

다중 UAV-RIS 네트워크를 위한 자원 할당 알고리즘

¹박희재, ^{2*}박래혁

Resource Allocation Algorithm for Multiple RIS-Assisted UAV Networks

¹Heejae Park, ^{2*}Laihyuk Park

요약

최근 Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)은 높은 유연성 및 낮은 하드웨어 비용으로 5G, 6G 무선 통신에서 큰 관심을 받고 있다. 여전히 Blockage와 에너지 문제가 존재하지만 이러한 문제들은 Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)를 활용하여 해결할 수 있다. 또한 RIS를 UAV 통신에 이용함으로써 신호를 받지 못하는 사용자에게 신호를 전송하여 Spectral Efficiency를 향상시키며, 에너지 소비를 줄일 수 있다. 현재 대부분의 연구들은 송신 전력 및 RIS 위상을 교대로 최적화하여 Power Consumption 최소화 및 데이터 전송 Delay 최소화 등의 목적을 달성하였다. 본 논문에서는 대역폭 최적화를 포함하여 합산 정보 전달율을 최대화하는 알고리즘을 제안한다. 이에 대한 성능평가를 진행하였고, 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 우수성을 보였다.

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have gained significant attention in 5G and 6G wireless networks due to their high flexibility and low hardware costs. However, UAV communication is still challenged by blockage and energy consumption issues. Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) have emerged as a promising solution to these challenges, enabling improved spectral efficiency and reduced energy consumption by transmitting signals to users who cannot receive signals because of the obstacles. Many previous studies have focused on minimizing power consumption and data transmission delay through phase shift and power optimization. This paper proposes an algorithm that maximizes the sum rate by including bandwidth optimization. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: RIS, UAV, Alternating Optimization, Resource Allocation, Spectral Efficiency

¹ 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 석사과정 (prkhj98@seoultech.ac.kr)

^{2*} 교신저자 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조교수 (lhpark@seoultech.ac.kr)

I. 서론

최근 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)은 5G, 6G 무선 통신에서 큰 관심을 받고 있다. UAV 는 높은 유동성 및 낮은 하드웨어 비용을 이용하여 통신 품질을 개선한다[1][2][3]. 그러나 높은 건물, 구조물 또는 고밀도 지역에서의 사용자가 UAV 와 사용자 사이의 신호를 차단할 수 있고, 이로 인해 통신 링크의 성능이 떨어지며 장거리의 통신을 구현하기 힘들어질 수 있다[4]. 또한 에너지 소비는 UAV 의 가장 큰 문제 중 하나다. 따라서 UAV 통신의 잠재력을 충분히 활용하기 위해서는 Blockage 와 에너지 문제를 해결해야 한다.

위의 문제를 해결하기 위해 Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)를 UAV 통신에 활용하여 신호를 반사하거나 굴절시킴으로써 사용자의 통신 환경을 보장하고 품질을 향상시킬 수 있는 기법들이 제안되고 있다[5][6]. RIS 는 접지된 유전체 기판에 인쇄된 금속 또는 유전체 Patch 로 만들어진 복합 재료 층의 2 차원 구조의 Metasurface 와 실시간 재구성을 위한 제어부로 구성된다. Metasurface 는 저비용, 저전력의 Reflecting Elements 로 이루어져 있으므로 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다.

RIS 를 UAV 통신에 이용함으로써 신호를 받지 못하는 사용자에게 신호를 전송하여 Spectral Efficiency 를 향상시키고, Reflecting Elements 로 에너지 소비를 줄일 수 있다. 또한 기존의 RIS 는 벽에 부착하여 위치를 변경하는 것이 어려운 반면, UAV 를 활용하면 RIS 의 위치를 유동적으로 변경하는 것이 가능하다는 장점이 있다[7][8].

