우 크기인 t_c는 t 시점의 $R_{k,i}$를 계산하기 위해 고려하는 이전 기간의 $R_{k,i}$ 개수를 의

미한다. 따라서 t_c가 크면 작은 경우에 비해 $R_{k,i}$ 변화량이 완만하게 나타난다.

$$m_{t,k,i}^{PF} = \frac{r_{k,i}(t)}{R_{k,i}(t)} \quad (3)$$

$$R_{k,i}(t) = (1-\frac{1}{t_c}) \times R_{k,i}(t-1) + \frac{1}{t_c} \times r_{k,i}(t-1) \quad (4)$$

Resource Fair(이하 RF) 스케줄러는 기지국이 접속한 단말들에게 동일한 비율로 무선자원을 할당하되, 자원할당 시 기지국 용량을 최대화 하는 방향으로 단말선택을 수행한다[13]. 하지만 초기에는 동일 비율로 무선자원을 단말에게 분배하는 단계에서는 채널상태가 고려되지 않았기에 이를 보완하기 위한 연구가 진행 되었고, 특정 스케줄링 타이밍에 채널상태가 우수하고, 할당이 결정된 무선자원을 적게 가진 단말에게 우선순위를 높게 두는 방식이 제안되었다[14].

Ⅳ. 시뮬레이션 구성

드론형 기지국의 성능평가를 위한 실험은 기지국의 3차원적 위치특성을 반영한 안테나 배치구조가 구현된 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해 다음과 같은 절차로 진행된다. 시뮬레이션이 시작되면 먼저 초기 파라미터 세팅이 수행된 후, 시뮬레이션을 위해 임의의 위치에 배치된 다수 단말의 이동속도 및 위치를 확인한다. 기지국은 단말로부터 피드백 정보를 수신하여 스케줄링 방식에 따라 채널상태를 고려, 또는 고려하지 않고 단말에 무선자원을 할당한다. 이후 단말에 대한 스케줄링 결과에 따라 링크 성능을 계산하여 하향링크 전송률이 결정된다. 이후 단말은 차후 피드백을 위한 채널상태를 결정하여 상향링크를 통해 CQI 정보를 수신한다. 상기 일련의 과정을 거친 후에도 시뮬레이션 기간이 만료 전이라면 다시 루프를 수행하고, 시뮬레이션 기간이 만료되었다면 시뮬레이션 결과 처리 프로세스로 진입하게 된다.

시뮬레이션에 적용한 주요 파라미터는 다음 표 1과 같다. ITU-R은 밀리미터 파 중 24.25~29.5 GHz의 대역을 5세대 이동통신 시스템에서 광역 셀 및 스몰 셀 용도로 사용하기를 권고하였고, 한국, 미국, 일본 등 주요 국가들은 28 GHz 주파수 대역을 우선적으로 검토하였다[15]. 따라서 본 연구에서도 드론형 기지국 운용 주파수대역으로 해당 대역의 1GHz 대역폭을 사용 주파수 대역폭으로 설정하였다. 그리고 전자통신연구원에서 수행한 기가코리아 프로젝트의 물리계층 설계를 참고하여[16-17] 최대 400 km/h의 단말 속도에서 이론적으로 기지국 당 최대 100 Gbps의 전송속도를 제공할 수 있도록 무선 파라미터를 설정하였다.

표 1. 시뮬레이션 적용 파라미터
Table 1. Parameters for simulation application

Simulation parameters	Values	
Frequency	28 GHz	
Bandwidth	1 GHz	
Resource Block BW	2.16 MHz	
Num of RBs per time slot	52×8	
Subcarrier spacing	180 kHz	
Resource Elements per RB	1, 6th sfs	120 RE
	etc	184 RE
Traffic model	Full buffer traffic	
Frame length	2ms(=10 subframes)	
Subframe length	0.2ms(=2 time slot=1TTI)	
Simulation Time	50 TTI×10 times repeat	
Feedback Delay	2 TTI	
Tx mode	SISO	
eNB Tx power	40W	
CQI range	0~15	
Inter-site distance	400 m	
Drone-type eNB height	20 m	
UE height	1.5 m	
UE mobility	3 m/s	

