

# 밀리미터파 대역에서의 드론형 기지국 성능분석을 위한 시뮬레이션 모델링 연구

정민우\*

## Simulation Modeling for Performance Analysis of Drone-type Base Station on the Millimeter-wave Frequency Band

Min-Woo Jeong\*

요 약

군 병력의 효율적 운용을 위한 정보공유의 수단으로서 높은 망 유연성을 제공할 수 있는 드론형 기지국이 최적의 플랫폼이 될 것으로 예상된다. 또한 넓은 대역폭을 활용 가능한 밀리미터파 주파수대역은 대용량 데이터를 송수신하는데 적합하지만 shadowing에 취약한 특성을 가지게 되는데, 자유롭게 고도를 조절할 수 있는 드론형 기지국의 특성을 활용하면 LoS를 안정적으로 확보하여 취약점을 상쇄할 것으로 기대된다. 본 논문에서는 다양한 요소가 반영된 드론형 기지국의 성능분석을 위한 모델링을 수행함으로써, 차후 군 통신망으로써 활용가능성이 기대되는 드론형 기지국의 성능평가에 대한 틀을 제공하고자 한다.

### ABSTRACT

The drone-type base station will be an optimal platform as a way of information sharing for efficient operation of the military force due to their high network flexibility. It is expected that the characteristics of the drone-type base station which would freely adjust the altitude can be used to offset the propagation attenuation characteristics of the millimeter-wave frequency band by securing the stable Line of Sight. In this paper, we proposed a framework for evaluation drone-type base station that can be utilized as a future military communication network by performing modeling for performance analysis that can reflect various factors.

### 키워드

Drone-type Base Station, mmWave, System Level Simulation Modeling, Performance Evaluation  
드론형 기지국, 밀리미터파, 시스템 레벨 시뮬레이션 모델링, 성능 평가

## 1. 서 론

교전 발생 시 군 병력의 효율적 운용을 위해서는 개별 병사 및 무기체계 단위에서의 전황파악이 필수적이다. 이를 위해서는 전장의 지형, 아군과 적군의 배치현황 및 작전사항을 포함한 다양한 정보를 전술

적/종합적으로 고려해야 한다. 드론형 기지국은 높은 망 유연성을 바탕으로 전장 내 노드에 대해 전술정보 공유를 지원할 수 있는 최적의 플랫폼이 될 것으로 예상된다[1]. 군용 전술통신망 운용을 위해서는 기존 상용이동통신망에 의한 간섭에서 자유로울 수 있도록 별도의 주파수대역을 사용해야 한다. 밀리미터파와 같

\* 교신저자 : 국방기술품질원 품질경영본부

• 접수일 : 2019. 08. 07  
• 수정완료일 : 2019. 09. 10  
• 게재확정일 : 2019. 10. 15

• Received : Aug. 07, 2019, Revised : Sep. 10, 2019, Accepted : Oct. 15, 2019

• Corresponding Author : Min-Woo Jeong  
Directorate of Quality Management, Defense Agency for Tech. and Quality  
Email : mwjeong@dtqaq.re.kr

이 높은 주파수대역에서는 기존 마이크로파 주파수대역에 비해 넓은 대역폭을 활용하여 대용량 데이터를 송수신하는데 적합한 것으로 연구되어 왔다. 반면, 직진성이 강한 주파수특성으로 인해 shadowing에 상대적으로 취약한 특징을 가지는데, 드론형 기지국 플랫폼을 활용하면 기지국 고도를 높여 LoS(: Line of Sight)를 최대한 확보함으로써 이러한 취약점을 상쇄할 수 있을 것으로 예측된다. 본 논문에서는 드론형 기지국의 성능분석을 위한 모델링을 수행함으로써 차후 드론형 기지국 성능평가에 대한 틀을 제공한다.

## II. 관련분야 연구현황

### 2.1 드론형 기지국 연구현황

무인 공중 이동체(UAV:Unmanned Aerial Vehicle)는 크기, 고도, 비행방식, 사용목적에 따라 드론, 항공기, 비행선과 같은 여러 가지 플랫폼으로 구현할 수 있다. 각각의 비행 플랫폼은 형식에 따라 운용에 필요한 기반시설과 비용이 상이하게 나타나는데 드론형 플랫폼은 범용성과 운영의 간편함이 특징이다. 현재 드론형 플랫폼을 공공 서비스를 제공하기 위한 목적으로 감시, 정찰, 측정 등 다양한 분야에서 활용 중이며, 해당 플랫폼의 안정적 운용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[2-3].

이와 더불어 무인 공중 이동체에 소형 기지국을 장착한 공중 통신망의 실현가능성을 검토하기 위하여 다양한 연구들이 진행되었다. B. Bergh의 연구에서는 UAV에 LTE 기반 기지국을 탑재하여 폭증하는 무선 데이터 소요량을 분산시키기 위한 연구를 수행하였다[4]. F. Fabra의 연구에서는 드론 통신환경에서 노드 간 거리, 주파수 간섭, 고도 등의 실험변인을 조합하여 측정된 결과, 상용으로 사용되는 2.4GHz 대역 외 타 대역을 고려해야한다는 결론을 얻었다[5]. S. Chandrasekharan 그룹은 저고도 플랫폼에 LTE-A를 접목하여 설계한 공중통신망을 구현한 ABSOLUTE 프로젝트의 실용성을 검토하였고, 커버리지 최적화 및 전력공급이 차후 해결되어야 할 핵심이슈로 예상하였다[6]. 그리고 ray-tracing을 통한 공중 통신망의 채널 모델링 연구에서는 공중 통신망 구현에 적합한 망 선택을 위해 노드 수, 기지국과의 거리에 따른 상용 통

신 시스템 간 성능비교가 수행되었다[7].