현재 UAV-RIS 통신에 관하여 여러 연구가 진행되고 있다[9][10][11]. 대부분의 연구들은 Power, Passive Beamforming, Active Beamforming 의 교대 최적화를 이용하여 Power Consumption 최소화 및 데이터 전송 Delay 최소화 등의 목적을 달성하였다. 본 논문에서는 대역폭 최적화를 포함하여 합산 정보 전달율을 최대화하는 알고리즘을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 시스템 모델과 교대 최적화 기반 알고리즘을 제안하고, III장에서는 제안하는 알고리즘의 성능평가를 기술한다. 마지막으로 IV장에서는 결론을 제시한다.

II. 시스템 모델 및 합산 정보 전달율 최적화 알고리즘

2.1 가정 및 기본 모델링

본 장에서는 논문에서 제안한 UAV-RIS 시스템 모델 및 합산 정보 전달율 최적화 알고리즘을 설명한다. 제안하는 시스템 모델은 그림 1 과 같이 M 개의 안테나를 가지는 하나의 기지국과 I 개의 UAV, 그리고 각 UAV 의 User Cluster 에는 1 개의 안테나를 가지는 사용자들로 구성되어 있다. 각각의 UAV 에는 RIS 가 부착되어 있고, 이를 이용하여 신호를 받지 못하는 사용자에게 신호를 전달한다. 또한 RIS 는 N 개의 Reflecting Element 를 가지고 있다. 이때 기지국과 사용자 사이에 Line-of-Sight (LoS) 경로는 없다고 가정한다. 다수의 UAV 가 존재하므로 기지국과 UAV 사이의 링크, 즉 백홀 링크 또한 여러 개 존재한다. 이때, 모든 백홀 링크가 동일한 대역폭을 가진다고 가정한다. 또한 UAV 와 사용자는 무선 액세스 링크로 연결되어 있다고 가정한다[12].

i 번째 UAV 의 User Cluster 에 K 명의 사용자가 있다고 가정한다면, i 번째 UAV 의 k 번째 사용자가 수신하는 데이터는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$y_k^i = \mathbf{h}_{2,k}^i \Phi^i \mathbf{H}_1^i x^i + w_k^i \quad (1)$$

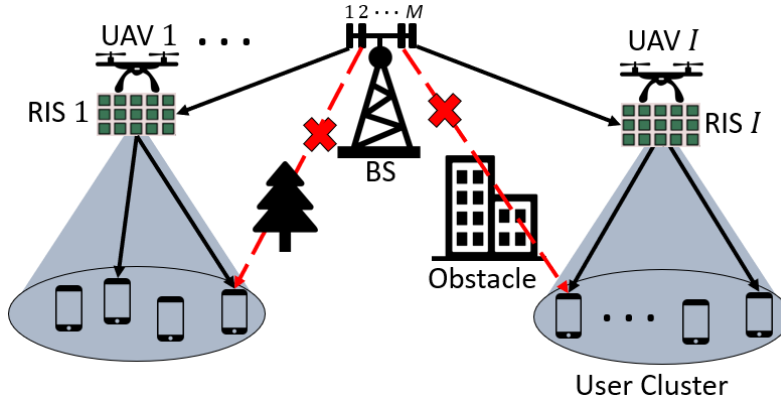


Figure 1. UAV-assisted RIS communication system
그림 1. UAV-assisted RIS 통신 모델

여기서 $\mathbf{h}_{2,k}^i \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 은 i 번째 UAV에 부착된 RIS와 사용자 사이의 채널, $\mathbf{H}_1^i \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 은 기지국과 i 번째 UAV에 부착된 RIS 사이의 채널이다. $\Phi^i = \text{diag}[e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}] \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 Reflecting Elements의 위상 변화율이고 w_k^i 는 백색 가우스 잡음이다. 또한 $\mathbf{x}^i = \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_k^i \sqrt{p_k^i} s_k^i$ 는 기지국이 송신한 신호이며, p_k^i 는 i 번째 UAV의 User Cluster 안에 존재하는 k 번째 사용자의 송신 전력, $\mathbf{g}_k^i \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 은 수신 신호 s_k^i 를 위한 Precoding 벡터이다.

