

소형 셀 밀도에 따른 상향링크와 하향링크 분리 연구

한 종 원*, 박 태 윤*, 홍 인 기°

Analysis of DUDe in Heterogeneous Network Based on Small Cell Density

Jong-Won Han*, Tae-Yoon Park*, Een-Kee Hong°

요 약

상·하향링크의 분리 (DL/UL Decoupling, DUDe)는 이기종 네트워크 (Heterogeneous Network)에서 상향링크의 용량을 증가시키기 위해서 관심이 높아지고 있는 기술이다. 기존의 셀룰러 네트워크에서는 상·하향링크 모두 하향링크의 참조 신호 세기를 바탕으로 셀 연결이 이루어졌지만, 상향링크는 경로손실이 적은 쪽의 기지국에 연결하는 것이 더 유리 할 수 있다. 특히, 셀 고밀화 (Cell Densification)된 초고밀도 네트워크 (Ultra Dense Network) 환경에서는 더욱 상·하향링크의 분리가 중요한 선택이 된다. 본 논문에서는 상·하향링크 분리를 이기종 네트워크 환경에서 시뮬레이션 하고, 소형 셀 기지국 개수를 늘려가며 매크로 셀과 소형 셀에 연결되는 상·하향링크 연결 수를 분석한다. 소형 셀이 어느 이상 늘어나게 되면 상향링크 coverage가 겹쳐져 DUDe로 연결될 수 있는 지역이 점차 줄어들게 되어 상향링크와 하향링크가 분리되는 단말기의 수가 줄어들게 된다. DUDe로 연결되는 단말기가 가장 많은 소형 셀 밀도의 네트워크와 그 이상의 소형 셀이 배치된 네트워크에서는 SINR coverage 및 상향링크 capacity 측면에서 비슷한 성능을 가져왔다. 이를 에너지 효율 (Energy Efficiency)면에서 확인한 결과, 상·하향링크가 분리되어 연결되는 단말기의 수가 가장 많은 소형 셀 밀도에서 가장 높은 에너지 효율을 가졌다. 즉, 소형 셀을 DUDe 연결에 대하여 적절한 밀도에 맞추면 소형 셀의 추가 증축이 없어도 상향링크의 성능이 소형 셀을 추가 증축한 결과와 비슷하기 때문에 에너지 효율과 비용적인 측면에서도 이득을 볼 수 있다.

Key Words : DUDe, Heterogeneous Network, Small Cell, Ultra-Dense Network, Uplink Capacity, Energy Efficiency

ABSTRACT

The DL/UL decoupling (DUDe) is an attractive technology to increase the capacity of the uplink in a heterogeneous network. In the conventional cellular network, cell connection is performed based on the downlink reference signal power in both uplink and downlink. However, it may be more advantageous to connect the uplink to the base station with less path loss. In this paper, we analyze the number of uplink and downlink connections by increasing a number of small cell base stations in heterogeneous network that DUDe algorithm is applied. As the number of small cells increases, the area where the uplink coverage overlaps and the area that

* 본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행되었습니다. (No.2018-0-01410, 고밀집 네트워크(UDN) 환경에서 고용량, 저비용 달성을 위한 무선전송 기술 개발)

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2019-2016-0-00 291)

• First Author : Kyung Hee University, Department of Electronics, anthonyhan@khu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Kyung Hee University, Department of Electronics, ekhong@khu.ac.kr, 종신회원

* Kyung Hee University, Department of Electronics, yooniq2@khu.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 201901-427-A-RN , Received January 14, 2019; Revised March 24, 2019; Accepted April 5, 2019

can be connected to the DUDe is gradually reduced, so that the number of UEs in which the uplink and the downlink are separated is reduced. SINR coverage and uplink capacity have similar performance in a network in which a UE connected to a DUD has the smallest cell density and a cell in which a small cell is disposed. As a result of checking energy efficiency, the UE has the highest energy efficiency at the small cell density with the largest number of UEs connected downlink. That is, if the small cell is adjusted to the proper density for the DUDe connection, the performance of the uplink is similar to the result of the addition of the small cell even without the additional enlargement of the small cell, which is advantageous in terms of energy efficiency and cost.