I. B. Yaliniz의 연구에서는 드론형 기지국의 사용으로 예상되는 긍정적인 영향 및 관리상 도전과제를 서술하였고, 드론형 기지국 위치를 동적으로 제어하여 망 활용도를 극대화하는 운용방안을 제안하였다[8].

### 2.2 밀리미터파 통신망 연구현황

4세대 이동통신망의 상용화 이후 5세대 이동통신기술을 선점하기 위해 MiWaveS, METIS, GK5G와 같은 프로젝트들이 경쟁적으로 수행되었다. 밀리미터파 주파수(6~60GHz)는 5세대 이동통신에 적용할 유력한 대역으로 크게 각광받으며 국내/국제 표준화기관에서 해당 주파수대역의 유용한 활용방안에 대하여 연구되고 있다. 특히 망의 실제적 설치 이전에 해당 주파수대역의 주파수특성을 고려한 통신시스템의 성능을 예측하기 위한 연구가 다수 수행되었는데, 높은 주파수대역에서의 거리감쇄를 극복하고 주변 빔 간 간섭을 최소화하여 폭증하는 무선데이터 발생량을 감당하기 위해 지향성 안테나를 다수 장착한 기지국형태가 주요모델로 제시되었다[9]. 또한 하드웨어 구현 기술의 발전으로 데이터 처리부와 RRH 간의 분리 및 안테나 폼팩터의 감소로 소형 기지국을 구현할 수 있게 되었고, 이는 드론형 기지국의 연구 및 개발을 가속화하는데 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## III. 드론형 기지국 구조설계

4세대 이동통신 시스템을 대표하는 LTE의 경우 일반적으로 3개의 섹터가 각각 120도의 평면각을 커버하며 하나의 기지국을 구성하였다. 본 연구에서는 높은 트래픽을 감당할 수 있는 드론형 기지국을 설계하기 위한 사용 주파수 대역과 기지국 구조를 검토하였다. 기존의 상용 이동통신 시스템에서 사용하던 3GHz 이하의 주파수 대역은 상용 통신용도 외에도 다양한 목적으로 분할 할당되어있기 때문에 해당 대역에서 통신시스템의 처리용량 확장을 위해 주파수 대역 자체를 확장하는 방안을 선택하기에는 어려움이 따른다. 이에 비해 밀리미터파 주파수대역, 특히 28GHz 대역은 기존의 상용 이동통신 시스템 사용 주파수 대역으로부터 멀리 이격되어 있고, 가용 주파수

표 1. 시뮬레이션 적용 안테나 특성  
Table 1. Antenna characteristics for simulation application

Characteristics	Value
Max Gain	19.1 dBi
Half-power beam width	15±1°
Side-lobe Suppression	< -18 dB
Feature	Tapered-array architecture for low power loss and side-lobe suppression

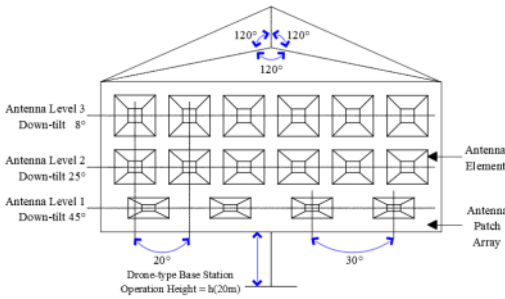


그림 1. 드론형 기지국 안테나 배치구조  
Fig. 1 Antennal arrangement structure of drone-type base station

대역이 넓게 존재하기 때문에 미래 이동통신 시스템의 후보 주파수 대역 중 하나로 고려되고 있다. 밀리미터파 대역을 통신 목적으로 사용하기 위해서는

높은 주파수 대역의 전파특성으로 인한 신호감쇄를 보상하기 위해 높은 송신에너지를 사용하거나, 한정된 송신 에너지를 보다 집중시킬 수 있도록 좁은 빔 폭의 안테나의 적용이 필요하다. 하지만 드론형 기지국의 특성 상 일정한 운용시간과 비행시간을 동시에 확보하기 위해서는 송신에너지를 무한정 높이는 것 보다 좁은 빔 폭의 안테나를 활용하여 기지국을 구성하는 것이 합리적인 선택이라 할 것이다. 따라서 좁은 빔 폭 안테나의 활용도를 극대화하기 위해 빔 방향이 일정하게 정렬된 다수의 섹터를 구성하는 방안을 기반으로 드론형 기지국 안테나를 설계하였다.

본 모델링 연구에서는 26~40 GHz 주파수 대역을 겨냥하여 EM 시뮬레이터로 구현한 7×6 2D micro-strip 패치 배열 안테나의 송신이득 데이터를 샘플링하여 드론형 기지국 구성에 사용하였으며, 성능 특성은 위의 표 1과 같다. 특정 위치의 안테나 이득은 안테나 지향 방향벡터와 지상의 특정 위치가 이루는 수직각과 수평각의 조합에 의해 단일 값(dB)으로 결정된다. 밀리미터파에서 운용되는 드론형 기지국의 안테나 배치구조는 지상의 빔 미도달 영역을 최소화 하기 위해 3개의 계층이 각각 다른 하향각도(8°, 25°, 45°)로 지면을 향하도록 그림 1과 같이 설계하였다. 각 안테나 계층은 수직/평면 방향으로 빈틈없이 커버리지를 구성하기 위해 표 2의 방위각 $\alpha$  및 하향각 $\beta$ 에 따라 1계층에 12개, 2계층/3계층에 각각 18개의 안테나

표 2. 드론형 기지국 안테나 빔 방사방향  
Table 2. Antenna beam radiation direction of drone-type base station

Beam index j	Down-tilt $\beta_j^\circ$	Azimuth $\alpha_j^\circ$	Beam index j	Down-tilt $\beta_j^\circ$	Azimuth $\alpha_j^\circ$	Beam index j	Down-tilt $\beta_j^\circ$	Azimuth $\alpha_j^\circ$
1	45	1.7	17	25	96.9	33	8	50.8
2	45	31.7	18	25	116.9	34	8	70.8
3	45	61.7	19	25	136.9	35	8	90.8
4	45	91.7	20	25	156.9	36	8	110.8
5	45	121.7	21	25	176.9	37	8	130.8
6	45	151.7	22	25	196.9	38	8	150.8
7	45	181.7	23	25	216.9	39	8	170.8
8	45	211.7	24	25	236.9	40	8	190.8
9	45	241.7	25	25	256.9	41	8	210.8
10	45	271.7	26	25	276.9	42	8	230.8
11	45	301.7	27	25	296.9	43	8	250.8
12	45	331.7	28	25	316.9	44	8	270.8
13	45	16.9	29	25	336.9	45	8	290.8
14	25	36.9	30	25	356.9	46	8	310.8
15	25	56.9	31	8	10.8	47	8	330.8
16	25	76.9	32	8	30.8	48	8	350.8

엘리먼트를 배치하였다. 각 안테나 엘리먼트는 고정형 빔포밍을 사용하여 좁은 빔 폭을 형성, 주변 빔에 미치는 영향을 최소화하였고 방사하는 에너지를 좁은 영역 내에 집중하여 높은 주파수 대역에서 발생하는 신호 감쇄치를 보상하였다. 그리고 각 안테나 엘리먼트를 통해 기지국에 접속한 단말들에게 무선자원 분배를 위한 분산 스케줄링이 빔 단위로 독립적으로 수행된다.

