

5G 무선 네트워크 효율성 향상을 위한 Full Duplex NOMA Relay 최소 전송전력 시스템[☆]

Minimized Transmit Power Full Duplex NOMA Relay System for 5G Wireless Networks

김 규 하¹ 유 원 석¹ 정 중 문^{1*}
Kyuha Kim Wonsuk Yoo Jong-Moon Chung

요 약

5G 네트워크의 기술 중 NOMA의 핵심은 각 노드별 파워할당계수를 할당하는 것이다. 본 연구에서는 Full Duplex NOMA 릴레이 시스템을 대상으로 성공적인 디코딩을 위한 수신단 최소 필요 신호 대 잡음비 분석을 통해 NOMA 기술의 핵심인 Uplink/Downlink 파워할당계수를 산출하는 알고리즘을 구현하였다. 이를 통해 제안된 알고리즘과 기존 파워 할당 방식과의 성능비교를 실시하였으며 에르고딕 처리용량 및 전송실패율에 관하여 우수한 성능을 확인하였다.

ABSTRACT

The key concept of NOMA among 5G network technologies is to set the power allocation coefficient for each node. In this study, we implemented the algorithm that calculates the uplink/downlink power allocation coefficients which is the key concept of NOMA technology through analysis of minimum SNR required for successful decoding at the receiver, based on Full Duplex NOMA relay system. The performance comparison between the proposed algorithm and the existing power allocation methods is performed and the performance is confirmed in terms of ergodic sum capacity and outage probability.

☞ keyword : NOMA, Full Duplex, 5G, Minimum Energy Consumption

1. 서 론

4차 산업혁명은 인공지능 (AI), 사물 인터넷 (IoT), 클라우드 컴퓨팅, 5G 네트워크, 드론, 빅데이터, 머신러닝 (ML), 3D 프린팅, 바이오 테크놀로지 (BT), 나노 테크놀로지 (NT) 등 기술의 발전으로 촉발되는 지능화 혁명을 의미한다. 이 기술들의 발전은 이전에 있었던 산업혁명에 비해 훨씬 빠른 속도로 사회 전반에 걸친 광범위한 변화를 가져오게 될 것이다. 각 기술은 독립적으로 발전하는 것이 아니라 상호작용을 통해 성장해 나갈 것이다. 수년 내로 현재와는 비교되지 않을 정도로 많은 숫자의 플랫폼들이 네트워크상에 연결될 것이다. 5G 기술의 특징인 초고속, 저지연성, 초연결성 등을 통해 대용량의 정보를

실시간으로 주고 받으며 원격 통제가 가능하다. 5G 기술을 바탕으로 자율주행 자동차, 증강현실 등 다양한 서비스 산업과 스마트폰, 자동차, 드론 등 제조산업의 폭발적 수요 증대가 예상된다.

5G 네트워크의 성능 발휘를 위해서는 핵심기술인 Full Duplex와 NOMA (Non-orthogonal Multiple Access)의 구현이 필수적이다.

Full Duplex Relay가 가능하면 Relay를 위해 여분의 time slot이 필요 없으며 Downlink와 Uplink의 동시 전송이 가능하여 효율성이 높아진다.

NOMA는 동일한 주파수 대역에서 에너지 파워를 달리하는 신호를 전송하고, 수신기에서 SIC (Successive Interference Cancellation)을 통해서 신호를 찾는 방식이다. 이때 효율적인 데이터 송수신을 위해서 신호마다 적절한 파워할당계수 (Power Allocation Coefficient)를 할당하는 것이 중요하다.

논문 [1]에서는 Node 간에 고정된 지상 Relay를 통해서만 통신이 가능한 시스템을 분석하였다. 시스템 모델에 대하여 각각 FD-NOMA (Full Duplex Non-orthogonal

¹ School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea.

* Corresponding author (jmc@yonsei.ac.kr)

[Received 16 April 2019, Reviewed 15 May 2019, Accepted 29 May 2019]

[☆] 본 연구는 행정안전부 재단 예측 및 저감연구개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (MOIS-재난-2015-10)

Multiple Access), HD-NOMA (Half Duplex Non-orthogonal Multiple Access), HD-OMA (Half Duplex Orthogonal Multiple Access) 방식의 전송방법에 대하여 처리량 (Ergodic Capacity) 및 전송실패율 (Outage Probability)에 대한 분석을 하였다.

논문 [2]에서는 FDMA (Frequency Division Multiple Access) 기술을 기반으로 하는 드론 Relay의 IoT 기기 중계에 대한 시스템을 분석하였다. IoT 기기와 드론 간의 최소에너지 소비에 대한 분석 및 UAV의 최적 위치에 대한 분석을 하였다.

논문 [3]에서는 Cognitive Radio (CR) NOMA 기술을 바탕으로 시스템을 분석하였다. QoS requirement를 바탕으로 power allocation coefficient를 산출하였다.

본 연구에서는 Full Duplex 방식의 NOMA Relay를 활용하는 시스템에 관하여 분석하였다. 그중 시스템의 성능을 결정하는데 가장 중요한 파워할당계수의 산출 방법에 대한 알고리즘을 연구하였다. 경로별 채널 상태 및 path loss를 고려한 최소에너지를 계산하고 그에 따른 전력 최적비를 산출하였다. 또한 제한한 알고리즘의 적절성 확인을 위해 기존 논문과의 성능비교를 실시하였다.

2. 관련 연구 및 문제 제기

2.1 5G 네트워크 특성

네트워크 분야의 변화는 우리의 곁에 성큼 다가와 있다. 지난 2018 평창 동계올림픽에서 국내 한 통신사가 5G 네트워크를 세계 최초로 시범 운영함으로써 기술의 실현이 곧 눈앞에 다가왔음을 선보였다.

네트워크 분야의 기술 혁신이 중요한 이유는 다른 기술들의 발전을 위한 기초 토양이 되기 때문이다. 네트워크 기술 혁신, 즉 5G 네트워크는 단순히 기존 4G 네트워크에서 통신속도가 빨라진 것 이상의 기술 변화를 의미한다.

5G 이동 통신은 ‘초광대역 서비스 (eMBB : enhanced Mobile Broadband)’, ‘고신뢰·초저지연 통신 (URLLC : Ultra Reliable & Low Latency Communications)’, ‘대량연결 (mMTC : massive MachineType Communication)의 특성을 가지고 있다 [4-5].