본 논문에서 제안하는 시스템 모델은 간섭을 줄이기 위해 채널을 완벽하게 알고 있는 Zero Forcing 기법을 이용했고, 이에 따라 i 번째 UAV의 k 번째 사용자의 Achievable Data Rate은 다음과 같이 표현된다[13].

$$R_k^i = BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \quad (2)$$

여기서 BW_k^i 는 사용자 k 에게 할당된 대역폭이며, σ^2 은 잡음 전력 밀도이다. 또한 문제 (2)를 이용하여 i 번째 UAV의 합산 정보 전달율을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{maximize } \sum_{k=1}^K BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \quad (3)$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^K BW_k^i \leq BW_{Total}^i \quad (3a)$$

$$BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \geq QoS_{min} \quad (3b)$$

$$\text{tr}(\mathbf{G}^i \mathbf{P}^i (\mathbf{G}^i)^H) \leq P_{max} \quad (3c)$$

여기서 BW_{Total}^i 는 i 번째 UAV에 할당된 대역폭이며, $\mathbf{P}^i = \text{diag}[p_1^i, p_2^i, \dots, p_K^i] \in \mathbb{C}^{K \times K}$, 그리고 QoS_{min} 은 각 사용자의 최소 QoS 제약이다. $\mathbf{G}^i = (\mathbf{H}_2^i \Phi^i \mathbf{H}_1^i)^+ = [\mathbf{g}_1^i, \mathbf{g}_2^i, \dots, \mathbf{g}_K^i] \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 는 Zero Forcing Precoding 행렬이며, 이때 $(\bullet)^H$ 는 Conjugate Transpose, $(\bullet)^+$ 는 Pseudo Inverse를 뜻한다. 또한 $\mathbf{H}_2^i = [(\mathbf{h}_{2,1}^i)^T, (\mathbf{h}_{2,2}^i)^T, \dots, (\mathbf{h}_{2,K}^i)^T]^T \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 이며 P_{max} 는 기지국의 최대 송신 전력이다. 문제 (3)을 최적화하기 위해 대역폭 BW_k^i , RIS의 위상 Φ^i 및 송신 전력 \mathbf{P}^i 순으로 최적의 값을 구하는 교대 최적화를 제안한다.

2.2 대역폭 최적화

RIS의 위상과 송신 전력이 주어진다면 문제 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{maximize } \sum_{k=1}^K BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \quad (4)$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^K BW_k^i \leq BW_{Total}^i \quad (4a)$$

$$BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \geq QoS_{min} \quad (4b)$$

(4a)를 통해 사용자들에게 할당된 대역폭의 합이 i 번째 UAV의 전체 대역폭 BW_{Total}^i 를 초과하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 (4b)는 각각 사용자가 최소 QoS를 만족하게 한다. 문제 (4)는 Sequential Least Squares Programming을 이용하여 최적화하고, 부등식 제약식을 해결하기 위해 Lagrangian Multipliers를 활용한다[14].

2.3 RIS의 위상 최적화

대역폭과 송신 전력이 주어진 상태에서는 문제 (3)이 아래와 같이 간단하게 변환된다.

$$\text{maximize } C \quad (5)$$

$$\text{subject to } tr(\mathbf{G}^i \mathbf{P}^i (\mathbf{G}^i)^H) \leq P_{max} \quad (5a)$$

여기서 C 는 문제 (3)에서 대역폭과 송신 전력이 주어졌을 때의 상수 값이다. 하지만 (5a)는 미분 불가능하고 non-Convex Form이다. 이를 위해 문제 (5)를 문제 (6)과 같이 변경한다[13].

$$\text{minimize } tr(\mathbf{G}^i \mathbf{P}^i (\mathbf{G}^i)^H) \quad (6)$$

문제 (6)은 Quasi-Newton 방법을 이용하여 최적화할 수 있다. 하지만 문제 (6)은 non-Convex Problem이므로 Local Optimum에 도달 가능하기 때문에 여러 번의 최적화를 거쳐 Global Optimum의 근삿값을 얻는다[15].