#### IV. 드론형 기지국 성능평가 모델링

##### 4.1 밀리미터파 신호감쇄 모델링

일반적으로 이동통신시스템의 성능은 기지국에 접속한 단말들의 데이터 소요량을 처리하는 정도에 따라 좌우된다. 단말은 해당 위치에서 가장 강한 신호를 제공하는 기지국 섹터에 접속하여 주파수자원을 할당 받는데, 밀리미터파 대역의 신호감쇄 PL은 식 (1)과 같이 모델링할 수 있다[10]. 본 연구에서 적용하는 신호감쇄에서는 환경변수  $L_{env}$ 과 수신안테나 이득  $G_r$ 은 0로 설정하여 실험에 영향을 미치지 않도록 하였다.

$$P_r = EIRP + G_r - 32.44 - 20\log(f_{GHz} \times d_m) - L_{env} \quad (1)$$

$$PL[dB] = EIRP - P_r \quad (2)$$

$$= 32.44 + 20\log(f_{GHz}) + 20\log(d_m)$$

기지국으로부터의 송신파워와 단말에서의 수신파워 간의 관계는 기지국으로부터의 안테나 이득과 상대의 신호감쇄를 고려하여 아래 수식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때,  $i$ 는 단말인덱스,  $j$ 는 기지국내 빔의 인덱스,  $P_{rx,ij}$ 는 단말 $i$ 가 빔 $j$ 로부터 수신한 수신파워,  $P_{tx,j}$ 는 빔 $j$ 의 송신파워,  $x_i$ 와  $y_i$ 는 단말 $i$ 의 평면위치좌표,  $\alpha_j(0 \leq \alpha_j < 360)$ 와  $\beta_j(0 \leq \beta_j < 180)$ 는 기지국 빔 $j$ 의 평면좌표계 방위각 및 하향 조정각,  $G_{tx}$ 는 빔에서 단말 방향으로 향하는 송신 안테나 이득,  $d_m$ 은 기지국과 단말 간의 거리를 의미한다.

$$P_{rx,i,j} = P_{tx,j} + G_{tx}(x_i, y_i, \alpha_j, \beta_j) - PL(f_{GHz}, d_m) \quad (3)$$

##### 4.2 드론형 기지국 안테나 이득 모델링

빔 지향 벡터와 단말 위치가 이루는 각도(수직각, 수평각)에 의해 결정되는 기지국 송신안테나 이득  $G_{tx}$

를 도출하기 위해 직관적으로 파악할 수 있는 입력변수(직교좌표계 기반 단말 위치, 기지국 안테나 지향각도)를 극좌표계로 변환하는 과정을 수행한다. 먼저  $h$  미터 상공에서 운용되는 드론형 기지국의 모든 안테나 빔 $j$ 는 직교 좌표계 상에서  $x$ - $y$  평면의 중앙인  $(x_i, y_i, z_i) = (0, 0, h)$ 에 위치한다. 이 때 빔 $j$ 의 방위각  $\alpha_j$ , 하향각  $\beta_j$ 는 빔 인덱스  $j$ 에 의해 상단의 표 2와 같이 결정된다. 아래는 좌표  $(x_i, y_i, z_i)$ 에 위치한 단말  $i$ 에 대해서  $z$ 축을 고정된 채  $x$ - $y$  평면을 방위각  $\alpha_j$ 만큼 회전하여  $x$ 축을 빔 $j$ 의 방위각과 일치시키는 1차 축 변환을 수행하기 위한 과정이다.

$$\begin{cases} \alpha'_j = \alpha_j + \frac{\pi}{2} \\ \beta'_j = \beta_j + \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서  $\alpha_j$ 와  $\beta_j$ 에  $\pi/2$ 를 더하는 것은 방위각 시작지점을  $x$ 축과 일치시키고, 하향각 시작지점( $z$ 축)을  $x$ - $y$  평면과 일치시키기 위함이다. 그리고 드론형 기지국 배치지점을 원점 $O(0,0,0)$ 에 일치시킴으로써  $O$ 를 기점으로 한 극 좌표계 변환을 수행할 수 있다. 1차 축 변환후의 단말 $i$ , 빔 $j$ 의 위치는 식 (5),(6)과 같다.

$$(x'_i, y'_i, z'_i) = \begin{cases} x'_i = x_i \cos(\alpha'_j) + y_i \sin(\alpha'_j) \\ y'_i = -x_i \sin(\alpha'_j) + y_i \cos(\alpha'_j) \\ z'_i = z_i - z_j \end{cases} \quad (5)$$

$$(x'_j, y'_j, z'_j) = \begin{cases} x'_j = x_j \cos(\alpha'_j) + y_j \sin(\alpha'_j) \\ y'_j = -x_j \sin(\alpha'_j) + y_j \cos(\alpha'_j) \\ z'_j = z_j - z_j = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2차 축 변환에서는 1차 변환된 직교 좌표계의  $z$ 축을 빔 지향방향 벡터와 일치하도록  $y$ 축은 고정된 채  $x$ - $z$  평면을 하향각  $\beta_j$ 만큼 회전시킨다. 2차 축변환이 완료된 후의 단말 $i$ 와 빔 $j$ 의 위치는 식 (7),(8)과 같다.

$$(x''_i, y''_i, z''_i) = \begin{cases} x''_i = -z'_i \sin(\beta'_j) + x'_i \cos(\beta'_j) \\ y''_i = y'_i \\ z''_i = z'_i \cos(\beta'_j) + x'_i \sin(\beta'_j) \end{cases} \quad (7)$$

$$(x''_j, y''_j, z''_j) = \begin{cases} x''_j = -z'_j \sin(\beta'_j) + x'_j \cos(\beta'_j) \\ y''_j = y'_j \\ z''_j = z'_j \cos(\beta'_j) + x'_j \sin(\beta'_j) \end{cases} \quad (8)$$

2차 축변환을 거친 단말과 빔j의 위치에 기반하여, 그림 2와 같이 안테나 지향방향과 단말의 위치가 이루는 수직각  $\theta$ 와 수평각  $\phi$ 을 구하기 위한 수식은 다음 (9),(10)과 같다. 단말에 대한 빔j의 안테나 이득은 그림 3의 안테나 이득 원시데이터를 룩업테이블로 사용하고, 수직각과 수평각을 대입하여 찾을 수 있다.