실험은 순환적 주파수계수 1,2,3에 3장 2절에서 다루었던 5가지 스케줄링 방식(RR, MT, Best CQI, PF, RF)을 각각 적용하였다. 좌표계 중앙의 드론형 기지국을 6개의 이웃 기지국이 400m 간격으로 둘러싸는 다중 셀 토폴로지 구현하였고, 중앙의 기지국 커버리지 내에 10~1000개의 단말을 배치하였다. 다중 셀 토폴로지 상에서 주파수 재사용 요소가 적용된 단말의 수신 SINR은 수식(5), (6)으로 표현할 수 있다. 이때 g는 단말 i가 접속한 기지국의 인덱스, j는 단말 i가 접속한 기지국 내 빔의 인덱스, $I_{i,g,j,k}$는 주변 셀들로부터 받는 간섭신호 세기의 합, $K_{FR-n,j}$는 주파수 재사용 계수 n을 적용했을 때 빔 j 내에서 사용가능한 무선자원의 집합을 의미한다.

$$SINR_{i,g,j,k} = 10\log_{10}\left(\frac{P_{rx,i,g,j,k}}{N_{thrmal} + I_{i,g,j,k}}\right) \quad (5)$$

$$I_{i,g,j,k} = \sum^{1 \le p \le 7}\ \sum_{h \in K_{FR-nj}}^{1 \le h \le 48} P_{rx,i,p,h,k} - P_{rx,i,g,j,k} \quad (6)$$

상기한 각 케이스 별로 50회의 스케줄링을 수행하는 루틴을 10회 반복하여 단말의 평균 데이터 수신 속도를 산출하였다. 그리고 단말들의 데이터 수신 속도 총합을 기지국 전송률로 가정하였고, 단말 간 수신 속도의 공정성 평가를 위해 수식 (7)과 같은 Jain's fairness 지표를 사용하였다[18]. 이때 N은 전체 단말기 수, i는 단말기 인덱스, x_i는 단말 i가 수신한 평균 데이터 속도를 의미한다.

$$Fairness\ J(x) = \frac{(\sum_{i=1}^{N} x_i)^2}{N\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \quad (7)$$

Ⅴ. 드론형 기지국 성능평가

하단의 그림 2는 총 48개 빔이 1계층 8°, 2계층 25°, 3계층 45° 하향각도로 구성된 드론형 기지국 플랫폼을 다중 셀 토폴로지 형태로 구성했을 때의 SINR 분포도이다. 각 위치의 픽셀에서 단말 수신안테나 이득은 모든 방향에 대해 0 dB로 가정하였고, 기지국 송신파워 40W를 적용하였다. 주파수 재사용 계수 1을 적용했을 때는 주변 빔으로부터의 간섭이 극심했기 때문에 대부분 영역에서 5dB이하의 낮은 SINR이 나타났으나, 주파수 재사용계수가 2,3으로 증가함에 따라 전체 평면의 SINR이 크게 개선되고 있음을 알 수 있다. 구체적으로는 BRFR1 적용 시 SINR 최소/최대 값은 -16.7dB/14.3dB, BRFR2 적용 시 -13.4dB/ 18.2dB, BRFR3 적용 시 -11.8dB/22.1dB으로 나타났으며 SINR 평균값은 각각 0.40dB/4.3dB/7.1dB으로 산출되었다.