I. 서 론

현재 대부분의 셀룰러 네트워크에서 셀 연결은 상향 링크와 하향링크의 신호와 간섭의 세기가 다름에도 불구하고 하향링크의 참조 신호 세기를 기준으로 이루어진다. 이전까지는 하향링크에서 요구하는 최대 트래픽 용량이 상향링크에서 요구하는 것보다 훨씬 컸기 때문에 단말기가 하향링크의 신호 세기를 기준으로 기지국을 선택하는 것은 문제가 없었다. 하지만, 센서 네트워크를 기반으로 한 IoT 기술이 확산되고, 소셜 네트워크와 영상통화, 실시간 비디오 게임 등이 차지하는 트래픽이 많아지면서 상향링크에서 요구하는 수율의 크기가 계속해서 증가하고 있어 지금은 하향링크와 상향링크의 트래픽이 대칭성을 이루는 응용 프로그램들이 늘어나고 있다. 따라서 지금까지는 하향링크 채널 환경에 대한 최적화가 중요했다면, 앞으로는 상향링크 채널 환경에 대한 최적화가 주목받고 있다. 또한 위의 과정은 비슷한 송신 전력을 갖는 매크로 셀로만 이루어진 단일 기종 네트워크(Homogeneous Network)에서는 문제가 없었지만, 기지국의 종류 즉, 송신 전력의 크기 및 안테나 높이 등이 다른 두 셀로 구성된 이기종 네트워크(Heterogeneous Network)에서는 더 이상 단말기가 하향링크의 참조 신호 세기만을 가지고 기지국을 선택하여 상향링크와 하향링크를 모두 해당 기지국에 연결을 하는 것은 적절한 방법이 아닐 수 있다. 상향링크와 하향링크를 분리 즉, DUDe(DL/UL Decoupling)는 말 그대로 상향링크와 하향링크가 분리가 되어 이기종 네트워크(HetNet)을 구성하는 매크로 셀의 기지국과 매크로 셀 안에 위치한 소형 셀의 기지국에 각각 하향링크와 상향링크를 연결한다. 하지만, 이러한 연결 과정에서도 기준이 필요하다. 단말기가 하향링크를 기존의 방식대로 주변 셀에서 보낸 참조 신호의 수신 전력 세기를 기준으로 가장 큰 전력을 송신한 기지국을 선택한다면, 상향링크는 UE에서 보내는 송신 전력의 거의 비슷하기 때문에 경로 손실(Path Loss)가 적은 쪽

의 기지국을 선택한다. 그림 1은 위의 과정을 도식하고 있다.

그림 1에서 하향링크 셀 경계(Downlink cell border)는 단말기가 소형 셀 기지국과 매크로 셀 기지국으로부터 받은 참조 신호의 수신 전력이 같은 위치의 경계를 나타낸다. 즉, 경계 안쪽은 단말기가 소형 셀 기지국으로부터 받은 수신 전력이 매크로 셀 기지국으로부터 받은 수신 전력보다 큰 지역이고, 바깥쪽은 그 반대이다. 상향링크 셀 경계(Uplink cell border)는 단말기와 소형 셀 기지국, 단말기와 매크로 셀 기지국 간의 경로 손실이 같은 경계이다. 즉, 경계 안쪽은 단말기와 소형 셀 기지국간의 경로 손실보다 작은 지역이고, 바깥쪽은 마찬가지로 그 반대이다. 따라서 단말기가 하향링크 셀 경계안에 있으면 하향링크와 상향링크가 모두 소형 셀 기지국에 연결이 되고, 하향링크 셀 경계와 상향링크 셀 경계 사이에 있을 때 하향링크와 상향링크가 분리되어 하향링크는 매크로 셀 기지국으로, 상향링크는 소형 셀 기지국으로 연결되며, 상향링크 셀 경계 바깥으로 나가면 모든 링크가 매크로 셀 기지국에 연결된다^[1].