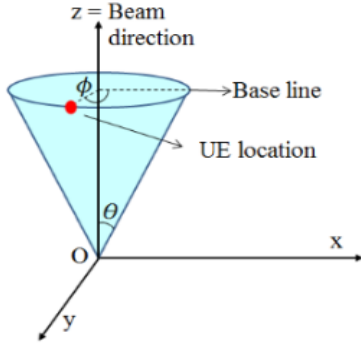


그림 2. 드론형 기지국 송신안테나의 이득 도출을 위한 파라미터  
Fig. 2 Parameters for TX antenna gain of drone-type base station

$$\phi_{i,j} = \tan^{-1} \left( \frac{y''_i - y''_j}{x''_i - x''_j} \right) \quad (9)$$

$$\theta_{i,j} = \begin{cases} 0^\circ \leq \phi_{i,j} < 90^\circ & \text{if } (x''_i - x''_j) \geq 0 \\ & \text{and } (y''_i - y''_j) \geq 0 \\ 270^\circ \leq \phi_{i,j} < 360^\circ & \text{if } (x''_i - x''_j) \geq 0 \\ & \text{and } (y''_i - y''_j) < 0 \\ 90^\circ < \phi_{i,j} < 270^\circ & \text{if } (x''_i - x''_j) < 0 \end{cases}$$

$$\theta_{i,j} = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(x''_i - x''_j)^2 + (y''_i - y''_j)^2}}{z''_i - z''_j} \right) \quad (10)$$

$$G_{tx}(x_i, y_i, \alpha_j, \beta_j) = G_{tx}(\theta_{i,j}, \phi_{i,j}) \quad (11)$$

### 4.3 신호대 잡음비 및 CQI 피드백 모델링

기지국 송신안테나 이득  $G_{tx}$ 를 원시데이터로부터 도출함으로써 계산된 단말의 수신신호세기  $P_{rx}$ 를 이용하여 드론형 기지국을 구성하는 다수의 빔으로부터의 단말의 SINR을 식 (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$SINR_{i,j} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{rx,i,j}}{N_{thermal} + \sum_{\substack{h \neq j \\ h \in K_{FR-n_j}}} P_{rx,i,h}} \right) \quad (12)$$

여기서  $K_{FR-n_j}$ 는 주파수 재사용 계수 n에 의해 전체 가용주파수가 분할되어 빔 j에 의해 사용할 수 있는 무선자원(RB, Resource Block)의 집합을 의미한다.  $SINR_{i,j}$ 는 단말이 이동하면서 드론형 기지국과의 거리  $d_m$ , 안테나 이득  $G_{tx}$ 가 매 순간 변화함을 반영하기 위해 매 TTI마다 재계산된다. 이렇듯 t번째 타임슬롯에 계산된 신호 대 잡음비인  $SINR_{i,j,t}$ 는 시뮬레이션 진행 기간 중 t 시점에 단말이 자신에게 가장 강한 신호를 주는 빔j를 선택하게 하는 SINR 참조값으로 사용된다. t 시점에 단말에 의해서 선택된 접속빔 인덱스  $J_{i,t}$ 는 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{i,t} = \operatorname{argmax}_i SINR_{i,j,t} \quad (13)$$

단말의 위치  $x_i, y_i, z_i$ 는 매 TTI 단말의 이동속도에 따라 변화하기 때문에 단말이 접속한 빔 인덱스  $J_{i,t}$ 와 SINR이 시간과 단말의 위치에 따라 달라질 수 있다는 것을 유의해야 한다.

CQI 피드백과 관련하여, 각 단말은 각 RB에 대해

Theta[deg.]	Phi[deg.]	Abs(Grlz)[dB]
0.000	0.000	1.91E+001
1.000	0.000	1.91E+001
2.000	0.000	1.89E+001
3.000	0.000	1.86E+001
4.000	0.000	1.82E+001
5.000	0.000	1.77E+001
6.000	0.000	1.70E+001
7.000	0.000	1.62E+001
8.000	0.000	1.52E+001
9.000	0.000	1.41E+001
10.000	0.000	1.29E+001
11.000	0.000	1.12E+001
12.000	0.000	9.35E+000
13.000	0.000	7.15E+000
14.000	0.000	4.44E+000
15.000	0.000	9.52E-001
16.000	0.000	-3.91E+000
17.000	0.000	-1.15E+001
18.000	0.000	-1.21E+001
19.000	0.000	-6.47E+000
20.000	0.000	-3.55E+000
21.000	0.000	-2.01E+000
22.000	0.000	-1.29E+000
23.000	0.000	-1.16E+000
24.000	0.000	-1.52E+000
25.000	0.000	-2.32E+000
26.000	0.000	-3.61E+000
27.000	0.000	-5.46E+000
28.000	0.000	-8.09E+000
29.000	0.000	-1.18E+001
30.000	0.000	-1.65E+001
31.000	0.000	-1.60E+001
32.000	0.000	-1.18E+001
33.000	0.000	-8.71E+000
34.000	0.000	-6.66E+000
35.000	0.000	-5.29E+000
36.000	0.000	-4.39E+000
37.000	0.000	-3.84E+000
38.000	0.000	-3.60E+000
39.000	0.000	-3.62E+000
40.000	0.000	-3.89E+000
41.000	0.000	-4.39E+000
42.000	0.000	-5.15E+000
43.000	0.000	-6.13E+000

그림 3. 드론형 기지국 송신안테나의 각도 별 이득 원시데이터  
Fig. 3 TX antenna gain raw data of drone-type base station by angle

CQI 값을 계산하고, 접속 빔  $J_{i,t}$ 로 전달한다. 단말에서 각 RB의 CQI 값을 계산하는 과정은 다음과 같다. 먼저 빔  $J_{i,t}$ 로부터 단말이 수신하는 신호에너지는 식 (14)와 같이 총 RB의 수  $K$ 로 나누어져서 가용 주파수 내의 무선자원인 각 RB로 균일하게 분배된다.

$$\overline{P_{rx,i,J_{i,t,k}}} = \frac{P_{rx,i,J_{i,t}}}{K} \quad (14)$$

$$P_{rx,i,J_{i,t,k}} = \overline{P_{rx,i,J_{i,t,k}}} \times Q \quad (15)$$

신호가 수신단에 도착하기 전 도심의 높은 빌딩과 같은 전파경로 상 장애물에 의해 발생하는 주파수 분산 및 신호분산을 고려하기 위해 레일리 분포함수를 따르는 랜덤변수  $Q(\sigma=1)$ 를 각 RB의 평균에너지에 곱하여 주파수 선택도(Frequency selectivity)를 적용하였다. 식(15)는 주파수 선택적 레일리 페이딩을 거친 후 단말의  $k$ 번째 RB에 할당된 신호세기를 나타낸다.