초광대역 서비스는 더 많은 데이터를 더 빠른 속도로 보낼 수 있는 것을 의미한다. 5G 네트워크는 한 명의 사용자에게 최대 20 Gbps의 빠른 데이터 전송속도를 제공한다. 또한 네트워크가 열악한 지역 (Edge)에서도 100 Mbps

의 속도를 유지할 수 있다. 이러한 특성을 이용 시 3차원 영상통화, 가상현실 (VR) 및 증강현실 (AR)을 활용이 가능하다.

(표 1) 4G와 5G 네트워크 간 비교

(Table 1) Comparison between 4G and 5G networks

구분	4G	5G
데이터 속도	최대 : 1 Gbps 평균 : 10 Mbps	최대 : 20 Gbps 평균 : 100 Mbps
데이터 지연 (초)	10 ms	0.5 ms
연결 가능 기기 (수)	$10^5/km^2$	$10^6/km^2$
주파수 대역	800 MHz, 900 MHz 1.8 GHz, 2.1 GHz	3.5 GHz, 28 GHz

고신뢰·초저지연 통신은 네트워크의 안정성이 우수하고, 통신간에 지연시간이 극도로 짧다는 것을 의미한다. 기존 4G에서 지연시간이 10 ms 였던데 반해 0.5 ms 수준으로 감소한다. 예시로 시속 100 km/h로 주행 중인 자율자동차가 위험을 감지할 경우 3 cm 이내에서 제동 명령이 내려지기 때문에 사고의 위험을 대폭 감소시킬 수 있다.

대량연결은 수많은 사물 인터넷 (IoT) 기기, 자율주행 자동차 등이 서로 연결된 미래 환경에 적합하다. 5G 네트워크는 km^2 당 1백만 개의 기기들을 연결할 수 있도록 한다. 미래에는 스마트기기, 가전제품, 도로 등에 설치된 IoT의 숫자가 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 따라서 5G의 특성을 통해 이들에 대한 실시간 통제가 가능하다.

주파수 대역 측면에서 보았을 때 4G는 도달 범위가 넓은 낮은 대역의 주파수를 사용했다. 이 주파수는 효율이 높지만, 대역폭이 좁고 현재 포화상태에 이르렀다. 5G가 사용할 3.5 GHz 및 28 GHz 대역은 초고주파 대역이다. 기존 (10~20 MHz)에 대비해 대역폭이 10~100배 (100 MHz~1 GHz) 확장된다. 5G 주파수의 단점은 물리적 특성에 의해 도달거리가 짧고, 장애물 투과력이 낮다는 것이다. 이를 극복하기 위해 많은 안테나를 이용하여 전파 에너지를 집중하는 빔포밍 (beamforming), 수많은 안테나 배열을 이용하여 전파 자원을 많은 유저가 동시에 사용하는 대량 멀티 입출력 (Massive MIMO, Multi-Input Multi-Output) 등 기술을 발전시키고 있다.

2.2 Path loss

무선통신에 있어 거리, 위치, 지형, 주파수 특성 등에 따라 전파의 신호강도는 변화한다. 이를 예측하기 위해 다양한 모델들이 존재한다.

2.2.1 자유 공간 (Free Space Path Loss) 모델

이상적인 자유 공간에서 거리에 대한 신호전력의 단순한 감쇄만을 고려한 모델이다. 여기서 P_t 는 송신단에서의 파워, P_r 는 수신단에서의 파워, λ 는 파장, d 는 송수신단 사이의 거리이다.

$$PL(d) \text{ [dB]} = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = - \log \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

2.2.2 레일리 (Rayleigh) 모델

직접파보다 간접파 (반사파 등)이 우세할 경우 사용하는 모델이며, 시변하는 채널의 임펄스 응답의 envelope가 다음과 같은 확률분포를 따른다. 여기서 $2\sigma^2$ 는 NLOS 성분의 평균 파워를 나타낸다.

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-r^2/2\sigma^2}, \quad r \geq 0 \quad (2)$$

2.2.3 라이시안 (Rician) 모델

직접파가 간접파보다 우세한 환경에서 사용하는 모델이며, Rayleigh 모델과 마찬가지로 시변하는 채널의 임펄스 응답의 envelope가 다음과 같은 확률분포를 따른다. 여기서 $2\sigma^2$ 는 NLOS 성분의 평균 파워를 나타내며, μ^2 는 LOS 성분의 파워이다.

$$f_R(r) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2+\mu^2}{2\sigma^2}} I_0 \left(\frac{r\mu}{\sigma^2} \right) \quad (r \geq 0) \quad (3)$$

Rician K factor는 직접 경로와 그 밖의 경로간의 파워 비율을 나타낸다.

$$K = \frac{\text{Specular Power}}{\text{Nonspecular Power}} = \frac{\mu^2}{2\pi\sigma^2} \quad (4)$$

이 Rician K factor가 매우 커지면 ($K \gg 1$) 이는 Gaussian PDF의 형태로 근사화할 수 있다 [6].

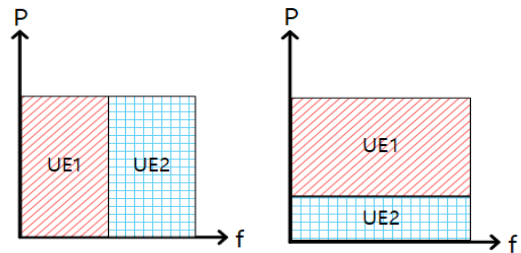
$$f_R(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi^2\sigma^2}} e^{-\frac{(r+\mu)^2}{2\pi^2\sigma^2}} \quad (5)$$

2.3 Full Duplex

송신과 수신을 동시에 실시하여 총 무선 자원 양을 높이는 방식이다. Half Duplex 방식의 경우 송신신호와 수신 신호를 주파수 영역 또는 시간 영역에서 구분할 수 있다. Full Duplex 방식의 경우 단일 안테나에서 송수신할 경우 송신부와 수신부의 모델이 정상적으로 작동하지 않을 수 있다. 이러한 문제 해결을 위해 Full Duplex 방식은 송신 안테나와 수신 안테나를 물리적으로 구분하여 사용한다[7].