이렇게 되면, 매크로 셀에서의 상향링크 트래픽이 어느 정도 오프로드 되는 효과를 볼 수 있고, 상향링크

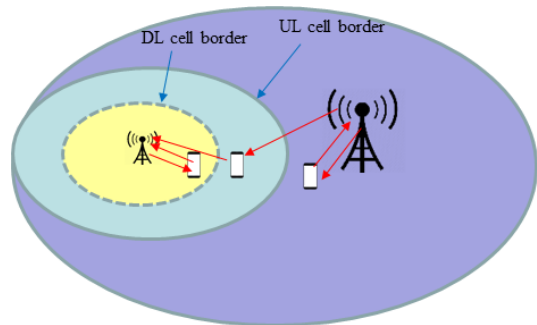


그림 1. DUDe의 개념도
Fig. 1. Concept of DUDe

의 셀 탐색이 하향링크와 독립적으로 이루어져 보다 더 최적의 환경을 바탕으로 연결이 가능해진다.

추가로, 논문에서 언급되는 DUDe는 상·하향링크가 분리되는 것만을 뜻하는 것이 아닌 그림 1에서 나타난 연결 알고리즘 전체를 뜻하기도 한다.

관련 연구로 이기종 네트워크에서의 DUDe에 관한 주요 개념은 기존 논문에서 상세하게 설명하고^{[1][2]}, DUDe를 도입해야 하는 5가지의 이유들을 여러 근거들을 통해 서술하였다^[2]. 상향링크를 연결할 기지국을 선택하는데 있어서 경로 손실만이 아닌 해당 기지국의 백홀 용량과 트래픽 부하를 함께 고려하여 더 효율적인 방법으로 적절한 기지국을 찾는 연구가 있고^[3], 역주파수 할당 (Reverse Frequency Allocation) 기법을 DUDe에 적용하여 상향링크의 간섭을 줄임으로써 기존의 DUDe보다 더 향상된 상향링크의 성능을 보여주는 연구도 존재한다^[4]. 이중 연결 (Dual Connectivity)와 DUDe를 결합하여 여러 가지의 케이스로 상향링크와 하향링크가 연결되는 경우를 정의하고, 각각의 케이스에 연결 기준을 정하여 주파수 효율 (Spectral Efficiency)를 서로 비교하였다^[5]. 또한, 기존 이기종 네트워크에 mm-wave를 이용하는 또 다른 소형 셀을 추가하여 3-tier의 환경에서 DUDe의 성능을 기존 2-tier의 환경과 비교하는 연구도 있고^[6], 초고밀도 네트워크에서 에너지 효율적 셀 접속 제어 기법을 연구하기도 했다^[7].

본 논문에서는 소형 셀의 개수를 늘려감에 따라 DUDe로 연결되는 단말기의 수와 그에 따른 SINR의 변화를 연구하고, DUDe로 연결된 단말기의 수가 최대가 되는 즉, DUDe에 최적화된 소형 셀의 밀도를 분석하였다. 소형 셀 밀도가 증가하면 SINR이 증가하지만 에너지 소모도 커진다. 밀도가 어느 이상 증가하면 DUDe로 연결되는 단말기의 수도 줄어들어 DUDe에 의한 상향링크 이득은 더 이상 늘지 않는다. 최적의 네트워크 구성을 위해서는 주어진 환경에서 최적의 소형 셀 밀도를 에너지 효율적 관점에서 분석을 할 필요가 있다. 이를 위해 DUDe가 가진 이점을 적극 활용하여 최적의 소형 셀 밀도를 분석하여 에너지 효율적인 측면과 비용적인 면에서 볼 때 소형 셀을 더 늘리지 않고도 이득을 볼 수 있는지 연구한다. II절에서는 DUDe의 시뮬레이션 환경을 간략하게 설명하고, III절에서는 시뮬레이션 결과, 그리고 IV절에서는 결론을 도출한다.