$t$ 시점에 단말의  $k$ 번째 RB에서 측정된 SINR은 다음 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SINR_{i,j,k} = 10\log_{10} \left( \frac{P_{rx,i,J_{i,t,k}}}{N_{thermal} + \sum_{\substack{h \neq J_{i,t} \\ h \in K_{RM-nj}}} P_{rx,i,h,k}} \right) \quad (16)$$

단말의 RB 별 채널 상태를 판단하는 기준으로 0~15 범위의 CQI(Channel Quality Indicator)를 사용하여 하향링크의 채널상태를 표현하고, 단말에서는 해당 채널상태를 기지국으로 알리기 위해 피드백 형태로 매 타임슬롯 마다 전송한다. SISO 링크레벨 시뮬레이션의 결과로 그림 4와 같이 도출된 SINR에 따른 전송 오류율(BLER, BLock Error Rate) 결과데이터를 기반으로, 오류 허용률을 10%이하 기준으로 설정한 CQI(Channel Quality Indicator)별 SINR 구간은 그림 5와 같다. 그리고 CQI에서 블록 전송 오류율 10%를 SINR 하한점으로 두고 각 CQI의 SINR 하한점을 연결한 선형함수를 식 (17)과 같이 모델링할 수 있다. 해당 수식으로부터 도출된  $CQI_{i,t,k}$ 는 단말로부터 기지국으로 전송되어 표 3과 같이 RB당 bit 수를 의미하는  $Mod_{i,t,k}$ , 부호화율을 의미하는  $CR_{i,t,k}$ 를 기지국에서 결정하고 하향링크로 전송하는데 사용된다.

$$CQI_{i,t,k}(SINR_{i,t,k}) = \begin{cases} 0, & \text{if } SINR_{i,t,k} \leq -6.936 \\ 15, & \text{if } SINR_{i,t,k} \geq 19.928 \\ \lfloor (0.523 \times SINR_{i,t,k}) + 4.628 \rfloor, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

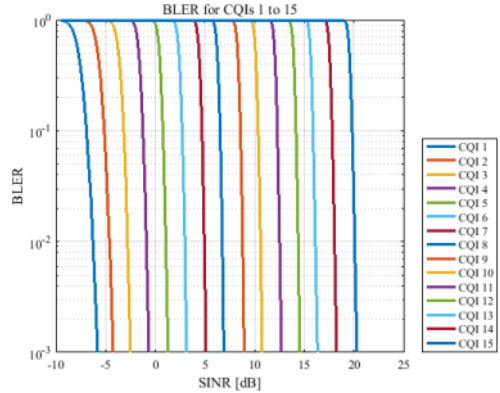


그림 4. 링크레벨시뮬레이션을 통해 도출한 SINR-BLER 매칭 함수  $f_{map-BLER}$   
 Fig. 4 SINR-BLER matching function  $f_{map-BLER}$  from link level simulation

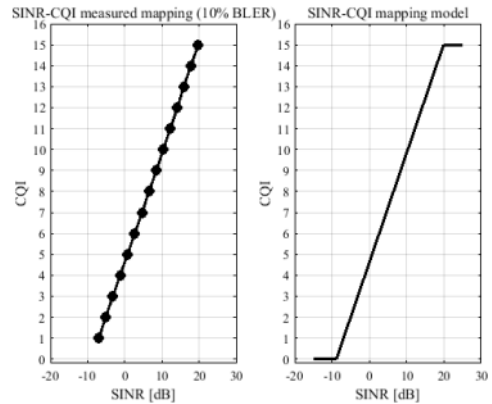


그림 5. SINR-CQI 매칭(블록전송오류율 10%)  
 Fig. 5 SINR-CQI matching(BLER 10%)

#### 4.4 스케줄링 및 Throughput 모델링

$N_{RE,t}$ 는  $t$ 번째 TTI 시점에 RB 격자를 구성하는 RE(Resource Element)의 수를 나타낸다.  $N_{CRC}$ 는 단말에서 RB의 CRC(Cyclic Redundancy Check)를 수행하기 위해 할당된 비트 수로서, 본 모델링 과정에서는 24bit 고정크기로 설정하였다.  $BLER_{i,t,k}$ 는 그림 4와 같이 CQI와 SINR의 조합을 통해 결정되는 단말 RB 단위의 수신성공율을 의미하며,  $v_{i,t,k}$ 는  $BLER_{i,t,k}$ 을 확률

표 3. CQI에 따른 변조 및 부호화율 파라미터  
Table 3. Modulation and coding parameter according to CQI

Range of SINR[dB]		CQI index CQI <sub>i,t,k</sub> (SINR <sub>i,t,k</sub> )	Modulation Mod <sub>i,t,k</sub> (CQI <sub>i,t,k</sub> )	Code rate (×1024) CR <sub>i,t,k</sub> (CQI <sub>i,t,k</sub> )	Efficiency
Lower limit	Upper limit				
-	-6.936	0	QPSK(2bit/RE)	0	0
-6.936	-5.147	1	QPSK	78	0.152
-5.147	-3.180	2	QPSK	120	0.234
-3.180	-1.253	3	QPSK	193	0.377
-1.253	0.761	4	QPSK	308	0.602
0.761	2.699	5	QPSK	449	0.877
2.699	4.694	6	QPSK	602	1.176
4.694	6.525	7	16QAM(4bit/RE)	378	1.477
6.525	8.573	8	16QAM	490	1.9141
8.573	10.366	9	16QAM	616	2.4063
10.366	12.289	10	64QAM(6bit/RE)	466	2.7305
12.289	14.173	11	64QAM	567	3.3223
14.173	15.888	12	64QAM	666	3.9023
15.888	17.814	13	64QAM	772	4.5234
17.814	19.829	14	64QAM	873	5.1152
19.829	-	15	64QAM	948	5.5547

변수로 두고 RB 수신 유효/무효를 나타낸다.

$$N_{REt} = \begin{cases} 120, t = 5n + 1 (n \geq 0, \text{integer}) \\ 184, \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

$$BLER_{i,t,k} = f_{map} - BLER(CQI_{i,t,k}, SINR_{i,t,k}) \quad (19)$$

$$v_{i,t,k} = \begin{cases} 1, \text{on the probability of } 1 - BLER_{i,t,k} \\ 0, \text{on the probability of } BLER_{i,t,k} \end{cases} \quad (20)$$

위의 도출된 요소들을 사용하여, t번째 TTI 시점에 단말i가 k번째 RB를 통해 수신한 비트의 수는 식(21)의 B<sub>i,t,k</sub>로 표현할 수 있다. 식(22)의 B<sub>i,t</sub>는 t번째 TTI 시점의 스케줄링 결과가 고려된 단말i의 수신 비트수를 나타낸다. 스케줄링 결과를 의미하는 l<sub>i,t,k</sub>는 전체 시뮬레이션 기간 동안 단말에 대한 무선자원 할당 결과를 나타내는 행렬 L<sub>i</sub>의 원소에 해당한다.