2.4 송신 전력 최적화

RIS의 위상과 대역폭의 값이 고정된다면 문제 (3)은 다음과 같이 모델링 된다.

$$\text{maximize } \sum_{k=1}^K BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \quad (7)$$

$$\text{subject to } tr(\mathbf{G}^i \mathbf{P}^i (\mathbf{G}^i)^H) \leq P_{max} \quad (7a)$$

$$BW_k^i \log_2 \left(1 + \frac{p_k^i}{BW_k^i \cdot \sigma^2} \right) \geq QoS_{min} \quad (7b)$$

7(b)는 (4b)와 마찬가지로 사용자의 최소 QoS를 만족하게 한다. 또한 문제 (7)은 Convex Problem이므로 Polynomial 시간 내에 최적의 송신 전력을 찾을 수 있다[13].

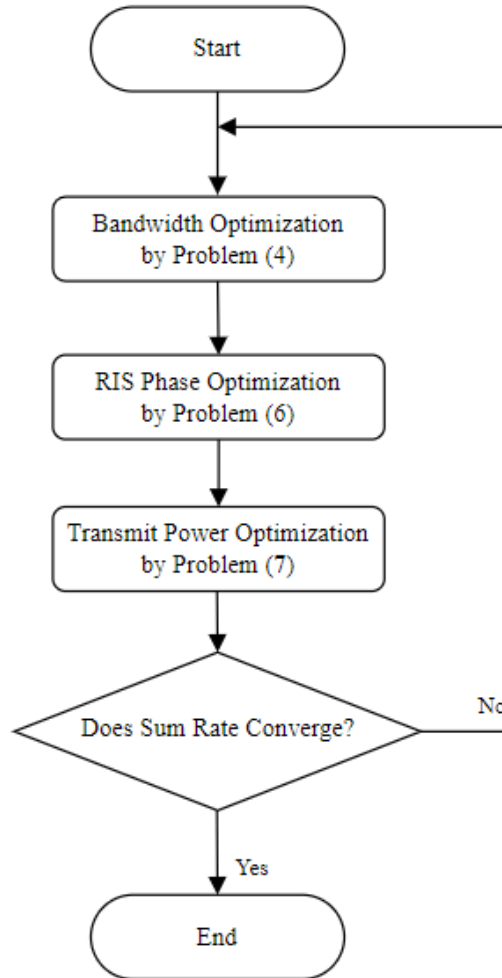


Figure 2. Operation of proposed algorithm

그림 2. 제안하는 알고리즘의 동작

그림 2 는 제안하는 알고리즘의 동작 과정을 보여준다. 먼저 문제 (4)를 최적화하여 대역폭을 할당하고, 문제 (6)을 최소화하여 RIS 의 위상을 최적화한다. 다음으로, 문제 (7)을 이용하여 최적의 송신 전력을 얻어낸다. 위의 세 과정은 합산 정보 전달율이 일정 범위 내로 수렴할 때까지 반복된다. 최소 QoS 를 만족시키지 못하는 경우 QoS 제약을 완화시킨다. 또한 UAV 의 개수가 I 이기 때문에 제안한 알고리즘을 수렴할 때까지 반복한다.

III. 성능평가

본 장에서는 Python 의 SciPy 라이브러리를 활용하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가한다. 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다. 또한 채널 모델은 Rayleigh fading 모델을 가정했다. 제안된 알고리즘의 우수성을 평가하기 위해 C. Huang 의 연구[16] 모델과 송신 전력과 대역폭을 모든 사용자에게 동일하게 할당한 경우 ($p_j^i = p_k^i, BW_j^i = BW_k^i \forall j, k$)와 비교하였다. C. Huang 의 연구는 Deep Reinforcement Learning 을 이용하여 합산 정보 전달율을 최대화하였다.