II. 시뮬레이션 환경 및 모델

7개의 매크로 셀을 가정하고 소형 셀을 균등 (Uniform) 분포로 각 셀에 배치하였다. 그리고 이 지역에 300개의 단말기를 가정하여 균등 분포로 배치했다. 그림 2는 시뮬레이션 환경으로 설정한 매크로 셀과 소형 셀의 배치를 나타낸다.

매크로 셀, 소형 셀 그리고 단말기의 전송 전력은 46dBm, 30dBm, 20dBm으로 각각 설정하고^[1], AWGN 채널에서 시분할 이중통신(TDD, Time Division Duplex) 방식과 직교 주파수 분할 다중접속 (OFDMA, Orthogonal Frequency-division Multiple Access) 방식을 가정하여 이러한 환경에서 소형 셀의 개수를 늘려가며 단말기들의 상향링크와 하향링크의 연결이 어떻게 이루어지는지 확인함으로써, 초고밀도 셀룰러 네트워크(UDN) 환경을 고려하여 분석하였다. 전파 모델은 상·하향링크 모두 Suburban model을 사용하였다^[9]. 하향링크는 기존대로 주변 기지국들이 송신하는 참조 신호의 수신 전력을 바탕으로 셀을 탐색하였고, 상향링크는 이외는 독립적으로 단말기와 기지국간의 경로 손실을 바탕으로 탐색하였다.

시뮬레이션은 표 1과 같은 환경을 구성하여 시행하였다.

2x2 MIMO 안테나 기법은 수신 전력에 따라 Spatial multiplexing mode와 Diversity mode를 교차하는 방법을 사용하였다. 참고 문헌 [8]에서 2x2 MIMO 안테나 기법의 성능을 분석하였고, Spatial multiplexing과 Diversity의 비트 오류율이 수신 전력 16dB에서 서로 교차하는 것으로 나타났다^[8]. 이를 응용하여 상향링크 SNR이 16dB보다 크면 기지국에서

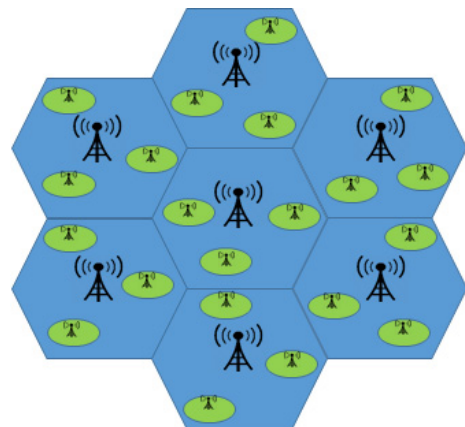


그림 2. 매크로 셀과 소형 셀의 배치
Fig. 2. Deployment of Macro Cells and Small Cells

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation Environment

Operating Frequency	2.6GHz
The Number of Macro Cells	7
Shape of Macro Cells	Hexagon
Area	1 km ²
Transmit Power of MBS	46dBm
Transmit Power of SBS	30dBm
Transmit Power of UE	20dBm
The number of UEs	300
Small Cell Distribution	Uniform
UE Distribution	Uniform
Antenna	2X2

이 정보를 단말기로 피드백 하여 비교적 높은 SNR에서 유리한 Spatial multiplexing mode로 설정하고, 반대로 16dB보다 작으면 비교적 낮은 SNR에서 유리한 Diversity mode로 스위칭 한다.

$$Antenna Mode = \begin{cases} Spatial\ Multiplexing, & SNR > 16dB \\ Diversity, & SNR < 16dB \end{cases} \quad (1)$$

이에 따른 시스템 용량은 다음과 같이 계산 하였다^[10].