2.4 NOMA

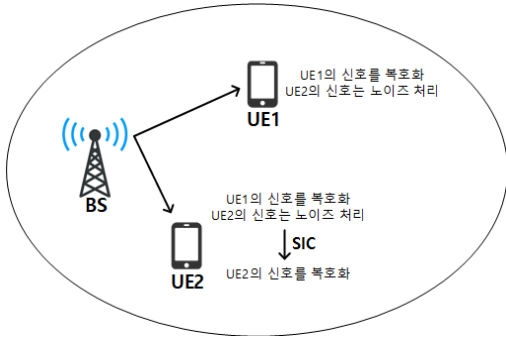
NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)는 셀의 용량 증대를 위해 동일한 시간, 주파수, 공간 자원 상에 복수의 단말에 대한 데이터를 동시에 전송하여 주파수 효율을 향상시키는 기술이다. 기존의 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 방식에 비교했을 때 같은 주파수상에 복수의 단말을 동시에 중첩 할당하여 자원 효율을 높이는데 특징이 있으며 그림 1과 같이 나타낼 수 있다 [7].



(그림 1) OFDMA방식 (좌)과 NOMA방식 (우) 비교
(Figure 1) Comparison of OFDMA method (left) and NOMA method (right)

기지국 (Base Station)은 채널간의 품질 차이가 나는 복수의 단말 (UE1, UE2)들의 데이터를 중첩 (Superposition) 하여 전송한다. 양호한 채널은 작은 전력을, 불량한 채널

에는 높은 전력을 할당한다. 양호한 채널의 단말은 강한 신호의 데이터를 SIC 방식을 통해 먼저 제거하고 자신의 신호를 얻는다. 불량한 채널의 단말은 강한 신호를 바로 얻을 수 있다. 이를 (그림 2)와 같이 나타낼 수 있다 [8-9].



(그림 2) NOMA 방식의 다운링크 데이터 전송 예시
(Figure 2) Example of NOMA Downlink Data Transmission

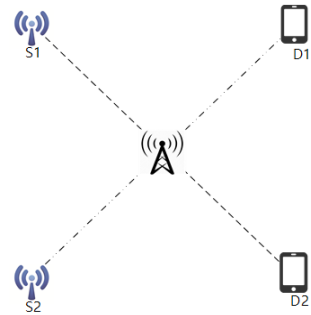
2.5 SIC

SIC는 물리계층 (physical layer)에서 사용되는 기법이다. 수신기 측에서 다중 수신신호를 동시 처리하는데 사용된다. 처리 대상 신호들 중에서 신호 강도의 차이를 이용하여 수신기에서 신호를 처리하는데 사용한다. 수신기의 입장에서 강한 신호를 먼저 복호화한 후, 나머지 신호로부터 약한 신호를 제거한다 [9].

2.6. 기존 연구의 문제점 및 한계

(그림 3)에서 보듯이 기존 연구에서는 각 노드 간의 거리 즉, $S_1 - R$, $S_2 - R$, $R - D_1$, $R - D_2$ 의 거리를 2차원 평면으로 계산하였다. 이에 비해 개선된 모델에서는 각 노드 (R, S_1, S_2, D_1, D_2)의 고도 변수를 추가하여 3차원 공간에서의 거리로 개선하였다.

본 연구에서는 노드 간 최소에너지를 계산 후에 파워 할당계수를 산출하는 알고리즘을 고안하였다. 제안된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 기존의 알고리즘과 처리량 (Ergodic Capacity) 및 전송실패율 (Outage Probability)에 대한 비교를 하였다.



(그림 3) 기존 FD-NOMA 모델
(Figure 3) Previous FD-NOMA model

3. 네트워크 구조 및 프로토콜 구성

3.1 시스템 환경

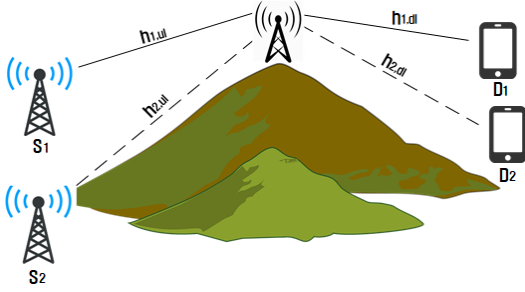
본 연구에서는 FD-NOMA-RS (Full-Duplex Non-orthogonal Multiple Access Relay Sharing) 방식의 모델을 기반으로 시스템의 성능을 분석하였다.

(표 2) 변수 표기 목록

(Table 2) Parameter notation list

표기	뜻
$CN(a,b)$	복소정규분포 (평균 a , 분산 b)
G_1	Source 및 Destination $\{S_1, D_1\}$ 짝
G_2	Source 및 Destination $\{S_2, D_2\}$ 짝
d	거리
λ	신호의 파장
v	Path loss exponent
h	채널 이득
(x_i, y_i, h_i)	Source 및 Destination 좌표 ($i = 1, 2, 3, 4$)
(x_j, y_j, h_j)	릴레이 위치 좌표
θ_{ij}	Source or Destination 노드 및 릴레이 간 각도
η_1, η_2	LOS, NLOS 링크의 Excessive Path Loss Exponent
θ_i	노드별 파워 할당 계수 ($i = 1, 2, 3, 4$)
ρ_s	송신 파워 대 잡음 분산의 비
I_s	Residual Self-interference
P_t	Source 노드에서의 총 전송 파워
P_r	Relay 노드에서의 총 전송 파워
C_{O_1}	G_1 에서의 최소 요구 QoS
C_{O_2}	G_2 에서의 최소 요구 QoS
$Ei(z)$	Exponential 적분 함수 ($\int_{-\infty}^z \frac{e^t}{t} dt$)

Full Duplex 프로토콜은 2개의 source가 동시에 Relay를 경유하여 각각 상응하는 Destination과 통신 가능한 네트워크를 의미한다.