$$B_{i,t,k} = [Mod_{i,t,k}(CQI_{i,t,k}) \times N_{REt} - N_{CRC}] \times CR_{i,t,k}(CQI_{i,t,k}) \times v_{i,t,k} \quad (21)$$

$$B_{i,t} = \sum_{k=1}^K B_{i,t,k} \times l_{i,t,k} \quad (22)$$

셀룰러 통신망에서 무선자원 할당을 위해서는 자원 할당 정책에 따른 스케줄링 우선순위 기준값(metric)을 자원할당 단위로 단말기 간에 비교하고, 최적의 상태를 보이는 단말에 해당 무선자원을 할당한다. 스케줄링 기준값 적용을 위한 모델링 파라미터는 아래 (23),(24),(25)와 같다. 먼저 t(1 ≤ t ≤ T = N<sub>TTI,max</sub>)는 스케

줄링이 수행되는 시점(TTI)를 의미하며 k(1 ≤ k ≤ N<sub>RB,max</sub>)는 스케줄링을 수행할 RB의 인덱스를, i(1 ≤ i ≤ N<sub>UE,max</sub>)는 기지국 셀에 접속한 단말의 인덱스를 의미한다. 따라서 m<sub>t,k,i</sub>는 t 시점에 무선자원에 대한 단말i의 스케줄링 기준값을 나타낸다. m<sub>t,k</sub>는 t시점에 무선자원k상에서 최대 스케줄링 기준값을 보이는 단말의 인덱스를 표현한다. m<sub>t</sub>는 1 × N<sub>RB,max</sub>로 구성된 t시점의 스케줄링 행렬을 의미하며, m<sub>t,k</sub>를 구성요소로 가진다. M은 모든 RB와 TTI 전 영역에 대하여 N<sub>TTI,max</sub> × N<sub>RB,max</sub>의 단말 인덱스로 구성된 스케줄링 행렬로서 m<sub>t</sub>를 구성요소로 가진다. 스케줄링 행렬 M 내 각 행은 특정 TTI 시점에 모든 RB에 대한 자원 할당단말 인덱스로 구성되어있고, 행렬의 각 역은 특정 RB에서 모든 TTI 시점에 대한 자원할당단말 인덱스 정보로 구성되어 있다.

$$m_{t,k} = \arg \max_i \{m_{t,k,i}\} \quad (23)$$

$$m_t = [m_{t,1} \ m_{t,2} \ m_{t,3} \ \dots \ m_{t,K}] \quad (24)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \dots & m_{1,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{T,1} & m_{T,2} & m_{T,3} & \dots & m_{T,K} \end{bmatrix} \quad (25)$$

l<sub>i,t,k</sub>는 t시점에서 무선자원k가 단말i에 할당되었는지의 여부를 나타내는 행렬의 구성요소로서 1은 할당, 0은 미할당 상태를 나타내어 상단의 수식(22)에서 스케줄링 요소가 고려된 단말의 수신비트수 계산에 사용된다. L<sub>i,t</sub>는 1 × K로 구성된 t시점의 단말에 대한 자

원할당 정보 행렬이며,  $l_{i,t,k}$ 를 구성요소로 가진다.  $L_i$ 는 전체 시뮬레이션 시간 동안에 단말에 할당된 무선자원 할당정보를 나타내며,  $T \times K$ 형태로  $L_{i,t}$ 를 구성요소로 가진다. 이와 같은 스케줄링 행렬의 모델링 과정에서 무선자원  $k$ 가 단말에게 할당되었다면, RB 인덱스  $k$ 는 집합  $K_{i,t}$ 에 속한다( $k \in K_{i,t}$ ).

$$l_{i,t,k} = \begin{cases} 1 & \text{if } m_{t,k} = i \\ 0 & \text{if } m_{t,k} \neq i \end{cases} \quad (26)$$

$$L_{i,t} = [l_{i,t,1} \ l_{i,t,2} \ l_{i,t,3} \ \dots \ l_{i,t,K}] \quad (27)$$

$$L_i = \begin{bmatrix} L_{i,1} \\ \vdots \\ L_{i,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{i,1,1} & l_{i,1,2} & l_{i,1,3} & \dots & l_{i,1,K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{i,T,1} & l_{i,T,2} & l_{i,T,3} & \dots & l_{i,T,K} \end{bmatrix} \quad (28)$$

식(29)은 단말  $i$ 가 전체 시뮬레이션 기간  $T$  동안 수신한 비트의 총 합을 나타낸다. 기간  $T$  동안 단말의 평균 throughput을 나타내는 식(30)에서 0.2ms는 서브프레임 타임슬롯의 길이를 의미하며, 시뮬레이션 진행 중 드론형 기지국 커버리지 내 모든 단말의 throughput을 합산함으로써 식(31)의 기지국 throughput을 계산하게 된다.

$$B_i = \sum_{t=1}^T B_{i,t} \quad (29)$$

$$\text{Throughput}_{UE,i} = \frac{B_i}{T \times 0.2ms} \quad (30)$$

$$\text{Throughput}_{eNodeB} = \sum_{i=1}^I \text{Throughput}_{UE,i} \quad (31)$$

위의 과정을 통해 도출된 단말 throughput은 합산되어 시스템 용량을 나타내는 성능지표인 기지국 throughput로 사용된다.

## V. 드론형 기지국 성능 분석

상기 모델링 과정에 부합하는 시뮬레이션 수행을 위해 적용된 통신 시스템 무선 인터페이스 관련 파라미터들은 다음과 같다. 먼저 28GHz 주파수대역 상의 1GHz 대역폭을 드론형 기지국 성능평가에 고려하였고, 송수신 데이터 처리의 기본 단위가 되는 시간영역 프레임 길이 2ms 내에 10개의 서브프레임을 구성하였으며 각 서브프레임은 전반부/후반부 타임 슬롯으

로 구분된다. 주파수 축으로는 1GHz 대역폭이 총 8개 (각 125MHz)의 부대역으로 나누어지고, 2.16MHz 폭의 RB가 각 부대역마다 52개로 구분되며 RB 내 subcarrier 간의 간격을 180kHz로 설정하였다. 트래픽 타입은 Full buffer traffic으로 단말이 수신 가능한 최대의 하향링크 성능을 내며, 기지국/단말 간에는 단일 안테나 통신(SISO)을 수행한다. 드론형 기지국은 20m 상공에서 40W 송신출력으로 운용되며 지상의 단말기 높이는 1.5m, 단말 안테나 이득은 0으로 일괄설정하였다. 드론형 기지국과 단말의 통신 경로 상에서 발생하는 shadow fading은 clausen model(표준편차  $\sigma = 10$ , 연관성 계수  $\alpha = 0.05$ , 연관 이웃 격자 수  $N = 8$ )을 적용하였다[11].