$$m_n = \min [n(Tx), n(Rx)] \quad (2)$$

$n(Tx)$: The number of transmit antenna
 $n(Rx)$: The number of receive antenna

$$C = \begin{cases} \begin{cases} m_n \times BW \\ \times \log_2 \left(1 + \frac{n(Rx)}{m_n} \right) \\ \times SNR \end{cases}, & (SNR > 16dB) \\ \begin{cases} BW \times \log_2 \det(I_{n(Tx)}) \\ + \frac{SNR}{n(Rx)} HH^H \end{cases}, & (SNR < 16dB) \end{cases} \quad (3)$$

이 논문에서는 소형 셀 개수에 따른 시스템 성능을 에너지 효율 (Energy Efficiency, EE)을 통하여 분석하였다. 에너지 효율이란 네트워크 Capacity와 해당 Capacity를 얻기 위해 소비되는 전체 셀의 전력의 비로, 네트워크 Capacity를 전체 셀의 소비 전력으로 나누어 계산하였다. 식은 다음과 같이 정의된다^[11].

$$EE = \frac{Network\ capacity}{n_1 \times (EC_m) + n_2 \times (EC_s)} \quad (4)$$

n_1 : The number of macro cell
 n_2 : The number of small cell
 EC_m : Energy consumption of macro cell
 EC_s : Energy consumption of small cell

III. 시뮬레이션 결과

그림 3은 소형 셀은 매크로 셀 마다 균일하게 20개 부터 배치하여 100개까지 늘려가며 전체 매크로 셀에서의 상향링크와 하향링크, 그리고 전체 소형 셀의 상향링크와 하향링크의 수를 비교한 것을 나타낸 그래프이다.

실제로 소형 셀을 늘릴수록 매크로 셀의 상향링크와 하향링크의 수가 줄어들었고, 특히 상향링크의 수가 현저하게 떨어졌다. 그만큼 소형 셀의 상향링크와 하향링크의 수가 늘어났고, 특히 상향링크의 수가 크게 늘어났다. 소형 셀의 밀도가 커짐으로써, 연결되는 숫자가 커지는 것은 자명한 사실이나, 여기서 주목해야 할 사실은 전체 매크로 셀의 하향링크보다 더 많은 수의 상향링크가 소형 셀로 오프로드 된다는 점이다.

그림 4는 매크로 셀과 소형 셀에 연결된 단말기와 상·하향링크가 분리된 단말기의 수를 소형 셀의 밀도에 따라 나타낸 것이다. MC로 표현된 선은 매크로 셀에 상향링크와 하향링크가 모두 연결된 단말기의 수, SC로 표현된 선은 소형 셀에 상향링크와 하향링크가 모두 연결된 단말기의 수, 그리고 DUDe로 표현된 선은 하향링크는 매크로 셀에, 상향링크는 소형 셀에 연

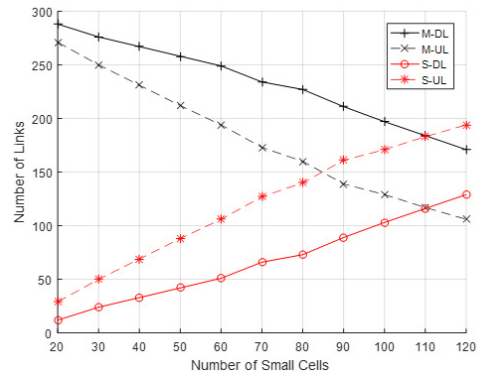


그림 3. 소형 셀 개수에 따른 상·하향 링크 각각의 연결 상태의 변화
Fig. 3. The number of links of DL/UL based on the number of small cells