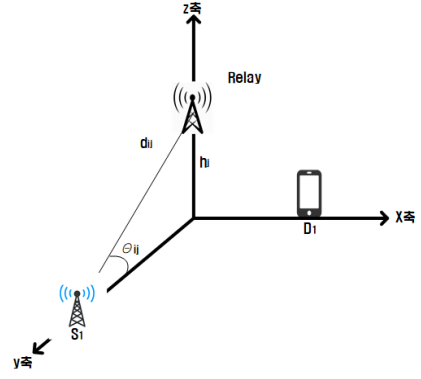


(그림 4) 시스템 모델
(Figure 4) System model

(그림 4)의 모델에서 2개의 source (S_1, S_2)와 2개의 destination (D_1, D_2) 사이에 직접 통신은 불가능하며 고지대에 있는 Relay 통신만 가능한 것으로 가정한다. Relay (이하 R)는 FD 프로토콜을 사용하며 DF 방식으로 데이터를 전송한다. 시스템은 두 쌍의 S-D를 각각 $G_1 = \{S_1, D_1\}$, $G_2 = \{S_2, D_2\}$ 로 구분하며 동일 주파수 대역을 사용한다. 이때 G_1 의 채널 상태가 G_2 보다 나쁘다고 가정한다.

R, S_1, S_2, D_1, D_2 의 위치가 결정되면 다음의 두 가지 사항을 고려해야 한다. 첫째 S_1, S_2 는 동시에 R에게 Uplink NOMA의 원칙에 따라 신호를 전송한다. R은 합성된 신호를 D_1, D_2 에게 전송한다. 둘째 SIC는 같은 S-D쌍을 위해 Uplink와 Downlink에서 실행되며 이는 시스템 전체의 capacity를 증대시킨다.

본 시스템 모델은 라이시안 페이딩 모델을 적용하며 Gaussian noise의 영향을 받는다고 가정한다. 링크별 complex channel coefficients는 $S_1 \rightarrow R, R \rightarrow D_1, S_2 \rightarrow R, R \rightarrow D_2$ 각각의 경우에 $h_{1,ul} \sim CN(0, \lambda_{1,ul} = d_{1,ul}^{-\alpha})$, $h_{1,dl} \sim CN(0, \lambda_{1,dl} = d_{1,dl}^{-\alpha})$, $h_{2,ul} \sim CN(0, \lambda_{2,ul} = d_{2,ul}^{-\alpha})$, $h_{2,dl} \sim CN(0, \lambda_{2,dl} = d_{2,dl}^{-\alpha})$ 과 대응한다. 이때 α 는 path loss exponent이며 $d_{1,ul}, d_{1,dl}, d_{2,ul}, d_{2,dl}$ 은 각각 $S_1 \leftrightarrow R, R \leftrightarrow D_1, S_2 \leftrightarrow R, R \leftrightarrow D_2$ 간의 거리를 의미한다. 이때 $d_{1,ul} > d_{2,ul}, d_{2,dl} < d_{1,dl}$ 인 것으로 가정한다. 또한, $CN(a, b)$ 는 평균 a , 분산 b 인 복소정규분포를 나타낸다.



(그림 5) 3차원 공간 모델
(Figure 5) 3D spatial model

3.2 APAC 알고리즘

R, S_1, S_2, D_1, D_2 는 3차원 좌표 위에 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. R의 좌표를 (x_j, y_j, h_j) 로 나타내며 S_i, S_2, D_1, D_2 의 좌표는 각각 (x_i, y_i, h_i) ($i = 1, 2, 3, 4$)의 형식으로 나타낸다. 이때 각각의 거리인 d_{ij} 는 다음과 같이 나타낸다.

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (h_i - h_j)^2} \quad (6)$$

또한 R과 S_1, S_2, D_1, D_2 가 각각 이루는 고각 θ_{ij} 는 다음과 나타낸다.

$$\theta_{ij} = \frac{180}{\pi} \times \sin^{-1} \left(\frac{h_j - h_i}{d_{ij}} \right) \quad (7)$$

R과 S_1, S_2, D_1, D_2 이 각각 이루는 LoS (Line of Sight) 확률 (P_{LoS}^{ij}) 및 NLoS (Non Line of Sight) 확률 (P_{NLoS}^{ij})은 다음과 같이 나타낸다.

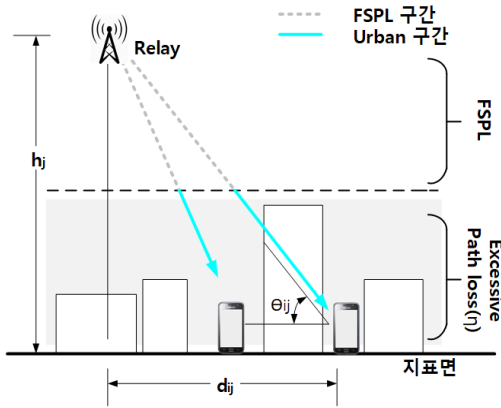
$$P_{LoS}^{ij} = \frac{1}{1 + \psi \exp(-\beta[\theta_{ij} - \psi])} \quad (8)$$

$$P_{NLoS}^{ij} = 1 - P_{LoS}^{ij}$$

이때 ψ 와 β 는 전파 환경에 따라 결정되는 상수값이다. R과 S_1, S_2, D_1, D_2 의 LoS와 NLoS 링크에 따른 path loss 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ij} = \begin{cases} \eta_1 \left(\frac{4\pi f c d_{ij}}{c} \right)^\alpha, \text{ LoS 링크} \\ \eta_2 \left(\frac{4\pi f c d_{ij}}{c} \right)^\alpha, \text{ NLoS 링크} \end{cases} \quad (9)$$

f_c 는 주파수이며, α 는 path loss exponent, c 는 빛의 속도이다. η_1, η_2 ($\eta_2 > \eta_1 > 1$)는 excessive path loss coefficient를 의미한다. excessive path loss coefficient의 의미는 (그림 6)에서 보는 것과 같으며 채널 환경에 따라 다른 값을 부여할 수 있다 [10].