드론형 기지국의 성능평가를 위해 주파수 재사용 및 스케줄링 요소와 같은 무선자원 운용방안 또한 고려하였다. 주파수 재사용 측면에서는 셀 간 간섭 완화를 위해 기지국을 구성하고 있는 다수의 안테나가 사용하는 가용 주파수대역을 빔 인덱스에 따라 순환적으로 선정하는 순환적 주파수 재사용(Beam-based Recursive Frequency Reuse, 이하 BRFR) 방안을 적용하였고, 가용 주파수량은 주파수 재사용 계수에 반비례하므로 재사용 계수를 1,2,3으로 한정하였다. 스케줄러는 전반적 시스템 용량과 단말 데이터 속도 공정성 양 측면에서 모두 비교적 우수한 성능을 보이는 Proportional Fair(비례공정, 이하 PF) 스케줄러를 사용하였다. PF 스케줄러의 스케줄링 기준값은 식 (32)와 같으며  $r_{k,i}$ 는 현재 RB  $k$  상에서 단말에 의해 달성 가능한 데이터 속도,  $R_{k,i}$ 는 업데이트 윈도우의 크기  $t_c$  동안의 단말 데이터 속도 평균값에 해당한다.

$$m_{t,k,i}^{PF} = \frac{r_{k,i}(t)}{R_{k,i}(t)} \quad (32)$$

$$R_{k,i}(t) = (1 - \frac{1}{t_c}) \times R_{k,i}(t-1) + \frac{1}{t_c} \times r_{k,i}(t-1) \quad (33)$$

성능분석 실험은 널리 알려진 비엔나 시스템 레벨 시뮬레이터를 기반으로, 기지국 구조 및 무선 인터페이스 파라미터, 스케줄링 방식 및 주파수 재사용 등을 상기 모델링 과정에 부합하도록 구성하였다[12]. MATLAB 환경 시뮬레이션을 각 무선자원운용 방안 및 단말 수 경우 별로 100회 반복 수행하여 도출한



평균값을 단말과 기지국의 throughput 성능으로 정의하였다.

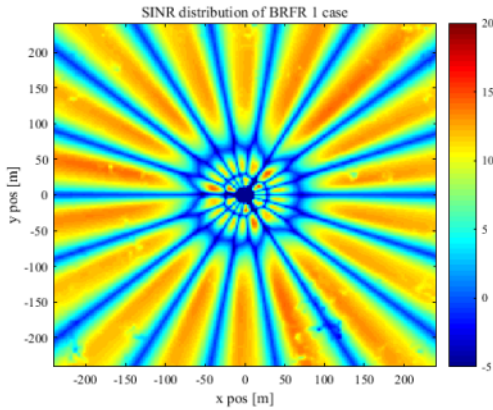


그림 6. 드론형 기지국 SINR 분포도(BRFR1)  
Fig. 6 SINR distribution of drone-type base station(BRFR1)

그림 6은 표 1의 특성을 가진 송신 안테나를 그림 1과 같은 형태로 구성한 드론형 기지국의 단일 배치 시 지면 SINR 분포도이다. 해당 그림에서 SINR은 접속 빔으로부터 단말이 수신하는 주 신호와, 순환적 주파수 재사용에 의해 동일한 무선자원을 사용하는 주변 빔으로부터의 잡음신호 간 비로 계산된다. 그림에서는 안테나 하향각도별(45°, 25°, 8°)로 근접영역, 중간영역, 장거리 영역을 구분한 넓이의 비가 4:15:22로 나타났는데 이를 바탕으로 판단하면 장거리 영역을 지향하는 단일 빔이 근접영역과 중간영역에 비해 넓은 범위를 커버함을 알 수 있다.

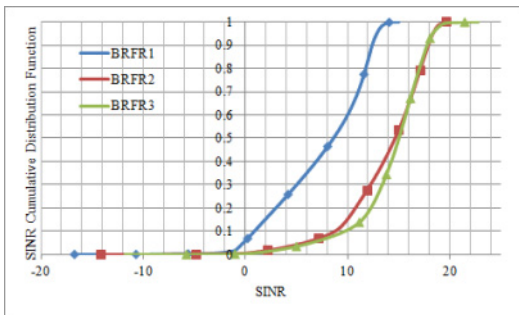


그림 7. 기지국 영역 내 SINR 누적분포함수  
Fig. 7 SINR CDF of base station coverage

그림 7은 주파수 재사용 계수 1,2,3을 적용했을 때 SINR 누적분포함수를 나타낸다. 해당 그래프에서 주파수 재사용 계수가 높을수록 단말이 더 높은 SINR을 유지할 확률이 높아지는 것을 알 수 있다. BRFR1 적용 시 SINR 최소/최대값은 -16.72dB/15.02dB, BRFR2 적용 시 -13.61dB/19.92dB, BRFR3 적용 시 -12.88dB/20.50dB로 나타낸다. 해당 SINR 분포도에서 상위/하위 1% 수치를 제외한 SINR 평균값은 각각 BRFR1 적용 시 7.78dB, BRFR2 적용 시 14.34dB, BRFR3 적용 시 14.66dB로 나타났는데, BRFR2 적용 시 BRFR1에 비해 상당한 SINR 개선을 보였으나 BRFR3 적용시에는 BRFR2에 비해 SINR 상승치가 미미하게 나타난 것을 알 수 있다.

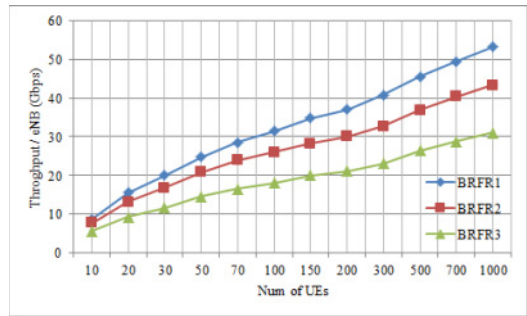


그림 8. 접속 단말수에 따른 기지국 Throughput  
Fig. 8 Base station throughput according to the number of access UE

그림 8은 드론형 기지국 내 접속 단말기 수의 증가에 따른 드론형 기지국 throughput 성능을 나타낸다. 해당 그래프에서는 단말 수가 증가할수록 기지국 throughput 또한 증가하며, 단말 수에 관계없이 전 영역에 걸쳐서 주파수 재사용계수 1의 경우가 가장 높은 용량을, 주파수 재사용계수 3의 경우에서 가장 낮은 용량을 제공하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 기지국 용량 성능측면에 있어서는 주파수 재사용 계수를 높임으로써 얻는 SINR 향상효과에 비해서 가용 무선자원의 감소에 따른 부정적 효과가 더 크게 나타난다는 결론을 얻을 수 있었다. 단말 수가 적을 때 주파수 재사용계수 2의 기지국 throughput은 계수 1의 경우에 근접하지만, 단말 수가 증가함에 따라 상대적으로 낮은 성능을 보인다.