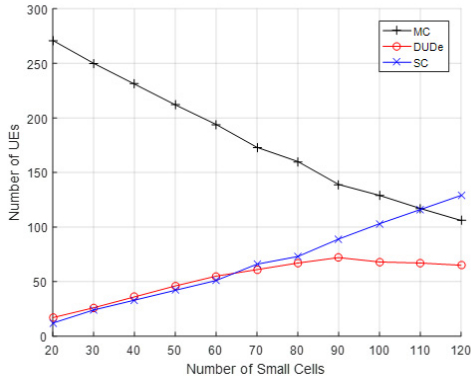


그림 4. 소형 셀 개수에 따른 상·하향 분리 링크 수
Fig. 4. The number of DUDe based on the number of small cells

결된 단말기의 수이다. 실제로 소형 셀이 늘어남으로써, 상향링크가 하향링크와 더 잘 분리되어 효과적으로 트래픽을 오프로드 할 수 있음을 확인 할 수 있다. 또한, 소형 셀 밀도가 낮을 때는 소형 셀 개수 증가에 따른 상·하향링크 분리에 의한 효과가 크게 증가하고, 소형 셀 밀도가 조금 더 커지면 상·하향링크 분리된 링크 수와 소형 셀로 연결된 링크 수가 비슷하게 증가하며, 소형 셀 밀도가 매우 높아지게 되면 상·하향링크 분리에 의한 효과는 줄어들고, 대부분의 링크가 소형 셀에 연결되는 것으로 분석되었다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이 90개의 소형 셀에서 DUDe로 연결된 단말기의 개수가 포화 된다. 소형 셀의 특정 개수에서 DUDe로 연결된 단말기의 수가 더 이상 증가하지 않는 이유는 아래의 그래프로 설명할 수 있다.

그림 5와 같이 단말기와 소형 셀과의 평균거리는 소

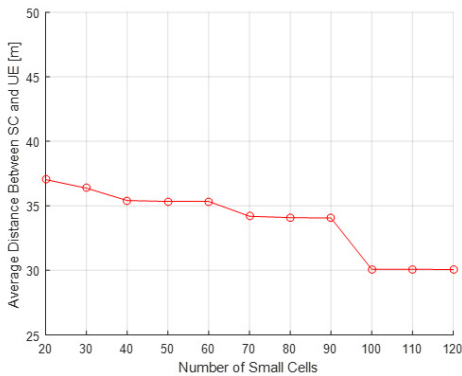


그림 5. 소형 셀 개수에 따른 소형 셀과 단말기 간의 평균 거리
Fig. 5. The average distance between small cell and UE

형 셀이 많아질수록 줄어들게 된다. 여기서 주목할 점은 소형 셀이 90개 되는 지점부터 소형 셀의 평균거리가 눈에 띄게 줄어든다는 점이다. 이는 소형 셀이 많아질수록 Coverage가 겹쳐질 확률이 높아지게 되고, 어느 순간부터는 소형 셀로 상향링크와 하향링크가 모두 소형 셀로 연결될 확률이 높아진다는 점을 시사한다.

소형 셀이 많아질수록 그림 6과 같이 상향링크 셀 경계와 하향링크 셀 경계 사이의 지역이 서로 겹쳐질 확률이 높다. 이에 따라 전체 소형 셀의 상향링크 Coverage는 그만큼 줄어들게 되고, DUDe로 연결되는 지점인 상향링크 셀 경계와 하향링크 셀 경계 사이의 지역은 줄어들게 되어 단말기는 소형 셀에 상향링크와 하향링크가 같은 기지국에 연결될 확률이 그만큼 늘어나게 된다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 소형 셀이 90개가 되는 지점에서 DUDe로 연결되는 수가 최대가 되고 그보다 더 많아지게 되면, 소형 셀끼리 그림 6과 같이 겹쳐질 확률이 더욱더 높아지기 때문에 DUDe로 연결되는 수는 오히려 줄어들게 된다.