(그림 6) Excessive Path Loss 모델
(Figure 6) Excessive Path Loss model

(8)과 (9)의 식을 바탕으로 R과 S₁, S₂, D₁, D₂ 사이의 평균 Path loss는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{L}_{ij} = P_{LoS}^{ij} \eta_1 \left(\frac{4\pi f c d_{ij}}{c} \right)^\alpha + P_{NLoS}^{ij} \eta_2 \left(\frac{4\pi f c d_{ij}}{c} \right)^\alpha \quad (10)$$

Uplink NOMA의 원칙에 따라 S₁, S₂의 전송 심볼인 s₁과 s₂는 동시에 $\theta_1 P_t$ 와 $\theta_2 P_t$ 의 파워로 전송이 된다. 이때 θ_1 과 θ_2 는 파워할당계수 (power allocation coefficients)이며 P_t 는 source의 총 전송파워이다. 한편 R은 Downlink NOMA의 원칙에 따라 $\theta_3 P_r$ 과 $\theta_4 P_r$ 의 파워로 D₁, D₂에게 신호를 전송한다. P_r 은 R에서의 총 전송파워이며, s₁과 s₂는 R에서 데이터 심볼로 재생성된다. 이때 $\theta_1 + \theta_2 = 1$, $\theta_3 + \theta_4 = 1$ 을 만족한다. 최적화된 θ 값을 산출하기 위해서 각 경로별 평균 path loss와 threshold SINR 값을 이

용한다. S₁ - R, S₂ - R, R - D₁, R - D₂의 평균 path loss는 각각 \bar{L}_{1j} , \bar{L}_{2j} , \bar{L}_{3j} , \bar{L}_{4j} 로 나타낸다. 또한 S₁ - R, S₂ - R, R - D₁, R - D₂의 각각의 전송파워는 P_{t1} , P_{t2} , P_{r3} , P_{r4} 로 나타낸다.

R, D₁, D₂에서 신호를 성공적으로 디코딩하기 위한 threshold SNR을 P_{th} 이라고 하면 평균 path loss와 P_{t1} , P_{t2} , P_{r3} , P_{r4} 사이에는 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \bar{L}_{1j} &= \frac{P_{t1}}{P_{th,1}} \\ \bar{L}_{2j} &= \frac{P_{t2}}{P_{th,2}} \\ \bar{L}_{3j} &= \frac{P_{r3}}{P_{th,3}} \\ \bar{L}_{4j} &= \frac{P_{r4}}{P_{th,4}} \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 S₁ - R, S₂ - R, R - D₁, R - D₂의 각 경로별 최소 전송 파워는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{t1} &= \bar{L}_{1j} \times P_{th,1} \\ P_{t2} &= \bar{L}_{2j} \times P_{th,2} \\ P_{r3} &= \bar{L}_{3j} \times P_{th,3} \\ P_{r4} &= \bar{L}_{4j} \times P_{th,4} \end{aligned} \quad (12)$$

이를 이용하여 Uplink와 Downlink의 각각의 파워 총량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_t &= \theta_1 P_t + \theta_2 P_t = P_{t1} + P_{t2} \\ P_r &= \theta_3 P_r + \theta_4 P_r = P_{r3} + P_{r4} \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 각 경로별 평균 path loss 및 최소 전송 파워, threshold 파워를 구한 후 이에 근거하여 파워할당계수 θ 를 산출할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_1 = \frac{P_{t1}}{P_{t1} + P_{t2}} \quad (14)$$

$$\theta_2 = \frac{P_{t2}}{P_{t1} + P_{t2}}$$

$$\theta_3 = \frac{P_{r3}}{P_{r3} + P_{r4}} \quad (14)$$

$$\theta_4 = \frac{P_{r4}}{P_{r3} + P_{r4}}$$

지금까지의 과정들을 알고리즘으로 순서도 형식으로 정리하면 (그림 7)과 같이 나타낼 수 있다. 이 알고리즘의 명칭은 APAC (Adaptive Power Allocation Control scheme) 이라고 한다. 이 알고리즘을 pseudocode로 정리하면 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

산출된 APAC 값은 최소 수신 SNR, 각 노드의 위치 변화, 채널 환경 변화 등에 따라 변경된다.

3.3 SINR 모델

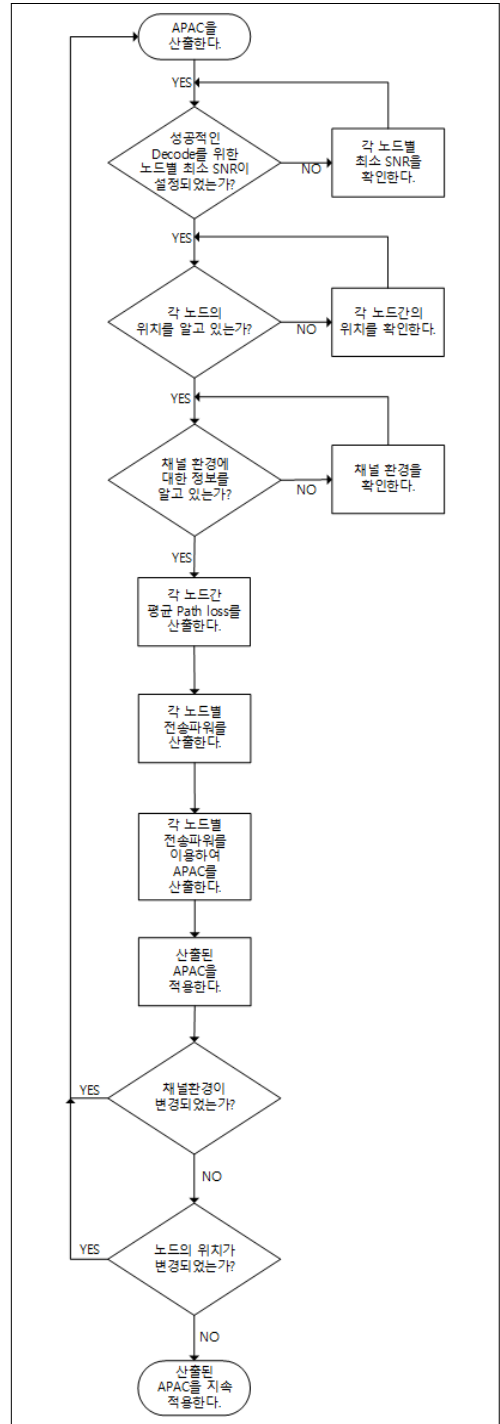
Uplink NOMA에서의 전송절차를 살펴보면 먼저 FD의 특성에 따라 R은 S₁, S₂의 신호를 동시에 전송가능하다. R은 양질의 채널 컨디션을 가진 s₁을 먼저 디코딩하고 상대적으로 나쁜 채널 컨디션의 s₂를 잡음으로 처리한다. 이후 R은 SIC를 통해 s₂의 데이터를 얻는다. 이때 R에서의 s₁과 s₂의 수신 SINR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{s1}^{f1} = \frac{\theta_1 \rho_s |h_{1,ul}|^2}{\theta_2 \rho_s |h_{2,ul}|^2 + I_s + 1} \quad (15)$$

$$\gamma_{s2}^{f1} = \frac{\theta_2 \rho_s |h_{2,ul}|^2}{\theta_1 \rho_s |\bar{g}_{1,ul}|^2 + I_s + 1} \quad (16)$$

이때 $\rho_s \approx \frac{P_t}{\sigma^2}$ 이고 $\bar{g}_{1,ul} \sim CN(0, k_1 \lambda_{1,ul})$ 이며 σ^2 은 noise variance이다. I_s 는 residual self-interference를 나타내며 상수로 간주할 수 있다. residual interference의 크기에 따라 R에서의 SIC 성능은 완벽하지 않은 것으로 간주하며 k_1 은 다음의 범위에 위치한다. $0 \leq k_1 \leq 1$. 만약 특별한 경우에 $k_1 = 0$, $k_1 = 1$ 이라면 완벽한 SIC 또는 SIC가 존재하지 않는다고 할 수 있다.