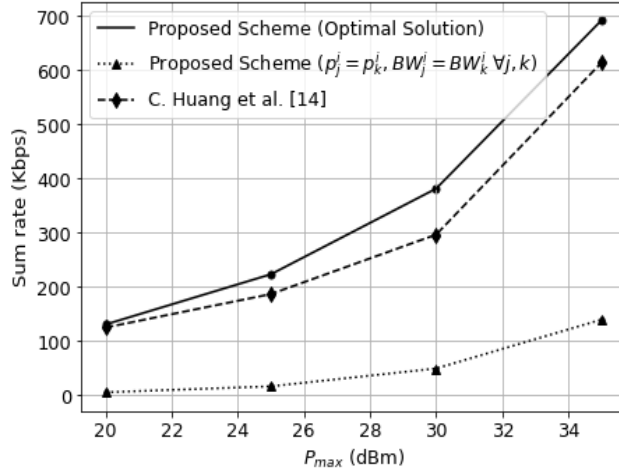


Figure 3. Sum rate according to P_{max} ($M = 16, K = 16, N = 16$)
 그림 3. P_{max} 에 따른 합산 정보 전달율 ($M = 16, K = 16, N = 16$)

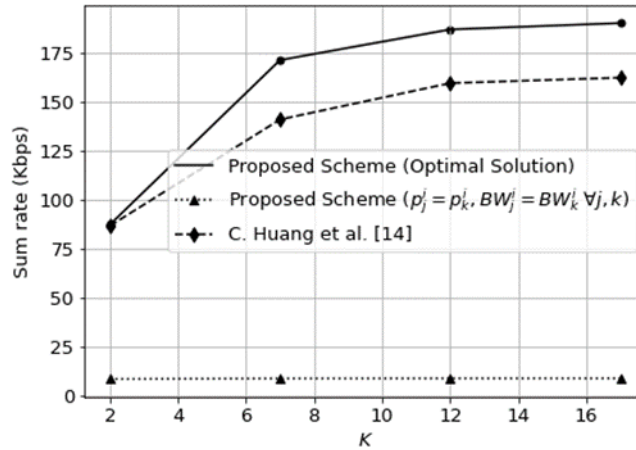


Figure 4. Sum rate according to number of users ($M = 32, K = N, P_{max} = 20\text{dBm}$)
 그림 4. 사용자 수에 따른 합산 정보 전달율 ($M = 32, K = N, P_{max} = 20\text{dBm}$)

그림 3은 P_{max} 에 따른 합산 정보 전달율을 보여준다. P_{max} 가 증가함에 따라 사용자에게 할당 가능한 전력이 늘어나기 때문에 합산 정보 전달율은 증가하게 된다. 이때, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능이 가장 높은 것을 볼 수 있다. 이는 제안된 알고리즘이 송신 전력과 RIS의 위상 뿐만 아니라 대역폭을 고려하여 최적화했기 때문에, 채널 환경에 따라 효율적으로 대역폭을 할당할 수 있기 때문이다.

그림 4는 사용자 수에 따른 합산 정보 전달율을 보여준다. 사용자 수가 증가함에 따라 전체 대역폭 BW_{Total}^i 와 P_{max} 가 제한되어 있기 때문에 합산 정보 전달율은 수렴하게 된다. 제안된 알고리즘은 대역폭을 고려하기 때문에 합산 정보 전달율을 비교 모델보다 향상시키는 것을 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 송신 전력, RIS 위상, 그리고 대역폭을 교대로 최적화하여 UAV-RIS 환경의 합산 정보 전달율을 최대화하는 알고리즘을 제안하였다. 성능평가를 통해 기지국의 최대 송신 전력과 사용자 수에 따른 합산 정보 전달율을 볼 수 있었다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘의 우수성을 보였다.