그림 7은 각 SINR 경계값보다 높은 상향링크 SINR을 갖는 단말기들의 비율이다. 이 그래프에서 알 수 있

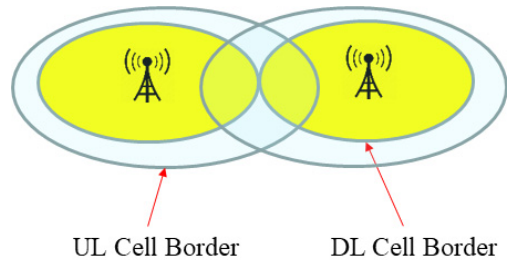


그림 6. 상향링크 Coverage가 겹친 두 소형 셀
Fig. 6. Small cells with overlapped uplink coverage

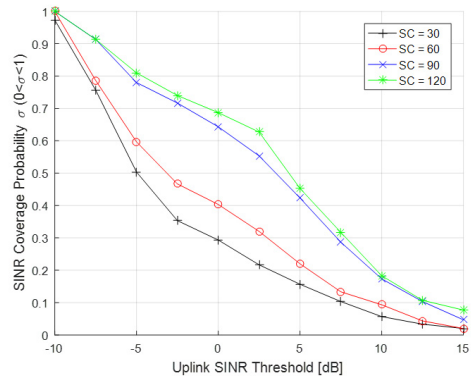


그림 7. 소형 셀 개수에 따른 SINR Coverage Probability
Fig. 7. SINR Coverage Probability based on the number of small cells

듯이 소형 셀의 개수가 많아지게 되면, Uplink SINR 은 그만큼 늘어나게 된다. 여기서 주목해야 할 점은 DUDe로 연결된 단말기의 수가 최대가 되는 소형 셀 90개의 환경의 SINR이 소형 셀 120개의 환경과 큰 차이를 보이지 않는다는 점이다.

그림 8은 소형 셀의 개수에 따라 에너지 효율을 나타낸 그래프이다. 소형 셀을 늘리게 되면 상향링크의 용량 또한 높아지는 것은 자명한 사실이나, DUDe 연결에 대한 최적의 소형 셀 밀도보다 소형 셀을 더 늘리게 되면 상·하향링크가 분리되어 연결되는 단말기의 수가 감소하고 상·하향링크 분리 연결을 함으로써 얻게 되는 이득 또한 감소하여 에너지 효율이 낮아지게 된다.

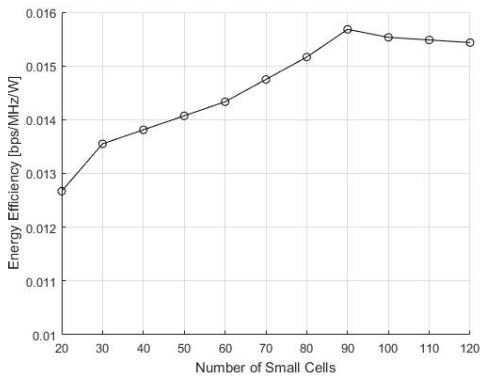


그림 8. 소형 셀 개수에 따른 에너지 효율
Fig. 8. Energy Efficiency based on the number of small cells

IV. 결 론

기존의 하향링크 참조 신호의 세기만을 가지고 상향링크까지 셀 연결을 하는 방식은 하향링크의 트래픽이 압도적으로 많은 경우에 있어서 문제가 되지 않는다. 최근에는 상향링크 트래픽이 증가함에 따라 상향링크는 더 이상 하향링크에만 맞춰진 최적의 환경을 선택하는 기준을 따라가기에는 무리가 있고, 별도의 최적화 기준이 필요하다. 소형 셀 개수가 증가함에 따라 상·하향링크 분리에 의한 링크 연결은 계속 증가하나, 셀의 고밀화 (Densification)가 어느 이상으로 진행되어 전체 소형 셀의 밀도가 늘어나게 되면 상·하향링크 분리로 연결된 단말기의 매크로 셀에 연결된 하향링크까지 소형 셀로 연결되기 때문에 상·하향링크 분리에 의한 연결은 특정 지점에서 더 이상 늘어나지 않는다. 실제 환경에서는 여러 제약 조건과 환경에 의해 시물