Downlink NOMA의 전송절차는 다음과 같다. D₁은 s₁을 디코딩하며 s₂를 노이즈로 간주한다. 따라서 D₁에서의 수신된 SINR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(그림 7) APAC 알고리즘 순서도
(Figure 7) APAC algorithm flowchart

```

Set  $P_{th,i}, \forall i \in \{1,2,3,4\}$ 
Get  $x_j(0), y_j(0), h_j(0), x_i(0), y_i(0), h_i(0)$ 
    Compute  $d_{i,j}(0), \theta_{i,j}(0)$  using (6), (7)
    Compute  $P_{LoS}^{ij}(0), P_{NLoS}^{ij}(0)$  using (8)
    Compute  $\bar{L}_{ij}(0)$  using (10)
    Compute  $P_{ti}(0)$  using (12)  $\forall i \in \{1,2\}$ 
    Compute  $P_{ri}(0)$  using (12)  $\forall i \in \{3,4\}$ 
    Compute  $\theta_i^*$  using (14)  $\forall i \in \{1,2,3,4\}$ 
         $\theta_i(0) = \theta_i^* \quad \forall i \in \{1,2,3,4\}$ 
For each time  $t > 0$ 
    Get  $x_j(t), y_j(t), h_j(t), x_i(t), y_i(t), h_i(t)$ 
    if  $x_i(t) = x_i(t-1) \ \&\& \ y_i(t) = y_i(t-1) \ \&\&$ 
         $h_i(t) = h_i(t-1) \ \&\& \ x_j(t) = x_j(t-1) \ \&\&$ 
         $y_j(t) = y_j(t-1) \ \&\& \ h_j(t) = h_j(t-1)$ 
        continue
    else
        Compute  $d_{i,j}(t), \theta_{i,j}(t)$  using (6), (7)
        Compute  $P_{LoS}^{ij}(t), P_{NLoS}^{ij}(t)$  using (8)
        Compute  $\bar{L}_{ij}(t)$  using (10)
        Compute  $P_{ti}(t)$  using (12)  $\forall i \in \{1,2\}$ 
        Compute  $P_{ri}(t)$  using (12)  $\forall i \in \{3,4\}$ 
        Compute  $\theta_i^*$  using (14)  $\forall i \in \{1,2,3,4\}$ 
             $\theta_i(t) = \theta_i^* \quad \forall i \in \{1,2,3,4\}$ 
    End
    
```

(그림 8) APAC 알고리즘 pseudocode
(Figure 8) APAC algorithm pseudocode

$$\gamma_{s1}^{t2} = \frac{\theta_3 \rho_r |h_{1,d1}|^2}{\theta_4 \rho_r |h_{1,d1}|^2 + 1} \quad (17)$$

반대로 D₂는 먼저 높은 파워의 신호인 s₁을 디코딩하고 s₂는 노이즈로 처리한다. 그리고 SIC를 통해 s₂의 데이터를 얻는다. 따라서 D₂에서 s₁, s₂의 수신된 SINR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{s1 \rightarrow s2}^{t2} = \frac{\theta_3 \rho_r |h_{2,d1}|^2}{\theta_4 \rho_r |h_{2,d1}|^2 + 1} \quad (18)$$

$$\gamma_{s2}^{t2} = \frac{\theta_4 \rho_r |h_{2,d1}|^2}{\theta_3 \rho_r |h_{2,d1}|^2 + 1} \quad (19)$$

이때 $\rho_r \approx \frac{Pr}{\sigma^2}$ 이고 $\bar{g}_{2,d1} \sim CN(0, k_2 \lambda_{2,d1})$ 이며 $\gamma_{s1 \rightarrow s2}^{t2}$ 는 D₂가 s₁ 심볼을 얻기 위해 요구되는 SINR을 의미한다. k_2 의 범위는 k_1 의 범위와 동일하다.

3.4 CR-NOMA 모델

논문 [3]에서는 Node와 릴레이 간의 파워할당계수를 다음의 식을 활용하여 산출하였다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \min \left\{ 1, \frac{\left(|h_1|^2 + \frac{1}{\rho} \right) (2^{R_1} - 1)}{|h_1|^2 2^{R_1}} \right\} \\ \theta_2 &= 1 - \theta_1 \\ \theta_3 &= \min \left\{ 1, \frac{\left(|h_3|^2 + \frac{1}{\rho} \right) (2^{R_3} - 1)}{|h_3|^2 2^{R_3}} \right\} \\ \theta_4 &= 1 - \theta_3 \end{aligned} \quad (20)$$

(20)식에서 R_1, R_3 은 Node 1, 3의 target data rate이며, ρ 는 전송 파워, $|h_1|^2, |h_3|^2$ 은 channel gain이다.