스케줄링 방식 간 셀 용량 측면 비교결과는 그림 3과 같이 나타났다. 그래프 상에서는 순환적 주파수 재사용계수가 증가할수록 용량이 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 주파수 재사용 계수가 증가하여 단말의 수신 SINR은 개선되었으나, 가용 주파수자원이 감소로 인한 영향이 더 크게 작용하였기 때문이다. Full buffer traffic이 적용된 중앙의 드론형 기지국에 1000

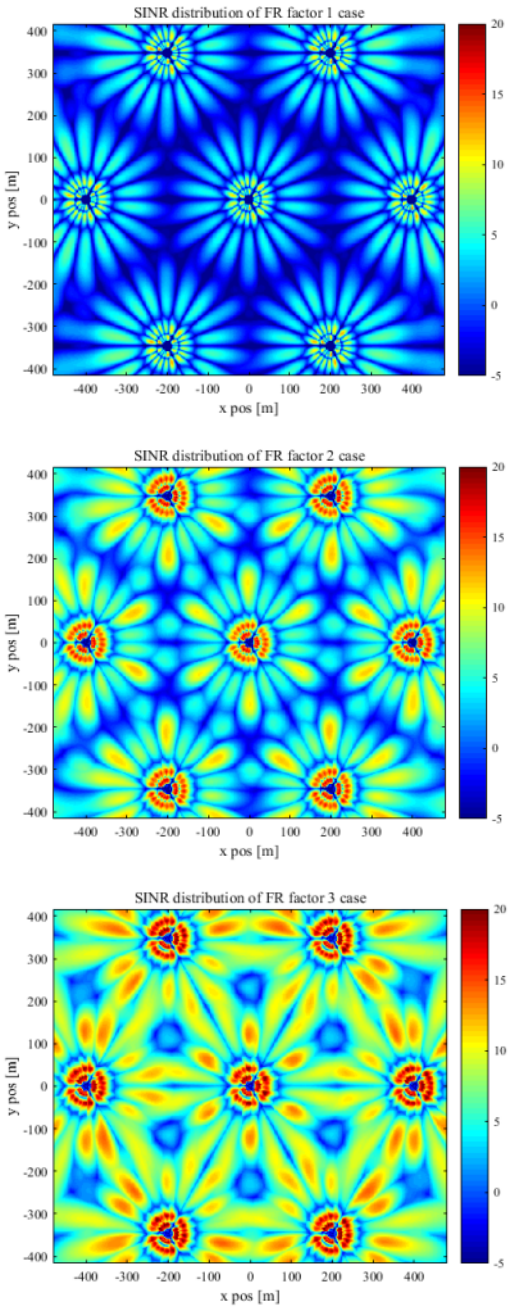

그림 2. 다중 셀 배치에 의한 드론형 기지국 SINR 분포도(주파수 재사용계수 1,2,3)
Fig. 2 SINR distribution of drone-type BS by multi-cell topology(BRFR1, BRFR2, BRFR3)

개 단말이 접속했을 때, MT 스케줄러가 적용된 기지국의 셀 용량은 BRFR1에서 약 57.6 Gbps, BRFR2에서 51.7 Gbps, BRFR3에서 약 38.5 Gbps로 나타났다. 이처럼 100 Gbps를 이론적 최대 셀 용량으로 설계하였더라도, 단말 위치의 임의배치와 무선자원 운용정책의 적용으로 인해 실제 망 운용상황에서 전송률 성능이 이론적 최대치와 차이가 나는 것을 알 수 있다. 스케줄러 별 셀 용량 성능 비교에서는 MT 스케줄러와 Best CQI 가 가장 우수하게 나왔으며, RR 스케줄러가 가장 낮은 셀 성능을 보였다. 이는 단말에 무선자원 할당 시 채널상태를 전혀 고려하지 않은 채 임의의 자원을 할당하였기 때문이다. 단말의 수가 증가할수록 스케줄링 방식 사이의 전송률 성능 차이가 커지는 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 단말 수가 적을 때는 기지국 내 다수의 빔에 단말이 단독으로 접속하거나, 또는 적은 수의 단말이 접속하므로 자원할당 방식의 영향이 비교적 작게 나타난다. 그러나 단말의 수가 증가함에 따라 개별 빔 접속 단말의 수 또한 증가하므로 단말 자원할당을 위한 경쟁이 발생함에 따라 스케줄링의 영향이 상대적으로 크게 작용한 것으로 해석된다.