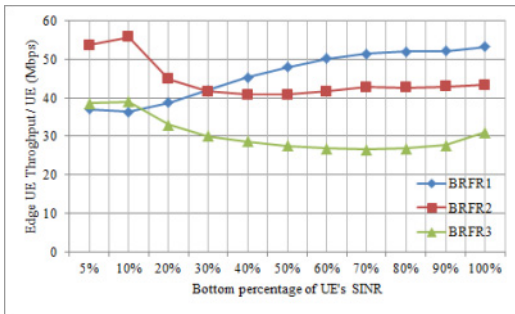


그림 9. SINR 하위 퍼센티지 단말 데이터 속도  
Fig. 9 UE data throughput of bottom percentage SINR

그림 9는 1000개의 단말이 단일 기지국에 접속해 있을 때, SINR 순으로 나열한 하위 퍼센티지 단말들의 평균 데이터 속도를 나타낸다. 앞의 SINR 분포도에서 알 수 있듯이 기지국 중앙부의 좁은 지역에 빔들이 조밀하게 형성되어 있고 기지국 외곽부에 빔들이 넓게 형성되어 있다. 주파수 재사용계수 1을 적용한 경우 하위 퍼센티지부터 관찰된 단말 평균 데이터 속도가 퍼센티지가 증가함에 따라 점차 증가함을 관찰할 수 있었다. 계수 2,3을 적용한 경우에는 셀 경계부(또는 낮은 SINR)에 위치한 단말들의 평균 데이터 속도가 전체 평균 데이터 속도보다 더 높게 측정되었다. 이는 순환적 주파수 재사용을 적용했을 때 기지국 중심부에서 셀 간 간섭이 개선되는 긍정적 효과가 가용 무선자원의 감소로 인한 부정적 효과보다 더 크게 나타남을 의미한다. 주파수 재사용 계수 2,3의 경우는 그래프 상에서 유사한 등락 패턴을 보이나, 전반적인 단말 데이터 속도 측면에서 계수 2의 경우가 더 우수한 성능을 나타내었다.

## VI. 결론

본 논문에서는 드론형 기지국의 3차원 배치를 고려한 기지국 안테나 배열구조를 설계하였고, 해당 기지국 구조를 반영한 통신시스템을 모델링하였다. 밀리미터파 주파수대역에서의 기지국 성능평가를 위한 모델링 과정에서 주파수 재사용과 스케줄링과 같은 무선 자원 운용방안이 추가적으로 고려되었다. 이에 따른

시뮬레이션 결과를 분석하면 다중 빔 구조의 드론형 기지국에서 주파수 재사용 시 가용 무선 자원량의 감소가 throughput 성능에 큰 영향을 주었으나, 음영지역이나 셀 경계점과 같이 전파상태가 나쁜 영역에 위치한 단말의 성능이 개선되는 것을 알 수 있었다.

후속연구에서는 본 성능평가 모델을 기반으로 드론형 기지국을 운용하는 주파수 대역, 기지국의 구조, 운용 높이 및 송신전력, 스케줄링 방식을 다변화한 실험을 통해 최적의 드론형 기지국 운용환경을 도출해 낼 수 있을 것으로 예상된다.

## References

- [1] C. Cho, S. Park, I. Um, and H. Kim, "Exploring Trend and Technologies in Drone Development," *Communication of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers*, vol. 37, no. 1, 2019, pp. 10-19.
- [2] J. Jo, "Highway Drone Patrol Network Topology and Performance Analysis for Traffic Violation Enforcement," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 6, 2017, pp. 1043-1048.
- [3] S. Yeo, S. Hong, H. Choi, and C. Yoon, "Data-link Antenna Design for Drone Control," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, 2018, pp. 1169-1176.
- [4] B. Bergh, A. Chiumento, and S. Pollin, "LTE in the sky: trading off propagation benefits with interference costs for aerial nodes," *IEEE Communications Mag.*, vol. 54, no. 5, 2016, pp. 44-50.
- [5] F. Fabra, C. Calafate, J. Cano, and P. Manzoni, "On the impact of inter-UAV communications interference in the 2.4 GHz band," *Int. Wireless Communications and Mobile Computing Conf.*, Valencia, Spain, 2017, pp. 945-950.
- [6] S. Chandrasekharan, K. Gomaz, A. Al-Hourani, S. Kandeepan, T. Rasheed, L. Goratti, L. Reynaud, D. Grace, I. Bucaille, T. Wirth, and S. Allsopp, "Designing and implementing future aerial communication networks," *IEEE*

*Communications Mag.*, vol. 54, no. 5, 2016, pp. 26-34.

- [7] S. Chandrasekharan, A. Al-hourani, K. Gomez, S. Kandeepan, R. Evans, L. Reynaud, and S. Scalise, "Performance Evaluation of LTE and WiFi Technologies in Aerial Networks," *IEEE Globecom Workshops*, Washington DC, USA, 2016, pp. 1-7.
- [8] I. Yaliniz and H. Yanikomeroglu, "The New Frontier in RAN Heterogeneity: Multi-Tier Drone-Cells," *IEEE Communications Mag.*, vol. 54, no. 11, 2016, pp. 48-55.
- [9] J. Kim, J. Shin, S. Oh, and A. Park, "System Coverage and Capacity Analysis on Millimeter-Wave Band for 5G Mobile Communication Systems with Massive Antenna Structure," *Int. J. of Antenna Propagation*, vol. 2014, 2014, pp. 1-11.
- [10] P. Soma and L. Ong, "Propagation Measurements and Modeling of LMDS Radio Channel in Singapore," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 3, 2003, pp. 595-606.
- [11] H. Claussen, "Efficient Modeling of Channel Maps with Correlated Shadow Fading in Mobile Radio Systems," *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Berlin, Germany, 2005, pp. 512-516.
- [12] M. Rupp, S. Schwarz and M. Taranetz, *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation*, Springer, 2016.

## 저자 소개



### 정민우(Min-Woo Jeong)

2010년 경북대학교 전자전기 컴퓨터학부 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