V. 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

VI. 참고문헌

- [1] Y. Zeng, and R. Zhang, "Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, Vol. 16, No. 6, pp. 3747-3760, Mar. 2017.
- [2] C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang, "A comprehensive survey on UAV communication channel modeling," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 107769-107792, Aug. 2019.
- [3] T. Alladi, G. Bansal, V. Chamola, and M. Guizani, "SecAuthUAV: A novel authentication scheme for UAV-ground station and UAV-UAV communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 69, No. 12, pp. 15068-15077, Oct. 2020.
- [4] T. Shafique, H. Tabassum, and E. Hossain, "Optimization of wireless relaying with flexible UAV-borne reflecting surfaces," *IEEE Trans Commun.*, Vol. 69, No. 1, pp. 309-325, Oct. 2020.
- [5] Y. Li, C. Yin, T. Do-Duy, A. Masaracchia, and T. Q. Duong, "Aerial reconfigurable intelligent surface-enabled URLLC UAV systems," *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 140248-140257, Oct. 2021.
- [6] S. Li, B. Duo, M. D. Renzo, M. Tao, and X. Yuan, "Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, Vol. 20, No. 10, pp. 6402-6417, Apr. 2021.
- [7] H. Park, T. H. Nguyen, and L. Park. "Federated Deep Learning for RIS-assisted UAV-enabled Wireless Communications," in *2022 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju Island, Korea, 2022, pp. 831-833.
- [8] H. Park, T. H. Nguyen, and L. Park. "Reconfigurable Intelligent Surface-assisted System Models for Uplink Communications," in *13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju Island, Korea, 2022, pp. 828-830.
- [9] X. Liu, Y. Liu, and Y. Chen, "Machine learning empowered trajectory and passive beamforming design in UAV-RIS wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 39, No. 7, pp. 2042-2055, Dec. 2020.
- [10] A. Ranjha, and G. Kaddoum, "URLLC facilitated by mobile UAV relay and RIS: A joint design of passive beamforming, blocklength, and UAV positioning," *IEEE Internet Things J.*, Vol. 8, No. 6, pp. 4618-4627, Sep. 2020.
- [11] H. Long, M. Chen, Z. Yang, Z. Li, B. Wang, X. Yun, and M. Shikh-Bahaei, "Joint trajectory and passive beamforming design for secure UAV networks with RIS," in *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Taipei, TW, 2020, pp. 1-6.
- [12] M. D. Nguyen, T. M. Ho, L. B. Le, and A. Girard, "UAV placement and bandwidth allocation for UAV based wireless networks," in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, HI, USA, 2019, pp. 1-6,
- [13] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, Vol. 18, No. 8, pp. 4157-4170, Aug. 2019.
- [14] C. Pan, H. Ren, K. Wang, W. Xu, M. ElKashlan, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Multicell MIMO communications relying on intelligent reflecting surfaces," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, Vol. 19, No. 8, pp. 5218-5233, Aug. 2020.
- [15] C. Huang, G. C. Alexandropoulos, A. Zappone, M. Debbah, and C. Yuen, "Energy efficient multi-user MISO communication using low resolution large intelligent surfaces," in *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dubai, AE, 2018, pp. 1-6.
- [16] C. Huang, R. Mo, and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 38, No. 8, pp. 1839-1850, Aug. 2020.

저자소개



박희재(Heejae Park)

2022 년 2 월 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 졸업

2022 년 2 월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 석사과정

관심분야 : RIS, 인공지능, 전자공학



박래혁(Laihyuk Park)

2008 년 2 월 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 졸업

2010 년 2 월 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 석사

2017 년 8 월 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 박사

2019 년 9 월~현재 : 서울과학기술대학교 조교수

관심분야 : Intelligent Computing, IoT, 스마트 그리드