스케줄링 방식에 따른 공정성 지표 비교결과는 그림 4와 같이 나타난다. 앞의 그림 2에서 볼 수 있듯이, 드론형 기지국을 구성하는 안테나의 하향각도에

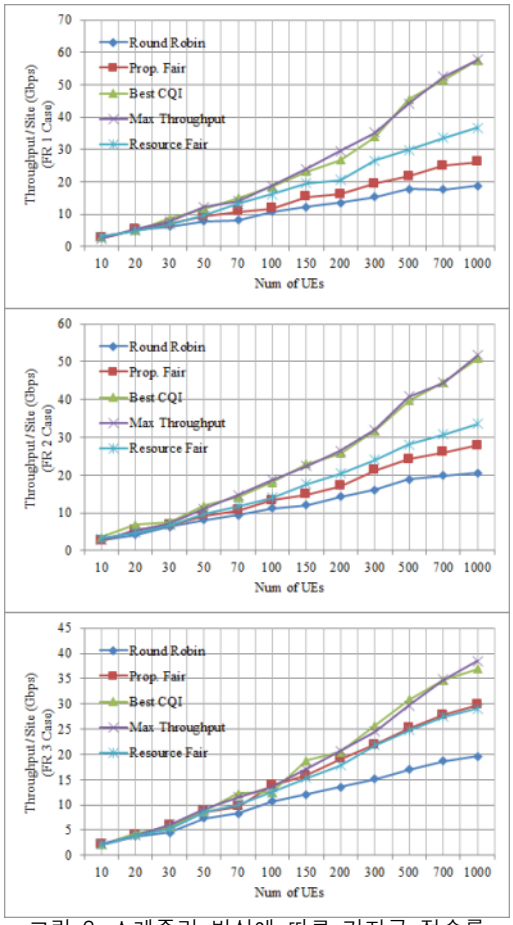

그림 3. 스케줄링 방식에 따른 기지국 전송률 (주파수 재사용계수 1,2,3)
Fig. 3 BS throughput according to the scheduler (BRFR1, BRFR2, BRFR3)

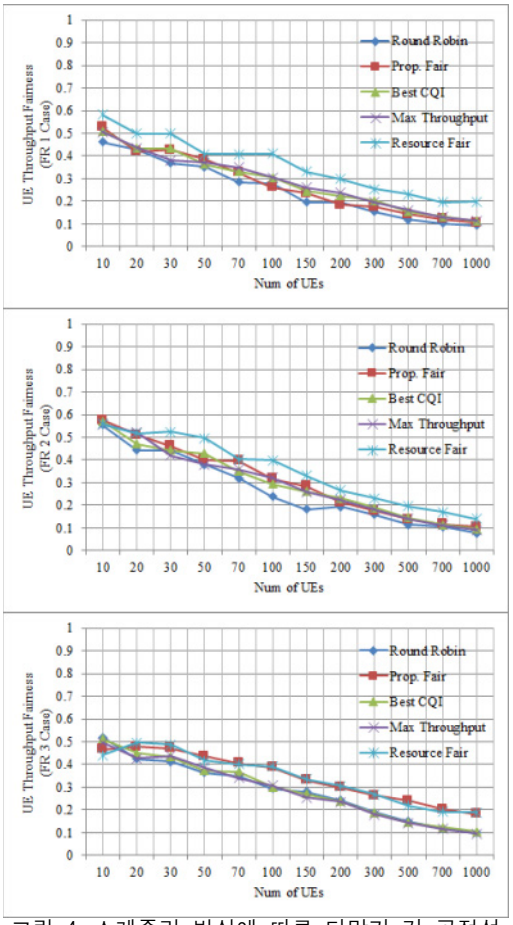

그림 4. 스케줄링 방식에 따른 단말기 간 공정성 (주파수 재사용계수 1,2,3)
Fig. 4 Fairness between terminals according to the scheduler(BRFR1, BRFR2, BRFR3)