레이션 결과와 다른 결과를 가질 수 있으나, 본 연구에서는 상향링크 성능 면에서 상·하향링크를 분리한 연결이 가진 장점을 적극 활용할 수 있는 소형 셀 밀도가 존재하고 그 밀도에서는 에너지 효율적인 측면에서 최적의 이득을 얻을 수 있다는 점을 분석하였다. 이 분석을 통하여 UDN (Ultra-Dense Networks) 환경에서 상·하향링크 분리를 이용한 최적의 소형 셀 밀도를 찾을 수 있었다.

References

- [1] H. Elshaer, F. Boccardi, M. Dohler, and R. Irmer, "Downlink and Uplink Decoupling: A disruptive architectural design for 5G networks," *IEEE Global Commun. Conf.*, 2014.
- [2] F. Boccardi, J. Andrews, H. Elshaer, M. Dohler, S. Parkvall, P. Popovski, and S. Singh, "Why to decouple the uplink and downlink in cellular networks and how to do It," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 3, Mar. 2016.
- [3] H. Elshaer, F. Boccardi, M. Dohler, and R. Irmer, "Load & backhaul aware decoupled downlink/uplink access in 5G systems," *IEEE ICC*, London, UK, 2015.
- [4] F. Muhammad, Z. H. Abbas, G. Abbas, and L. Jiao, "Decoupled downlink-uplink coverage analysis with interference management for enriched heterogeneous cellular networks," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6250-6260, Sep. 2016.
- [5] M. A. Lema, E. Pardo, O. Galinina, S. Andreev, and M. Dohler, "Flexible dual-connectivity spectrum aggregation for decoupled uplink and downlink access in 5G heterogeneous systems," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 34, no. 11, Nov. 2016.
- [6] M. Shi, K. Yang, C. Xing, and R. Fan, "Decoupled heterogeneous networks with millimeter wave small cells," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Jul. 2018.
- [7] J. Park, "Energy efficient cell association method for ultra dense network," *J. KICS*, vol. 42, no. 12, pp. 2301-2303, Dec. 2017.
- [8] R. W. Heath and A. J. Paulraj, "Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no.

6, Jun. 2005.

- [9] ITU-R, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," Recommendation ITU-R P.1411-6 P Series Radiowave propagation, Feb. 2012.
- [10] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE-The UMTS Long Term Evolution*, A John Wiley and Sons, 2009.
- [11] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. Wang, and T. Han, "5G ultra-dense cellular networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 1, Feb. 2016.

한 종 원 (Jong-Won Han)



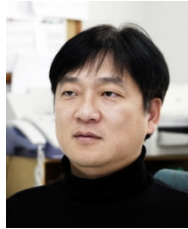
2018년 2월 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업
2018년 3월~현재 : 경희대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 5G, 이동통신, 무선 네트워크
[ORCID:0000-0002-2420-3422]

박 태 윤 (Tae-Yoon Park)



2018년 2월 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업
2018년 3월~현재 : 경희대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 5G, 이동통신, Machine Learning
[ORCID:0000-0001-5086-4008]

홍 인 기 (Een-Kee Hong)



1989년 2월 : 연세대학교 전기공학과 학사 졸업
1991년 2월 : 연세대학교 전기공학과 석사 졸업
1995년 8월 : 연세대학교 전기공학과 박사 졸업
1995년~1999년 : SKT 선임연구원
1999년~현재 : 경희대학교 전자전파공학과 교수
2012년~현재 : 미래창조과학부 주파수 정책 자문위원
2013년~현재 : 5G 포럼 주파수 위원회 위원장
2014년~현재 : 국무조정실 주파수 심의위원
2018년~현재 : 한국통신학회 부회장
<관심분야> 5G, 이동통신
[ORCID:0000-0001-6777-7058]