4. 성능분석

4.1 Ergodic capacity

4.1.1 G₁의 Ergodic capacity

(15), (17), (18)의 수식을 이용하여 G₁의 Capacity를 산출할 수 있으며 Shannon의 정리를 활용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \log_2 (1 + \min(\gamma_{s1}^{t1}, \gamma_{s1}^{t2}, \gamma_{s1 \rightarrow s2}^{t2})) \quad (21)$$

이는 근사화를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_1^{FD} &= \frac{\theta_1 \lambda_{1,ul} \log_2 e}{\theta_1 \lambda_{1,ul} - \theta_2 \lambda_{2,ul}} \\ &\quad \times \ln \frac{\theta_1 \lambda_{1,ul} (\theta_3 + \theta_4)}{\theta_1 \theta_4 \lambda_{1,ul} + \theta_2 \theta_3 \lambda_{2,ul}} \end{aligned} \quad (22)$$

4.1.2 G₂의 Ergodic capacity

(16), (19)의 수식을 이용하여 G₂의 capacity를 산출할 수 있으며 Shannon의 정리를 활용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_2 = \log_2(1 + \min(\gamma_{s_2}^{t_1}, \gamma_{s_2}^{t_2})) \quad (23)$$

이는 근사화를 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_2^{FD} = P \log_2 e - Q e^m Ei(-m) + Re^{mn} Ei(-mn) + (Q-R)e^{mo} Ei(-mo) \quad (24)$$

위 식의 각각의 변수는 다음과 같다. $i = \theta_2 \lambda_{2,ul}$, $j = \theta_1 k_1 \lambda_{1,ul}$, $k = \theta_4 \lambda_{2,dl}$, $l = \theta_3 k_2 \lambda_{2,dl}$, $I_c = I_s + 1$ ($I_s = 0$ dB), $m = \frac{I_c}{\theta_2 \rho_s \lambda_{2,ul}} + \frac{1}{\theta_4 \rho_r \lambda_{2,dl}}$, $P = \frac{i}{i-j}$, $Q = \frac{k}{k-l}$, $R = \frac{k}{k-ln}$, $n = \frac{i}{j}$, $o = \frac{k}{l}$. $Ei(z)$ 는 exponential 적분 함수로서 $\int_{-\infty}^z \frac{e^t}{t} dt$ 로 나타낸다.

4.1.3 전체 시스템의 Ergodic sum capacity

(22), (24)의 수식을 이용하여 시스템의 총 capacity는 다음과 같이 구할 수 있으며 E는 expectation operator이다.

$$C_{sum}^{FD} = E\{C_1\} + E\{C_2\} \quad (25)$$

4.2 Outage Probability

C_{O_1} 과 C_{O_2} 는 G₁과 G₂에서 요구되는 최소 QoS (Quality of Service) 값이다.

4.2.1 G₁의 Outage Probability

각각에서 요구되는 최소 QoS 값 및 수신단 SNR 확률 분포를 고려하여 G₁에서의 Outage Probability는 다음과 같이 구할 수 있다 [1].

$$P_{O,1}^{FD} = 1 - P_r(\gamma_{s_1}^{t_1} > 2^{C_{O_1}} - 1) \times P_r(\gamma_{s_1}^{t_2} > 2^{C_{O_1}} - 1) = 1 - \frac{\theta_1 \rho_s \lambda_{1,ul}}{\theta_1 \rho_s \lambda_{1,ul} + \theta_2 \rho_s \lambda_{2,ul} R_t} e^{-\frac{R_t}{\theta_1 \rho_s \lambda_{1,ul}}} - \frac{R_t}{(\theta_3 - \theta_4 R_t) \rho_s \lambda_{1,dl}} \quad (26)$$

이때 $R_t = 2^{C_{O_1}} - 1$ 이다.

4.2.2 G₂의 Outage Probability

마찬가지로, G₂에서의 Outage Probability는 다음과 같이 구할 수 있다 [1]. G₁에서의 Outage Probability와의 수식 차이는 D₁, D₂에서의 디코딩 방식 차이에서 기인한다.

$$P_{O,2}^{FD} = 1 - P_r(\gamma_{s_1}^{t_1} > 2^{C_{O_1}} - 1) \times P_r(\gamma_{s_1}^{t_2} > 2^{C_{O_2}} - 1) \times P_r(\gamma_{s_1 \rightarrow s_2}^{t_2} > 2^{C_{O_1}} - 1) = 1 - \frac{\theta_2 \theta_4 \lambda_{2,ul} \lambda_{2,dl}}{(\theta_2 \lambda_{2,ul} + \theta_1 k_1 \lambda_{1,ul} \bar{R}_t)(\theta_4 \lambda_{2,dl} + \theta_3 k_2 \lambda_{2,dl} \bar{R}_t)} \times e^{-\frac{\bar{R}_t}{\theta_2 \rho_s \lambda_{2,ul}} - \frac{\bar{R}_t}{\theta_4 \rho_r \lambda_{2,dl}} - \frac{\bar{R}_t}{(\theta_3 - \theta_4 R_t) \rho_r \lambda_{2,dl}}} \quad (27)$$

이때 $\bar{R}_t = 2^{C_{O_2}} - 1$ 이다.

4.2.3 전체 시스템의 Outage Probability

(26), (27)의 수식을 이용하여 시스템의 총 Outage Probability는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{sum}^{FD} = P_{O,1}^{FD} + P_{O,2}^{FD} \quad (28)$$

5. 성능평가

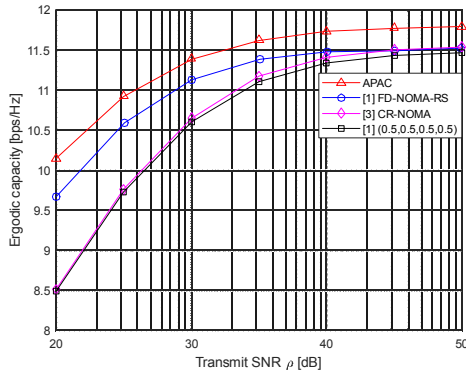
새로 제시한 APAC 알고리즘의 성능평가를 위해 기존 논문[1], [3]에 제시되었던 파워할당계수와 대조군으로 Default 값을 대입하여 Ergodic Capacity, Outage Probability를 비교하였다.

(표 3) 시뮬레이션 parameter
(Table 3) simulation parameter

변수	값	변수	값
d_{1r}, d_{r2}	0.25	d_{2r}, d_{r1}	0.5
α	3	I_s	0 dB, -20dB
k_1, k_2	$(0.02)^3$ $(0.04)^3$	f_c	3.5 GHz
C_t	0.5 bps/Hz	v	4
G ₁ η_1, η_2	0.1, 21 dB	G ₂ η_1, η_2	2.3, 34 dB

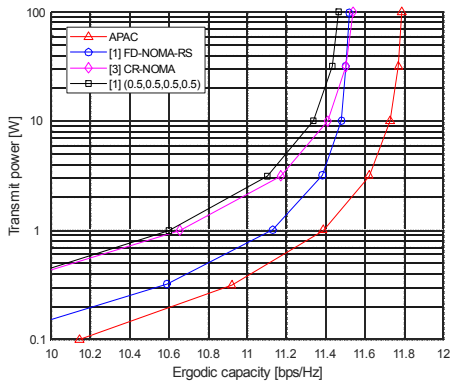
5.1 Ergodic Capacity

논문 [1]에서 제안된 파워할당계수, 논문 [3]의 공식에 의해 산출된 파워할당계수, APAC 알고리즘의 절차를 거쳐 얻은 파워할당계수를 활용하여 capacity를 산출하면 (그림 9)와 같은 그래프를 얻을 수 있다.