따라 셀 영역의 넓이가 다르게 나타난다. 그리고 기지국 간 경계부에 위치한 바깥쪽 빔 영역이 상대적으로 넓기 때문에, 단말 위치의 균일한 분포를 가정했을 때 바깥쪽 빔에 다수의 단말이 접속함으로써 한정된 자원을 나누어 공유할 확률이 높다. 이에 비해 기지국 중앙부에 위치한 안쪽 빔에 접속한 단말은 상대적으로 충분한 양의 주파수 자원을 할당받을 개연성이 높다. 이러한 불균형은 기지국 중심부의 제한된 커버리지와 적은 접속단말 수의 조합에 의해 발생하며, 전체 단말 수가 증가할수록 이러한 경향성은 심화된다. 본 연구에서 공정성 지표로 사용한 Jain's fairness는 0과 1사이의 값으로 나타나며, 모든 단말이 동일한 전송률을 제공받았을 때 공정성 지표는 1, 단말 간 전송률 차이가 커질수록 0에 가깝게 나타난다. 그림 4에서는 단말 수가 증가할수록 공정성 지표가 감소하는 경향성을 확인할 수 있다. 스케줄링 방식 간 비교를 통해서는 RF 스케줄러가 타 스케줄링 방식에 비해 우수한 공정성 성능을 보이는 것을 알 수 있다. BRFR3 적용 시에는 RF 스케줄러와 PF 스케줄러가 전 단말 수 구간에서 유사한 공정성을 보였으나, BRFR1 적용 시에는 RF 스케줄러가 더 높은 공정성을 보였다. 이는 가용 무선 자원량이 적을 때에 비해 가용 무선 자원량이 많을 때 최적화 연산을 거치는 RF 스케줄링 방식의 장점이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 분석된다.

Ⅵ. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 드론형 기지국 운용상황을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 다중 빔 형태로 구성된 기지국에서 적용 가능한 순환적 주파수 재사용 방식에 5종의 스케줄링 방식(RR, BR, Best CQI, MT, RF)을 조합하여 드론형 기지국의 성능을 전송률과 단말 간 전송률 공정성 측면에서 분석하였다. 분석 결과, 전송률 측면에서는 Best CQI/MT 스케줄러가 우수하였고 단말 수가 증가할수록 그 차이가 크게 나타났다. 공정성 측면에서는 RF 스케줄러가 우수하였고, 가용 자원의 수가 증가할수록 그 차이가 명확해짐을 확인할 수 있었다. 단말 수가 증가할수록 전송률 수치는 증가하는데 비해 공정성은 감소하는 경향성을 보였는데, 이 두 성능간의 트레이드 오프를 적절하게 고려하여 드론형 기지국의 무선자원 운용방식을 결정하는 것이 안정적인 통신망 운영에 필요할 것으로 판단된다.

차후에는 드론형 기지국의 안테나 구조 및 주파수 대역, 운용 높이 등을 다변화한 비교실험을 통해 드론형 기지국의 효율적인 운용환경을 도출하기 위한 후속연구가 이루어질 것으로 예상된다.

References

[1] J. Cho, J. Oh, D. Kim, J. Lee, and J. Kim, "Space/Air Based Mobile Network Core Technology," *Information and Communication Mag.*, vol. 33, no. 11, 2016, pp. 65-72.

[2] K. Nam and M. Jang, "A Study on the Exploration Device of the Disaster Site Using Drones," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 579-586.

[3] J. Jo, "Performance Comparison among MANET Routing Protocols of Drone Patrol Network for Traffic Violation Enforcement on a Highway," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 1, 2018, pp. 107-112.

[4] S. Chandrasekharan, A. Al-Hourani, K. Gomaz, S. Kandeepan, R. Evans, L. Reynaud, and S. Scalise, "Performance Evaluation of LTE and WiFi Technologies in Aerial Networks," *IEEE Globecom Workshop*, Washington, DC, USA, 2016, pp. 1-7.

[5] I. Jeong, "Implementation of System Level Simulator for Performance Analysis of mmWave," M.S. Thesis, *Hanyang University*, 2017.

[6] M. Kulkarni, S. Singh, and J. Andrews, "Coverage and Rate Trends in Dense Urban mmWave Cellular Network," *IEEE Global Communication Conf.*, Austin, USA, Dec. 2014, pp. 3809-3814.

[7] A. Nassar, A. Sulyman, and A. Alsanie, "Radio Capacity Estimation for millimeter wave 5G

Cellular Network Using Narrow Beamwidth Antennas at the Base Station," *Int. J. of Antennas and Propagation*, vol. 2015, Article ID 878614, 2015, pp. 1-6.

[8] R. Ford, M. Zhang, S. Dutta, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "A Framework for End-to-End Evaluation of 5G mmwave Cellular Networks in ns-3," *Workshop on ns-3(WNS3)*, Seattle, WA, USA, 2016, pp. 85-92.

[9] S. Hussain, "Dynamic radio resource management in 3GPP LTE," M.S. Thesis, *Blekinge Institute of Technology*, 2009.

[10] C. Han, K.C. Beh, M. Nicolaou, S. Armour, and Doufexi, "Power efficient dynamic resource scheduling algorithms for LTE," *IEEE Vehicular Technology Conf. Fall*, Ottawa, Canada, Sept. 2010, pp. 1-5.

[11] R. Kwan, C. Leung, and J. Zhang, "Multiuser Scheduling on the Downlink of an LTE Cellular System," *Research Letter in Communication*, vol. 2008, Article ID 323038, 2008, pp. 1-4.

[12] S. Schwarz and C Mehlfuhrer, "Low Complexity Approximate Maximum Throughput Scheduling for LTE," *44th Asilomar Conf. on Signal, systems and Computers*, Pacific grove, USA, Nov. 2010, pp. 1563-1569.

[13] G. Yu, Z. Zhang, P. Qiu, and P. Cheng, "Fair Resource Scheduling Algorithm for Wireless OFDM Systems," *Int. Conf. on Communications, Circuits and Systems*, Hong Kong, China, 2005, pp. 374-377.

[14] L. Zheng, G. Youjun, T. Hui, and Z. Ping, "A Cross-Layer Fair Resource Scheduling Algorithm for OFDMA System," *IEEE Region 10 Conf. (TENCON)*, Hong Kong, China, Nov. 2006, pp. 1-3.

[15] S. Lee, "Fixed Service Frequency Usage Trends and Implications for 5G Transmission Networks," *Information and Communication Broadcasting Policy*, vol. 30, no. 19, 2018, pp. 1-24.

[16] J. Lee, Y. Song, E. Choi, and J. Park, "mmWave Cellular Mobile Communication for Giga Korea 5G project," *21st Asia-Pacific Conf. on Communications*, Kyoto, Japan, Oct. 2015, pp. 179-183.

[17] N. Sung and Y. Choi, "Fast Intra-Beam Switching Scheme Using Common Contention Channels in Millimeter-Wave Based Cellular Systems," *Int. Conf. on Advanced Communication Technology*, Pyeongchang, South Korea, Jan. 2016, pp. 760-765.

[18] R. Jain, D. Chin, and W. Hawe, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems," Technical Report, 1984.

저자 소개

정민우(Min-Woo Jeong)

2010년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학사)
2012년 과학기술연합대학원 이동통신 및 디지털방송공학과 졸업(공학석사)
2018년 과학기술연합대학원 이동통신 및 디지털방송공학과 졸업(공학박사)
2018년 ~현재 국방기술품질원 연구원
※ 관심분야 : 이동통신 시스템, 시스템 레벨 시뮬레이션