(그림 9) 전송파위에 따른 Ergodic Capacity 변화량
(Figure 9) Capacity variation depending on transmission power

모든 알고리즘의 Ergodic Capacity는 전송 SNR의 증가에 비례하여 점진적으로 증가한다. 그중 APAC의 Ergodic Capacity가 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 전송파위 50 dB를 기준으로 APAC 알고리즘의 경우 FD-NOMA-RS에 비해 약 0.25 bps/Hz가 높다.



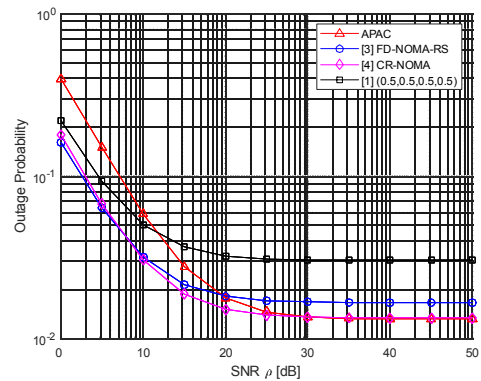
(그림 10) Ergodic Capacity에 따른 전송파위
(Figure 10) Transmission power depending on Ergodic Capacity

제안된 알고리즘의 이점을 Ergodic Capacity에 따른 전송파위의 관점에서 바라보면 더욱 확실하게 알 수 있다. (그림 10)에서 볼 수 있듯이 동일한 Ergodic Capacity를 전송하고자 할 때 APAC이 최소의 에너지를 소비하여 전송 가능함을 확인할 수 있다.

5.2 Outage Probability

Ergodic Capacity와 마찬가지로 논문 [1]에서 제안된 파워할당계수, 논문 [3]의 공식에 의해 산출된 파워할당계수, APAC 알고리즘의 절차를 거쳐 얻은 파워할당계수를 활용하여 Outage Probability를 산출할 수 있다.

이때 시뮬레이션에 있어서 outage threshold는 $C_{o1} = C_{o2} = C_t$ 라고 가정한다.



(그림 11) 전송파위에 따른 Outage Probability 변화량
(Figure 11) Outage Probability Variation depending on transmission power

모든 알고리즘의 Outage Probability는 전송 SNR의 증가에 따라 감소한다. APAC 알고리즘은 낮은 SNR에서는 Outage Probability가 상대적으로 높지만 전송파위가 10 dB 이상으로 높아지면 급격히 감소하여 가장 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 충분히 높은 송신 파워가 이용 가능할 시, APAC 알고리즘이 수신단의 필요 SNR 정보를 이용하여 효율적으로 파워를 분배해 주기 때문이다.

6. 결 론

본 연구에서는 Full Duplex 방식을 사용하는 NOMA 시스템을 분석하였고 NOMA 시스템의 가장 핵심이라

할 수 있는 파워할당계수 (Power allocation coefficients)의 산출 방법에 대한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 채널 환경과 path loss를 고려하여 Node와 Relay 간에 필요한 최소 수신 파워를 계산하고 이를 통해 최적 파워할당계수를 산출한다. 제안된 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 기존 논문에서 제시된 방식과 비교를 하였고 상대적으로 우수한 성능을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 최소 필요 신호 대 잡음비 기반의 알고리즘을 적용한다면 향후 5G 네트워크 운영 시 최소한의 송신 에너지를 사용하는 신뢰성 있는 시스템을 구축하는데 도움이 될 것으로 예상된다.

참고문헌(Reference)

- [1] M. F. Kader, S. Y. Shin, and V. C. Leung, "Full-duplex Non-orthogonal Multiple Access in Cooperative Relay Sharing for 5G Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5831-5840, Jul. 2018.
<https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799939>
- [2] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient internet of things communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 11, pp. 7574-7589, Nov. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2751045>
- [3] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan and V. K. Bhargava, "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
<https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725519>
- [4] <http://www.itfind.or.kr/WZIN/ugidong/1844/file/5768908337074226766-1844.pdfU> (2018. 9. 20.)
- [5] <https://news.samsung.com/kr/?p=366136> (2018. 9. 18.)
- [6] G. D. Durgin, *Space-time wireless channels*, Prentice Hall Professional, 2003.
- [7] <https://www.tta.or.kr/ebook/ecatalog.jsp?catimage=1&Dir=32&start=42> (2018. 9. 21.)
- [8] http://koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=GCSHCI_2015_v40n12_2549 (2018. 10. 4.)
- [9] L. Lv, J. Chen, Q. Ni, Z. Ding, and H. Jiang, "Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 4, pp. 188-195, Apr. 2018.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700687>
- [10] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>

● 저 자 소 개 ●



김 규 하(Kyuha Kim)

2008년 공군사관학교 군사전략학과(문학사)
2019년 연세대학교 대학원 전기전자공학과(공학석사)
관심분야 : 드론 무선통신, 다중홉 네트워크, etc.
E-mail : halbaek7@gmail.com



유 원 석(Wonsuk Yoo)

2016년 연세대학교 전기전자공학과(공학사)
2017년~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석박통합과정 진행중
관심분야 : 비디오 스트리밍, 모바일 엣지/포그 컴퓨팅, V2X 통신, etc.
E-mail : wsbm34@yonsei.ac.kr



정 종 문(Jong-Moon Chung)

1992년 연세대학교 전자공학과(공학사)
1994년 연세대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
1999년 Pennsylvania State University 대학원 Electrical Engineering(이학박사)
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
관심분야 : 블록체인, IoT, WSN, 클라우드컴퓨팅, 빅데이터, etc.
E-mail : jmc@yonsei.ac.kr